

Fondamental
Sous-thème

Dominique JAULT, Daniel BRITO, Philippe CARDIN et Henri-Claude NATAF

Le moteur de la dynamo terrestre

Pour percer les secrets du champ magnétique de la Terre, les géophysiciens étudient, par des simulations numériques et par des expériences sur modèles réduits, la dynamique dans le noyau terrestre.

Dominique JAULT
est directeur de recherches au Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (LGIT) à Grenoble (CNRS, Université Joseph Fourier).

Daniel BRITO
est maître de conférences au LGIT.

Philippe CARDIN
est chargé de recherches au LGIT.

Henri-Claude NATAF
est directeur de recherches au LGIT.

Au II^e siècle, les Chinois utilisaient de la magnétite, un oxyde de fer naturellement aimanté, à des fins divinatoires. Posée sur une table rituelle, une cuillère en pierre d'aimant représentant la constellation de la Grande Ourse déterminait l'équilibre des forces yin et yang qui s'affrontent dans l'Univers. Plus prosaïquement, la boussole est devenue un moyen de trouver son chemin, car une aiguille aimantée et libre de pivoter indique approximativement le Nord.

On sait aujourd'hui que l'aiguille d'une boussole tend à s'aligner avec les lignes de force du champ magnétique de la Terre. Ce dernier ressemble beaucoup à celui que présenterait un grand barreau aimanté situé au centre du globe. On parle de champ dipolaire : les lignes de champ quittent la surface par l'hémisphère Sud, suivent les méridiens et replongent dans la planète dans l'hémisphère Nord (*voir la figure page ci-contre*). Les pôles magnétiques sont éloignés d'une dizaine de degrés des pôles géographiques.

S'il est une aide à la navigation, le champ magnétique terrestre protège aussi les organismes vivants des particules solaires et cosmiques énergétiques qui bombardent la Terre en permanence. Cependant, ce bouclier n'a pas une intensité ni une structure constantes. Les pôles magnétiques Nord et Sud se sont même inversés des centaines de fois depuis la formation de la Terre (*voir La Terre déboussolée, par J. Aubert, G. Hulot et Y. Gallet, page 24*). Par ailleurs, les observations astronomiques ont montré que les champs magnétiques des différentes planètes du Système solaire sont variés. Comprendre comment une planète, telle que la Terre, engendre un champ magnétique est donc un enjeu scientifique d'importance.

Les géophysiciens pensent que le magnétisme de la Terre est une conséquence des mouvements qui animent son noyau de métal liquide, composé à près de 80 pour cent de fer. Or, dans certaines géométries, des écoulements de fluides conducteurs, tels que le fer liquide, peuvent engendrer des courants électriques qui créent, à leur tour, des champs magnétiques, lesquels renforcent les courants qui leur ont donné naissance, et ainsi de suite. C'est l'effet dynamo, où champs magnétiques et courants électriques s'entretiennent mutuellement, à partir du mouvement du fluide.

Deux moteurs possibles

Cependant, au-delà de son principe, le fonctionnement de la dynamo terrestre reste assez mystérieux. Quels sont les phénomènes qui ont déclenché l'effet dynamo ? Les géophysiciens explorent deux moteurs possibles des mouvements internes au noyau terrestre : d'une part, les mouvements de l'axe de rotation de la Terre ; d'autre part, la différence de température entre le centre de la Terre et sa surface. Comme on ne dispose d'aucune sonde capable d'atteindre le noyau pour y effectuer des mesures, nous devons nous contenter de simulations numériques et d'expériences de laboratoire pour étudier les phénomènes physiques à l'œuvre dans les profondeurs de la Terre.

Nous examinerons d'abord comment les mouvements de l'axe de la Terre engendrent des contraintes susceptibles de déclencher un effet dynamo. Nous décrirons ensuite les expériences permettant d'imaginer les mouvements qui animent le cœur liquide de la Terre. Modélisations numériques et expériences en

PARTIE 1



LE NOYAU LIQUIDE, composé à près de 80 pour cent de fer, s'étend entre le manteau terrestre et la graine solide (la boule orange au centre). Les mouvements au sein du noyau (symbolisés par les cylindres) constituent le moteur de la dynamo terrestre, laquelle donne naissance au champ magnétique. À la surface du noyau, la structure du champ (les lignes bleues) est plus perturbée qu'à proximité de la surface. De plus, en surface (à l'inverse de ce qui se passe à la surface du noyau), l'axe de ce champ magnétique ne coïncide plus avec l'axe de la rotation terrestre.

Delphine Bally

laboratoire se combinent pour nous laisser entrevoir comment naît un champ magnétique.

La Terre tourne sur elle-même en un jour. À ce mouvement de rotation s'ajoute un mouvement de précession de son axe de rotation : cet axe tourne autour de la direction perpendiculaire au plan de l'écliptique, le plan de rotation des planètes autour du Soleil, avec une période égale à 25 800 ans (voir *Le cœur de la Terre dévoilé par les ondes*, par R. Garcia, M. Calvet et A. Souriau, page 8). Comment le noyau de fer liquide réagit-il aux contraintes mécaniques associées à ces mouvements ? Quel rôle cette réaction joue-t-elle dans la création du champ magnétique terrestre ?

Dès 1910, le mathématicien Henri Poincaré étudia le mouvement d'un noyau liquide, à l'intérieur d'une coquille solide (le manteau) légèrement aplatie aux pôles et animée d'un double mouvement de rotation et de précession. Poincaré calcula que le noyau liquide tourne en bloc autour d'un axe intermédiaire entre l'axe de rotation instan-

tanée du manteau et l'axe de précession. Hormis cette rotation différentielle entre noyau et manteau, d'autres écoulements complexes surviennent dans un fluide en rotation, qu'une étude mathématique seule ne permet pas de déterminer.

Ondes inertielles et cylindres tournants

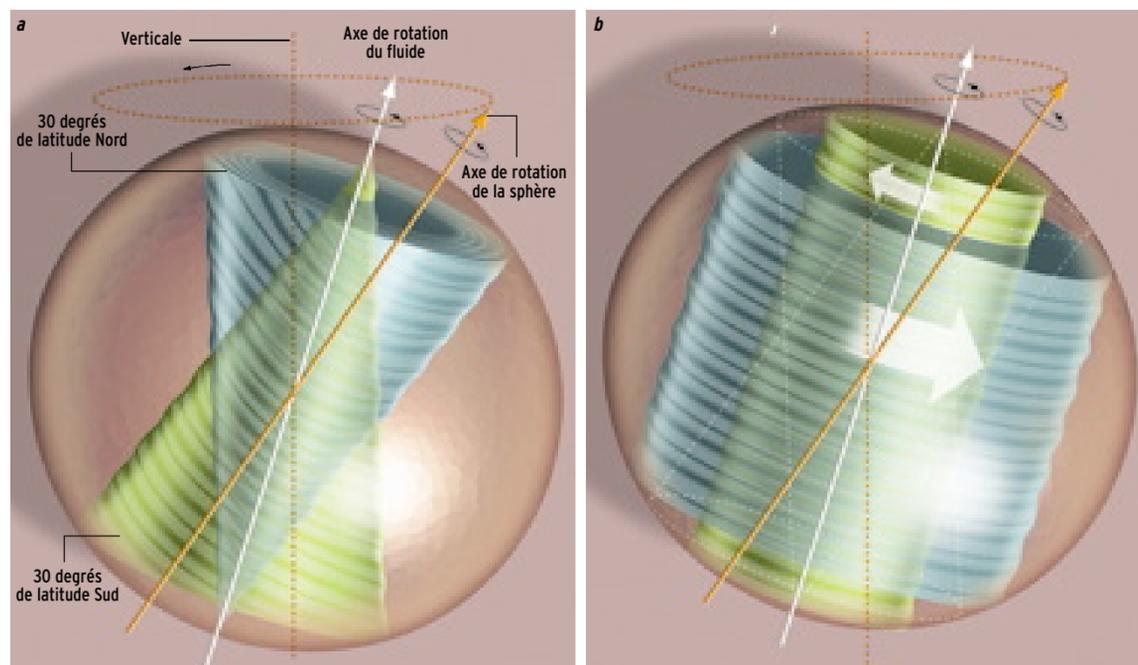
Nous avons alors réalisé, il y a quelques années, une série d'expériences afin d'étudier les mouvements possibles au sein d'un noyau fluide. Nous avons utilisé un récipient rempli d'eau, de 25 centimètres de diamètre, légèrement ellipsoïdal, et animé d'un double mouvement de rotation rapide et de précession. Pour respecter l'échelle des mouvements terrestres, l'ellipsoïde tourne sur lui-même avec une vitesse atteignant plusieurs centaines de tours par minute, tandis que le mouvement de précession a une période de quelques minutes.

Nous voulions notamment observer des ondes « inertielles », un phénomène étudié par notre équipe, après que Rainer Hollerbach et Richard

PREMIER MOTEUR : LES MOUVEMENTS DE L'AXE DE ROTATION TERRESTRE

Un récipient en forme d'ellipsoïde et rempli d'eau est mis en rotation autour d'un axe (la flèche orange) et soumis à un mouvement de précession (l'extrémité de l'axe de rotation décrit le cercle orange centré sur la verticale). Des ondes dites inertielles (a) apparaissent à 30 degrés de latitude Nord et Sud : comme des vagues sur la mer, de petites oscillations des particules autour de leur position d'équilibre se propagent en s'enroulant autour de deux cônes de même axe (en vert pour les

ondes nées au Sud, en bleu pour celles apparues au Nord), celui-ci étant décalé par rapport à l'axe de rotation de l'ellipsoïde. Les ondes inertielles conduisent à des écoulements cylindriques emboîtés, tournant en sens opposés (b). Le fort cisaillement associé à une telle circulation au sein du noyau terrestre serait l'un des éléments responsables, via la création de courants électriques, du champ magnétique de la Terre. La photographie (c) est celle du dispositif expérimental.



Kerswell des Universités de Newcastle et de Glasgow l'ont mis en évidence dans les années 1990. Les simulations sur ordinateur avaient montré que dans le cas d'un mouvement de précession de l'ellipsoïde en rotation, le frottement du noyau sur le manteau entraîne un cisaillement – une contrainte liée au déplacement de masses de fluide frottant l'une contre l'autre – qui se propage à travers le liquide du noyau. Ces ondes naissent à 30 degrés de latitude (Nord et Sud) par rapport à l'axe de rotation du fluide, à la frontière entre le manteau et le noyau (dans l'expérience, il s'agit de la frontière entre le liquide et la paroi). Elles se propagent ensuite en tire-bouchon le long d'une surface conique dont le sommet se trouve sur le pôle opposé à l'hémisphère où elles prennent naissance (*voir l'encadré ci-dessous*).

Pour la première fois, nous avons observé ces ondes inertielles en laboratoire. Pour ce faire, nous avons mesuré le profil des vitesses de déplacement du fluide, au moyen d'un vélocimètre Doppler ultra-

sonore recueillant l'écho Doppler de fines particules introduites dans le liquide. Les durées d'aller et retour de l'onde ultrasonore de l'émetteur jusqu'au récepteur fournissent la position de chaque particule, tandis que le décalage en fréquences donne sa vitesse et le sens de son déplacement.

Notre expérience a révélé d'autres mouvements : l'écoulement prend la forme de deux cylindres emboîtés, de même axe que celui de la rotation, et tournant en sens opposés. À la source des ondes inertielles, le cisaillement est élevé, et nous avons montré qu'il accélère ces écoulements cylindriques. En extrapolant les résultats numériques et expérimentaux, on évalue les vitesses des écoulements à l'échelle de la Terre.

La détermination des mouvements de matière à l'intérieur d'un ellipsoïde en rotation n'est qu'une première étape dans la compréhension du moteur de la dynamo terrestre. Les équations de la magnéto-hydrodynamique rendent compte de la façon dont l'énergie mécanique transportée par les différents mouvements du fluide se transforme en énergie électrique (des déplacements d'électrons, à distinguer des mouvements de matière). Étant donné la complexité des calculs, on ne dispose pas de critère général indiquant si une dynamique particulière créera ou non un champ magnétique stable. Pour qu'un tel champ naisse, il faut que les courants amorcent un petit champ magnétique, qui à son tour renforce le courant, puis le champ magnétique, et ainsi de suite jusqu'à l'établissement d'un régime stationnaire. En outre, il reste à montrer que le champ ainsi établi ne s'auto-détruit pas en perturbant trop les écoulements qui lui ont donné naissance.

Aucune expérience de laboratoire n'a encore recréé un effet dynamo dans un fluide contenu dans un ellipsoïde grâce aux mouvements de précession de l'axe. Quelques simulations ont réussi, mais avec des « fluides numériques » de viscosité bien supérieure à celle du noyau terrestre.

La convection thermique

Outre la précession, il existe un autre candidat sérieux au rôle de moteur de la dynamo terrestre. Beaucoup de géophysiciens pensent que l'on doit rechercher son origine dans les mouvements de convection thermique qui agitent le noyau de la planète. L'intérieur de la Terre étant plus chaud que sa surface, de la chaleur s'évacue peu à peu, de l'intérieur vers la surface. Quand la quantité de chaleur à évacuer est faible, elle s'échappe par simple conduction, sans déplacement de matière. Lorsqu'elle est importante, du métal liquide chaud, moins dense que le cœur, remonte : la chaleur s'évacue par convection thermique.

Dans un premier temps, pour étudier les

L'ESSENTIEL

Le champ magnétique terrestre est créé par un effet dynamo dû aux mouvements de convection dans le noyau liquide. Ceux-ci résultent soit des mouvements de l'axe de rotation de la Terre soit de l'évacuation de la chaleur interne.

Aucun dispositif expérimental n'a réussi à reproduire la dynamo terrestre. Des simulations y sont parvenues, mais avec des paramètres peu représentatifs du noyau.

Diverses expériences éclairent tout de même les écoulements à l'intérieur du noyau, ainsi que la création d'un champ magnétique par de tels écoulements.



mouvements de convection thermique, on peut négliger l'influence des phénomènes électromagnétiques. Pour ce faire, on utilise dans les expériences un liquide conduisant mal l'électricité, l'eau par exemple. À la suite des travaux du physicien allemand Fritz Busse, les géophysiciens ont d'abord étudié le seuil d'apparition des mouvements convectifs. Comme nous l'avons évoqué, l'état le plus naturel d'un fluide dans une sphère tournant sur elle-même est une rotation en bloc avec son enveloppe solide. Si la différence de température entre le cœur du noyau et sa surface est faible, rien de significatif ne se passe. Cependant, quand la quantité de chaleur à évacuer augmente, les simulations numériques ont montré qu'une instabilité apparaît. Cette dernière modifie la dynamique du système et les mouvements convectifs du fluide s'organisent en fines colonnes, parallèles à l'axe de rotation et réparties en anneaux autour de cet axe. L'écoulement présente une alternance de tourbillons où le fluide circule dans le sens de rotation de la sphère (des cyclones), et d'anticyclones, avec une circulation en sens opposé (*voir l'encadré ci-dessous*).

Le diamètre des tourbillons dépend de la viscosité du fluide. Plus cette dernière est faible, plus le diamètre des tourbillons diminue, et plus la

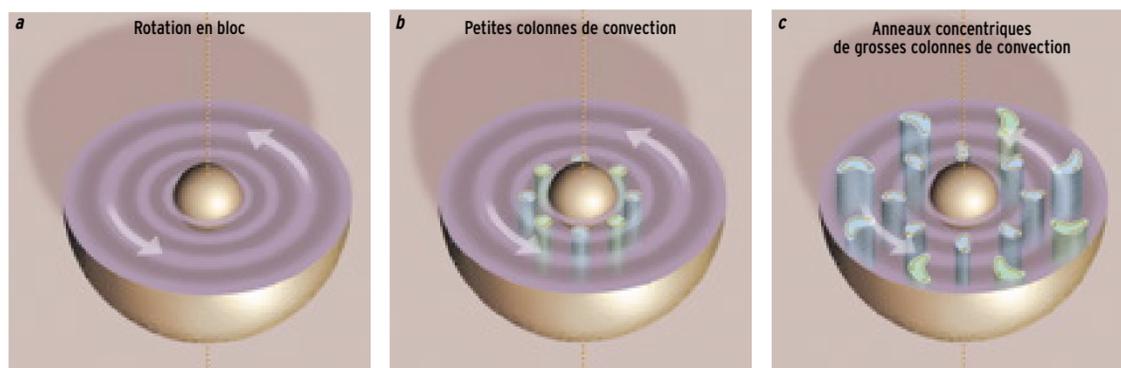
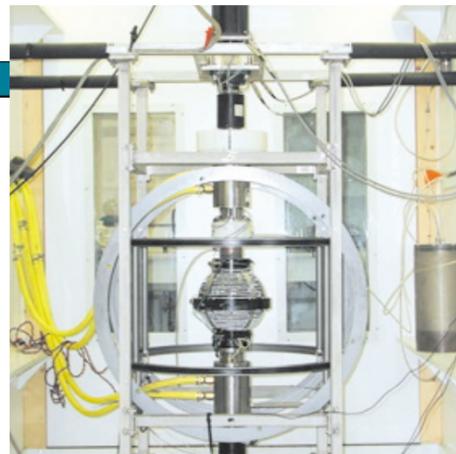
quantité de chaleur requise pour que la convection démarre augmente. De fait, la viscosité s'oppose aux mouvements, d'autant plus efficacement que le diamètre des colonnes est petit. À l'intérieur de la Terre, compte tenu de la très faible viscosité du fer liquide (de l'ordre de celle de l'eau), on s'attend à des colonnes dont le diamètre n'est que de quelques kilomètres.

Dans nos modélisations numériques de la dynamo terrestre, nous considérons un fluide de viscosité supérieure à celle du noyau terrestre. Avec une faible viscosité, le nombre de colonnes convectives dans le noyau simulé aurait été trop important, compte tenu des capacités de calcul des ordinateurs actuels. Par conséquent, les colonnes convectives que nous modélisons, si elles reproduisent qualitativement la dynamique du noyau, sont beaucoup plus larges que celles qui tourneraient à l'intérieur de la Terre, s'il n'y avait pas de champ magnétique.

L'étape suivante des simulations numériques consiste à tenir compte des propriétés électriques du liquide. On cherche à savoir si les mouvements du fluide s'accompagnent de courants électriques, et si ces derniers sont capables d'engendrer

SECOND MOTEUR : L'ÉVACUATION DE LA CHALEUR INTERNE

La convection thermique du noyau peut être reproduite en laboratoire dans une sphère (*ci-contre*). Une différence de température est imposée entre la surface et le centre, et le système est mis en rotation. Quand la différence de température entre le centre et la surface du noyau terrestre est faible, la chaleur ne s'évacue que par conduction et le fluide tourne avec la coque. Quand la différence de température augmente, d'autres mouvements apparaissent au sein du liquide, et la chaleur peut s'évacuer par convection. D'après les simulations numériques et les expériences, à faible température, on n'observe pas de colonnes de convection (*a*). Puis un anneau de colonnes de convection apparaît au-delà d'une certaine différence de température (*b*). Une colonne sur deux tourne dans le sens de la rotation du noyau, les autres dans le sens opposé. Quand la différence de température augmente encore, les colonnes grossissent et, près de la graine, un seul sens de rotation est sélectionné. Après un nouveau seuil, elles s'organisent en deux anneaux concentriques (*c*).



PARTIE 1

Crédit : Dominique Jault

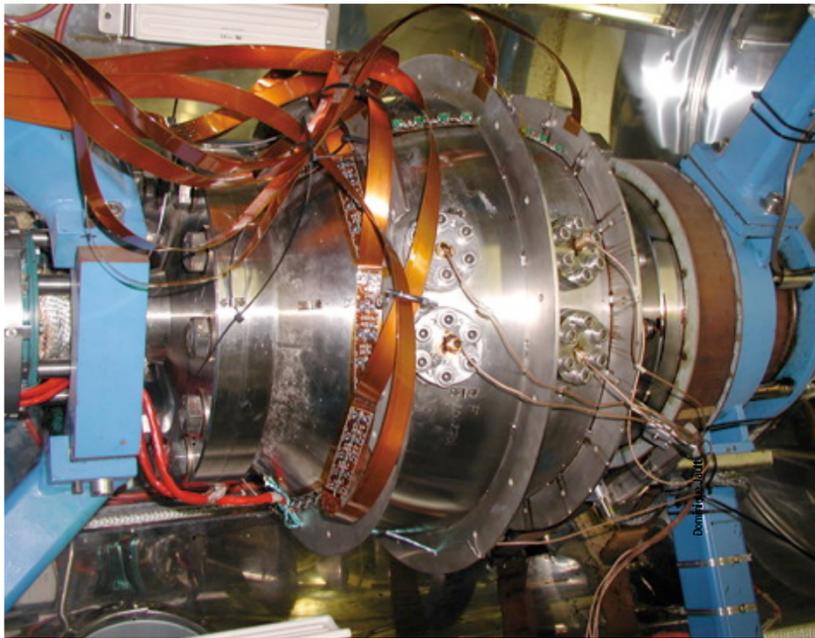
un effet dynamo. Dans le cas de champs magnétiques intenses, on s'attend aussi à ce que les forces magnétiques modifient l'écoulement du fluide.

Pour qu'un éventuel champ magnétique naisse, on doit augmenter la conductivité électrique du « fluide numérique ». Malgré les différences avec la situation réelle, les simulations numériques font apparaître un champ magnétique qui reproduit en partie la géométrie du champ terrestre : un dipôle magnétique aligné avec l'axe de rotation, comme les colonnes convectives. Reste à reproduire le même phénomène avec une viscosité et une conductivité électrique proches des valeurs réelles. À l'instar des écoulements induits par la précession, ce n'est pas encore possible numériquement, mais des expériences de laboratoire complètent ces simulations.

En 1998, nous avons entrepris une étude consistant à faire tourner rapidement (sans précession) une sphère de 22 centimètres de diamètre remplie soit d'eau, soit de gallium (un métal liquide ayant une bonne conductivité électrique). Pour imiter la force de gravité régnant dans le noyau terrestre (qui ne peut avoir d'équivalent en laboratoire), nous avons soumis le système à une forte accélération centrifuge en lui imposant une rotation rapide. Cette force centrifuge étant dirigée de l'axe de rotation vers l'extérieur, à l'inverse de la gravité qui est dirigée vers le centre de la sphère, nous avons inversé le sens du gradient thermique en imposant la température la plus élevée à la surface de la sphère et la plus basse au cœur (par un système de refroidissement à eau qui joue aussi le rôle de la graine). Ainsi, notre expérience reproduit en négatif les conditions géophysiques (bien qu'avec une force de « gravité » de symétrie cylindrique et non sphérique). Cette double inversion est sans influence sur la géométrie des écoulements et la structure d'un éventuel champ magnétique.

Convection thermique en laboratoire

Avec de l'eau, nous avons mesuré la convection thermique en mélangeant au liquide du pollen très hydrophile ; les mouvements des grains de pollen sont enregistrés, comme précédemment, par vélocimétrie Doppler. Les expériences avec du gallium liquide se sont révélées plus délicates, car il est difficile de trouver des particules qui restent bien en suspension dans ce fluide. Ces expériences permettent d'explorer une gamme de paramètres complémentaire de celle autorisée par les simulations numériques. De plus, elles ont été importantes dans la mise au point de simulations numériques à la fois rapides et fiables.



Qu'avons-nous constaté ? À mesure que la différence de température imposée augmente, les mouvements deviennent plus turbulents, les colonnes de convection s'élargissent tout en s'écartant les unes des autres. Elles finissent par s'organiser en deux anneaux concentriques autour de la graine, ce qui rappelle la structure en cylindres emboîtés constatée lors des expériences avec précession. L'anneau intérieur est constitué de colonnes convectives qui tournent dans le sens inverse de celui du noyau, mais les sens de circulation des colonnes de l'anneau extérieur sont aléatoires (*wir l'encadré page ci-contre*). Cette configuration entraîne d'importants cisaillements dans le fluide, à chaque frontière entre les deux séries de colonnes.

Ces mouvements de cylindres emboîtés apparaissent donc comme une caractéristique générale des écoulements à l'intérieur d'une boule liquide en rotation rapide, dès que les contraintes (on parle de forçage) sont importantes, qu'elles soient dues à un mouvement de précession ou à une différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la sphère. Les mouvements observés avec le gallium sont sensiblement différents de ceux de l'eau dans des conditions équivalentes : les colonnes sont plus larges, et le cisaillement d'ensemble sur le cylindre centré sur l'axe de rotation et s'appuyant sur la graine est encore plus prononcé. L'explication tient au fait que le gallium, métal liquide comme l'alliage de fer du noyau terrestre, conduit beaucoup mieux la chaleur que l'eau.

Si nous commençons à avoir une idée assez précise des mouvements qui animent le noyau fluide de la Terre – et si ceux-ci présentent des

CE DISPOSITIF vise à étudier l'effet d'un champ magnétique intense sur un écoulement. Il est constitué de deux sphères emboîtées en rotation à des vitesses différentes. L'espace entre les sphères est rempli de sodium liquide et le champ est créé par un aimant permanent placé dans la sphère centrale. On constate que près de l'aimant, la forme de l'écoulement est imposée par le champ magnétique.

cisaillements élevés, condition favorable à la création de champs magnétiques –, nous n'avons réussi à recréer une dynamo en laboratoire ni sous l'effet de la précession ni sous celui de la convection thermique. En effet, les mouvements de convection reproduits ne sont pas assez rapides pour fonctionner comme le moteur d'une dynamo. Dans les années 2000, trois équipes ont alors tenté une approche différente : elles ont recréé des dynamos en impulsant un mouvement au fluide par des mécanismes moins proches de ceux à l'œuvre dans les entrailles de la Terre, afin de montrer dans un premier temps la possibilité d'une telle dynamo fluide.

L'expérience VKS a recréé des dynamos stationnaire, périodique ou s'inversant de façon aléatoire comme le champ magnétique terrestre (en exergue)

Les deux premières expériences furent effectuées à Riga en Lettonie et à Karlsruhe en Allemagne : du sodium liquide pompé dans des tuyaux judicieusement agencés a ainsi créé un champ magnétique. Ce n'était pas une surprise, car les calculs avaient prédit les propriétés d'une telle dynamo résultant d'écoulements simples et bien connus, mais cela a tout de même permis de vérifier qu'aucun événement parasite imprévu ne détruisait le champ magnétique.

Dans le cas d'écoulements turbulents plus complexes, les calculs deviennent difficiles. L'étape suivante était donc de construire en laboratoire des dynamos plus élaborées. C'est ce qu'a réalisé récemment un groupe de chercheurs réunis au sein de la collaboration VKS (Von Karman sodium), au centre du CEA à Cadarache, près d'Aix-en-Provence. Leur dispositif utilisait deux turbines, situées de part et d'autre d'une cavité cylindrique remplie de sodium. Ces turbines tournaient en sens opposé, à des vitesses parfois différentes et allant jusqu'à 25 tours par seconde (l'écoulement qui résulte d'un tel dispositif est dit de Von Karman, d'où le nom de l'expérience). Ainsi, le fluide est entraîné dans une rotation d'ensemble, comme le fer liquide du noyau terrestre.

Bien que les écoulements soient très désordonnés, on a observé un champ magnétique à l'intérieur du fluide. Ce champ n'était pas parallèle à l'axe du cylindre, comme un champ dipolaire l'aurait été, mais perpendiculaire à cet axe et tangentiel au cylindre. En modifiant les vitesses de rotation des deux turbines de façon indépendante, on a observé différents types de dynamo : stationnaire, périodique ou s'inversant de façon aléatoire comme le champ magnétique terrestre. Ces dynamos n'étaient obtenues que lorsque l'une

au moins des turbines en rotation était en fer doux, métal ferromagnétique (c'est-à-dire qui s'aimante sous l'effet d'un champ magnétique extérieur). Le problème est que l'intérieur de la Terre est trop chaud pour être ferromagnétique. Ces résultats sont-ils alors déconnectés de toute signification géophysique ? Pas nécessairement : la contrainte d'une turbine ferromagnétique disparaîtrait peut-être avec des vitesses de rotation supérieures et des récipients plus vastes. Une expérience à plus grande échelle, en préparation dans l'état du Maryland aux États-Unis, devrait répondre à cette question.

S'il est déjà difficile d'obtenir un effet dynamo dans une cavité fluide en laboratoire, il est quasi impossible de réaliser une expérience dynamo dans laquelle le champ magnétique obtenu est suffisamment intense pour influencer sur l'écoulement qui lui a donné naissance, comme dans le noyau de la Terre. Or c'est un point crucial : un champ magnétique intense pourrait transformer complètement les écoulements que nous avons observés. On sait déjà qu'en présence d'un tel champ apparaissent de petites perturbations, dites ondes d'Alfvén, qui se propagent selon la direction du champ. Plus généralement, il y a alors compétition entre forces magnétique et de rotation.

L'effet d'un champ intense sur les écoulements

Pour étudier cette physique, nous avons élaboré à Grenoble une expérience dans laquelle un champ magnétique intense est obtenu à l'aide d'aimants permanents – et non par effet dynamo, puisque nous en sommes encore incapables. Nous avons rempli de sodium liquide le volume compris entre deux sphères et imposé une rotation différentielle entre les frontières interne et externe (*voir la figure page précédente*). Nous observons alors deux régions distinctes : près des aimants permanents (situés dans la sphère interne), les forces magnétiques dictent la physique des écoulements, qui sont parallèles aux lignes de champ ; dans la région externe, nous retrouvons les mouvements en cylindres emboîtés que nous avons constatés dans nos expériences antérieures. Ces derniers mouvements sont en effet caractéristiques des fluides en rotation rapide. Nous observons aussi des ondes intermittentes, sans doute dues à l'action combinée du champ magnétique et de la rotation d'ensemble, cette explication restant à confirmer.

Un modèle réduit de la planète, où un champ magnétique émergerait naturellement comme dans le noyau de la Terre, apparaît encore lointain. En revanche, des expériences variées éclairent des facettes complémentaires de la physique du noyau terrestre. L'enjeu est maintenant d'établir une image cohérente de la géodynamo à partir de ces différentes pièces. **n**

livres

• *La physique de la Terre, sous la direction de Henri-Claude Nataf et Joël Sommeria*, Belin-CNRS Éditions, 2000.

articles

• D. Schmitt et al., *Rotating spherical Couette flow in a dipolar magnetic field: experimental evidence of magneto-inertial waves*, in *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 604, pp. 175-197, 2008.

• N. Gillet et al., *Experimental and numerical studies of convection in a rapidly rotating spherical shell*, in *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 580, pp. 83-121, 2007.

• M. Berhanu et al., *Magnetic reversals in an experimental turbulent dynamo*, in *EPL*, Vol. 77, p. 59001-59005, 2007.

• J. NOIR et al., *Experimental evidence of non-linear resonance effects between retrograde precession and the tilt-over mode within a spheroid*, in *Geophysical Journal International*, vol. 154, pp. 407-416, 2003.