

Le moteur



1. Sous la croûte terrestre, le manteau s'étend jusqu'à 2 900 kilomètres de profondeur. Le noyau, fluide, est composé à près de 80 pour cent de fer liquide. Au-delà de 5 200 kilomètres de profondeur, on trouve une « graine » solide. Les mouvements au sein du noyau liquide (symbolisés ici 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 (schématisé par les lignes bleues) est plus perturbée qu'à proximité de la surface. De plus, en surface (contrairement à 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.

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.

D. Jault • D. Brito • P. Cardin • H.-C. Nataf

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 qu'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 1). 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 les organismes vivants des particules solaires et cosmiques énergétiques qui bombardent la Terre en permanence. 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. 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, tel que le fer liquide, peuvent engendrer des courants électriques qui créent, à leur tour, des champs

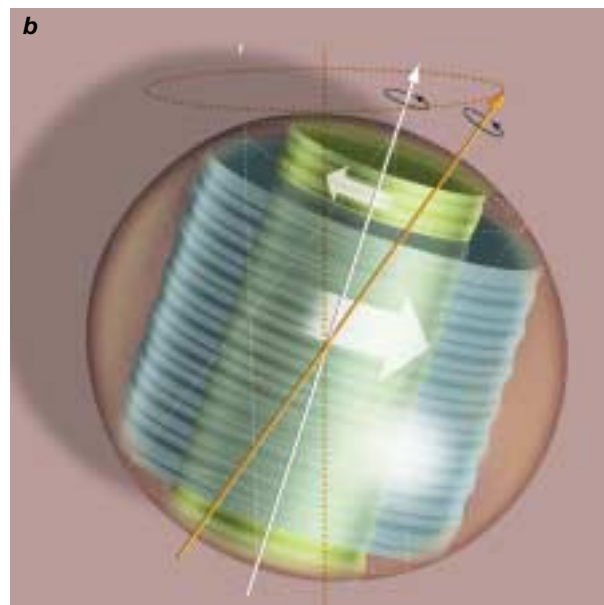
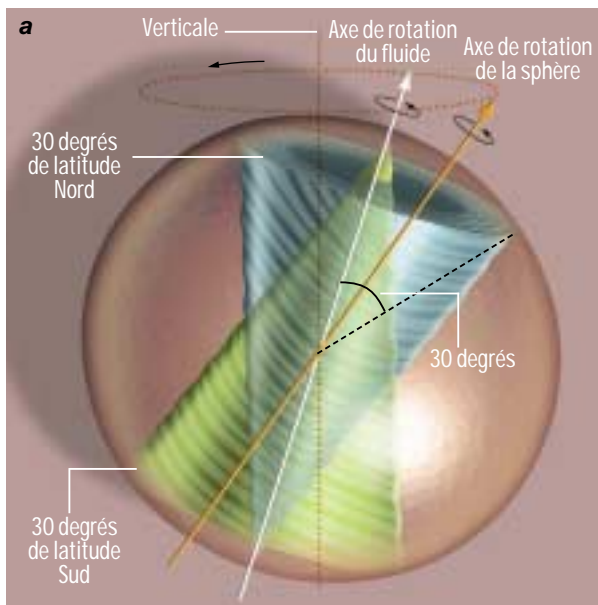
magnétiques, lesquels renforcent les courants qui leur ont donné naissance, et ainsi de suite. C'est l'effet dynamo, où champs magnétiques et courants électriques s'entretiennent mutuellement, à partir du mouvement du fluide.

Pendant, au-delà de son principe, le fonctionnement de la dynamo terrestre reste assez mystérieux. Pourquoi le champ magnétique change-t-il parfois d'orientation et de sens? 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 (voir *La Terre, une toupie au cœur liquide*, par Marianne Greff-Lefitz, page 58); 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, ainsi que d'expériences de laboratoire portant sur des modèles de la Terre à échelle réduite.

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 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. Comment le noyau de fer liquide réagit-il aux contraintes mécaniques associées à ces mouvements? Quel rôle cette réaction joue-t-elle dans la génération du champ magnétique terrestre?

Dès 1910, le mathématicien Henri Poincaré étudia le mouvement d'un noyau liquide, à l'intérieur d'une coquille



2. Un récipient en forme d'ellipsoïde et rempli d'eau est mis en rotation autour d'un axe (en 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 latitude Nord et Sud

(par rapport à l'axe de rotation du fluide). Elles se propagent en s'enroulant autour d'un cône dont l'axe est décalé par rapport à l'axe de rotation de l'ellipsoïde. Les ondes inertielles créent des écoulements cylindriques emboîtés, tournant en sens opposés (b). Le fort cisaillement associé à une telle circu-

solide (le manteau) légèrement aplati aux pôles et animée d'un double mouvement de rotation et de précession. Dans l'approximation d'un fluide parfait, c'est-à-dire de viscosité nulle, Poincaré calcula que le noyau liquide tourne en bloc autour d'un axe intermédiaire entre l'axe de rotation instantanée du manteau et l'axe de précession. En 1968, le physicien allemand Friedrich Busse montra que ce mouvement en bloc persiste si l'on tient compte de la viscosité du noyau. Concrètement, on détermine la dynamique du noyau en étudiant l'action de plusieurs couples de forces : un couple dû au mouvement de précession, qui tend à ramener l'axe de rotation du noyau sur la perpendiculaire au plan de l'écliptique ; un couple de pression exercé par l'enveloppe solide sur le noyau sous-jacent, dû au caractère elliptique de la frontière qui sépare le manteau et le noyau (cette ellipticité, mesurée par le rapport entre la différence de longueur des deux axes de l'ellipse et la longueur du grand axe, est égale à $1/400$) ; et un couple visqueux, exercé également par le manteau sur le noyau, du fait qu'ils ne tournent pas exactement à la même vitesse angulaire. Ces deux derniers couples tendent à ramener l'axe de rotation du noyau sur celui du manteau.

Pour certaines valeurs des contraintes extérieures, la réaction du système peut être brutale. Par exemple, quand le rapport entre la vitesse de précession et la vitesse de rotation est comparable à l'ellipticité, l'axe de rotation du noyau liquide peut être dévié jusqu'à 90 degrés de l'axe de rotation du manteau (le mécanisme ci-dessus ne permet pas d'inverser le sens de rotation du noyau). Aujourd'hui, ce n'est pas le cas, mais deux géophysiciens français, Marianne Greff-Lefftz, à l'Institut de physique du globe de Paris, et Hilaire Legros, à l'Institut de physique du globe de Strasbourg, ont montré, en 1999, que ce phénomène s'est peut-être produit il y a plusieurs centaines de millions d'années, lors que la Terre tournait plus vite.

Hormis une telle « excursion » de l'axe de rotation, d'autres écoulements complexes surviennent dans un fluide en rotation, qu'une étude mathématique seule ne permet pas de déterminer. Depuis 1998, nous avons réalisé une série d'expériences à échelle réduite, 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.

Ondes inertielles et cylindres tournants

Plus précisément, nous voulions observer des ondes « inertielles », un phénomène étudié par notre équipe, après que Reiner Hollerbach et Richard Kerswell des Universités de Newcastle et 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, le frottement du noyau sur le manteau provoque un cisaillement – une contrainte liée au déplacement de masses de fluide frottant l'une contre l'autre – qui se propage à travers le liquide. 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 paroi-liquide). 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 la figure 2).

Pour la première fois, nous avons observé ces ondes inertielles en laboratoire. Pour ce faire, nous avons mesuré



lution au sein du noyau terrestre serait l'un des éléments responsables, via la création de courants électriques, du champ magnétique de la Terre. Pour étudier l'effet des mouvements de l'axe de la Terre sur le noyau, de l'eau est mise en rotation (avec précession) dans un ellipsoïde en plexiglas (c).

le profil des vitesses de déplacement du fluide, au moyen d'un vélocimètre Doppler ultrasonore 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, fournit la position de chaque particule, tandis que le décalage en fréquences donne sa vitesse et le sens de son déplacement. Nous avons également observé les grandes excursions de l'axe de rotation du fluide.

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 (voir la figure 2). Les extrémités de ces cylindres sont approximativement localisées là où naissent les ondes inertielles. 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 donnée la complexité des calculs, on ne dispose pas de critère général indiquant si une dynamique particulière créera ou non un champ magnétique stable. En revanche, nous avons déterminé que si les ondes inertielles en sont incapables, les écoulements stationnaires en cylindres emboîtés et tournant en sens opposés peuvent engendrer des courants électriques.

Pour que naisse, dans ces conditions, un champ magnétique stable, 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. Il s'agit alors de montrer qu'avec cet état stable du champ, les mouvements de fluide ayant donné naissance à toute la cascade perdurent. Le cisaillement entre cylindres coaxiaux serait la cause première d'un tel mécanisme. Dans les années 1970, l'un des pionniers de ces études, Wilhem Malkus, de l'Université de Los Angeles, fit tourner, avec un mouvement de précession, plusieurs litres de sodium liquide, dans l'espoir de faire apparaître un champ magnétique. À défaut d'avoir observé l'effet dynamo, il a obtenu des résultats... que l'on n'a pas encore réussi à interpréter!

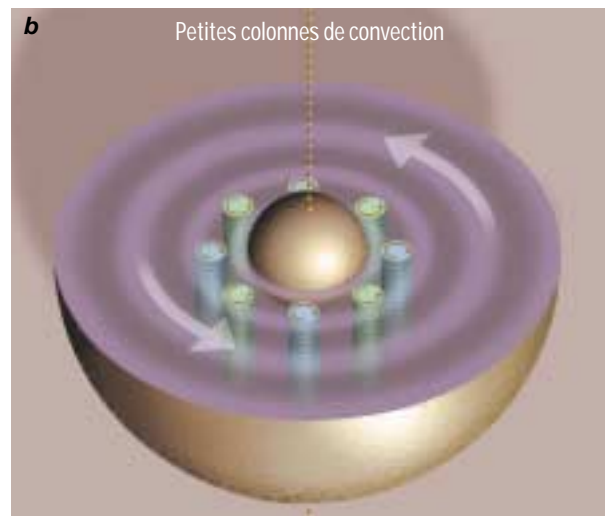
En poursuivant nos expériences, nous avons déterminé que lorsque la vitesse de précession augmente, les cylindres emboîtés se déforment. Des tourbillons apparaissent entre les cylindres, et de nouvelles instabilités prennent naissance. La dynamique du noyau entre alors dans un régime turbulent. Nous poursuivons nos recherches pour quantifier ces phénomènes ; il n'est pas impossible qu'ils jouent un rôle dans l'établissement de la dynamo 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 cœur 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. Si la différence de température entre le noyau et le manteau est faible, la chaleur s'évacue par simple conduction, sans déplacement de matière. Si la différence de température 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 mouvements de convection thermique, on peut négliger l'influence des phénomènes électromagnétiques. Pour ce faire, on peut utiliser dans les expériences un liquide conduisant mal l'électricité, l'eau par exemple. À la suite des travaux de F. 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 (cyclones) où le fluide circule dans le sens de rotation de la sphère, et d'anticyclones, avec une circulation en sens opposé (voir la figure 3).

Le diamètre des tourbillons dépend de la viscosité du fluide. Plus cette dernière est faible, plus le diamètre des tourbillons diminue, et plus le seuil de convection en température est difficile à atteindre. De fait, la viscosité s'oppose aux mouvements, d'autant plus efficacement que le diamètre des colonnes est faible. Le système tend donc vers un état où se conjuguent la quantité de chaleur à évacuer,



3. La convection thermique du noyau peut être reproduite en laboratoire dans une sphère (*ci-dessus*). 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 (*c*), les colonnes grossissent. Après un nouveau seuil, elles s'organisent en deux anneaux concentriques.

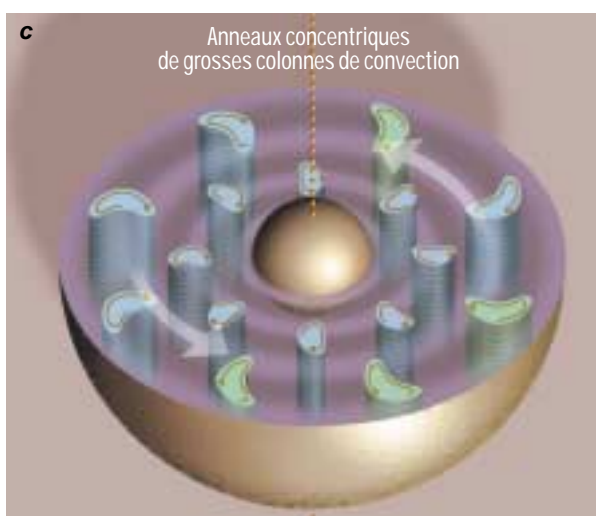
la viscosité qui s'oppose à l'apparition de colonnes d'écoulement trop petites, et le fait que les petites colonnes se forment plus facilement que les grosses. À l'intérieur de la Terre, compte tenu de la très faible viscosité du fer liquide (de l'ordre de celle de l'eau), on s'attend à des colonnes dont la base mesure quelques kilomètres de diamètre.

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 tournoieraient à l'intérieur de la Terre, s'il n'y avait pas de champ magnétique (*voir la figure 3*).

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 susceptibles d'engendrer 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, il faut 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. 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,



contrairement à la gravité qui agit en direction du 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 (par un système de fils chauffants) 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. 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.

Même avec du gallium, nos expériences n'ont pas fait apparaître spontanément de champ magnétique (les écoulements n'étaient pas assez rapides). Pour étudier l'influence d'un champ magnétique sur l'écoulement convectif, nous réalisons actuellement une expérience dans laquelle nous imposons un champ de l'extérieur. Nous cherchons à déterminer si ce champ peut déformer l'écoulement du fluide et amorcer ainsi la dynamo, et si le cisaillement entre les cylindres augmente. On pourrait alors penser que ce type de dynamique est à l'œuvre dans la dynamo terrestre.

Plusieurs équipes effectuent des simulations et des expériences analogues à celles que nous avons décrites ici. Les projets expérimentaux se multiplient et les calculs numériques progressent. Ils commencent à donner une idée assez précise des mouvements qui animent le noyau fluide de la planète Terre. Les écoulements qu'ils font apparaître, aussi bien sous l'effet de la précession que de la convection thermique, présentent des cisaillements élevés, condition favorable à la création de champs magnétiques. Ainsi, les simulations numériques de la convection thermique dans le noyau ont montré qu'un système de colonnes convectives engendre un champ magnétique similaire au dipôle terrestre. En revanche, personne n'est encore parvenu à créer un effet dynamo dans une expérience de laboratoire reproduisant la géométrie de la Terre. En 2000, deux équipes indépendantes, à Riga en Lettonie et à Karlsruhe en Allemagne, ont réussi à obtenir un effet dynamo en laboratoire. La géométrie des dispositifs expérimentaux était très différente de la géométrie sphérique. C'est néanmoins un encouragement pour les géophysiciens qui tentent de percer le mystère de la dynamo terrestre et de savoir pourquoi une boussole indique le Nord.

Dominique JAULT, Daniel BRITO, Philippe CARDIN et Henry-Claude NATAF sont respectivement directeur de recherches, maître de conférence, chargé de recherches et directeur de recherches. Ils travaillent au Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique à Grenoble.

J. NOIR, Ph. CARDIN, D. JAULT et J.-P. MASSON, *Experimental evidence of non-linear resonance effects between retrograde precession and the tilt-over mode within a spheroid*, in *Geophysical Journal International*, vol. 154, p. 407-416, 2003.

J. AUBERT, D. BRITO, H.-C. NATAF, Ph. CARDIN et J.-P. MASSON, *A systematic experimental study of rapidly rotating spherical convection in water and liquid gallium*, in *Physics of the Earth and planetary interiors*, vol. 128, pp. 51-74, 2001.

Sous la direction de Henri-Claude Nataf et Joël Sommeria, *La physique de la Terre*, Belin-CNRS éditions, 2000.