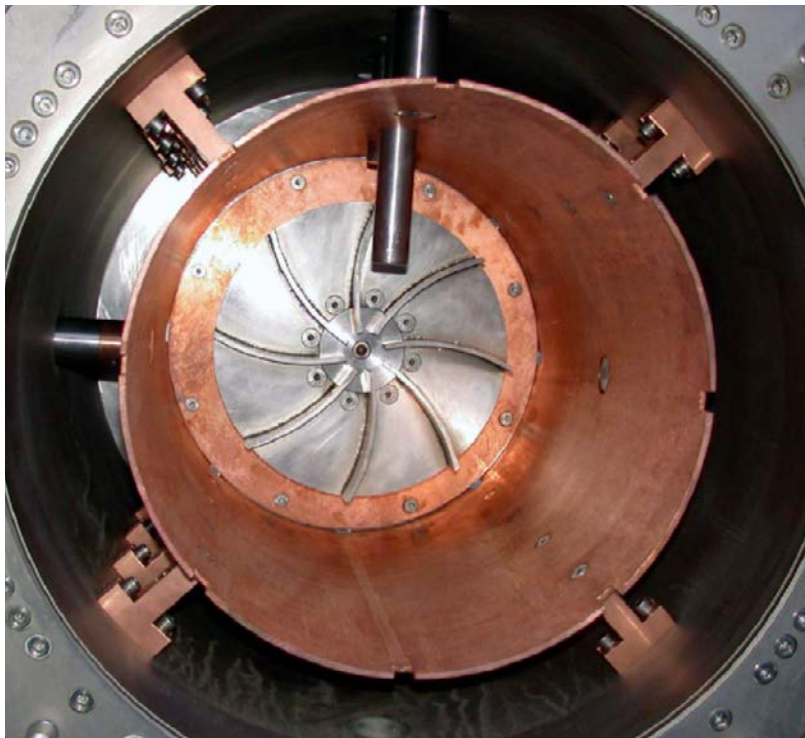




En 2006, l'expérience VKS (pour *Von Karman sodium*), à Cadarache, en France, a reproduit l'effet dynamo autoexcité. Le fluide, du sodium liquide, était brassé dans un cylindre par deux disques munis de pales (au fond, en gris) et mis en rotation à ses extrémités, les deux disques tournant en sens inverses. 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



cyindrique 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.