

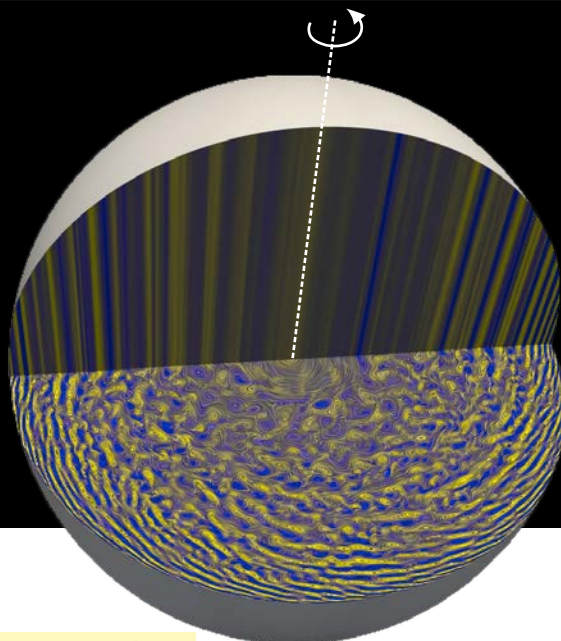
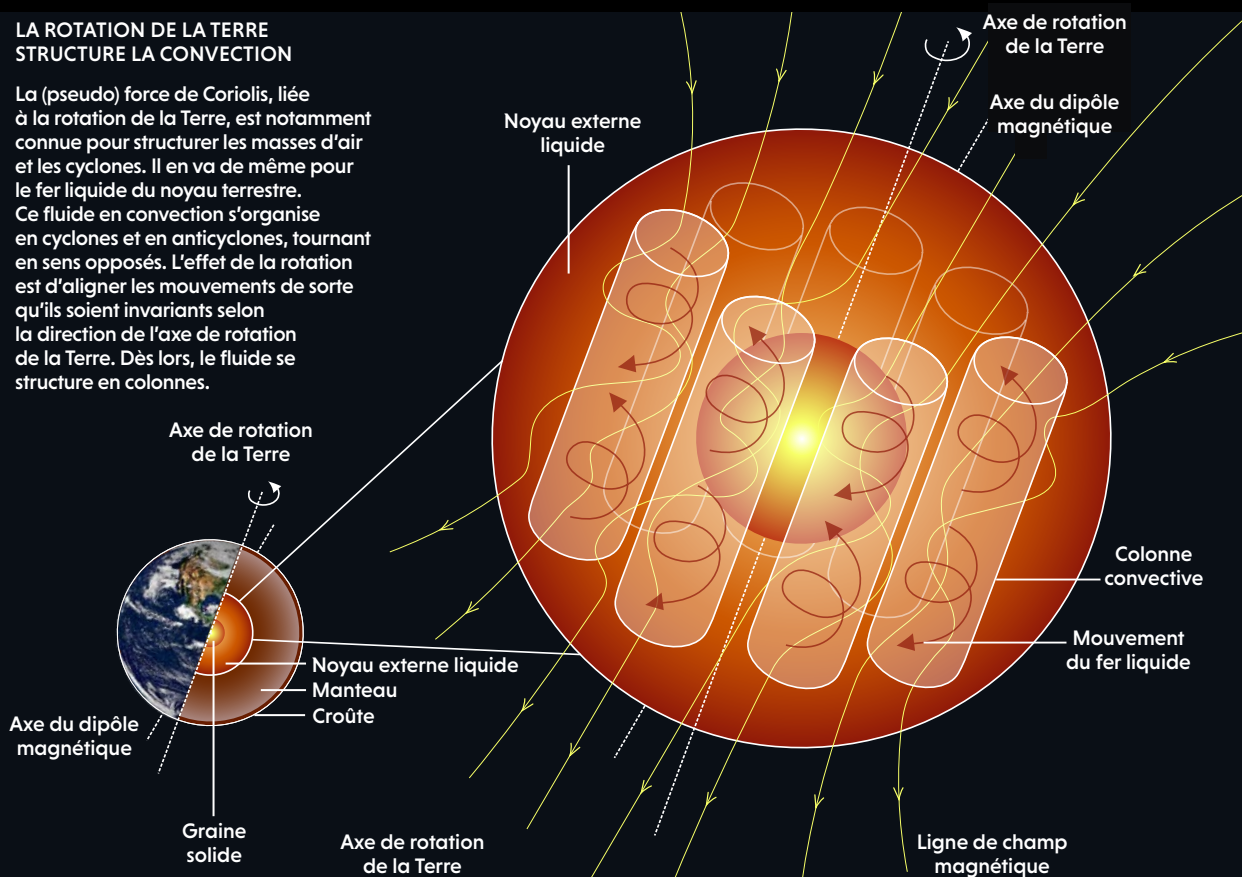
DES COLONNES DE FER LIQUIDE AU CENTRE DE LA TERRE

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 3 000 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.

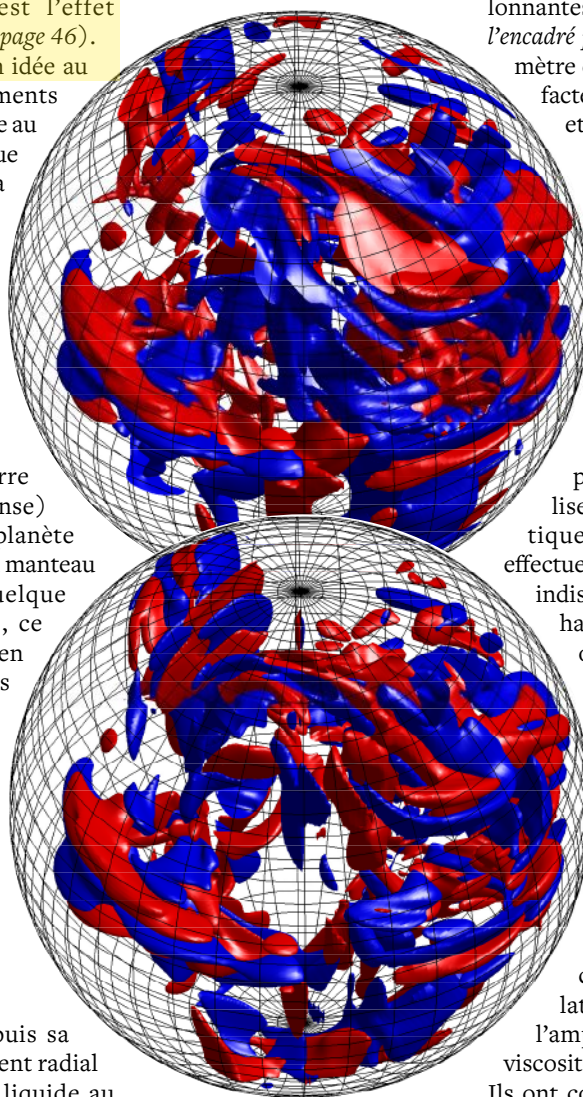
La rotation de la Terre et la (pseudo)force de Coriolis qui lui est associée jouent aussi un rôle. En l'absence de champ magnétique, cette force contraint le fluide subissant la convection à s'organiser en cyclones et anticyclones, et s'oppose à toute variation de la vitesse dans la direction de l'axe 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 dia-

mètre 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 à du 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).