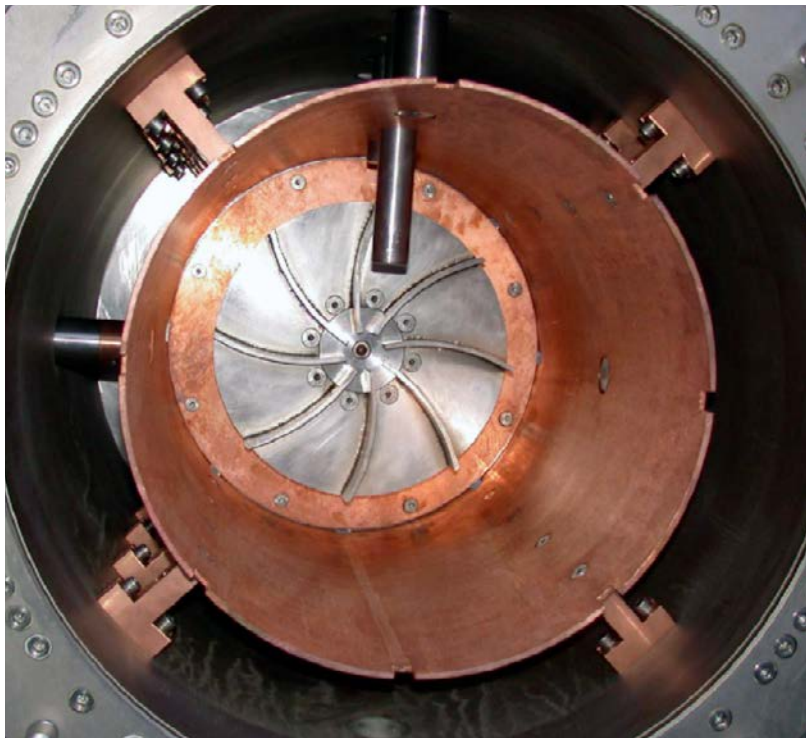




En 2006, l'expérience VKS (pour *Von Karman sodium*), à Cadarache, en France, a reproduit l'effet dynamo autoexcité. Le fluide, du sodium liquide, était brassé dans un cylindre par deux disques munis de pales (au fond, en gris) et mis en rotation à ses extrémités, les deux disques tournant en sens inverses.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