

➤ magnétique et malgré tout de s'approcher d'un régime le plus réaliste possible.

Ces simulations numériques ont mis en évidence la possibilité d'enclencher l'effet dynamo dans des modèles du noyau liquide terrestre. Tous les éléments de la théorie de Larmor semblent donc réunis. Et une fois que l'effet dynamo s'enclenche, l'intensité du champ magnétique augmente jusqu'à ce que la force – dite « de Laplace » – que ce champ exerce sur le fluide conducteur rivalise avec la force de Coriolis. On atteint, alors, un régime d'équilibre où le champ magnétique compense les contraintes de la rotation rapide: les colonnes de convection disparaissent, comme on l'observe dans mes simulations de 2016 (voir les figures page 45).

UN SYSTÈME NON LINÉAIRE

Ce type de simulations s'appuie sur des équations que l'on résout par des méthodes numériques, donc par des méthodes d'approximation. L'étude rigoureuse de ces équations est aussi un défi pour les mathématiciens. Leur analyse commence au lendemain de la Seconde

Guerre mondiale, lorsque le physicien d'origine allemande Walter Elsasser en a donné l'expression moderne sous la forme d'un système d'équations magnétohydrodynamiques qui décrivent l'instabilité proposée par Larmor. Le système comprend trois équations: l'équation de Navier-Stokes (intrinsèquement non linéaire), qui régit le mouvement du fluide, l'équation d'induction du champ magnétique, qui décrit la formation du champ magnétique et les effets de l'induction, et une troisième équation, qui porte sur les transferts thermiques au sein du fluide. Le système de ces trois équations est difficile à résoudre, car il est non linéaire – notamment parce que le mouvement du fluide donne naissance au champ magnétique, qui agit en retour, par la force de Laplace, sur l'écoulement du fer liquide.

Comme pour les simulations numériques, la difficulté de résolution de ces équations réside en partie dans les valeurs prises par leurs paramètres, associées à des caractéristiques, parfois extrêmes, de la Terre. Par exemple, la force de Coriolis est plusieurs milliards de fois plus intense que celles liées à la

EFFET DYNAMO AUTOEXCITÉ: LE RÔLE DE L'INSTABILITÉ

Dans une dynamo de vélo, le mouvement de la roue entraîne un aimant permanent dans un bobinage. D'après les lois de l'électromagnétisme, les variations du champ magnétique créent un courant électrique dans la bobine. Dans un dispositif équivalent (ci-dessous, à gauche), le courant est produit grâce au mouvement d'un disque conducteur tournant dans un champ magnétique fixe. Mais comment produire un courant électrique sans aimant permanent, comme cela semble être le cas pour la Terre ? Joseph Larmor a proposé une solution en 1919 : l'effet dynamo autoexcité. Pour illustrer l'idée, reprenons le dispositif précédent et remplaçons l'aimant par une bobine. Lorsqu'un courant circule dans la bobine, il crée un champ magnétique qui peut jouer le rôle de l'aimant du montage précédent. Dès lors, on obtient une dynamo ; un courant électrique est produit et, si le bobinage s'enroule dans le bon sens, ce courant créera à son tour un champ magnétique qui viendra renforcer le champ initial, etc. C'est par une telle

amplification qu'on obtiendrait un champ magnétique à l'échelle d'une planète !

Mais une question se pose, celle dite « de l'œuf et de la poule » : lequel, du champ magnétique ou du courant électrique, était là en premier ? Il s'agit en fait d'une fausse question. Au-delà d'une certaine vitesse de rotation du disque conducteur, tout courant ou champ magnétique, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, sera amplifié. C'est ce que l'on nomme une instabilité. Divers phénomènes ou sources extérieures au dispositif peuvent provoquer cet élément déclencheur (effet thermoélectrique, source externe de champ magnétique, etc.).

Un exemple plus familier d'instabilité est l'« effet Larsen ». Au-delà d'une certaine amplification, un son, aussi petit soit-il, pourvu qu'il soit non nul, est capté par le micro, amplifié par le haut-parleur et croît jusqu'à devenir strident. L'origine du son initial n'a pas d'importance : au-delà d'une certaine amplification, l'effet est systématique.

