



## L'effet dynamo, un casse-tête non-linéaire

Emmanuel Dormy, Henri-Claude Nataf, Jean-François Pinton

### ► To cite this version:

Emmanuel Dormy, Henri-Claude Nataf, Jean-François Pinton. L'effet dynamo, un casse-tête non-linéaire. Images de la Physique, 2005, 2005 (2005), pp.21-26. ensl-00180607

**HAL Id: ensl-00180607**

**<https://ens-lyon.hal.science/ensl-00180607>**

Submitted on 19 Oct 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'effet dynamo, un casse-tête non-linéaire

L'origine du champ magnétique terrestre constitue probablement l'un des problèmes les plus surprenants de la physique moderne. Alors que la question posée est d'une simplicité remarquable, « pourquoi la boussole indique-t-elle le nord ? », la réponse se refuse aux physiciens depuis le XVI<sup>ème</sup> siècle. La théorie des dynamos auto-excitées a été introduite pour la première fois par Sir Joseph Larmor en 1919. Elle a résisté aux critiques les plus sévères, mais n'a pas encore pu être appliquée au régime de paramètres terrestres. A l'ère du calcul scientifique, il peut sembler surprenant qu'aucun modèle numérique complet n'ait été proposé depuis sans introduire des termes *ad hoc* : paramétrisation d'une induction turbulente ou bien utilisation de valeurs de paramètres très éloignées de celles qu'il faudrait. Les raisons en sont cachées dans les non-linéarités du système.

**A** lors que la dynamo de votre bicyclette est construite avec des fils et un aimant, les dynamos naturelles ont lieu dans un fluide conducteur homogène et sont auto-excitées. Par *homogène* on entend que l'ensemble du domaine fluide est conducteur, c'est-à-dire que l'on ne contraint pas les courants à l'aide de fils. Par *auto-excitée*, on entend que la présence du champ magnétique est entièrement due à l'effet dynamo, c'est-à-dire qu'il n'y a pas d'aimant permanent ni de champs externes au système. Le champ magnétique est produit par des courants électriques résultant de l'interaction de l'écoulement avec ce champ. C'est à ce mécanisme, proposé pour la première fois par Larmor en 1919, que l'on se réfère par l'expression « effet dynamo ».

La génération du champ magnétique terrestre par des courants électriques à l'intérieur de notre planète a été proposée par Ampère très peu de temps après la célèbre expérience d'Ørsted. Aucun aimant permanent ne pourrait en effet résister aux températures élevées (plusieurs milliers de degrés) qui règnent au cœur de la Terre. Des courants électriques parcourant le noyau de la Terre (constitué de fer en fusion) constituent donc la seule explication réaliste pour engendrer le champ observé en surface. S'ils n'étaient pas entretenus ces courants disparaîtraient pourtant en quelques milliers d'années par dissipation ohmique. Pour expliquer la présence d'un champ magnétique de grande échelle sur Terre depuis plusieurs millions d'années, il faut donc identifier un processus régénérateur. Il s'agit probablement des forts mouvements de convection qui brassent le noyau liquide de notre planète pour en évacuer plus efficacement

la chaleur. Ces mouvements sont du bon ordre de grandeur pour prétendre régénérer les courants électriques et donc le champ magnétique. Mais le problème n'est pas réglé pour autant : les mouvements dans le fer liquide conducteur n'introduisent pas un terme source pour le champ magnétique, mais simplement un terme couplant celui-ci à la vitesse du fluide. Le système physique ainsi décrit admet toujours une solution sans champ magnétique, mais au-delà de certaines valeurs (critiques) des paramètres, cette solution se déstabilise *via* une « bifurcation » au profit d'une solution magnétique (appelée solution « dynamo »). Cette croissance du champ magnétique, de manière auto-excitée continuerait sans fin si le couplage entre les mouvements du fluide et le champ magnétique n'introduisait un autre terme, dans l'équation du fluide cette fois (l'équation de Navier-Stokes). Il s'agit de la force de Laplace qui va modifier l'écoulement du fluide et amener le champ magnétique à saturer.

Le seul fait que le champ magnétique de la Terre doit son existence à une instabilité et non à un terme source ne justifie pas que le problème résiste aux physiciens depuis plusieurs siècles. Les instabilités de ce type se rencontrent dans de nombreux problèmes physiques (en particulier en hydrodynamique où elles sont à l'origine de la plupart des mouvements convectifs) sans entraîner de difficultés insurmontables. Le réflexe naturel du physicien face à ce type de problèmes est de chercher à l'étudier dans une situation simplifiée – par exemple en une ou deux dimensions d'espace – avant d'envisager le problème complet. Malheureusement, on sait depuis le milieu du XX<sup>ème</sup> siècle que ce type d'approche est sans espoir pour le problème de l'effet

---

Article proposé par :

E. Dormy, École Normale Supérieure de Paris / Institut de Physique du Globe de Paris / C.N.R.S.

H.-C. Nataf, Université Joseph Fourier, Grenoble / C.N.R.S.

J.-F. Pinton, École Normale Supérieure de Lyon / C.N.R.S.

dynamo ! On peut en effet démontrer que toutes les solutions de ce problème pour des dimensions inférieures à trois ne peuvent régénérer le champ magnétique contre la dissipation par effet Joule ...

Il faut donc envisager le problème complet en trois dimensions d'espace. Une approche réaliste doit résoudre un système couplant non-linéairement l'équation d'induction

$$\partial_t \mathbf{B} = \text{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta \Delta \mathbf{B} \quad (1)$$

( $\eta$  est la diffusivité magnétique) à l'équation de Navier-Stokes (elle-même intrinsèquement non-linéaire) régissant le mouvement du fluide. Enfin, une source d'énergie doit être apportée au système. On peut envisager un forçage mécanique pour des systèmes simplifiés, mais la description des dynamos naturelles nécessite le couplage non-linéaire avec une troisième équation décrivant les transferts thermiques. C'est ce système couplé, posé depuis les années 1950 qu'il faut résoudre pour expliquer le magnétisme des planètes, des étoiles et des galaxies.

## Dynamos expérimentales et mécanismes

Il est connu depuis Siemens et Bullard – voir encadré 1 – que des arrangements astucieux de circuits électriques permettent l'auto-entretien d'un champ magnétique à partir du mouvement de conducteurs solides. En fait, ce principe soutient le fonctionnement de nombreux moteurs électriques. Le problème devient beaucoup plus complexe si on impose que la dynamo se développe dans un milieu électriquement homogène. Les contraintes mathématiques pour l'existence d'un effet dynamo, bien que probablement non encore toutes recensées, pèsent très lourd ! On ne connaît pas de méthode générique permettant de prescrire un champ de vitesse  $\mathbf{u}$  tel que l'équation d'induction (1) autorise la croissance spontanée d'un champ  $\mathbf{B}$ . Ce problème est connu sous le nom de « dynamo cinématique ».

La réalisation expérimentale d'une dynamo fluide a dû attendre l'expérience de Riga, en 2000. L'équipe de Lettonie a utilisé un écoulement de sodium liquide en mouvement hélicoïdal dans un cylindre (voir figure 1). Cette géométrie reproduit la solution analytique proposée en 1973 par Ponomarenko, qui a prouvé que le mouvement hélicoïdal d'un cylindre infini dans une matrice infinie de même conductivité conduit à une dynamo cinématique.

Le fait que le fluide en mouvement soit un métal liquide (comme dans la Terre) pose aussi de nouveaux problèmes. En effet, pour les métaux la diffusivité magnétique (qui est une sorte de « viscosité » du champ magnétique) est de plusieurs ordres de grandeur supérieure à la viscosité cinématique ordinaire du fluide. Ceci implique que le mouvement du fluide peut se développer sur des échelles beaucoup plus petites que celles sur laquelle varie le champ magnétique global (par exemple le champ dipolaire que l'on représente pour la Terre). Cela a conduit à se demander s'il ne peut pas exister des effets coopératifs entre les petites échelles pour

contribuer à la naissance d'un champ macroscopique. Cette idée est à la base de ce que l'on appelle la « magnétohydrodynamique de champ moyen ». Dans cette approche l'équation d'induction (1) est moyennée sur les petites échelles pour obtenir une description à grande échelle, ce qui fait apparaître la moyenne spatiale de l'induction  $\langle \text{rot}(\mathbf{u} \times \mathbf{b}) \rangle$  où  $\mathbf{u}$  et  $\mathbf{b}$  sont les champs fluctuants à petite échelle. Cet effet s'appelle l'effet «  $\alpha$  ». Il existe des exemples (hélas pas si nombreux !) où ce terme peut contribuer à induire une dynamo cinématique. C'est le cas pour le champ de vitesse proposé en 1970 par G. O. Roberts, où le mouvement du fluide correspond à un pavage périodique de cellules en mouvements hélicoïdaux alternés (les sens de rotation et de translation sont inversés d'une cellule à l'autre). Cette géométrie a été reproduite (en taille finie évidemment !) dans l'expérience de Karlsruhe qui a fourni le deuxième (et pour l'instant dernier) exemple de dynamo fluide expérimentale connue. Il faut noter que toutes les dynamos expérimentales ayant à ce jour fonctionné, reposent sur des champs de vitesse conduisant analytiquement à une dynamo cinématique. Leur fonctionnement met en jeu les mécanismes d'induction  $\alpha$  et  $\omega$  (encadré 1).

Une observation très importante effectuée lors de ces expériences est que l'auto-entretien de la dynamo s'est produit pour des paramètres très proches du seuil calculé numériquement. Or, en raison de la très grande différence de diffusivité entre champ magnétique et champ de vitesse, l'écoulement du métal liquide est toujours très turbulent. Les simulations numériques ne peuvent pas atteindre ces régimes et ne mettent en jeu que l'écoulement moyen du fluide, comme s'il était laminaire. Il semble donc que la turbulence ait peu d'incidence sur le seuil de la bifurcation, au moins dans les expériences faites à Riga et Karlsruhe. Un deuxième résultat a été fourni par ces expériences : la valeur du champ magnétique saturé, après bifurcation. C'est un renseignement essentiel car il indique comment les forces de Laplace agissent sur le champ de vitesse afin de saturer la croissance du champ magnétique. Cela permet aussi de connaître le rendement de la conversion en puissance magnétique de la puissance mécanique impartie au fluide. Contrairement au seuil d'auto-entretien, il semble que pour expliquer les valeurs observées, il faut impliquer les fluctuations turbulentes de l'écoulement, en équilibrant la force de Laplace avec les effets inertiels.

## Régime de paramètres

L'existence des champs magnétiques engendrés par effet dynamo est remarquablement robuste : alors que les échelles et les régimes de paramètres sont extrêmement divers, des champs magnétiques d'origine interne ont été mesurés sur l'essentiel des planètes du système solaire. Notre étoile, le soleil, produit elle aussi un champ magnétique par effet dynamo. Enfin, à une échelle encore plus impressionnante, la polarisation de la lumière nous apprend que les galaxies elles-mêmes (dont la voie lactée) produisent leur propre

## Encadré 1

## Dynamo et mécanismes d'induction

L'illustration la plus simple d'une dynamo inhomogène a été proposée au début des années cinquante par le physicien anglais E. Bullard. Lorsqu'un disque en rotation uniforme  $\Omega$  est plongé dans un champ magnétique  $B_0$  parallèle à son axe de rotation, il apparaît un champ électromoteur  $E = u \times B$  entre son centre et sa périphérie. Connecté à un circuit électrique, ce champ peut engendrer un courant. L'astuce de la dynamo de Bullard consiste à utiliser le courant ainsi produit pour qu'il crée un champ magnétique induit  $B_1$  qui renforce le champ initial  $B_0$ , comme sur la figure 1. Plus le disque tourne vite, plus cet effet est important. L'écriture de l'équation électrique du circuit montre que lorsque la rotation est suffisamment importante, un champ magnétique (i.e. un courant dans la spire) peut croître spontanément :  $di/dt = i(M\Omega - R)/L$ , où  $L$  est l'inductance de la spire,  $R$  sa résistance et  $M$  l'induction mutuelle entre la spire et le disque. Cet exemple très simple illustre plusieurs propriétés très générales de l'effet dynamo : (i) l'instabilité se déclenche lorsque l'induction excède la dissipation ohmique ; (ii) la topologie des courants est essentielle ; dans notre exemple, si la spire est bouclée dans l'autre sens, le champ induit  $B_1$  s'oppose au champ initial  $B_0$  et le montage se transforme en une « anti-dynamo » ; (iii) la saturation du courant est assurée par l'action de la force de Laplace qui tend à freiner le disque ; (iv) la croissance d'un champ dynamo peut être vue comme provenant de la superposition de champs magnétiques induits qui se renforcent.

Il reste que la dynamo précédente repose sur un astucieux chemin imposé au courant. On peut se dégager de cette contrainte et imaginer une dynamo naissant dans un milieu de conductivité électrique homogène, comme l'a montré l'expérience de F.J. Lowes et I. Wilkinson, conduite à l'Université de Newcastle

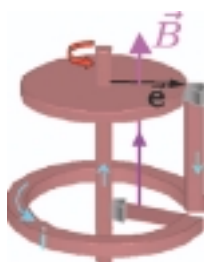


Figure 1 - Principe de la dynamo de Bullard.

(UK) en 1963. Elle repose sur le fait que les lignes de champ magnétique sont entraînées par le mouvement du milieu qu'elles traversent. Un tube de champ magnétique se tord sous l'action d'une rotation différentielle, un peu comme un élastique, cf. figure 2. Dans cette torsion, il naît un champ magnétique induit dans la direction du cisaillement. Cet effet très général est connu sous le nom d'« effet  $\omega$  » : il permet d'induire un champ toroïdal à partir d'un champ poloïdal. La dynamo de Lowes & Wilkinson – en bas sur la figure 2 – est constituée de deux cylindres métalliques non-coaxiaux pouvant tourner dans un bloc du même métal (condition électrique homogène pour les courants). La rotation différentielle existe dans le fond du cylindre qui tourne par rapport au bloc qui est immobile. Si une fluctuation de champ magnétique d'axe parallèle à l'un des cylindres tournants apparaît, la rotation différentielle induit un champ magnétique toroïdal qui joue le rôle d'un champ magnétique axial pour le deuxième cylindre. Si ce dernier tourne dans le bon sens, il induit alors, toujours par effet de rotation différentielle, un champ magnétique qui a une composante positive le long de l'axe du premier cylindre, renforçant ainsi la perturbation initiale. Lorsque la vitesse des disques est suffisante, le champ magnétique est ainsi auto-entretenu. Cette dynamo à rotors solides peut conduire à des évolutions dynamiques extrêmement riches. Lowes et Wilkinson ont montré qu'on peut observer des régimes oscillatoires et même des successions quasi périodiques de renversements du champ dynamo. Enfin, il faut remarquer sur cet exemple (i) la tridimensionnalité du mouvement des conducteurs et des champs induits, (ii) l'importance encore des sens relatifs de rotation des cylindres : un sens contraire à celui de la figure 2 conduit encore une fois à une « anti-dynamo ».

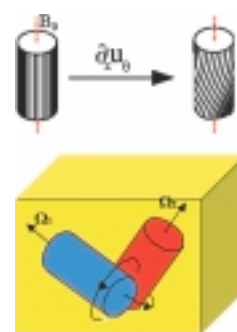
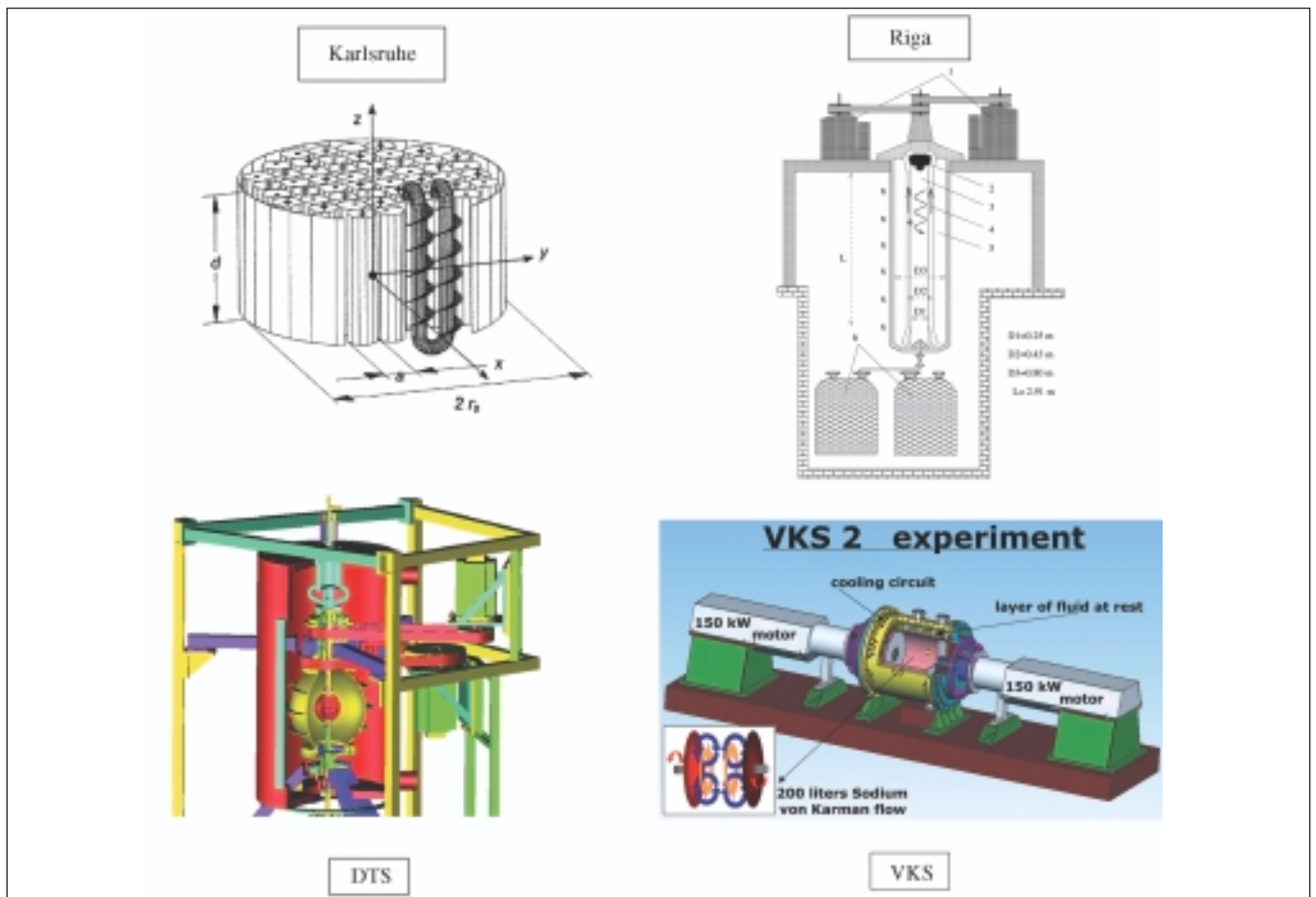


Figure 2 - Torsion des lignes de champ  $B$  et dynamo de Lowes et Wilkinson.

champ magnétique. Devant une telle universalité, on pourrait penser que cet effet doit être facilement reproductible, aussi bien en laboratoire qu'à l'aide de simulations numériques. En fait, la difficulté provient de la gamme très étendue couverte par les échelles spatiales du problème, qui doit être envisagée dans son ensemble. Ainsi dans le noyau liquide de la Terre qui occupe une sphère d'environ 3 500 km de rayon, les développements asymptotiques décrivent des couches de cisaillement visqueux dont la taille

est de l'ordre du mètre. On pense que certaines de ces couches jouent un rôle actif et peuvent contrôler une partie de la dynamique de grande échelle. Ces disparités d'échelles spatiales sont naturellement accompagnées de contrastes comparables dans la variation temporelle du système. Il suffit pour s'en convaincre de considérer que le champ magnétique à la surface de la Terre évolue très lentement, ce qui nécessite de remettre régulièrement à jour les cartes de navigation. Cette échelle de variation (que l'on



**Figure 1** - Schéma des deux dynamos expérimentales réalisées à Karlsruhe (Allemagne) et Riga (Létonie) et des expériences DTS et VKS en cours en France, à Grenoble et Cadarache. Toutes ces expériences utilisent du sodium liquide. Dans la dynamo de Karlsruhe, le sodium circule dans un assemblage de 52 tuyaux en série. Dans celle de Riga, une turbine au sommet d'un long cylindre tourne à plus de 2 500 tours/minute. Dans DTS, le sodium est en rotation globale et l'écoulement est produit par rotation différentielle. Dans VKS, deux disques tournent en vis-à-vis.

qualifie de séculaire) contraste avec des échelles bien plus longues comme celle des inversions de polarité du champ (voir encadré 2) et des échelles bien plus courtes, comme le jour. Si le jour peut sembler une échelle de temps bien trop courte pour influencer sur l'évolution du champ magnétique à long terme, il faut se souvenir que c'est bien à cette rotation très rapide de la planète sur elle-même que l'on doit le caractère dipolaire axial de son champ magnétique (voir encadré 2). Il est donc naturel que cette constante de temps très courte intervienne dans les équations qui régissent l'évolution du champ.

Ces rapports extrêmes entre les petites échelles spatiales et les grandes, ou bien ceux entre les échelles de temps les plus rapides et les constantes de temps géologiques, se reflètent dans les équations caractérisant le problème de la dynamo par l'apparition de paramètres aux valeurs également extrêmes. Les nombres sans dimension – qui caractérisent l'importance relative des différents termes de ces équations – prennent souvent des valeurs inquiétantes. Certains d'entre eux restent de l'ordre de l'unité, tandis que d'autres sont bien inférieurs au milliardième...

Le problème de la dynamo se retrouve alors intimement connecté à celui de l'étude des équations aux dérivées partielles dites « raides », qui constitue un sujet de recherche actif en analyse. La tentative de simplifier les équations en les « débarrassant » de leurs petits paramètres est souvent grande, mais ne permet pas, dans la plupart des cas, d'obtenir des résultats physiquement pertinents. Il faut donc se concentrer sur le comportement asymptotique du système pour de petites valeurs de tels paramètres. Dans ce type d'approche, les valeurs de ces tout petits paramètres (allant jusqu'à  $10^{-15}$ ) sont fortement surévaluées, et on s'intéresse au comportement du système à mesure qu'ils sont diminués en s'efforçant d'atteindre un régime asymptotique. C'est dans cette perspective que doivent être placées les expériences de laboratoire et les simulations numériques. Aucun de ces deux outils ne peut permettre au physicien d'attaquer de front la disparité d'échelles des objets naturels que l'on cherche à comprendre.

Chacune de ces approches offre des avantages complémentaires. Les expériences de laboratoire sont nécessairement limitées par l'échelle la plus grande qu'elles peuvent représenter. Elles le sont peu en ce qui concerne les échelles



## Encadré 2

## La dynamo terrestre

L'aiguille de la boussole indique le Nord... On le sait depuis près de 2 000 ans. Et les paléomagnéticiens nous disent qu'il en est ainsi depuis des centaines de millions d'années. Sauf que le pôle de l'aiguille aimantée qui pointe vers le Nord est tantôt le nord, comme aujourd'hui, tantôt le sud : le champ magnétique terrestre s'est inversé plus de 100 fois au cours de 50 derniers millions d'années, et la dernière inversion date de 780 000 ans. Mis à part ce changement de polarité, le champ magnétique terrestre semble toujours dominé par ce dipôle qui s'aligne en moyenne avec l'axe de rotation de notre planète (dipôle axial). Qu'est-ce qui lie donc rotation et champ magnétique ? On a longtemps cherché une relation directe entre les deux : courants thermo-électriques en réponse aux différences d'insolation de surface, pour Ampère vers 1830, quête infructueuse d'un magnétisme d'un type nouveau des corps massifs en rotation pour Blackett en 1947. On pense aujourd'hui que le lien est plus subtil et dû à l'action de l'accélération de Coriolis sur les mouvements de convection qui agitent l'intérieur du noyau liquide, ce grand océan de fer en fusion situé entre la graine de fer solide de 1 220 km de rayon et le bas du manteau silicaté à 3 500 km de rayon.

On sait que l'accélération de Coriolis, en l'absence de champ magnétique, contraint les écoulements à s'organiser en cyclones et anticyclones – comme dans l'atmosphère – et s'oppose à toute variation le long de l'axe de rotation, conduisant la convection du noyau à s'organiser en immenses colonnes parallèles à l'axe de rotation. On parle d'équilibre quasi-géostrophique. En présence de la force de Coriolis, le frottement visqueux à la frontière rigide que constitue le manteau provoque en outre le « pompage d'Ekman », qui engendre une circulation secondaire symétrique par rapport au plan de l'équateur, qui donne une hélicité aux tourbillons. Lorsque les mouvements de convection sont suffisamment vigoureux, l'instabilité dynamo se déclenche et produit un champ magnétique dont la géométrie dépend naturellement de celle des mouvements qui lui donnent naissance. Le champ croît jusqu'à ce que les forces de Laplace viennent concurrencer l'accélération de Coriolis. On passe alors dans l'équilibre magnétostrophique.

Ce n'est que très récemment que ce scénario a reçu l'appui de simulations numériques complètes. Le champ magnétique produit par ces dynamos numériques est dominé par un dipôle aligné avec l'axe de rotation. Pourtant, un arrangement régulier de tourbillons cycloniques et anticycloniques tend plutôt à créer un dipôle perpendiculaire à leur axe. C'est d'ailleurs ce qu'on observe dans l'expérience de Karlsruhe et peut-être ce qui explique le dipôle équatorial de Neptune ou d'Uranus. Plus surprenant enco-

re, il arrive que le champ de vitesse de ces tourbillons convectifs n'autorise pas la croissance d'un champ magnétique (il ne constitue pas une « dynamo cinématique »), et c'est seulement en présence d'un champ magnétique initial que la force de Laplace brise la symétrie entre cyclones et anticyclones au profit de ces derniers, et qu'un dipôle axial peut s'installer !

Les simulations produisent un champ magnétique qui ressemble à s'y méprendre à celui de la Terre (voir ci-contre) et plusieurs présentent même des inversions spontanées. Pourtant, de nombreuses questions se posent : quel rôle jouent les petites échelles de l'écoulement et du champ magnétique, que l'on ne peut pas modéliser ? Ne dominent-elles pas la dissipation ? Quelle est alors la puissance nécessaire pour faire marcher la dynamo terrestre ? Au cours de son histoire, la Terre a-t-elle toujours disposé d'une puissance suffisante pour entretenir sa dynamo ? Même avant que ne démarre la cristallisation de la graine solide, qui procure aujourd'hui l'essentiel des forces d'Archimède qui nourrissent la convection ? Pourquoi Vénus n'a-t-elle pas de dynamo ?

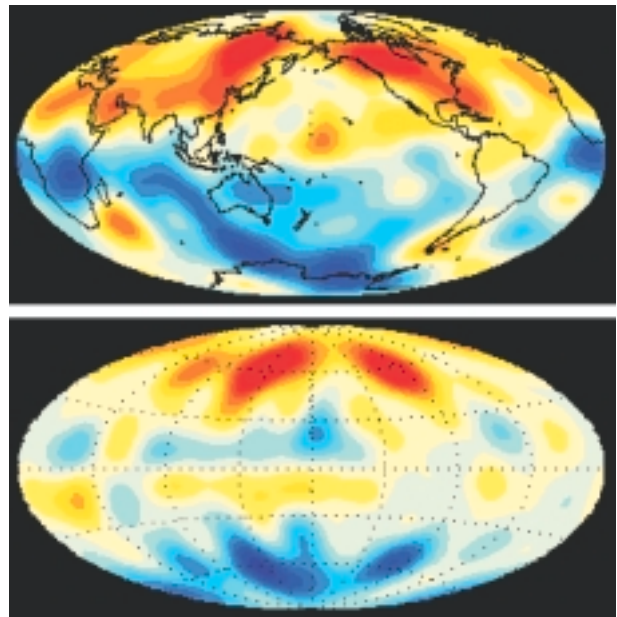
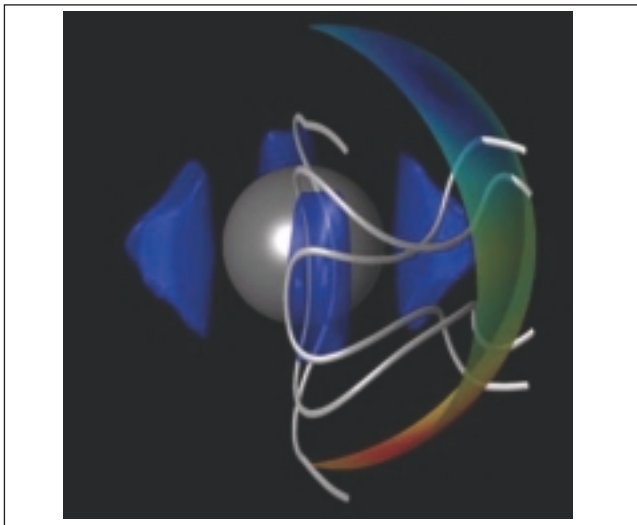


Figure - Isovaleurs de la composante radiale du champ magnétique à la surface du noyau terrestre en 1980 (en haut) et dans une simulation numérique due à Christensen et al. (en bas).

les plus petites, correspondant à la dissipation visqueuse. La difficulté consiste à s'approcher d'une limite caractérisée par de faibles effets visqueux à grande échelle en comparaison des non-linéarités intrinsèques de Navier-Stokes (pour modéliser les objets astrophysiques) ou en comparaison de la force de Coriolis (pour la Terre). Il est irréaliste d'espérer faire tourner sur elle-même une expérience de petite taille à une vitesse suffisante pour donner à la « force de Coriolis » le rôle prépondérant qu'elle a dans le cœur de notre planète. Il est en revanche possible dans les expériences de labora-

toire d'engendrer des écoulements très turbulents de métaux liquides. Ce fut le cas en particulier lors des premières expériences von Karman Sodium (voir figure 1 et encadré 1) menées à Cadarache et qui ont permis d'étudier la réponse à des sollicitations magnétiques.

Les modèles numériques existants (e.g. figure 2) sont sans doute les plus limités quant à la capacité de gérer une très grande disparité d'échelles, cependant ils permettent de s'affranchir de certaines contraintes physiques (comme la valeur



**Figure 2** - Etalon international pour les modèles numériques de dynamo terrestre. Autour de la graine centrale, la convection thermique se développe sous forme de tourbillons (anticyclone en bleu) qui engendrent le champ magnétique visualisé par ses lignes de champ en volume et par sa composante radiale à la surface du noyau. (figure J. Aubert).

du nombre de Prandtl magnétique) et ainsi d'envisager approcher d'une manière différente le comportement asymptotique recherché. Cela pose alors le problème d'une double limite asymptotique (pour laquelle deux paramètres doivent tendre vers zéro). Le comportement du système peut alors être différent selon la manière dont ces deux paramètres tendent vers zéro (*i.e.* selon la manière dont ils sont reliés dans cette limite).

Le comportement asymptotique caractérisant le fonctionnement d'une dynamo dans un régime physiquement réaliste (par exemple la limite des petits nombres de Prandtl magnétique) a pu être mis en évidence pour des problèmes partiels, fortement simplifiés. Il n'a pas encore été obtenu pour le problème complet de la dynamo.

La réalisation expérimentale d'une dynamo fluide homogène serait une manière d'explorer ce régime.

## Projets en cours

De nouveaux projets expérimentaux sont en cours de réalisation pour permettre d'étudier des écoulements libres. Parmi ceux-ci, la seconde génération d'expériences conduites au CEA-Cadarache. L'enjeu est de comprendre dans des géométries moins contraintes que les premières

expériences de Riga et Karlsruhe, comment se développe la dynamique temporelle du champ auto excité et les mécanismes de saturation. Parallèlement plusieurs projets visent à étudier le rôle de la rotation dans le régime de champ fort qui semble caractériser la dynamo terrestre, comme l'expérience DTS, à l'UJF-Grenoble.

Les modèles numériques récents permettent d'étudier le système complet, mais dans une gamme de régime de paramètres très éloignée de la réalité physique, en raison de la limitation de la puissance de calcul. Les équipes de recherche travaillent donc au développement de nouvelles approches numériques, plus performantes, ou bien basées sur des modélisations des phénomènes en jeu.

## Perspectives

Les progrès conjoints obtenus en combinant l'approche numérique et expérimentale ces dernières années laissent espérer des progrès décisifs qui devraient permettre de mieux comprendre l'origine du champ magnétique de la Terre, mais aussi des planètes et des étoiles.

La théorie des systèmes dynamiques réserve souvent bien des surprises. A ce titre l'effet dynamo pose le problème d'une instabilité en présence de bruit (la turbulence), dont la compréhension peut se révéler de portée générale en physique non-linéaire. Les observations sur les systèmes naturels montrent que le régime dynamique au voisinage des bifurcations peut être extrêmement riche. La polarité du champ magnétique terrestre s'inverse de manière apparemment chaotique. La durée moyenne entre deux inversions est de l'ordre de 100 000 ans, mais elle peut très largement dépasser le million d'années. Quant au soleil, la polarité de son champ magnétique semble s'inverser avec une grande régularité tous les 11 ans, bien que le soleil soit dans un régime de paramètres donnant beaucoup plus d'importance aux non-linéarités du système que ne l'est la Terre...

Le soleil vient de passer par un maximum de son activité magnétique en 2001. Dans le même temps, l'activité magnétique de la Terre, diminue depuis quelques siècles. L'effet des composantes non-dipolaires du champ semble prendre de l'ampleur. L'accroissement des composantes non-dipolaires du champ magnétique terrestre au cours des dernières décennies ont amené certains chercheurs à s'interroger sur la possibilité d'une très prochaine inversion de polarité du champ magnétique terrestre.

## Pour en savoir plus

- MOFFATT (H.K.), *Magnetic Field Generation in Electrically Conducting Fluids*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1978).
- FAUVE (S.), PÉTRÉLIS (F.), *The Dynamo effect, Peyresq lectures on Nonlinear Phenomena, II*, J.A. Sepulchre Ed., World Scientific, Singapore (2003).
- Numéro spécial sur les dynamos expérimentales, *Magnetohydrodynamics* **38**, 2002.
- CARDIN (P.), LEMARCHAND (F.), L'énigme de la dynamo terrestre, *La Recherche*, **352**, 36-38, Avril 2002.
- DORMY (E.), VALET (J.P.), COURTILLOT (V.), Numerical models of the geodynamo and observational constraints, *Geochemistry, Geophysics and Geosystems*, **1**, 62, 2000.