

La Terre va-t-elle perdre le Nord ?

Rien n'est stable dans notre univers. Le champ magnétique de la Terre, sur lequel s'aligne l'aiguille de nos compas et boussoles, n'échappe pas à la règle. Depuis les Romains, son intensité a diminué de moitié. Au point que certains se demandent s'il ne va pas bientôt s'annuler... Pour surprendre qu'il puisse paraître, ce phénomène, baptisé inversion de polarité, s'est déjà produit à maintes reprises au cours de l'histoire mouvementée de notre planète (1). Sa découverte est due à Bernard Brunhes, il y a environ un siècle, mais il aura fallu cinquante ans pour que l'idée en soit définitivement acceptée.

Le champ magnétique terrestre est engendré par la rotation de la Terre sur elle-même, rotation qui implique celle de son noyau de fer liquide conducteur de l'électricité par le biais de ce que l'on appelle l'effet dynamo (voir ci-dessous). Nos instruments mesurent ce champ depuis quelques siècles seulement. Pour les périodes plus anciennes, les géophysiciens ont recours à la mémoire magnétique des roches. Ces dernières sont en effet capables d'enregistrer le champ magnétique terrestre et de conserver l'information pendant des milliards d'années.

La dernière inversion date d'un peu moins de 800 000 ans

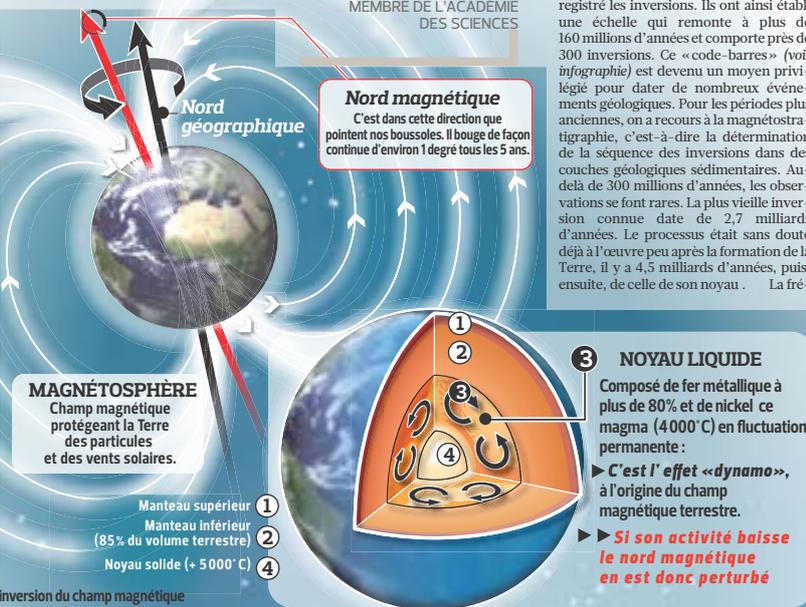
C'est ainsi que l'étude détaillée de séries de coulées de lave a permis de montrer que, pendant une inversion, l'intensité du champ chute à moins de 10 % de sa valeur normale. L'aimant dipolaire (orienté nord-sud ou sud-nord selon les périodes) s'écroule, et un champ à géométrie plus complexe, multipolaire, domine alors. La dernière inversion date d'un peu moins de 800 000 ans et la pro-

chaine semble avoir du retard... L'inversion peut être très brève, de l'ordre de quelques milliers d'années, parfois moins. Mais il lui arrive aussi d'avorter. On parle alors d'excursion. La dernière en date, découverte par Norbert Bonhommet dans la chaîne des Puy, remonte à 40 000 ans. Jean-Pierre Valet, géophysicien à l'Institut de physique du globe à Paris, a suggéré qu'elle pouvait



Docteur
Vincent
Courtillot

MEMBRE DE L'ACADÉMIE
DES SCIENCES



Chacune des barres rouges représente une inversion du champ magnétique terrestre sur un temps donné. Il y a eu 89 inversions en 170 millions d'années.



L'échelle «code-barre» des inversions du champ magnétique terrestre

Sources : Graphic News, Nouveau Voyage au centre de la Terre, V. Courtillot, Édition Odile Jacob (2009)

Un magnétisme créé par une dynamo géante

LA TRANSFORMATION et le transport de l'énergie figurent parmi les avancées majeures réalisées au XIX^e siècle. La création de courant électrique à partir du mouvement d'un conducteur métallique est l'une des solutions les plus astucieuses. À l'aide de bobinages sophistiqués et de circuits magnétiques, une fluctuation de courant électrique est amplifiée par ce qu'on appelle l'effet dynamo. Il est possible ensuite d'acheminer ce courant loin de l'endroit où il a été produit pour différents usages, comme faire tourner un moteur.

Quel lien existe-t-il entre ces dynamos et le champ magnétique des étoiles ou des planètes comme la Terre ? En 1919, le physicien irlandais Joseph Larmor fit l'hypothèse que des écoulements de liquides conducteurs pouvaient générer un champ magnétique et proposa cet effet comme source du champ magnétique solaire. Petit à petit, l'idée s'imposa. Pour le Soleil, mais aussi pour la Terre, qui contient un noyau liquide métallique.

Encore des inconnues

Pourtant, à la fin du XX^e siècle, le phénomène n'avait encore jamais été observé expérimentalement : les vitesses des écoulements dans un liquide doivent en effet atteindre des valeurs trop élevées pour les expériences tentées jusqu'alors. Des calculs analytiques et des simulations numériques sur ordinateur permirent de modéliser l'effet imaginé par Larmor, mais avec des hypothèses peu réalistes, incapables de décrire les fluctuations turbulentes intenses à l'œuvre dans ces liquides en mouve-



François
Pétrélis

PHYSICIEN À L'ÉCOLE
NORMALE SUPÉRIEURE

ment. Ce n'est qu'en 2001 que deux équipes, l'une localisée à Riga (Lettonie), l'autre à Karlsruhe (Allemagne), parvinrent à relever le défi. Mais leurs expériences étaient basées sur des écoulements circulant dans des tuyaux, donc peu représentatifs du Soleil ou de la Terre.

Plusieurs groupes dans le monde, principalement aux États-Unis et en France, suivirent une voie différente en localisant les écoulements dans un unique réservoir où les fluctuations turbulentes peuvent occuper tout le volume. En 2006, une expérience menée conjointement par trois équipes du CEA-Saclay, des écoles normales supérieures de Lyon et de Paris, autour de François Davidau, Jean-François Pinton et Stephan Fauve, permit d'observer l'effet dynamo pour la première fois dans ce type d'écoulement.

Dans la foulée, et un peu à la surprise générale, l'équipe constatait que le champ magnétique ainsi créé peut s'inverser (voir article ci-contre). Dans certains cas, ces inversions sont périodiques, comme semble l'être l'évolution du champ magnétique du Soleil. Dans

d'autres, les renversements paraissent aléatoires et les mesures ressemblent étonnamment à ce qui est connu pour le champ magnétique terrestre.

Avec Stephan Fauve, Emmanuel Dormy et Jean-Pierre Valet, nous avons montré que cette similitude n'est pas une coïncidence. Nous pensons qu'un même processus est à l'œuvre dans ces deux systèmes. L'idée est que la forme principalement dipolaire du champ se transforme en une forme plus structurée (par exemple quadripolaire) au cours du renversement.

Ces résultats ont suscité d'autres travaux. Au cours de sa thèse, Basile Gallet a ainsi prédit l'existence de dynamos dont le champ serait localisé dans un seul hémisphère... Or, certaines observations laissent à penser que le Soleil (pendant le minimum de Maunder sous le règne de Louis XIV) ainsi que certaines planètes ont eu, à un moment de leur existence, des dynamos hémisphériques. Cet effet a depuis été observé expérimentalement.

La compréhension du phénomène observé lors de l'expérimentation de 2006 explique plusieurs aspects des renversements des champs magnétiques stellaires et planétaires, et prédit de nouveaux comportements. Ceux-ci seront peut-être observés soit en continuant à remonter l'histoire de la Terre, soit en regardant loin dans l'espace. Les progrès observationnels récents permettent d'étudier des étoiles éloignées. De nouveaux comportements de leurs champs magnétiques nous apporteraient alors quelques-unes des clés qui nous manquent encore. ■

Le Soleil subit lui aussi des « inversions » magnétiques

LE SOLEIL est l'une des 200 milliards d'étoiles de notre galaxie, la Voie lactée. Une étoile ordinaire, mais essentielle pour l'humanité. Les célèbres taches sombres qui apparaissent périodiquement à sa surface sont la principale signature de son activité.

Les premiers relevés furent établis dès le règne du Roi Soleil, en particulier à l'observatoire de Paris fondé en 1667. Mais elles ne sont comptabilisées avec régularité que depuis 250 ans. Les astronomes ont pu constater que ces taches solaires suivent un cycle de onze ans d'amplitude très variable qui semble modulé par une onde centennale. C'est ainsi que l'activité de notre étoile a été très faible sous Louis XIV, faible sous Napoléon et vers 1900. Une nouvelle période très calme semble se profiler à l'horizon 2030.

On doit à l'astrophysicien américain George Hale d'avoir découvert, en 1908, la nature magnétique des taches solaires en observant dans le spectre de raies d'absorption de la lumière (transitions atomiques) l'effet décrit par le physicien hollandais Pieter Zeeman en 1886. Les taches sont réparties en groupes de polarités opposées, grossièrement symétriques par rapport à l'équateur, mais leur ordonnancement en termes de polarités magnétiques est inversé entre les hémisphères Nord et Sud. En 1919, Hale remarqua au bout d'un cycle de onze ans un renversement des champs des deux hémisphères, démontrant ainsi



Jean-Marie
Malherbe

ASTRONOME À
L'OBSERVATOIRE DE PARIS

La rotation de l'étoile, plus rapide à l'équateur, cisaille le champ initial qui devient toroidal. Puis, l'émergence des taches du nouveau cycle régénère la composante poléoidale, mais renversée. Ce nouveau champ est alors transporté vers les pôles par une circulation dite méridienne, et l'inversion polaire est alors réalisée au maximum d'activité.

En attente des images du télescope japonais

Un cycle et demi magnétique d'observations, c'est peu. Les observations systématiques en cours seront renforcées au début de la prochaine décennie avec le futur télescope européen EST (4 mètres de diamètre) ainsi que son équivalent américain ATST.

Dans l'espace, SoHO a laissé la place en 2011 à SDO, premier satellite du programme de la Nasa Vivre avec une étoile. À l'horizon 2020, l'Europe ne sera pas en reste avec Solar Orbiter, qui sera positionné très près du Soleil et en dehors du plan de l'écliptique, lui offrant une vue inédite sur les pôles solaires. Enfin, le futur télescope spatial japonais de 1,50 mètre de diamètre devrait, lui aussi, fournir des images extraordinairement détaillées. Nous saurons alors si le Soleil s'enfonçait vers un nouveau minimum profond, et nous en comprendrions peut-être enfin les mécanismes. ■

Pour en savoir plus : www.lesia.obspm.fr/perso/jean-marie-malherbe/cycle/index.html