

# L'expérience VKS : apparition d'un champ magnétique dans un fluide conducteur turbulent

Avec le dispositif expérimental VKS, les équipes du CEA, du CNRS et des Écoles normales supérieures de Lyon et de Paris créent un champ magnétique par l'agitation d'un métal liquide. Elles reproduisent ainsi en laboratoire "l'effet dynamo" à l'origine du champ magnétique des étoiles et des planètes, à commencer par la nôtre, et ses avatars.



L'installation VKS au centre CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône).

A. Gonin/CEA

Quelle est l'origine des **champs magnétiques** cosmiques ? Pourquoi le champ magnétique terrestre se renverse-t-il de façon erratique ? (Mémo D, *Le champ terrestre, faible mais vital*, p. 99).

C'est pour répondre à ces questions que les chercheurs de la collaboration VKS <sup>(1)</sup> (CEA-CNRS-ENS Paris-ENS Lyon) ont réalisé une expérience qui s'est révélée fructueuse au centre CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône). Cette expérience a permis de mettre en évidence l'**effet dynamo**, c'est-à-dire la génération spontanée d'un champ magnétique dans un écoulement pleinement **turbulent** de **sodium** liquide. Elle a également montré, pour la première fois, des renversements erratiques et des basculements périodiques du champ magnétique qui présentent des similitudes étonnantes avec les dynamos naturelles.

La plupart des objets astrophysiques qui nous entourent possèdent un champ magnétique. Celui de la Terre est principalement **dipolaire** et connaît des alternances irrégulières de polarité. Le champ magnétique du Soleil est, quant à lui, cyclique, avec une période de 22 ans. L'origine de ces champs magnétiques est longtemps restée une énigme, en particulier en ce qui concerne le magnétisme terrestre, le premier à avoir suscité l'intérêt. En 1600, William Gilbert pensait par exemple que la Terre était un gros **aimant** tandis

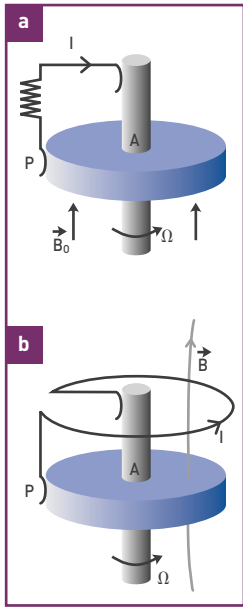
qu'en 1840, Gauss la croyait dotée d'un aimant en son centre. Mais bien que le champ magnétique possède toutes les apparences de celui généré par un tel aimant, la température au centre de la Terre est beaucoup trop élevée pour que les objets puissent y conserver leur **aimantation**. Ce n'est qu'en 1919 que Sir Joseph Larmor émit l'idée que le champ du Soleil pouvait être engendré par effet dynamo, une instabilité due au mouvement d'un fluide conducteur. Pour la Terre, composée en son centre d'un noyau de fer liquide, l'hypothèse était que son champ magnétique serait créé par ce même effet dynamo grâce à des mouvements de ce fluide.

## L'effet dynamo

L'effet dynamo consiste en la génération spontanée d'un champ magnétique qui s'auto-entretient. Le principe est celui à la base du fonctionnement des générateurs électriques décrits par Siemens à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle : l'énergie mécanique est convertie en énergie **électromagnétique**. Un effet dynamo peut donc se produire dans un milieu conducteur (solide ou liquide) en mouvement au-delà d'un certain seuil de vitesse des mouvements de ce milieu : un courant électrique circulant dans un milieu conducteur crée un champ magnétique et, réciproquement, un conducteur en mouvement dans un champ magnétique produit du courant électrique (figure 1).

■ (1) Pour Von Karman et Sodium.

Figure 1. En (a) la rotation à vitesse angulaire  $\Omega$  d'un disque soumis à un champ magnétique  $B_0$  engendre une force électromotrice et un courant pouvant circuler dans la résistance. (b) L'idée est alors de choisir la géométrie du circuit électrique afin d'utiliser le courant induit pour engendrer un champ magnétique. Dans ces conditions, une perturbation du champ engendre un courant qui à son tour amplifie ce champ si le sens de rotation est bien choisi en fonction de l'induction mutuelle entre le circuit et le disque, et si ce dernier tourne suffisamment vite pour compenser les pertes par effet Joule.



Dans les objets astrophysiques, les conditions ne sont pas les mêmes que dans un circuit électrique : les mouvements y sont aléatoires et très turbulents et les courants électriques n'y sont pas prescrits. L'enjeu pour les scientifiques est donc de montrer que des mouvements bien choisis et suffisamment vigoureux d'un fluide conducteur de l'électricité peuvent engendrer spontanément un champ magnétique au-delà d'un certain seuil. Bien que les équations régissant ce phénomène soient connues (équations de Maxwell et de Navier Stokes<sup>(2)</sup>, loi d'Ohm), les simulations numériques ne permettent pas encore de reproduire sans approximation les conditions des milieux naturels, les fluides y étant en particulier très turbulents. Il est donc nécessaire de réaliser des expériences dynamo de laboratoire.

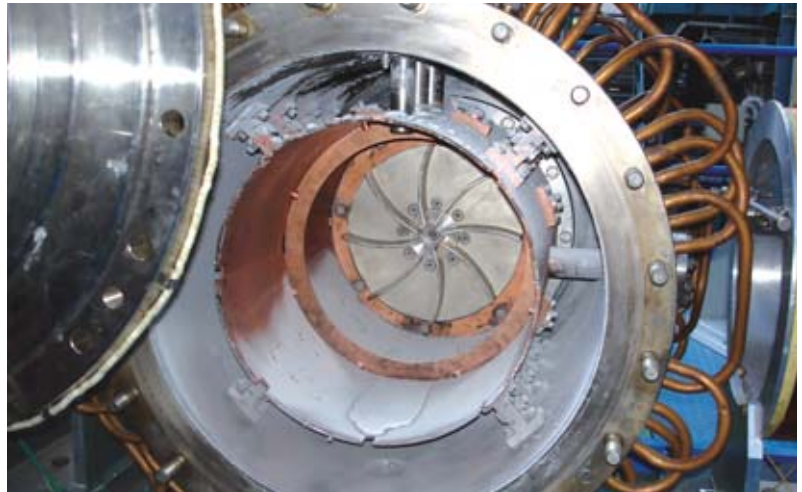
## Créer un champ magnétique en laboratoire

Du point de vue expérimental, deux étapes importantes ont permis de prouver que le concept de dynamo fluide était valide. En 1963, Lowes et Wilkinson ont d'abord montré que deux rotors solides tournant dans une matrice conductrice pouvaient créer un champ magnétique. Les mouvements des conducteurs sont imposés mais les courants sont libres. En 2000, les expériences de Riga et Karlsruhe ont remplacé le mouvement de rotors solides par un écoulement de sodium liquide. Mais cet écoulement est contraint à suivre une géométrie imposée. Les champs magnétiques engendrés sont simples, contrairement aux champs magnétiques des objets naturels qui ont, en général, des dynamiques complexes.

En 2007, la collaboration VKS – qui, comme cinq autres équipes dans le monde, conduit ses expériences avec des écoulements de sodium liquide – a réussi à créer en laboratoire un champ magnétique par effet dynamo, dans un écoulement pleinement turbulent plus proche des conditions naturelles, c'est-à-dire avec des mouvements et des courants non contraints.

Le sodium est un métal excellent conducteur de

(2) Équations de Navier-Stokes : équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans des milieux continus.



La cuve ouverte de l'expérience VKS permet d'en distinguer une des "turbines" contrarotatives.

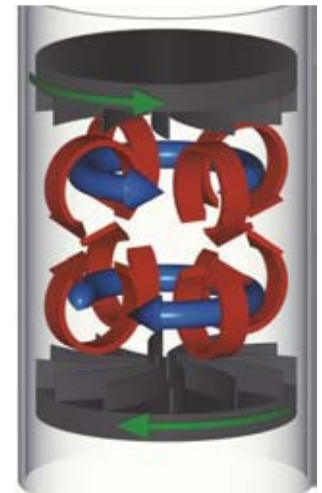
l'électricité, solide jusqu'à 98 °C. Au-delà de cette température, il est liquide avec une masse volumique et une viscosité toutes deux relativement modérées, ce qui permet des écoulements à grands nombres de Reynolds<sup>(3)</sup> comparables aux écoulements de fluides classiques tels que l'eau ou l'air. En revanche, le sodium brûle spontanément dans l'air et réagit très vivement avec l'eau, ce qui nécessite des dispositions particulières pour sa mise en œuvre.

Les expériences du programme se déroulent au CEA Cadarache, au Département des techniques nucléaires de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN). Les installations dédiées à l'usage du sodium liquide y sont choses courantes et bénéficient des années de développement des réacteurs à neutrons rapides de type Phénix qui utilisent ce sodium en très grande quantité comme caloporteur<sup>(4)</sup>.

## L'expérience VKS

Un écoulement de Von Karman<sup>(5)</sup> tourbillonnaire est produit par la rotation de deux "turbines" tournant en sens inverse dans un cylindre en cuivre rempli de sodium liquide. Le mouvement entraîne un fort cisaillement dans le plan médian et génère de part et

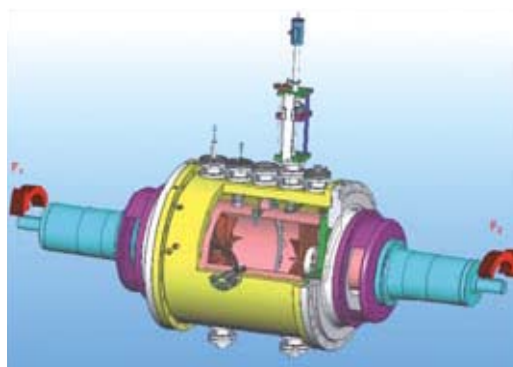
Figure 2. Schéma de l'écoulement moyen entre les deux turbines contra-rotatives. L'écoulement toroidal est représenté en bleu et le pompage poloïdal en rouge.



(3) Nombre de Reynolds : rapport des forces aérodynamiques aux forces de viscosité dans un écoulement. Il permet le calcul des caractéristiques de la couche limite et de la résistance au décollement.

(4) Ce type de réacteur nucléaire a besoin d'un caloporteur qui ne ralentit pas trop les neutrons et reste transparent aux neutrons : c'est le cas du sodium, métal sous forme liquide.

(5) écoulement de Von Karman : écoulement engendré par deux disques en contra-rotation dans une enceinte cylindrique avec une paroi latérale immobile.



Vue écorchée de l'expérience VKS au CEA/Cadarache.

d'autre, comme dans des pompes radiales, un effet de "pompage axial". L'ensemble est fortement fluctuant et le niveau de turbulence élevé (figure 2). Les dimensions, les conditions aux limites et la forme des turbines ont fait l'objet de nombreuses études théoriques, numériques et expérimentales. La cuve actuelle fait 60 centimètres de long pour un diamètre de 60 cm et a un volume de sodium d'environ 150 litres. Elle comprend une couche de sodium au repos qui entoure

l'écoulement, un anneau permettant de stabiliser la couche de cisaillement dans le plan médian et des turbines en fer pur. Les mesures du champ magnétique sont réalisées à partir de sondes immergées dans l'écoulement et les paramètres opérationnels de fonctionnement (pression, température, vitesse, puissance...) sont enregistrés (figure 3).

Lorsque les turbines tournent en exacte contra-rotation à une vitesse supérieure à 1 020 tours par minute (*vitesse critique*), un champ magnétique naît spontanément et est auto-entretenu par le mouvement du fluide. Ce champ est fortement fluctuant en raison de la turbulence élevée de l'écoulement. Ce résultat prouve que les dynamos fluides continuent à opérer en présence de turbulences fortes, telles qu'elles existent dans les conditions naturelles où la turbulence est omniprésente (figure 4).

Pour se rapprocher plus encore des conditions naturelles, les chercheurs de la collaboration ont fait tourner les turbines en contra-rotation à des vitesses différentes, ce qui revient à ajouter une rotation d'ensemble semblable à celle des planètes et des étoiles. Ils ont ainsi observé que le champ magnétique a alors un comportement plus riche que lorsque les turbines tournent à la même vitesse. Le champ magnétique évolue au cours du temps avec des renversements erratiques de sa direction. Il existe également des *excursions* au cours desquelles le champ magnétique décroît comme s'il allait s'inverser puis revient à sa valeur initiale (figure 5).

Figure 4. En (a), évolution temporelle des trois composantes du champ magnétique lorsque la vitesse de rotation est augmentée au-dessus du seuil (contra-rotation exacte). En (b), évolution des valeurs moyennes de ces composantes en fonction du nombre de Reynolds magnétique  $R_m$ , paramètre de contrôle proportionnel à la vitesse de rotation des turbines.

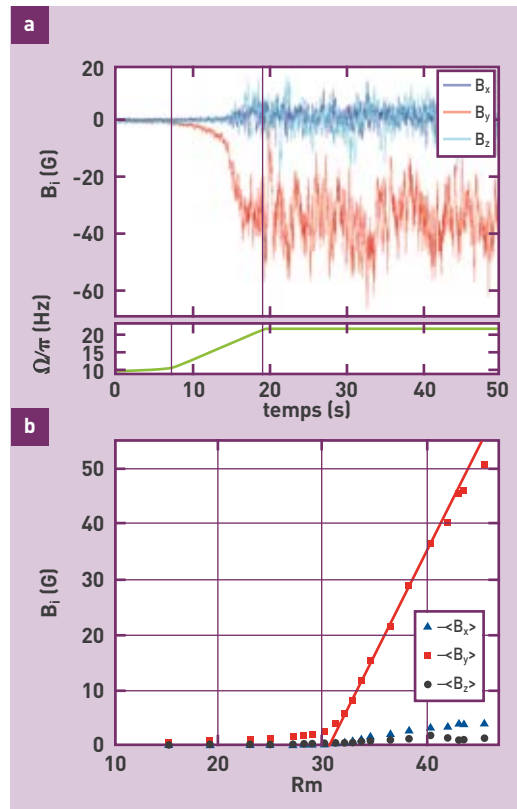


Figure 5. Évolution temporelle présentant les inversions erratiques du champ magnétique lorsque les deux turbines ne tournent pas à la même vitesse. L'une des turbines tourne ici à 960 tours/minute et l'autre à 1 320 tours/minute.

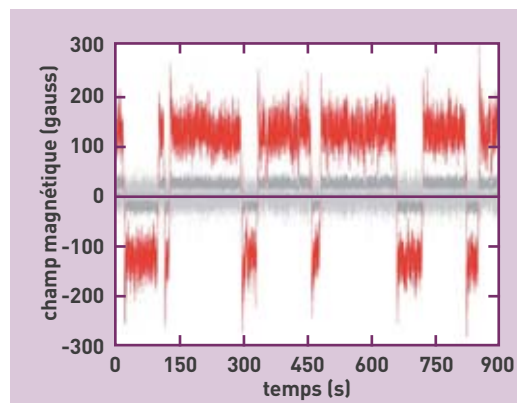
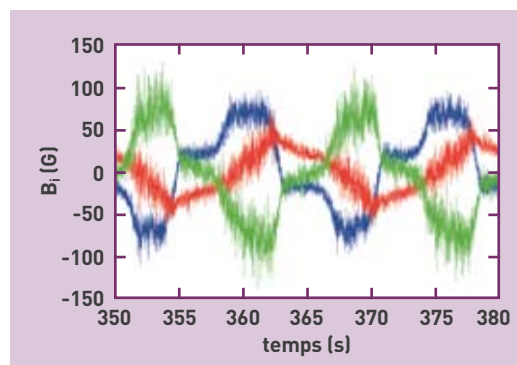


Figure 6. Oscillations périodiques du champ magnétique pour d'autres vitesses de rotation des turbines.



## De singulières similitudes avec le champ terrestre

Ces résultats, en particulier le dernier, mettent en évidence de singulières similitudes avec le champ magnétique terrestre. En effet, il est possible dans ces expériences d'observer, comme sur Terre, trois phénomènes. Le premier voit le champ passer d'un état de polarité à un état opposé avec des périodes de temps aléatoires et une durée de transition d'un état à l'autre très courte. Le deuxième est que si les périodes pendant lesquelles le champ est stable ont une durée variable, celle-ci est toujours plus longue que le temps nécessaire à un renversement. Le troisième phénomène est la présence d'excursions du champ, périodes durant lesquelles le champ décroît puis croît de nouveau sans changer de polarité.

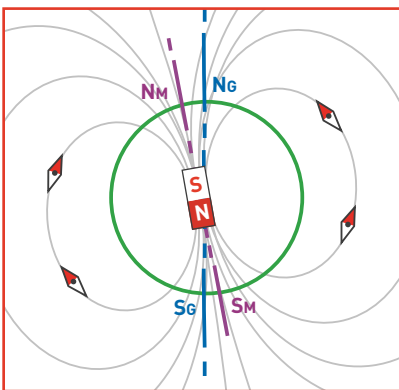
Pour d'autres vitesses de rotation, le champ magnétique peut s'inverser de manière périodique, en tournant dans l'espace sans s'annuler, comme cela est observé, par exemple dans le Soleil (figure 6). Ce résultat de l'expérience VKS montre que certaines caractéristiques de la dynamo terrestre peuvent être étudiées "au laboratoire" dans des situations bien contrôlées. De plus, la richesse des régimes observés laisse entrevoir la possibilité de comprendre pourquoi des dynamos différentes peuvent être observées pour des objets naturels *a priori* similaires (Vénus, par exemple, ne possède pas de champ magnétique) ou pourquoi la durée du cycle d'activité magnétique des étoiles semble dépendre de leur vitesse de rotation.

► François Daviaud

Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis)  
Direction des sciences de la matière  
CEA Centre de Saclay

# Le champ terrestre, faible mais vital

La Terre possède son propre **champ magnétique**, se comportant comme un énorme **aimant**. Son étude relève du **géomagnétisme**. Ce champ peut, en première approximation, être assimilé à celui d'un **dipôle** centré dont l'axe ne coïncide d'ailleurs pas avec celui de la rotation de la Terre puisqu'ils forment actuellement un angle de  $11,5^\circ$ , valeur qui évolue au cours du temps en fonction des mouvements du noyau de la planète (figure).



L'angle formé entre la direction du pôle nord *magnétique* et celle du pôle nord *géographique*, ou **déclinaison magnétique**, varie d'un point de la surface du Globe à l'autre. L'angle formé par le vecteur du champ magnétique et la surface terrestre est l'**inclinaison magnétique**.

Au dipôle centré sont associées des lignes de champ magnétique qui relient le pôle Sud au pôle Nord. Les deux points où les **lignes de champ** convergent et sont verticales à la surface du globe correspondent aux **pôles magnétiques**, respectivement situés aujourd'hui au Canada et en Terre Adélie. Le pôle Nord magnétique (qui correspond au pôle Sud de l'aimant que constitue la planète) est celui sur lequel s'aligne l'aiguille des boussoles.

Le champ magnétique terrestre est un champ relativement faible, de l'ordre de  $0,5$  **gauss**, soit  $5 \cdot 10^{-5}$  **tesla** (valeur à Paris, par exemple). Il est créé par l'**effet dynamo** engendré par les mouvements du noyau de la planète. Le pôle Nord magnétique se déplace d'une centaine de kilomètres par an. Même si l'intensité du dipôle n'est pas très forte, les lignes du champ dipolaire forment un écran vis-à-vis de toute particule chargée et mettent les Terriens à l'abri des rayonnements cosmiques. Comme d'autres planètes du système solaire (Mercure, Jupiter, Saturne, Uranus

et Neptune), la Terre possède ainsi une **magnétosphère** qui protège sa surface du vent solaire mais ce dernier déforme les lignes de son champ magnétique.

Le champ magnétique terrestre est loin d'être uniforme. Il présente des **anomalies magnétiques**, déviations de la force du champ constatées par rapport au modèle global, qui peuvent être importantes à l'échelle de toute une région. C'est le cas de l'*anomalie de l'Atlantique Sud*, qui n'est pas sans conséquence sur la dose de rayons cosmiques reçue par les équipages et les passagers des avions et des vaisseaux spatiaux qui la traversent.

D'autres composantes plus faibles du champ magnétique terrestre, dites *non dipolaires*, se superposent au dipôle principal et ont des constantes de temps beaucoup plus courtes que celles du dipôle; elles n'ont pas d'effet significatif au-delà de la surface terrestre.

Au cours des temps géologiques, le champ magnétique de la Terre a subi de fortes fluctuations, vécu des périodes d'instabilité importantes dont aucune n'est véritablement périodique, et connu plusieurs inversions de ses pôles magnétiques. En témoignent les empilements de coulées de lave ou les séquences sédimentaires qui s'accumulent au fond des océans. Ces deux types de roches ont, en effet, la capacité de rester magnétisées dans la direction du champ magnétique existant lors de leur refroidissement à la **température de Curie** (**point de Curie**), un peu en dessous de  $500^\circ\text{C}$ , et donc de garder la mémoire du champ magnétique régnant à la surface du Globe pendant ce refroidissement (ou pendant leur dépôt *via* les petits grains magnétiques qui les composent). C'est le phénomène de **rémanence magnétique** qui a permis le développement du **paléomagnétisme**. La direction du champ rémanent, qui peut être complètement différente de la direction du champ local actuel, est caractéristique du champ local lors de la formation de la roche. Les roches volcaniques, après avoir traversé l'écorce terrestre à une température supérieure au point de Curie des minéraux qui les composent, se refroidissent et s'aimantent sous l'effet du champ terrestre au passage de ce point dans le sens inverse. Moins sensibles au phénomène, les roches sédimentaires voient les particules magnétiques s'orienter dans la direction du champ terrestre lors de la sédimentation et conser-

ver cette orientation. Les sédiments qui se déposent dans les fonds océaniques contiennent des minéraux magnétiques dont le plus facile à détecter est la célèbre magnétite. Cette aimantation est proportionnelle à l'intensité du champ et n'évolue pas à la température ordinaire. Mais d'autres facteurs influent sur l'aimantation rémanente: l'action continue du champ terrestre, les champs intenses ponctuels (dus par exemple à la foudre) et la cristallisation qui peut en modifier l'intensité ou la direction.

## Renversements et excursions du champ

Le champ magnétique terrestre connaît deux types d'instabilités, les *renversements* et les *excursions*. Les renversements correspondent à des inversions des pôles Sud et Nord magnétiques, dont la plus récente a eu lieu il y a environ 790 000 ans. Ce type d'inversions a été mis en évidence pour la première fois en 1906 en France par Bernard Brunhes, mais il a fallu attendre les années 1960 pour que les études se multiplient et établissent que ces phénomènes d'inversion sont vraiment une caractéristique globale du champ magnétique terrestre. Elles ont surtout montré qu'ils se produisaient de façon erratique et imprédictible, avec une alternance de polarité stable pendant de longues périodes (plusieurs centaines de milliers d'années) et de renversements rapides (quelques milliers d'années) et que le taux de renversement avait augmenté au cours de la dernière centaine de millions d'années, passant de un, au début de cette période, à quatre renversements par million d'années pendant les cinq derniers millions d'années, la période "normale" actuelle semblant donc "anormalement" longue.

Les excursions géomagnétiques sont des instabilités de plus courte durée. Si, comme pour les inversions, la polarité s'inverse complètement, la polarité initiale se rétablit aussitôt. Les études menées au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE/CEA-CNRS-université de Versailles-Saint-Quentin-en-Yvelines) ont montré que la durée d'une excursion est de l'ordre de 1500 ans, apportant une première vérification de la théorie du géophysicien anglais David Gubbins selon laquelle les excursions ne se produisent que dans le noyau externe *fluide* de la Terre et non pas dans le noyau *solide*.

# Les différentes formes de magnétisme

Le **magnétisme** trouve essentiellement son origine dans les propriétés des **électrons** telles qu'elles sont expliquées par la **physique quantique**. Leur état quantique de **spin** est responsable d'une première partie du magnétisme (*magnétisme de spin*). Une deuxième partie est imputable au mouvement orbital des électrons autour du noyau de l'**atome** (*magnétisme orbital*) et également au magnétisme du **noyau** lui-même (*magnétisme nucléaire*), notamment mis à profit dans les techniques d'imagerie médicale par **résonance magnétique nucléaire**. Le magnétisme est donc produit par des charges électriques en mouvement. La force agissant sur ces charges, dite **force de Lorentz**, traduit la présence d'un **champ magnétique**.

L'électron possède un **moment magnétique** élémentaire (le **quantum** magnétique étant le *magnéton* imaginé par Bohr) qui peut être associé à l'image de son mouvement de rotation du **spin** sur lui-même dans un sens ou dans l'autre, orienté vers le haut ou vers le bas. Le **nombre quantique de spin** (un des quatre nombres qui "quantifient" les propriétés de l'électron) est égal à  $1/2$  ( $+ 1/2$  ou  $- 1/2$ ). Une paire d'électrons ne peut occuper la même *orbitale* que si l'un et l'autre sont de moments magnétiques opposés.

Chaque atome peut être assimilé à un petit aimant porteur d'un moment magnétique élémentaire. Le spin du noyau (**neutron** et **proton** ont eux-mêmes un spin demi-entier) est demi-entier si le **nombre de masse** est impair ; nul si le nombre de masse et la charge sont pairs, et entier si le nombre de masse est pair et la charge impaire. De nombreux moments magnétiques peuvent, à une échelle plus importante, constituer des **domaines magnétiques** dans lesquels tous ces moments sont orientés

dans la même direction. Ces régions de l'espace sont séparées entre elles par des **parois**. Rassemblés, ces domaines peuvent eux-mêmes constituer un **aimant** à l'échelle macroscopique (figure E1).

De l'organisation de ces constituants élémentaires dépend la manifestation de différents types de magnétisme, associés traditionnellement à trois grandes familles de matériaux : *ferromagnétiques*, *paramagnétiques* et *diamagnétiques*.

Tous les matériaux qui ne sont pas diamagnétiques sont par définition paramagnétiques, dans la mesure où leur **susceptibilité magnétique** est positive, mais cette susceptibilité est particulièrement élevée dans les ferromagnétiques, qui constituent donc en eux-mêmes une famille.

1. Les matériaux **ferromagnétiques** sont constitués de petits domaines à l'intérieur desquels les atomes, présentant une **aimantation** parallèle, tendent à s'aligner comme autant de **dipôles** élémentaires dans la direction d'un **champ magnétique** extérieur. Les moments magnétiques de chaque atome peuvent s'aligner spontanément dans ces domaines, même en l'absence de champ extérieur. En présence d'un tel champ, les parois se déplacent et tendent à renforcer le champ appliqué. Si celui-ci dépasse une certaine valeur, le principal domaine orienté dans la direction du champ tendra à occuper tout le volume du matériau. Si le champ diminue, les parois se déplacent, mais pas de façon symétrique, une partie du mouvement "aller" des parois étant irréversible : il subsiste donc une **magnétisation rémanente**, importante dans les aimants proprement dits ou la magnétite naturelle.

L'ensemble du processus constitue un **cycle d'hystérésis**, la relation du champ induit au champ extérieur dessinant une *boucle*

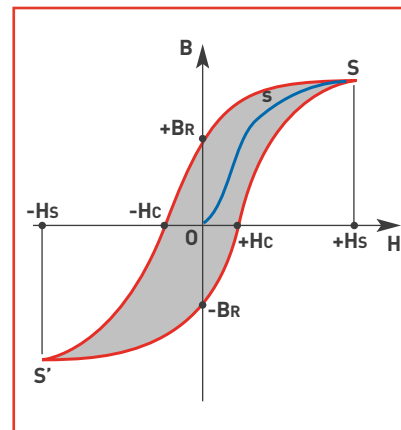


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OsS en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend vers zéro ; cette induction rémanente ne peut être annulée que par une inversion du champ magnétique jusqu'à une valeur de champ "coercitif". Le cycle d'hystérésis traduit des pertes "par frottement" entre les domaines magnétiques. Ces pertes sont représentées par la surface que délimitent les courbes d'aimantation et de désaimantation.

ou *courbe d'hystérésis* dont la surface représente l'énergie perdue dans la partie irréversible de ce processus (figure E2). Pour annuler le champ induit, il faut appliquer un **champ coercitif** : les matériaux avec lesquels les aimants permanents artificiels sont réalisés présentent une valeur élevée de champ coercitif.

En général, le moment magnétique total des matériaux ferromagnétiques est nul, les différents domaines ayant des orientations différentes. Le ferromagnétisme disparaît si on dépasse une certaine température appelée **point de Curie**.

Le couplage collectif des spins entre centres métalliques du matériau ou d'un complexe de **métaux de transition** explique les propriétés magnétiques du matériau, les moments de tous les spins se trouvant tous orientés de manière identique.

Les matériaux dont les atomes sont éloignés les uns des autres dans leur structure **crystalline** favorisent un alignement de ces aimants élémentaires par couplage. Le fer, mais aussi le cobalt, le nickel et leurs **alliages**, en particulier les aciers, et certains de leurs composés appartiennent à cette catégorie caractérisée par une susceptibilité magnétique positive et très élevée, ainsi que,

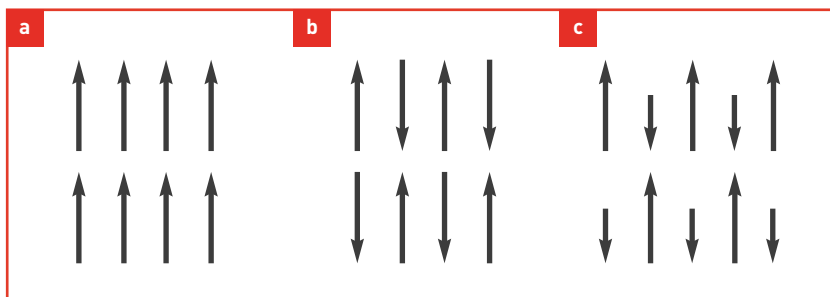


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



Stoiber Productions, München

Arrivée à la gare routière de Long Yang, à Shanghai (Chine), d'un train à sustentation magnétique du type Transrapid, d'origine allemande, mis en service en 2004 pour relier la ville à l'aéroport international de Pudong.

plus faiblement, certains métaux de la famille des **terres rares**, quelques alliages dont les mailles sont grandes et certaines combinaisons d'éléments n'appartenant pas eux-mêmes à cette famille.

Dans les matériaux **ferrimagnétiques**, les domaines magnétiques constituent des ensembles pouvant être alignés dans des sens opposés (anti-parallèles), mais leur moment magnétique résultant diffère de zéro alors que le champ extérieur est nul (exemples de la magnétite, de l'ilménite ou des oxydes de fer). Le ferrimagnétisme s'observe dans des matériaux comportant deux types d'atomes se comportant comme des aimants de force différente et orientés en sens contraire. Si la somme des moments parallèles et anti-parallèles est nulle, il s'agit d'**anti-ferromagnétisme** (exemple du chrome ou de l'hématite). En effet, si les atomes sont plus rapprochés, la disposition la plus stable est celle d'aimants antiparallèles, chacun compensant en quelque sorte son voisin (figure E1).

**2.** Les matériaux **paramagnétiques** présentent un comportement de même nature que les ferromagnétiques, bien que beaucoup moins intense (leur susceptibilité magnétique est positive mais très faible, de l'ordre de  $10^{-3}$ ). Chaque atome d'un tel matériau a un moment magnétique non-nul. Sous l'action d'un champ extérieur, les moments magnétiques s'orientent et augmentent ce champ, qui décroît cependant avec la température, l'agitation thermique désorientant les dipôles élémentaires. Les matériaux paramagnétiques perdent leur aimantation dès qu'ils ne sont plus soumis au champ magnétique. La plupart des métaux, y compris des alliages d'éléments ferromagnétiques, font partie de cette famille, ainsi que des minéraux comme la pegmatite.

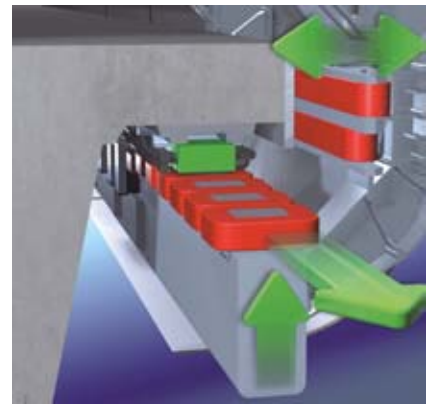
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

tent une susceptibilité magnétique négative et extrêmement faible (de l'ordre de  $10^{-5}$ ). La magnétisation induite par un champ magnétique s'opère dans la direction opposée à ce dernier : ils ont donc tendance à s'éloigner le long de ses **lignes de champ** vers les zones de faible champ. Un diamagnétique parfait offrirait une résistance maximale au passage du champ magnétique et présenterait une **perméabilité** nulle. Les métaux comme l'argent, l'or, le cuivre, le mercure ou le plomb, le quartz, le graphite, les gaz rares ainsi qu'une grande majorité des composés organiques se rangent dans cette catégorie.

En fait, tous les corps présentent peu ou prou ce phénomène de diamagnétisme, imputable à la déformation des orbitales électroniques des atomes sous l'action d'un champ extérieur, phénomène réversible avec la disparition du champ extérieur. Comme Michael Faraday l'a montré en son temps, toute substance est donc plus ou moins "magnétisable" pour autant qu'elle soit placée dans un champ magnétique suffisamment intense.

### L'électromagnétisme

C'est le Danois Hans Christian Ørsted, professeur à l'Université de Copenhague qui, le premier, a fait autour de 1820 le lien entre les deux domaines jusqu'alors complètement séparés de l'**électricité** et du **magnétisme**. Il a mis en évidence la déviation de l'aiguille d'une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, avant que Faraday n'énonce la loi qui porte son nom : le champ magnétique produit est d'autant plus fort que l'intensité du courant est importante. La discipline qui étudie les champs magnétiques statiques (ne dépendant pas du temps) est la **magnétostatique**. Le **champ magnétique** forme, avec le **champ**



Vue de détail des aimants pour le guidage et la propulsion du train.

**électrique**, les deux composantes de l'**électromagnétisme**. Des ondes peuvent se propager librement dans l'espace, et dans la plupart des matériaux, dans tous les domaines de longueur d'onde (ondes radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma). Les **champs électromagnétiques** sont donc une combinaison de **champs de force** électriques et magnétiques naturelle (le champ magnétique terrestre) ou non (de basses fréquences comme les lignes et les câbles électriques, ou de plus haute fréquence comme les ondes radio (téléphone cellulaire compris) ou de télévision).

Mathématiquement, les lois de base de l'électromagnétisme sont résumées dans les quatre **équations de Maxwell** (ou **de Maxwell-Lorentz**) qui permettent de décrire l'ensemble des phénomènes électromagnétiques de manière cohérente, de l'électrostatique et la magnétostatique à la propagation des ondes. James Clerk Maxwell les a formulées en 1873, trente-deux ans avant qu'Albert Einstein ne place la théorie de l'électromagnétisme dans le cadre de la **relativité restreinte**, qui expliquait ses incompatibilités avec les lois de la physique classique.