

# La lévitation magnétique au secours des lanceurs spatiaux

Utiliser la force agissant sur un corps diamagnétique ou paramagnétique placé dans un champ magnétique statique constitue un moyen original de compenser la force de gravité. Il permet d'étudier sur terre, paradoxalement plus simplement et plus économiquement qu'en vol, le comportement des fluides dans l'espace, en particulier des ergols cryogéniques des lanceurs de satellites.

Il existe aujourd'hui un intérêt très marqué pour l'étude du comportement des fluides dans l'espace, en particuliers des ergols<sup>(1)</sup> **cryogéniques** (hydrogène et oxygène liquides) des lanceurs spatiaux comme Ariane. Pour des raisons de sécurité, l'expérimentation sur ces fluides en **microgravité** (encadré 1) par les moyens classiques se révèle quasi impossible. Une autre solution existe : la lévitation magnétique permet pour certains corps (**paramagnétiques** ou **diamagnétiques**) de compenser les forces de pesanteur en utilisant la force agissant sur de tels corps placés dans un **champ magnétique** statique (encadré 2). Il est ainsi possible de recréer au sol des conditions de microgravité et ainsi de mener des expériences qui seraient d'un coût beaucoup plus élevé si elles étaient conduites en orbite. De fait, si dans la plupart des cas l'influence de la gravité a d'abord été mise en évidence lors d'expériences au niveau spatial, elle a été ensuite confirmée par des expériences similaires réalisées en utilisant la *lévitation magnétique*. Certes, les conditions de microgravité obtenues par cette technique diffèrent sensiblement de celles obtenues dans l'espace, la principale différence étant l'ajout d'un champ magnétique. Cependant, pour les cas où ce champ n'intervient pas ou peu, la lévitation magnétique est une technique très avantageuse, même si la mise en œuvre de **bobinages supraconducteurs** implique l'utilisation de technologies associées complexes (vide, cryogénie).

Depuis une dizaine d'années, le Service des basses températures (SBT) du centre CEA de Grenoble réalise ce type d'expériences dans une installation équipée d'une bobine supraconductrice refroidie à l'**hélium** liquide. Cette bobine permet de compenser dans l'hydrogène liquide, qui est diamagnétique, les forces de gravité par des forces magnétiques. Fournissant un champ magnétique de 10 **teslas** (20 000 fois le champ magnétique terrestre), elle permet de sustenter un volume d'environ 100 mm<sup>3</sup>.

## Le défi d'OLGA

Tout récemment, grâce au soutien du **Cnes** et du groupe **Air Liquide** (centre de Sassenage en Isère), le SBT a mis en service une nouvelle station de lévitation magnétique nommée OLGA (Oxygen Low

(1) Ergols : corps chimiques (carburants et comburants) utilisés pour la propulsion (d'où le nom de propergols) des moteurs-fusées, sous forme liquide (souvent le couple hydrogène-oxygène) ou solide (mélange de perchlorate d'ammonium, d'aluminium et de polybutadiène, par exemple).



La bobine supraconductrice de la station OLGA, au centre CEA de Grenoble.

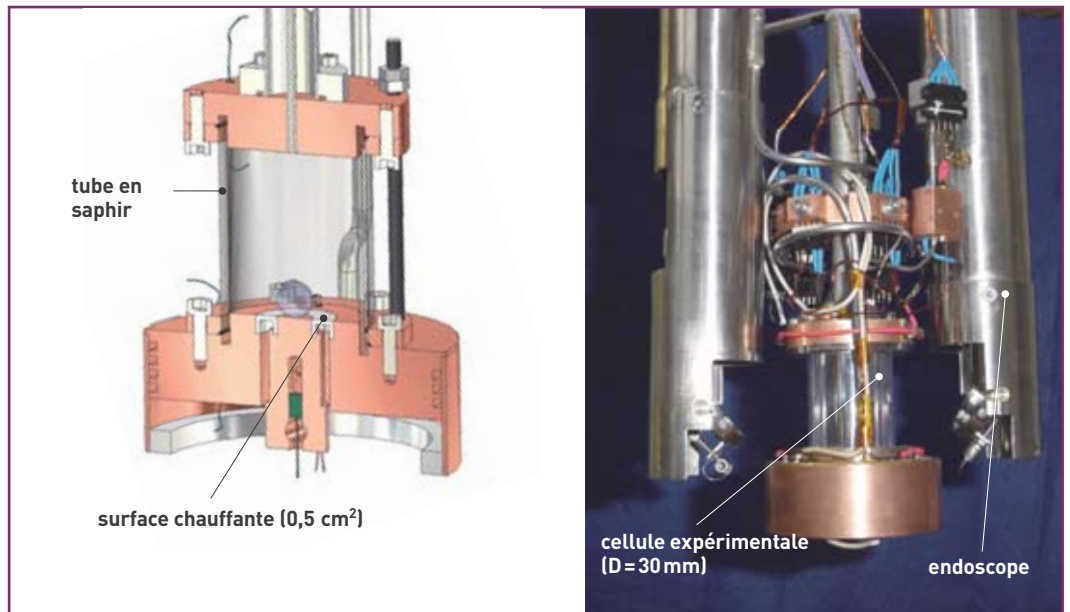


Figure 1. La cellule expérimentale d'OLGA de 25 cm<sup>3</sup> (à gauche) et entourée de ses endoscopes (à droite).

Gravity Apparatus). Cette installation permet de soutenir plusieurs cm<sup>3</sup> d'oxygène liquide, qui est, lui, paramagnétique et donc plus sensible au champ magnétique. Un programme expérimental lié à l'étude du comportement de ce fluide en microgravité y est en cours. Il concerne en particulier l'étude des transferts thermiques en régime d'ébullition.

OLGA est dotée d'une bobine supraconductrice (illustration 1) d'un diamètre extérieur de 650 mm, d'une hauteur de 580 mm et d'un diamètre intérieur de 330 mm. Pour fonctionner, elle doit être immergée dans de l'hélium liquide à une température de 4,2 K (-269 °C) et donc être placée dans un **cryostat** pendant les expériences. Elle délivre un champ magnétique de 2 teslas suffisant pour communiquer à l'oxygène liquide une force capable de s'opposer à la gravité terrestre.

## Impesanteur et microgravité

1

La **gravité** joue un rôle majeur dans de nombreux mécanismes physiques. Son importance est apparue avec les premiers vols spatiaux qui ont permis d'atteindre l'état de **microgravité**. Microgravité car l'*impesanteur*<sup>(1)</sup> est un état théorique et idéal qui n'existe pas en pratique à bord d'un véhicule spatial : il y subsiste toujours des forces parasites, donc une pesanteur résiduelle. C'est pourquoi on parle de *micropesanteur*, dont la valeur est proche du millionième de la pesanteur terrestre.

En orbite stable, ces vols sont caractérisés par une compensation quasi-totale de la pesanteur en raison de la force inertielle due à l'accélération centripète sur sa trajectoire orbitale d'un engin ayant atteint la vitesse suffisante (environ 8 km/s pour un satellite en orbite terrestre basse). L'absence de gravité permet de faire apparaître, modifier, ou disparaître des phénomènes ou comportements liés à la pesanteur dans les expériences effectuées à la surface du sol. Ainsi, la **convection** thermique classique, due à l'existence de la pesanteur, est profondément modifiée en conditions spatiales.

Il existe plusieurs moyens de se placer en conditions de microgravité, pour des durées variant de quelques secondes à plusieurs mois. La microgravité peut être obtenue en utilisant au sol des tours de chute libre, par des vols paraboliques en avion (Airbus A300 "zéro G" en Europe), par des fusées sondes ou enfin en vol orbital, essentiellement aujourd'hui à bord de la station spatiale internationale (ISS). Ces différents moyens offrent également des niveaux de microgravité et des capacités d'expérimentation variables.

En fait, la gravité zéro obtenue en orbite l'est uniquement par des effets inertiels, c'est-à-dire que la compensation agit sur l'ensemble du corps et chacun de ses constituants (noyaux et électrons). Dans le cadre de la lévitation magnétique, en revanche, les forces magnétiques agissent essentiellement sur les **électrons** et c'est uniquement la grande cohésion des **atomes** qui fait que les **noyaux**, et donc le reste du corps, "suivent" et lèvitent. Dans un système physique associant plusieurs matériaux de **susceptibilités** différentes, la compensation ne peut être effective que pour le matériau obéissant à cette condition.

(1) Au terme *apesanteur* du langage courant, est aujourd'hui préféré celui d'*impesanteur*, en raison de la confusion orale possible entre "la pesanteur" et "l'apesanteur".

Les phénomènes physiques sont étudiés dans une cellule expérimentale en saphir de 30 mm de diamètre et de 50 mm de hauteur (figure 1). Deux endoscopes permettent l'observation du fluide, en l'occurrence l'oxygène liquide. La cellule et ses endoscopes sont placés dans un tube sous vide appelé *anti-cryostat*. Pendant les expériences, le tube est introduit au centre de la bobine à une hauteur bien précise, là où la force magnétique est maximale. Le centre de la base de la cellule est équipé d'un élément chauffant qui peut délivrer une puissance de 17 watts. Cet élément permet de faire bouillir l'oxygène, et ainsi d'étudier comment l'ébullition de l'oxygène se produit, avec ou sans gravité.

### L'ébullition revisitée pour Vinci

Les premières expériences réalisées sur OLGA ont concerné l'étude des transferts thermiques en régime d'ébullition sous gravité réduite. Ces études, menées en collaboration avec Air Liquide et le Cnes, intéressent fortement les concepteurs, chez **Snecma**, du moteur Vinci qui doit équiper un futur étage supérieur cryotechnique de la fusée Ariane 5, envisagé un temps sous le nom d'ESC-B. Il est en effet prévu de pouvoir rallumer ce moteur cryogénique dans l'espace après une période de vol balistique, c'est-à-dire sans propulsion, uniquement sous l'effet résultant de l'impulsion initiale et de la gravitation. Les ergols (oxygène et hydrogène liquides) se trouvent alors en contact avec des surfaces chaudes qu'il faut refroidir comme lors du premier allumage. Il est donc nécessaire d'acquérir des connaissances dans ce domaine des transferts thermiques encore mal connu.

## L'oxygène beaucoup plus facile à sustenter que l'hydrogène

2

La force par unité de volume que subit un corps **diamagnétique** ou **paramagnétique** placé dans un **champ magnétique** statique d'**induction magnétique**  $B$  est donnée par la relation suivante :

$$\vec{f} = \frac{1}{2\mu_0} \chi_m \text{grad}(B^2)$$

où  $\chi_m$  est la **susceptibilité magnétique** du corps et  $\mu_0$  est la **perméabilité magnétique** du vide. En définissant le vecteur  $G$  comme le produit du gradient de  $B$  par l'induction  $B$  ( $G = \text{grad}(B^2)$  en  $T^2/m$ ), la condition de compensation exacte de la gravité  $g$  (accélération de la pesanteur) s'écrit :

$$G = \frac{2\mu_0 g \rho}{\chi_m}$$

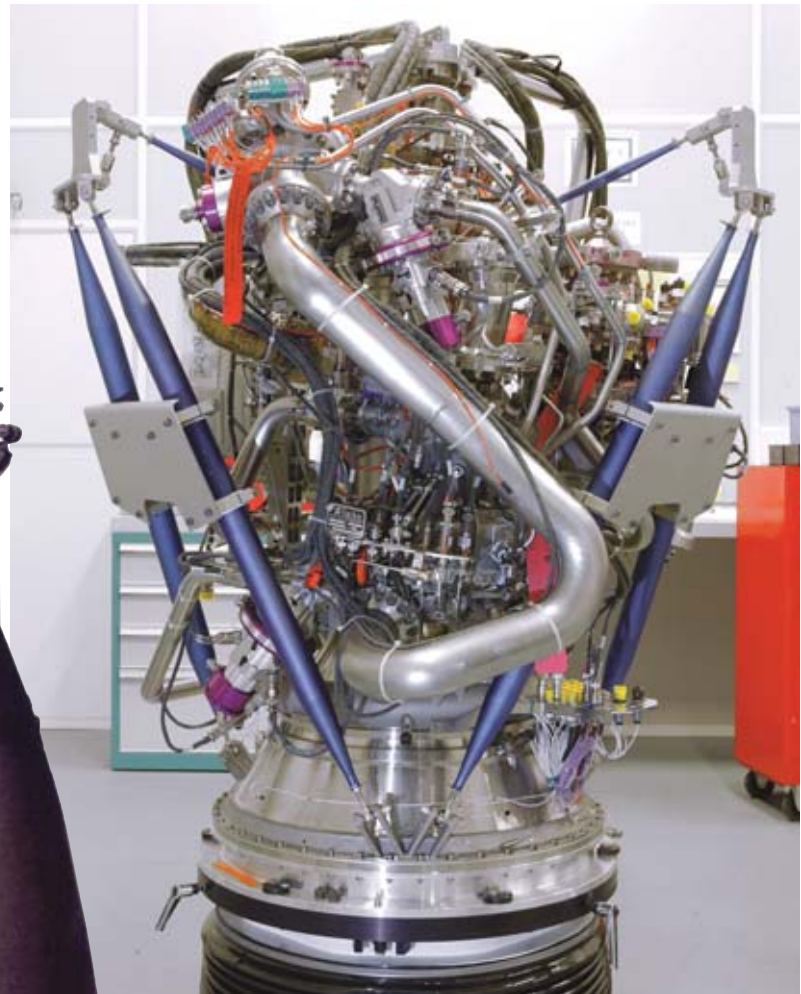
où  $\rho$  est la masse volumique du corps considéré. L'examen des valeurs de  $G$  requises pour compenser exactement la pesanteur pour quelques substances (tableau) montre ainsi qu'il est beaucoup plus facile de sustenter de l'oxygène liquide – qui a une valeur de  $G$  positive car c'est un corps paramagnétique<sup>(1)</sup> – que de l'eau ou de l'hydrogène liquide.

L'obtention de telles valeurs de  $G$  sur des volumes d'au moins quelques  $\text{cm}^3$  suppose de pouvoir atteindre des valeurs d'induction magnétique de plusieurs teslas. Ces forts champs magnétiques peuvent être créés en utilisant des **bobines supraconductrices** qui permettent d'atteindre des inductions importantes dans des volumes significatifs. Une optimisation plus poussée de ces aimants pourrait éventuellement ouvrir de nouveaux domaines, au-delà de l'hydrogène, en lévitant par exemple de l'eau et, partant, des **protéines** ou même des corps vivants (encadré 3).

substance	$G$ ( $T^2/m$ )
hydrogène liquide	-1 000
deutérium	-2 000
eau (1 °C)	-2 796
hélium	-3 900
oxygène (90 K)	8
oxygène (71 K)	7

(1) La susceptibilité magnétique est positive et dépendante de la température pour les substances paramagnétiques, alors qu'elle est négative et indépendante de la température pour les substances diamagnétiques.

C'est tout le mécanisme de l'ébullition qu'il faut revisiter. Que se passe-t-il sur Terre lorsqu'un récipient d'eau est posé sur une flamme? Si celle-ci est de faible intensité, des mouvements de **convection** de l'eau pourront être observés: le liquide qui est au fond se réchauffe et monte à la surface car, en se réchauffant, il devient plus léger alors que le liquide froid descend. Si on augmente l'intensité de la flamme, des bulles vont apparaître au fond du récipient et monter vers la surface. Les mécanismes de convection et d'ascension des bulles ne sont possibles que grâce à la gravité terrestre qui donne naissance à la poussée d'Archimède. Mais que se passerait-il dans le récipient si la gravité était nulle? C'est tout l'objet des expériences qui sont menées avec OLGA. Les chercheurs ont pu observer ce qui se produit lorsque la gravité passe de  $1g$  à  $0g$ , comme l'illustre bien la figure 2. L'intensité du chauffage de la cellule a d'abord été réglée de façon à ce que le régime d'ébullition soit bien développé. Le courant dans la **bobine** d'OLGA a été ensuite progressivement augmenté de façon à ce que la gravité soit peu à peu compensée par la force magnétique. Il est ainsi possible d'observer qu'au fur et à mesure que la gravité baisse, la vitesse ascensionnelle des bulles diminue, que la fréquence de détachement des bulles diminue également et que la taille des bulles augmente d'une façon bien corrélée avec la théorie. Lorsque



Moteur Vinci en développement. Ce moteur à hydrogène et oxygène liquides a effectué ses premiers essais de réallumage au banc d'essais de Lampoldshausen (Allemagne) en 2007. En médaillon, le moteur complet avec son divergent déployable.

Sncma/Eric Forterre

## Acquis et perspectives de la lévitation magnétique

3

Les progrès et résultats obtenus ces dernières années prouvent que la lévitation magnétique est une technique fiable, promise à un bel avenir. Elle permettra d'explorer de nouveaux horizons, sous réserve de développer des configurations magnétiques inédites, dédiées spécifiquement à la compensation de la gravité, et de ne plus se contenter de réutiliser des **solénoïdes supraconducteurs** détournés de leur vocation initiale, c'est-à-dire générer un champ magnétique important en leur centre.

En utilisant les derniers développements technologiques (nouvelles configurations associées à de nouveaux matériaux supraconducteurs permettant de travailler à des valeurs d'**induction** encore plus élevées), ces futurs aimants permettront d'obtenir des volumes de lévitation plus grands (jusqu'à plusieurs cm<sup>3</sup> d'eau ou plusieurs centaines de cm<sup>3</sup> d'oxygène liquide) et un meilleur niveau de gravité résiduelle (inférieure à 1 % de la gravité), de manière à concurrencer ou même remplacer certaines expérimentations spatiales. C'est la lévitation magnétique de l'eau, réalisée pour la première fois il y a plus de quinze ans par E. Beaugnon et R. Tournier (CRETA-CNRS Grenoble), qui a ouvert la voie à de nombreuses expériences de microgravité au sol dans plusieurs domaines pour lesquels la gravité est un paramètre important.

En biotechnologies, la principale application est la **croissance cristalline** pour laquelle la lévitation magnétique permet d'obtenir des **protéines** pures pour ensuite réaliser leur analyse structurale. La gravité intervient en effet directement dans les mécanismes de **convection** : la diminuer revient donc à augmenter la pureté des protéines. Dans le domaine des matériaux et des alliages,

la production de cristaux et le contrôle des défauts de croissance ont été explorés. En chimie, la lévitation magnétique peut améliorer la compréhension des réactions, en particulier de **polymérisation**. En physique des fluides, l'exemple des ergols cryogéniques montre l'intérêt de la lévitation magnétique pour les études hydrodynamiques (étude de phénomènes critiques, dynamiques des interfaces...).

Il n'est jusqu'à la **fusion par confinement inertiel** qui pourrait faire appel à la lévitation magnétique. Dans le cadre d'un contrat **Euratom**, le SBT, en collaboration avec le SACM, a naguère étudié l'idée de réaliser la solidification de cibles cryogéniques, en les plaçant dans une zone de microgravité, homogène, créée par un aimant supraconducteur. Le SBT a établi que la lévitation magnétique pouvait être un moyen intéressant d'obtenir une couche de deutérium liquide d'épaisseur constante à l'intérieur de la cible sphérique avant de la refroidir et de la solidifier. La lévitation magnétique de ces cibles a été étudiée en utilisant soit un solénoïde supraconducteur, soit un aimant multipolaire, également supraconducteur, s'inspirant de la technologie employée dans les accélérateurs de particules. L'intérêt de la structure multipolaire réside dans sa structure invariante par translation, qui permet d'obtenir des volumes de travail plus importants car la zone utile n'est alors plus limitée par le rayon intérieur du bobinage, comme c'est le cas dans un solénoïde.

> **Lionel Quettier**

Institut de recherches  
sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière  
CEA Centre de Saclay

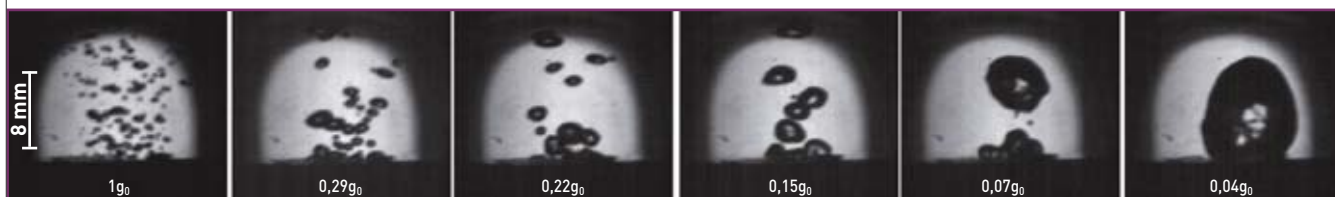


Figure 2.  
Évolution de la taille des bulles d'oxygène en fonction de la gravité résiduelle ( $g_0$ ) dans la cellule expérimentale d'OLGA.

la gravité terrestre est parfaitement compensée, on peut constater qu'une grosse bulle unique reste accrochée à la partie chauffante. Cette bulle est animée d'un mouvement de vibration généré par deux mécanismes, l'un d'évaporation qui intervient sur cette partie chauffante, et l'autre de condensation qui a lieu sur toute la surface de la bulle en contact avec le liquide. Il a également été possible de mesurer que plus l'intensité du chauffage était élevée, plus la taille de la bulle était grande.

#### Des études technologiques et d'autres plus fondamentales

Ces premiers résultats donnés par la station OLGA sont très précieux et uniques. Les chercheurs du CEA sont maintenant capables de prédire la façon dont les

transferts thermiques s'effectuent en absence de gravité dans l'oxygène liquide. Les résultats pourront être exploités pour dimensionner les moteurs des futurs lanceurs. D'autres études sont envisagées dans la station, avec un programme expérimental s'étalant sur plusieurs années. Ce dernier concernera l'étude du comportement des ergols dans les réservoirs des lanceurs (mouvements de l'interface liquide/gaz sous variation rapide de gravité, ballottement, vibrations) ainsi que des études à caractère plus fondamental menées près du **point critique** de l'oxygène, pour une pression de 50 **bars** et une température de 154 K.

> **Denis Chatain et Daniel Beysens**

Institut nanosciences et cryogénie (Inac)  
Direction des sciences de la matière  
CEA Centre de Grenoble

# 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*

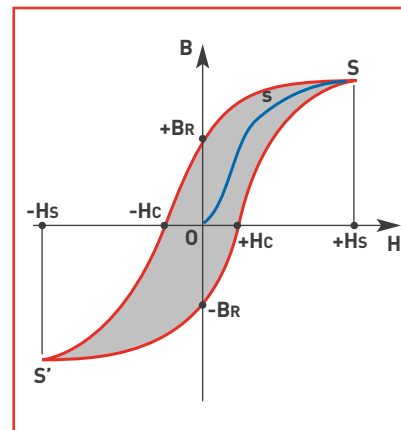


Figure E2. L'induction  $B$  d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ  $H$ ). Si la première aimantation dessine une courbe de type  $OS$  en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de  $s$  une saturation. L'induction n'est conservée qu'en 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,

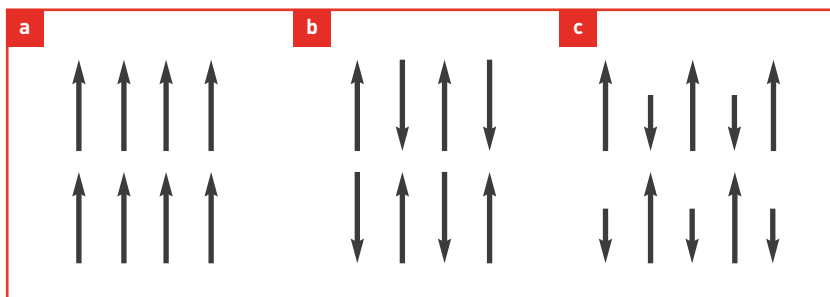


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

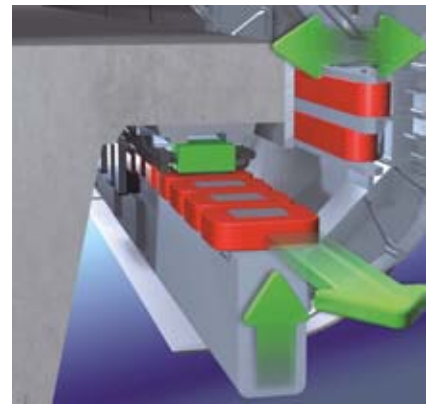
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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.