

Mini-désaimantation adiabatique pour très grand froid spatial

Le CEA développe un système de réfrigération aux très basses températures capable de fonctionner en microgravité et compatible avec les exigences de fiabilité et de robustesse du spatial. Ce secteur exige en effet des températures de plus en plus basses pour les capteurs des satellites.

Afin notamment d'éviter aux détecteurs des rayonnements parasites, les concepteurs de satellites demandent des "réfrigérateurs" capables de maintenir des températures de plus en plus basses. Les dernières générations de capteurs exigent des températures de l'ordre de 300 **millikelvins (mK)** (0,3 degré au-dessus du zéro absolu, soit $-272,85\text{ }^{\circ}\text{C}$) afin d'avoir la précision nécessaire à leur mission. Actuellement, l'**Agence spatiale européenne (Esa)** termine la préparation d'Herschel. Prévus pour 2008, cette mission d'observation de l'Univers, qui a notamment pour objet l'étude de la formation des étoiles et des galaxies, est composée de trois instruments: PACS, SPIRE et HIFI. Le CEA a livré les réfrigérateurs équipant les deux premiers, couronnement de plus de dix ans de développement: ces réfrigérateurs sont capables de produire 260 mK pendant plus de 50 heures (voir encadré).

Et ce n'est pas fini! L'Esa se penche aujourd'hui sur la définition de ses futures missions: en termes de réfrigération, la demande s'oriente vers les plus basses températures. De nouvelles générations de capteurs **supraconducteurs** tirent parti des propriétés de la supraconductivité et exigent des températures de l'ordre de 50 mK pour fonctionner. Anticipant cette demande, le CEA a lancé le développement d'un système capable de produire ces 50 mK en environnement spatial.

Trois quarts de siècle de réfrigération magnétique

Les technologies capables de produire des températures inférieures à 100 millikelvins (0,1 degré au-dessus du zéro absolu) sont peu nombreuses. La *cellule de Pomeranchuk* permet de créer du froid en mettant de l'**hélium 3** (**isotope** rare de l'hélium) solide sous pression. C'est l'outil utilisé par David M. Lee, Douglas D. Osheroff et Robert C. Richardson pour leurs travaux sur les propriétés de ce même hélium 3, couronnés par un prix Nobel en 1996. Peuvent également être cités les *réfrigérateurs à dilution*, dont le froid provient de la dilution de l'hélium 3 dans l'hélium 4 (l'isotope habituel de l'hélium). Cette dilution pourrait être décrite comme une évaporation de l'isotope 3 dans un "vide" composé d'hélium 4. Il s'agit de la solution la plus souple et la plus utilisée aujourd'hui pour produire les très basses tempé-



Le satellite Herschel doit être mis en orbite fin 2008 par une fusée Ariane 5 en même temps que le satellite Planck.

Le réfrigérateur à adsorption

Le fonctionnement du réfrigérateur à **adsorption** repose sur un principe simple: la température d'un liquide dépend de sa pression de vapeur⁽¹⁾. En diminuant cette dernière, le liquide refroidit. En pompant sur de l'hélium liquide (4,2 **kelvins**), il est possible de descendre jusqu'à environ 700 millikelvins (mK) (0,7 °C au-dessus du zéro absolu). En pompant sur de l'hélium 3, liquide en dessous de 3,2 K, on peut refroidir jusqu'à environ 200 mK (0,2 °C au-dessus du zéro absolu). Pour assurer le pompage, la technologie du CEA tire parti de la propriété des solides d'être capables de piéger des molécules de gaz à leur surface. Le charbon actif dispose notamment d'une grande surface spécifique (environ 1 000 m²/g) et permet de piéger efficacement l'hélium à 4,2 K. Il est, de ce fait, une excellente pompe à cette température qui a l'avantage d'être située à froid, d'être très compacte et très efficace.

(1) pression de vapeur: pression exercée par la phase vapeur au-dessus d'une phase liquide ou solide d'une substance alors qu'un équilibre existe entre les dites phases. C'est donc la valeur maximale de la pression de cette substance pour qu'elle dégage une vapeur. Elle est directement proportionnelle à sa température.



L'un des derniers prototypes de réfrigérateur développés par le laboratoire, capables de produire 48 mK.

tures en laboratoire. La *réfrigération magnétique* fait partie de ces technologies capables de refroidir à une poignée de millikelvins.

Les premières démonstrations expérimentales remontent à 1933, par Giauque et MacDougall d'une part, et par de Haas, Wiersma et Kramers d'autre part. Ces expérimentations ont permis d'ouvrir un nouveau champ dans l'étude de la matière puisque c'était la première fois que les très basses températures pouvaient être atteintes. Cette technologie a, par la suite, été supplantée en laboratoire par les réfrigérateurs à dilution, capables de produire du froid continu et d'assurer une puissance froide importante, même aux plus basses températures.

Dans leur forme classique, les réfrigérateurs à dilution ne sont cependant pas adaptés à la **microgravité**, la pesanteur étant nécessaire au phénomène de dilution dans la définition de l'interface de démixtion⁽¹⁾ entre l'hélium 3 et l'hélium 4, essentielle au fonctionnement du réfrigérateur. Des développements menés au **CNRS** ont permis la mise au point d'un système tirant parti des forces capillaires. Un de ces réfrigérateurs équipe le satellite Planck, qui sera lancé en même temps qu'Herschel. Les performances de cette dilution sont toutefois, à l'heure actuelle, insuffisantes pour satisfaire les besoins des prochaines missions spatiales européennes, mais les développements se poursuivent.

Les contraintes du spatial sont assez drastiques, notamment en terme de fiabilité, d'encombrement, de poids, de tenue mécanique ainsi que de consommation d'énergie. La demande des futures missions s'orientant vers des températures inférieures à

100 millikelvins, la réfrigération magnétique est l'objet d'un intérêt renouvelé. Son fonctionnement est en effet indépendant de la gravité et ne dépend que du courant électrique. Il n'y a donc aucune pièce mobile, aucune usure qui pourrait mettre en péril la fiabilité de son fonctionnement. La réfrigération magnétique est donc bien adaptée à l'environnement spatial, malgré deux défauts majeurs évoqués plus loin.

Principe de la désaimantation adiabatique

De façon générale, refroidir revient à réduire l'**entropie** du système. La réfrigération magnétique ne déroge pas à la règle et joue sur l'entropie magnétique.

Considérons un matériau **paramagnétique**. Il est constitué d'une collection de **moments magnétiques** assimilables à autant d'aimants de la taille d'un **atome** ou d'une **molécule**. Comme les aimants, les moments magnétiques se caractérisent par une orientation et une intensité. De la même façon que deux aimants peuvent interagir, les moments magnétiques interagissent entre eux au sein du matériau. La particularité du paramagnétisme réside dans la faiblesse de cette interaction. L'agitation moléculaire (**l'agitation thermique**) l'emporte, avec pour conséquence une orientation aléatoire des moments qui crée du désordre, de l'entropie. Celle-ci est liée au nombre d'orientations possible des moments (défini par la physique **quantique**).

Plaçons le matériau paramagnétique dans un **champ magnétique** extérieur (produit par une **bobine** par exemple). Comme l'**aimant** de la boussole s'aligne sur le champ magnétique terrestre, les moments du matériau vont s'aligner sur la direction et le sens du champ. Ceci d'autant plus facilement que les moments sont en faible interaction. Plus le champ est intense, plus il y aura de moments magnétiques alignés. Le désordre est réduit, l'entropie diminue. La transformation est **exothermique** : c'est l'*effet magnéto-calorique*. En pratique, le matériau est lié à un bain thermique isotherme pour évacuer la chaleur produite lors de l'aimantation.

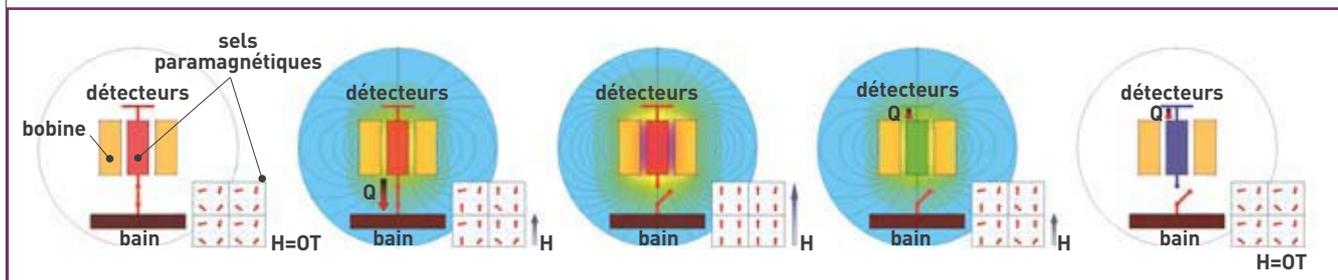
Isolons maintenant thermiquement le matériau, et réduisons le champ magnétique. Les moments magnétiques vont retourner à leur orientation aléatoire, ce qui demande de l'énergie. Le système étant isolé, les moments vont puiser dans l'énergie thermique et la température du matériau va baisser : c'est le principe de la désaimantation **adiabatique** (figure 1).

La technologie

Techniquement, un étage de désaimantation est composé du réfrigérant, le sel paramagnétique, et d'un moyen de produire un champ magnétique variable.

Figure 1. Principe de la désaimantation adiabatique.

(1) démixtion : phénomène de micro-séparation de phases de compositions différentes dans un alliage lorsqu'un composé en solution du mélange a dépassé sa limite de solubilité.



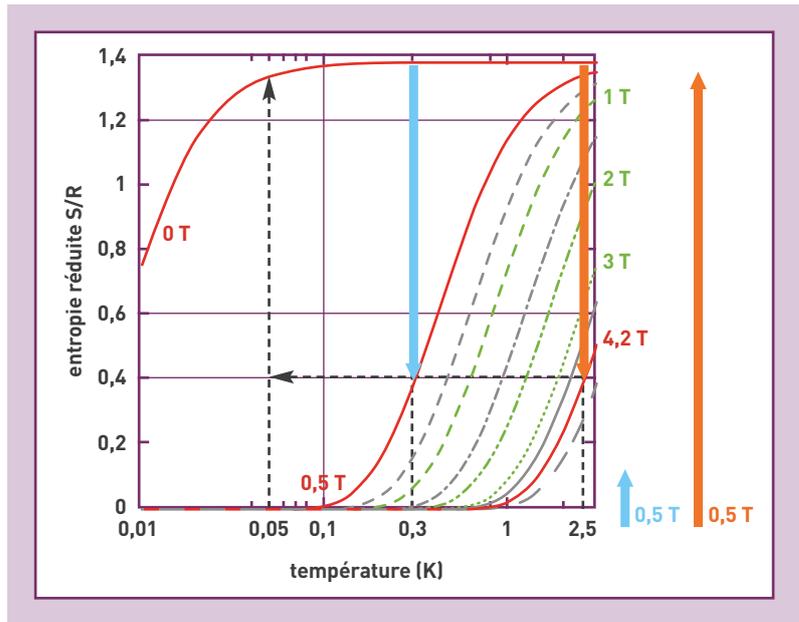
Le choix du réfrigérant dépend de la plage de température à laquelle il est prévu que l'étage fonctionne. Entre 4 et 1 kelvin, il existe des **grenats** dont le magnétisme se base sur des **terres rares** (gadolinium ou dysprosium), disponibles commercialement sous la forme de **monocristaux**. En dessous du kelvin, les choses se compliquent un peu. Plusieurs réfrigérants sont disponibles, la plupart sont des aluns (sulfates doubles) dont le magnétisme se base sur des **ions** fer, chrome ou cérium. Leur intérêt réside dans le fait qu'ils contiennent de l'eau. Les molécules d'eau servent de "cages" isolant les ions magnétiques les uns des autres. Cela permet d'obtenir des interactions très faibles et des réfrigérants capables d'atteindre des températures de l'ordre de quelques millikelvins (figure 2). Mais l'eau est également à l'origine des principaux désavantages de ces aluns: ils doivent être scellés sous peine de la perdre et de s'endommager. En outre, leur température de fusion est basse (39 °C pour l'alun de fer).

Le champ magnétique en **cryogénie** est aujourd'hui produit par des bobines **supraconductrices**. Pour le produire avec l'intensité nécessaire au fonctionnement de la désaimantation, il faut soit multiplier les boucles de courant et alourdir la bobine, soit prévoir l'utilisation d'un courant important. En environnement spatial, les budgets masse et énergie sont limités et un compromis entre masse et courant doit être trouvé. Or, plus un étage de désaimantation travaille à haute température, plus le champ magnétique nécessaire à son fonctionnement est élevé et plus le compromis est difficile à atteindre.

Récemment, pour sa prochaine mission d'observation cosmique, Xeus⁽²⁾, l'Agence spatiale européenne a émis un appel à candidatures pour le financement du développement d'une solution de réfrigération capable de produire 50 mK en continu à partir de 2,5 K et d'une masse totale inférieure à 5 kg. Le réfrigérant à désaimantation adiabatique en cascade le plus efficace actuellement, développé par le Goddard Space Flight Center de la **NASA** à Greenbelt (Maryland), se situe juste au-delà de cette limite de poids. Il est en effet très difficile de rentrer dans ces spécifications avec du "tout désaimantation adiabatique".

Deux étages de désaimantation adiabatique

Le CEA a répondu à l'appel de l'Esa en proposant le développement de deux étages de désaimantation adiabatique (l'un servant principalement de réservoir thermique à 50 mK) couplés à un réfrigérant à **adsorption**, similaire à ceux déjà développés pour Herschel (figure 3). Celui-ci est capable de pré-refroidir la désaimantation à une température d'environ 350 millikelvins. Il a l'avantage d'être extrêmement compact et léger. La partie "active" des réfrigérateurs d'Herschel ne pèse en effet que 300 g, la structure leur permettant de survivre aux vibrations du lanceur Ariane 5 montant le tout à environ 1,8 kg. Le pré-refroidissement des deux étages de désaimantation permet de limiter fortement les besoins en champ magnétique et de maintenir la masse et le courant de la bobine à des valeurs acceptables.



Le choix du réfrigérant s'est porté sur un alun de chrome et de potasse (CPA) qui allie bonne performance et relative robustesse (température de fusion: 89 °C). Cet alun se présente sous forme **polycristalline**. La conductivité thermique du tout est limitée par la faible conduction aux **joints de grain**. Il est donc nécessaire de créer ce que l'on appelle un "bus thermique" afin de bien thermaliser les cristaux. Celui du CEA est composé de 260 fils de cuivre d'un diamètre de 0,25 mm et d'une longueur de 80 mm, d'une **conductance** totale de 0,3 $\mu\text{W}/\text{mK}$ à 50 mK. Les sels sont recristallisés directement sur ce réseau de fils afin de minimiser les résistances thermiques de contact. La recristallisation des sels tire parti de la faible solubilité du CPA dans l'eau: le bus thermique est plongé dans une solution saturée à 50 °C. Refroidir à 0 °C en gardant la solution chaude assure que la croissance s'effectue sur les fils. Il reste ensuite la tâche délicate du scellement du réfrigérant sans dépasser sa température de fusion.

Figure 2. Courbes théoriques de l'entropie magnétique de l'alun de chrome et de potasse. Les valeurs de champ magnétique indiquées par les flèches sont les champs nécessaires pour réduire l'entropie d'une même quantité (pour une même efficacité à 50 mK) entre 2,5 K et 300 mK.

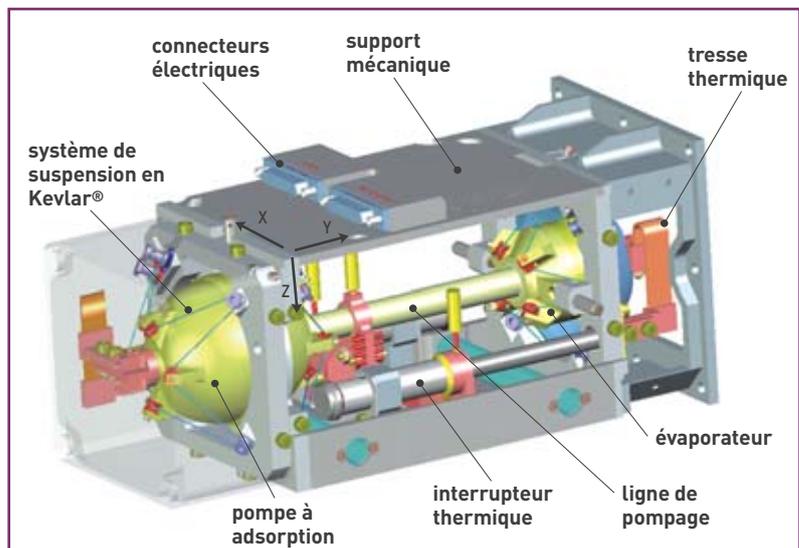
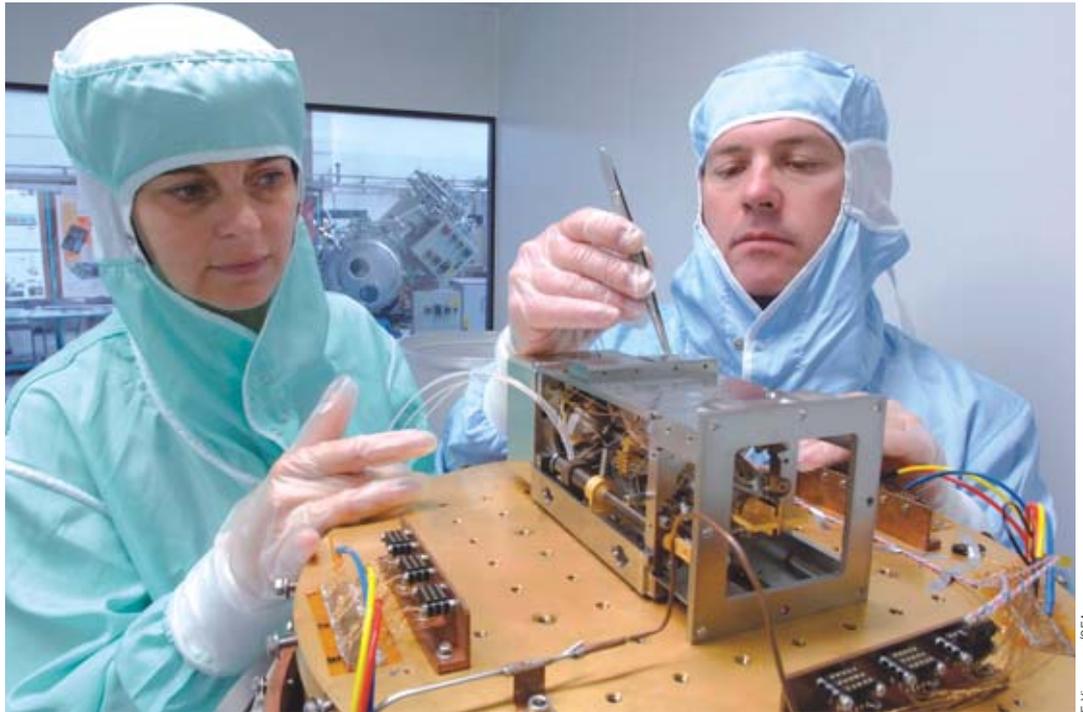


Figure 3. Vue 3D du réfrigérateur à adsorption du satellite Herschel. Le modèle prévu pour pré-refroidir la désaimantation adiabatique sera similaire.

(2) <http://www.sciops.esa.int/index.php?project=Xeus>



Essais thermiques sur le cryoréfrigérateur de recharge du satellite Herschel au service des basses températures du CEA à Grenoble.

F. Vigouroux/CEA

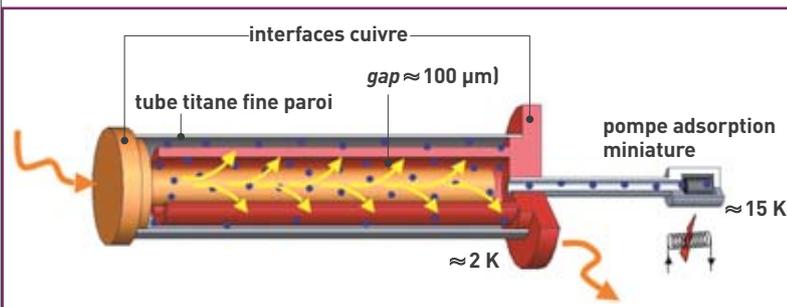


Figure 4. Principe de l'interrupteur thermique. Lorsque la pompe à adsorption miniature est froide, le tube est vide et la chaleur ne passe que par le tube à paroi fine. Lorsque la mini-pompe est chauffée, de l'hélium remplit le tube permettant à la chaleur de passer de façon beaucoup plus efficace entre les interfaces cuivre à travers le gaz contenu dans le gap.

Le réfrigérant est ensuite fixé au centre de sa bobine par des fils de Kevlar® qui allient une grande solidité mécanique à une faible conductivité thermique. Cela permet donc de fixer le sel de façon suffisamment solide pour survivre aux vibrations du lanceur tout en l'isolant thermiquement de la bobine. Le fil de Kevlar, bien connu du laboratoire pour avoir été utilisé dans les cryoréfrigérateurs d'Herschel, a été l'objet d'une étude poussée. Il est notamment l'un des rares matériaux se dilatant lors des refroidissements. Un mécanisme de fluage⁽³⁾ a également été observé lors des cycles thermiques (succession de refroidissements et de réchauffements), avec pour conséquence une baisse de la tension des fils de fixation, source potentielle de casse au lancement. Le CEA a mis au point un procédé de tensionnement du Kevlar® permettant de s'en affranchir et de garantir leur bonne tension lors du lancement.

Le dernier prototype, composé d'un unique étage de désaimantation, a permis d'atteindre 32 mK. Il s'agit maintenant d'y ajouter un second étage à 50 mK, réservoir magnétique "actif". Dans ce cadre,

(3) fluage : évolution au cours du temps de la déformation plastique d'un matériau sous l'effet d'une contrainte mécanique s'exerçant de façon prolongée.

(4) Un interrupteur thermique est un dispositif capable de bien ou mal conduire la chaleur selon son état.

(5) <http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/index.html>

l'une des priorités est de se doter d'un interrupteur thermique⁽⁴⁾ capable de fonctionner à cette température. Un tel dispositif est nécessaire au fonctionnement de tout réfrigérateur multi-étagé puisque chaque étage doit successivement être thermiquement connecté/déconnecté de ses voisins. De leur performance dépend le dimensionnement du réfrigérateur entier. Le laboratoire a développé une solution d'interrupteur thermique "à gaz" très efficace jusqu'à environ 300 millikelvins (figure 4). Il s'agit maintenant pour l'équipe de se doter d'une solution capable de fonctionner à 50 millikelvins, prévoyant la production d'un modèle d'ingénierie fonctionnel dans les deux prochaines années.

Deux nouvelles applications en vue

Xeus peut potentiellement embarquer deux instruments qui auraient besoin de respectivement 300 et 50 millikelvins en continu. Pour chacun, le CEA propose une solution robuste et fiable : un réfrigérateur à adsorption qui a déjà fait ses preuves et sa solution de réfrigération magnétique.

En parallèle, JAXA, l'agence spatiale japonaise, met sur pied une mission scientifique, SPICA⁽⁵⁾, sur laquelle un instrument européen, l'ESI, pourrait prendre place. Au stade actuel de développement, les besoins cryogéniques d'ESI sont également de 50 millikelvins en continu. Le CEA est à ce sujet en contact avec le **Rutherford Appleton Laboratory** qui supervise l'étude du projet et notamment sa partie thermique.

Pour ces deux missions, il travaille aujourd'hui à consolider cet intérêt pour son réfrigérateur mixte adsorption/désaimantation

► **Nicolas Luchier**

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*

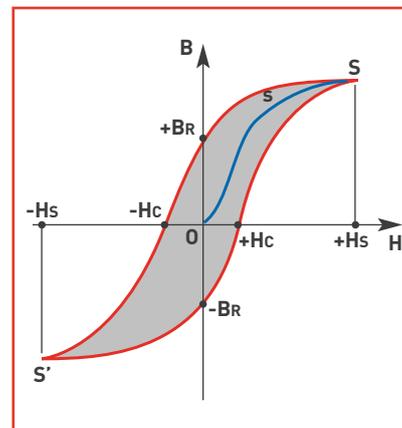


Figure E2. L'induction B d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ H). Si la première aimantation dessine une courbe de type OS sur la figure, elle manifeste à partir de s une saturation. L'induction n'est conservée qu'en partie si le champ tend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

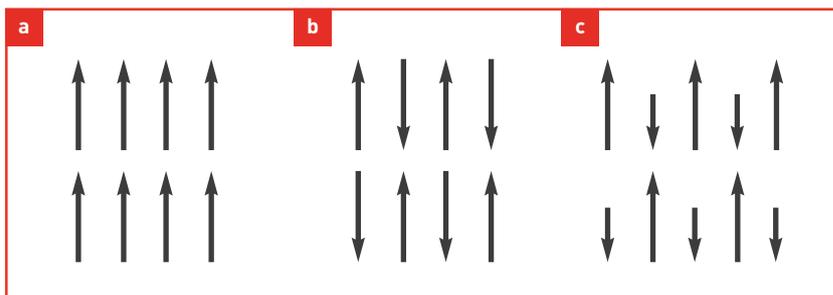


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposé et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

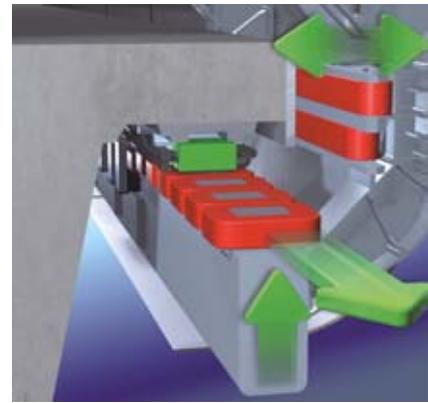
3. Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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.