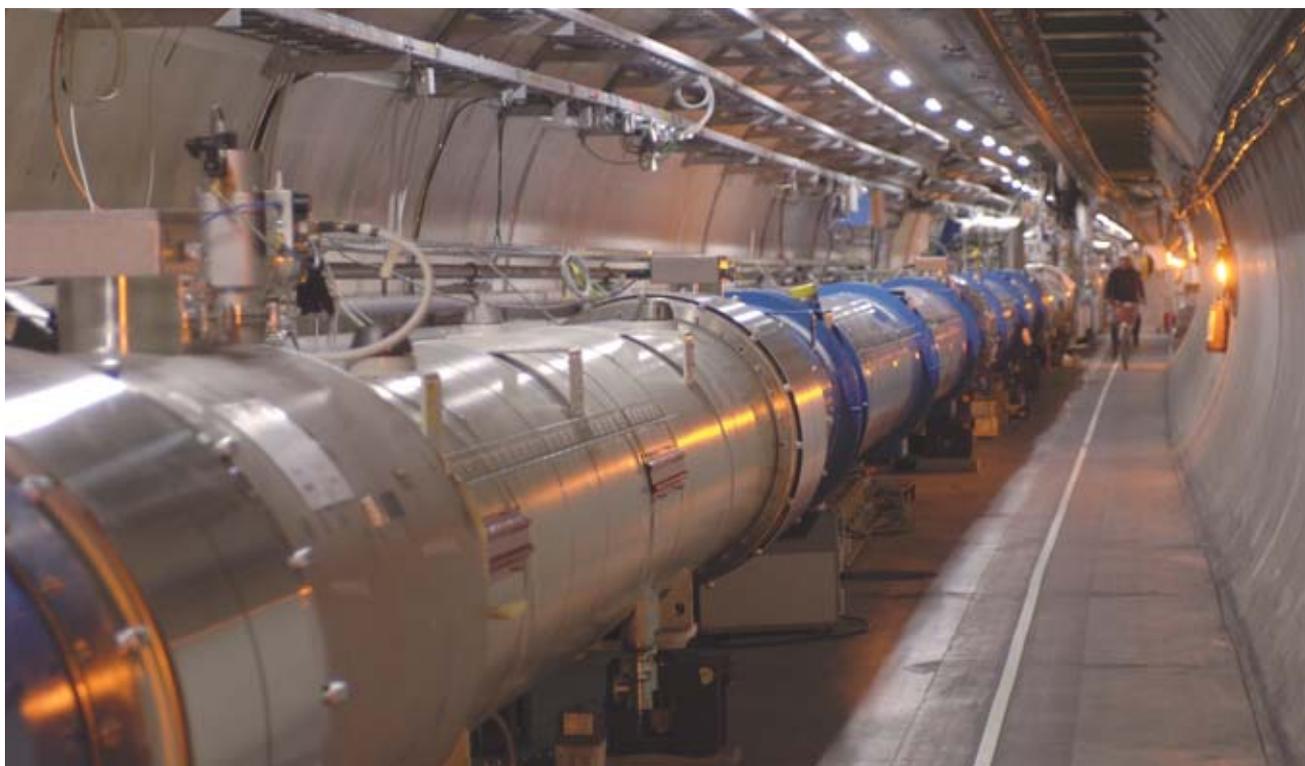


# Les aimants supraconducteurs au service du LHC

Le *Large Hadron Collider* (LHC), le plus puissant collisionneur de particules du monde qui démarre au Cern en 2008, bénéficie doublement de la technologie des aimants supraconducteurs. D'abord pour guider dans l'accélérateur les particules qui doivent entrer en collision, ensuite pour observer dans un champ magnétique connu, au sein de détecteurs géants, les produits de cette collision. Ceci pour une dépense d'énergie minimale en regard du gigantisme des installations.



P. Stroppa/CEA

Le tunnel du LHC (*Large Hadron Collider*), le plus puissant collisionneur proton-proton du monde installé au Cern. D'une circonférence de 27 km, il est entièrement équipé d'aimants supraconducteurs qui dirigent et focalisent les protons sur des trajectoires circulaires. Le CEA apporte ses compétences sur la conception de deux des quatre détecteurs et sur la construction de dipôles et de quadripôles supraconducteurs.

Les physiciens poursuivent l'étude de la structure de la matière avec une **résolution** de plus en plus poussée. Trouver les constituants fondamentaux et comprendre la façon dont ils se lient entre eux est le but de la physique des particules élémentaires. Cette recherche utilise les **accélérateurs de particules** comme des microscopes, qui offrent la possibilité de sonder la matière avec une **résolution spatiale** d'autant meilleure que l'énergie des particules accélérées est plus grande<sup>(1)</sup>. Depuis les années 1950, une croissance régulière de

l'énergie des accélérateurs employés en physique des particules est observée (figure 1). Les progrès technologiques, réalisés notamment dans le domaine des **électroaimants supraconducteurs** (Mémo B, *Supraconductivité et supraconducteurs*, p. 16), ont permis de concevoir et de construire les systèmes magnétiques du Grand collisionneur de hadrons<sup>(2)</sup> (*Large Hadron Collider*, LHC) en cours d'installation au Laboratoire européen pour la physique des particules, le **Cern**, situé près de Genève. Le rôle du **champ magnétique** est de courber les faisceaux de particules, soit pour les guider et les maintenir sur des orbites de géométrie bien définie, soit pour en analyser les produits de collision dans les détecteurs.

## Les principaux ingrédients d'un collisionneur circulaire

Les particules circulent dans un tube à vide, en forme d'anneau, entouré successivement de systèmes électromagnétiques servant à les piloter. Elles sont accélérées par des champs électriques au passage de

(1) Une résolution de  $10^{-19}$  m (échelle du *quark*) demande 1 TeV ( $10^{12}$  électronvolts).

(2) Hadrons: particules **subatomiques** formées de *quarks* (ou d'*antiquarks*) et sensibles à l'*interaction nucléaire forte*. Le **proton** et le **neutron** sont des hadrons.

(3) Diagramme de Livingston: diagramme établi dans les années soixante par le physicien Stanley Livingston, qui montre la croissance exponentielle de l'énergie des faisceaux accélérés dans le centre de masse (en un multiple d'électronvolts en supposant une collision avec un proton ou un électron au repos) dans les accélérateurs de particules, et l'évolution du coût par eV de l'énergie du faisceau en fonction du temps (années).

cavités alimentées par d'intenses ondes **radiofréquences**. Afin de tirer le meilleur parti d'un nombre limité de cavités, les concepteurs d'accélérateurs forcent le faisceau de particules à passer plusieurs fois à travers celles-ci en faisant de sa trajectoire une boucle fermée. L'axe du faisceau de particules chargées est courbé par une succession de secteurs à champ magnétique uniforme créé par des **aimants dipolaires**. Plus l'énergie de la particule est élevée, plus le champ nécessaire est intense (encadré). Pour empêcher le faisceau de diverger et maintenir des dimensions transverses raisonnables autour de l'axe du faisceau, des aimants quadripolaires de focalisation sont introduits. Dans ce type d'élément, le champ magnétique croît linéairement lorsque l'on s'écarte de son axe. La distance focale est inversement proportionnelle au gradient d'**induction** transverse. La fonction essentielle des anneaux de collisions est la rencontre de deux faisceaux circulant en sens contraire. Les collisions se font en des points particuliers de la circonférence de la machine, autour desquels sont disposés des appareils qui détectent les événements créés lors de l'interaction des faisceaux. Les quantités de mouvement des particules sont déterminées par la mesure de la courbure des trajectoires dans un champ magnétique connu, et les énergies par l'intermédiaire de calorimètres.

Le CEA participe à la construction au Cern du LHC, le plus puissant collisionneur **proton-proton** du monde. Il apporte ses compétences sur la conception de deux des quatre détecteurs et sur la construction de certains équipements importants comme les quadripôles. Ce collisionneur accélérera, à une vitesse très proche de celle de la lumière, deux faisceaux de protons parcourant en sens inverse un tunnel circulaire de 27 km de circonférence, enterré à une profondeur variant entre 50 et 170 m. Dans les points de croisement des faisceaux, des protons se percuteront violemment à des énergies de 14 TeV par collision proton-proton. Le défi scientifique se double du défi technologique et industriel que constitue la construction des 1 200 dipôles supraconducteurs produisant un champ magnétique de 8,4 T, des 400 quadripôles supraconducteurs fournissant un gradient de champ magnétique de 223 T/m, du circuit **cryogénique** d'**hélium superfluide** assurant leur refroidissement à 1,9 K et de deux énormes complexes de détection, dénommés Atlas (*A Toroidal LHC Apparatus*) et CMS (*Compact Muon Solenoid*).

### Les atouts des électroaimants supraconducteurs

Les corps supraconducteurs possèdent la propriété d'avoir une **résistivité** nulle au-dessous d'une certaine **température** dite **critique**. Ils échappent donc à la dissipation d'énergie par **effet Joule**. Certains de ces matériaux, comme le **niobium-titane**, peuvent transporter des **densités de courant** de l'ordre de 3 000 A/mm<sup>2</sup> dans des champs d'induction de 5 T à 4,2 K. Pour comparaison, les densités de courant atteintes dans les matériaux utilisés pour réaliser les **bobinages** d'électroaimants conventionnels, généralement le cuivre ou l'aluminium, varient entre 5 et 50 A/mm<sup>2</sup> suivant le mode de refroidissement. Grâce à leurs fortes densités de

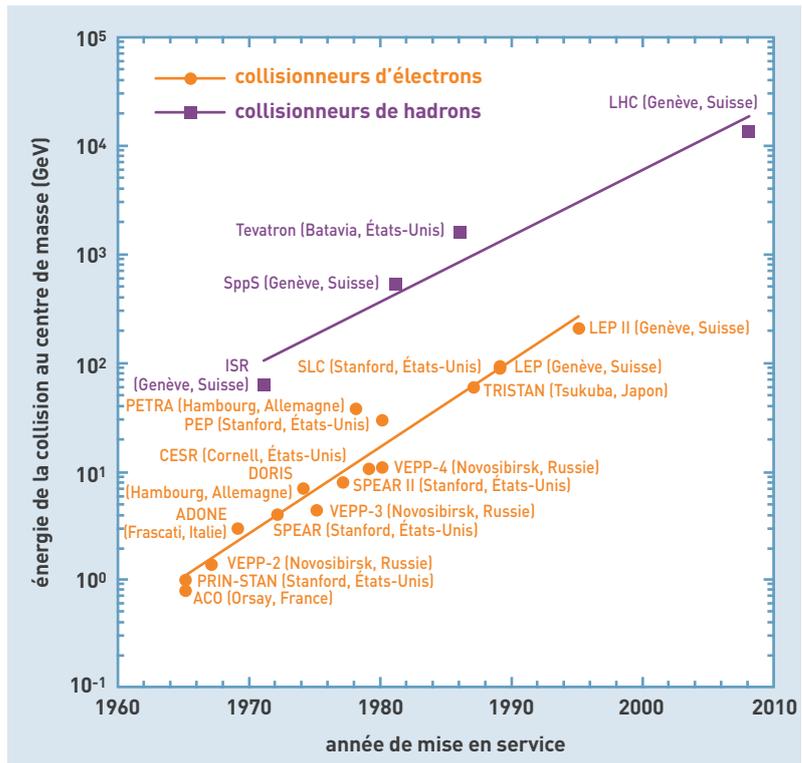
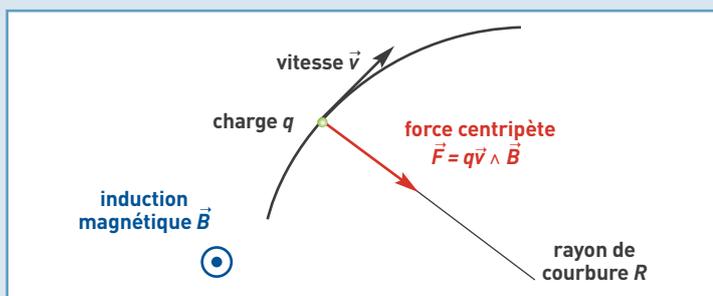


Figure 1. Diagramme de Livingston <sup>[3]</sup> donnant l'énergie atteinte à différentes époques. Celle-ci est passée de 100 MeV en 1950 à plusieurs dizaines de GeV en 1975 et à des centaines de GeV en 1990. Le LHC, qui démarre en 2008, sera le plus puissant accélérateur du monde, avec une énergie de choc frontal entre deux protons de 14 TeV.

## Comment un champ électromagnétique agit-il sur une particule chargée ?



Une particule qui porte une charge électrique est sensible à l'action d'un champ électrique  $\vec{E}$  ou d'un **champ magnétique**  $\vec{B}$ . La force, appelée **force de Lorentz**, subie par une particule de charge  $q$  en mouvement à la vitesse  $\vec{v}$  dans un champ **électromagnétique** s'exprime par :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}.$$

$\vec{E}$  et  $\vec{B}$  exercent des actions très différentes sur le mouvement. À la traversée d'un champ électrique  $\vec{E}$ , il y a accélération de la particule qui gagne ainsi de l'énergie cinétique : la force électrique ( $q\vec{E}$ ) est une **force accélératrice**. C'est le principe de base des cavités accélératrices. En revanche, à la traversée d'un champ d'**induction magnétique**  $\vec{B}$ , la force magnétique ou **force de Laplace** ( $q\vec{v} \wedge \vec{B}$ ) est perpendiculaire à  $\vec{v}$  et à  $\vec{B}$  et n'induit pas de changement d'énergie cinétique. C'est une **force défléchissante** utilisée pour le guidage des faisceaux de particules. Dans un champ d'induction magnétique uniforme  $B$ , une particule de masse  $m$  en mouvement à la vitesse  $v$  décrit une trajectoire circulaire de rayon moyen  $R$  tel que :

$$BR = \frac{mv}{q},$$

$mv$  représentant la quantité de mouvement de la particule.

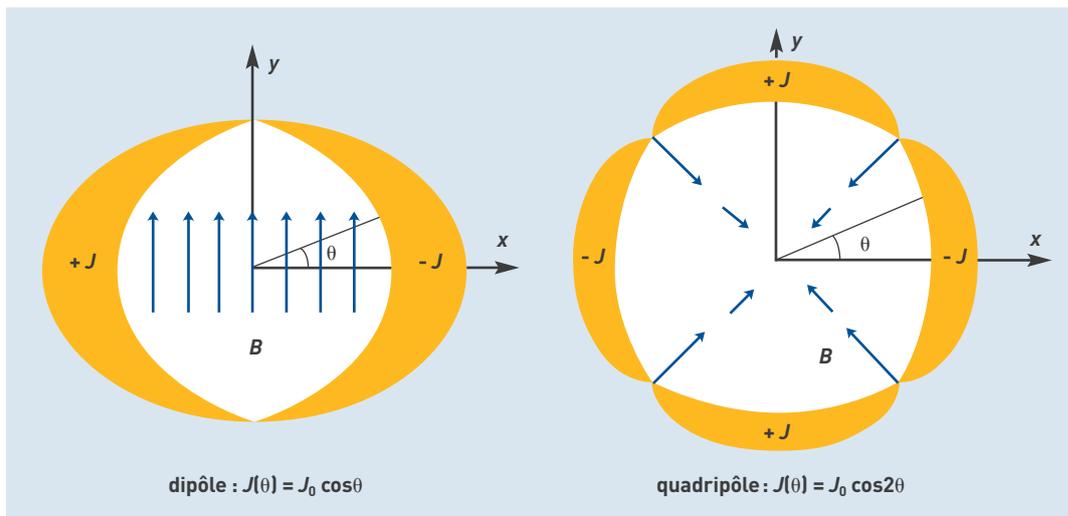


Figure 2. Distributions de la densité de courant  $J(\theta)$  et des lignes de champ magnétique associées dans un dipôle et un quadripôle supraconducteurs.

courant, les électroaimants supraconducteurs produisent des champs magnétiques intenses à l'aide de bobinages compacts. Dans un collisionneur circulaire, ils permettent alors de réduire la taille et le coût total de la machine. Le coût de fonctionnement est également minimisé par la diminution de la consommation d'énergie électrique, qui se réduit à celle nécessaire aux installations de réfrigération

des aimants. Si le LHC utilisait des aimants conventionnels à la place d'aimants supraconducteurs, l'anneau aurait une circonférence de 120 km pour assurer la même énergie de collision et consommerait 40 fois plus d'électricité.

Les électroaimants classiques comportent des pôles de fer pur autour d'enroulements conducteurs. Les inductions magnétiques créées dans l'entrefer de ces appareils dépassent rarement 2 T, valeur imposée par l'**aimantation à saturation** du fer. Dans les aimants supraconducteurs, le fer intervient très peu et sert essentiellement de blindage magnétique pour l'extérieur. Le champ utile est produit directement par les enroulements de conducteurs supraconducteurs. La morphologie précise des champs magnétiques des dipôles et des quadripôles s'obtient par une distribution précise des densités de courant dans les bobinages (figure 2).

Il est indispensable de fixer le point de fonctionnement nominal d'un conducteur supraconducteur en dessous de ses valeurs critiques de température, d'induction magnétique et de densité de courant (figure 3). Les matériaux supraconducteurs permettant l'obtention de **champs critiques** élevés (jusqu'à 20 T) et de grandes densités de courant sont les matériaux **supraconducteurs de type II** (niobium-titane, **niobium-étain**) qui présentent des températures critiques inférieures à 20 K (figure 4). Pour mettre en froid et maintenir le bobinage à sa température de fonctionnement, un fluide cryogénique, comme l'hélium liquide dont la température d'ébullition sous la pression atmosphérique est de 4,2 K, est utilisé. À cette très basse température, les bobinages sont sensibles à la moindre perturbation thermique à cause des faibles valeurs des capacités thermiques des matériaux, environ 2000 fois inférieures aux valeurs à température ambiante. Un mouvement de conducteur de 10 micromètres ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ) peut dissiper une énergie suffisante pour échauffer le conducteur de 3 K et élever ainsi la température du supraconducteur au-dessus de sa température critique. Pour mettre en œuvre des électroaimants supraconducteurs, il faut maîtriser et éviter la *quen*ch, nom donné au passage accidentel de l'état supra-

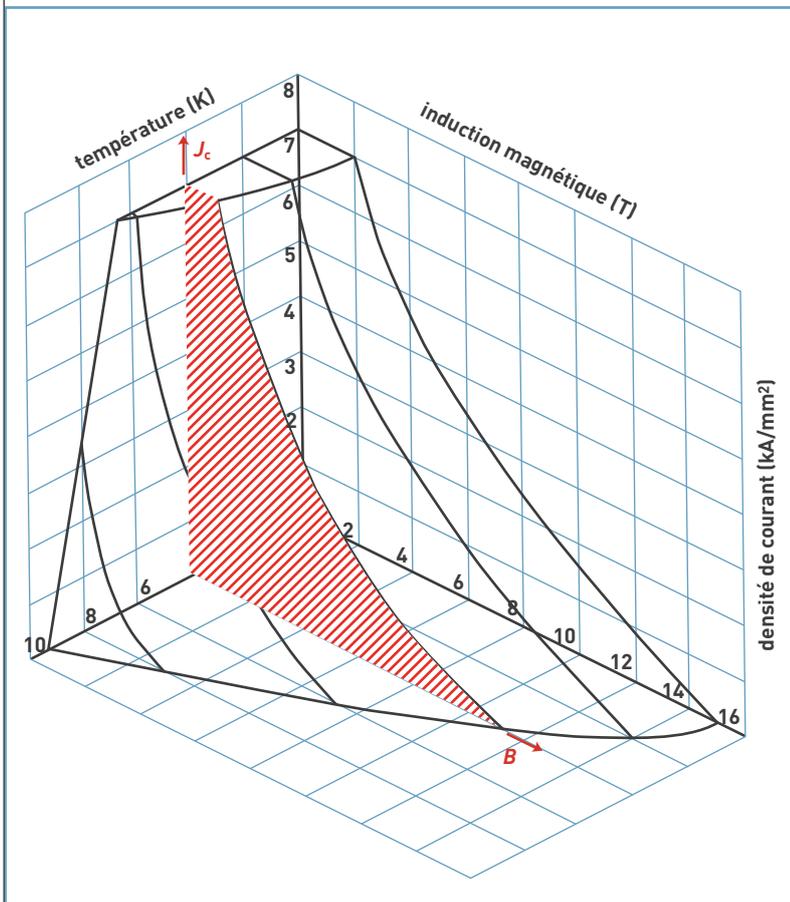


Figure 3. Diagramme de phase du niobium-titane. La partie hachurée donne la courbe  $J_c(B)$  à 4 K, c'est-à-dire la densité de courant maximale dans le supraconducteur refroidi à la température de l'hélium liquide et soumis à une induction magnétique B.

D'après M. N. Wilson

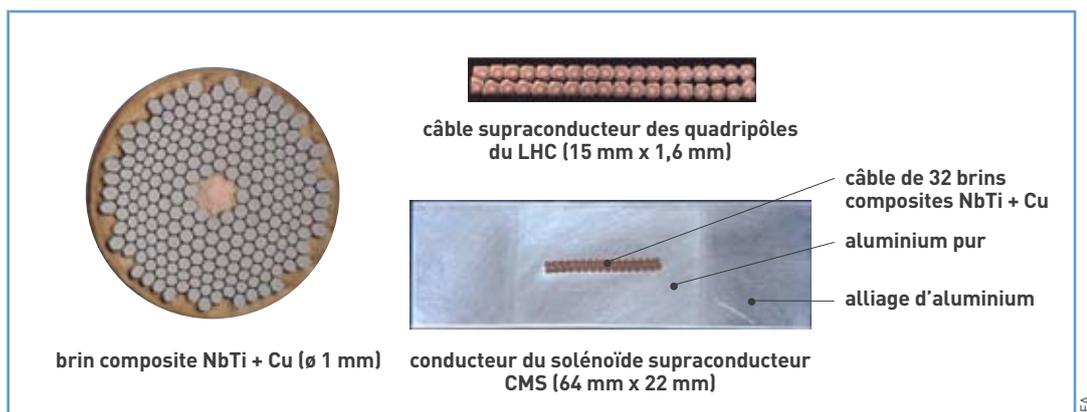


Figure 4. Sections de conducteurs supraconducteurs. La technologie actuelle des électroaimants supraconducteurs utilise des conducteurs monolithiques ou câblés à partir de brins **composites** constitués de milliers de filaments supraconducteurs de très faible diamètre (de l'ordre d'une dizaine de micromètres) noyés dans une matrice de cuivre.

conducteur à l'état normal de tout ou partie du bobinage. Les aimants supraconducteurs disposent de systèmes de sécurité en cas de *quench* pour éviter toute détérioration par échauffement du bobinage.

### Les problématiques à prendre en compte lors de la conception

La conception d'un cryoaimant doit permettre de vérifier que le système est satisfaisant du point de vue de l'utilisation du matériau supraconducteur, de sa protection en cas de *quench*, de la mécanique et du refroidissement. Après avoir choisi une température de fonctionnement adaptée au champ magnétique souhaité et connaissant les caractéristiques du matériau supraconducteur à cette température, une densité de courant moyenne, qui tient compte de la quantité de matériau stabilisant, des épaisseurs des isolants électriques et des espaces laissés vides, est déterminée. Cette densité de courant moyenne permet de pré-dimensionner le système magnétique. Il est alors possible de définir les caractéristiques du conducteur supraconducteur et, si nécessaire, d'ajuster les dimensions des bobines pour obtenir la qualité de champ magnétique souhaitée.

Même si le *quench* est un événement indésirable, il ne peut pas être exclu et doit être pris en compte au moment de la conception de l'aimant. Lors d'un *quench*, le supraconducteur étant devenu résistif, le courant est dérivé dans le matériau stabilisant qui dissipe de l'énergie par effet Joule. La chaleur générée permet alors au *quench* de se propager aux zones voisines et une tension électrique apparaît aux bornes de la zone devenue résistive. La protection de l'aimant consiste à mettre en place un système de détection rapide du *quench* et à dissiper une partie de l'énergie stockée au sein de l'aimant dans des résistances externes. Pour limiter l'élévation de la température du point à l'origine du *quench*, la propagation du *quench* à tout l'aimant peut être accélérée au moyen de chauffeferettes. L'énergie déposée par unité de volume est ainsi minimisée tout en limitant la tension électrique aux bornes de l'aimant, qui serait susceptible de conduire à la dégradation de l'isolation.

La mécanique est un point essentiel de la conception d'un cryoaimant. Les **forces de Lorentz** qui s'exercent sur tout conducteur plongé dans un champ magnétique sont à l'origine d'efforts énormes sur les bobinages des aimants supraconducteurs. D'une part, les matériaux constituant les bobines, en particulier les matériaux isolants, ont des résistances mécaniques relativement basses. Il convient de limiter les contraintes mécaniques à des valeurs acceptables pendant toute la vie de la bobine. Il est également nécessaire de restreindre la possibilité de mouvements des conducteurs dans le champ magnétique, car ils sont la source d'échauffements locaux susceptibles de conduire au *quench*. D'autre part, la structure de l'aimant doit non seulement tenir les efforts globaux, mais aussi limiter les déformations qui sont à l'origine de l'altération des **lignes de champ magnétique** et donc de la qualité de ce champ.

Les supraconducteurs fonctionnent à très basse température. Cet aspect doit être considéré avec soin pour limiter les contraintes mécaniques dues aux différences de rétreint thermique<sup>(4)</sup> des divers matériaux. De plus, il faut évacuer la chaleur pouvant réchauffer l'aimant : elle provient en général des pertes du cryostat contenant l'aimant au travers des supports, de l'instrumentation et des amenées de courant. Il peut aussi s'agir de puissances déposées au sein même de l'aimant et provoquées par un fonctionnement non statique ou par le rayonnement du faisceau.

Tous ces aspects, bien que faisant appel à des spécialités différentes, doivent être traités conjointement et tenir compte de la technologie de fabrication mise en œuvre pour conduire à une conception satisfaisante. De plus, de nombreux tests de validation de grandeurs physiques ou de choix technologiques sont indispensables pour assurer la réussite.

### Quatre cents aimants quadripolaires pour le LHC

Dans le cadre d'une collaboration entre le CEA et le Cern, une première étude avait eu lieu au centre CEA de Saclay (Essonne) entre 1989 et 1993. Elle avait conduit à la fabrication et aux essais de deux **masses froides** de quadripôles avec un gradient de champ magnétique de 250 T/m. Ces deux aimants ont par la suite été utilisés dans une chaîne d'aimants desti-

(4) Rétreint thermique : diminution des dimensions d'un matériau lorsque sa température décroît.



CEA

Les quadrupôles du LHC présentent une configuration à double ouverture réunie dans une même structure magnétique et cryogénique. Les principales caractéristiques d'un aimant sont une longueur de 3,2 m, une ouverture de 56 mm et un gradient de champ magnétique de 223 T/m.

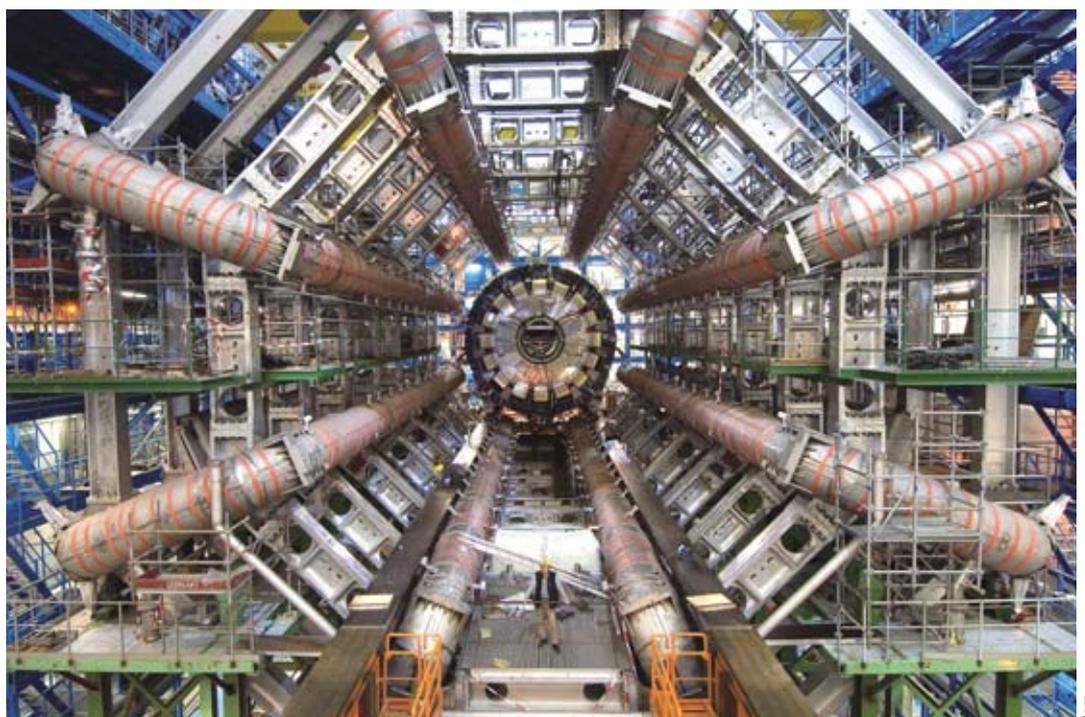
née à prouver la validité de la conception de la machine LHC. Dans le cadre de la participation de la France au LHC, trois nouveaux prototypes de masses froides, avec un gradient de champ magnétique réduit à 223 T/m, ont été étudiés, réalisés et testés au CEA, prouvant la validité de la conception. Ces quadrupôles, d'une longueur de 3,2 m, fonctionnent à 1,8 K, température à laquelle l'hélium est superfluide. La mise en œuvre de l'hélium superfluide pour la machine LHC a été rendue possible grâce, notamment, à l'expertise du CEA dans ce domaine, acquise lors de la réalisation du projet Tore Supra.

Deux quadrupôles, mécaniquement indépendants, sont positionnés avec précision dans la culasse magnétique en acier doux. Chacun des quadrupôles subit des forces d'éclatement de 110 tonnes par mètre d'aimant. Ces forces considérables sont reprises par les colliers en acier inoxydable amagnétique. L'aimant constitué des deux quadrupôles est monté, avec d'autres aimants correcteurs de faisceau, dans la masse froide qui mesure environ 6 m de long et contient de l'hélium superfluide. Pour obtenir la qualité de champ magnétique nécessaire, la précision des bobines doit être de l'ordre d'une vingtaine de micromètres, et les déformations sous effort de près de 0,1 mm.

Le CEA a assuré le transfert de technologie et le suivi de la fabrication chez l'industriel allemand **Accel Instruments** qui a construit 400 masses froides. La production s'est achevée fin 2006 et une seule masse froide a dû être rejetée. Après avoir été mis en cryostat au Cern, tous les éléments ont été descendus dans le tunnel de la machine et interconnectés aux aimants voisins. La mise en route de l'accélérateur LHC est prévue avant l'été 2008.

## Les aimants réalisés pour deux grands détecteurs du LHC

Les aimants pour les détecteurs Atlas et CMS, quant à eux, sont des aimants unitaires. Ils fonctionnent tous deux à une température proche de celle de l'hélium liquide et disposent chacun de leur propre liquéfacteur d'hélium. Les champs magnétiques produits sont moins élevés que celui des quadrupôles, mais le volume magnétisé est beaucoup plus grand. L'énergie stockée est telle qu'il est impossible de l'extraire très rapidement, si bien que le conducteur doit être capable de supporter pendant plusieurs minutes un courant élevé sans se dégrader (à comparer à quelques dizaines de millisecondes pour un quadrupôle). Bien que les pro-



Cern

Toroïde central du détecteur Atlas dans sa caverne au Cern. Les huit bobines supraconductrices positionnées en étoile ont chacune une forme d'hippodrome de 25 m de long sur 5 m de large et sont alimentées par un courant de 20 500 A.



Montage du solénoïde supraconducteur du détecteur CMS au Cern. La culasse magnétique (en rouge), contenant l'enceinte à vide, est glissée autour du solénoïde entouré de ses écrans thermiques. En jaune, la plate-forme qui a permis le montage de la bobine et son basculement de la position verticale à la position horizontale.

Cern

blématiques abordées lors de la conception soient les mêmes pour les quadripôles et pour les aimants des détecteurs, les solutions apportées sont fortement différentes. Le toroïde principal pour le détecteur Atlas et le **solénoïde** pour le détecteur CMS ont été étudiés au CEA depuis la fin des années 1980. Leur mise en service est prévue dans le courant de l'année 2008.

#### L'aimant toroïdal du détecteur Atlas

Le toroïde principal pour Atlas est constitué de 8 bobines de 25 m de long et 5 m de large disposées en forme de tore autour du point de collision des deux faisceaux de particules. L'énergie stockée est de 1 100 MJ pour un champ de 0,4 T au centre du toroïde et de 3,9 T sur le supraconducteur. Une bobine de longueur réduite à 1/3 a d'abord été réalisée au Centre de Saclay et testée au Cern en 2001. Cela a permis de valider la conception. Les bobines définitives ont été assemblées au Cern à partir de composants fournis par l'industrie européenne. Le CEA a assuré le suivi industriel de la fabrication de la plupart des composants, le suivi de leur montage et des tests individuels effectués en surface au Cern, puis de leur assemblage dans la caverne de l'expérience. En novembre 2006, l'ensemble du toroïde a été testé avec succès, transportant sans *quench* un courant de 21 000 A (soit 500 A de plus que le courant nominal). L'assemblage des autres aimants et des détecteurs est maintenant en cours et l'expérience Atlas sera opérationnelle dans le courant du 1<sup>er</sup> semestre 2008.

#### Le solénoïde supraconducteur du détecteur CMS

Le solénoïde de l'expérience CMS, avec ses 7 m de diamètre, 12,5 m de long et un champ magnétique de 4 T, détient le record d'énergie totale stockée avec

2,6 GJ ainsi que celui d'énergie stockée par unité de masse de bobine. Le solénoïde est constitué de 5 modules formés de 4 couches d'un conducteur stabilisé par de l'aluminium pur renforcé mécaniquement par un alliage d'aluminium (nouveau concept proposé par le CEA). Le conducteur est bobiné à l'intérieur d'un cylindre externe qui sert de support et assure le refroidissement par l'hélium mis en circulation naturelle au moyen d'un thermosiphon. Les 5 modules ont été réalisés par l'industrie européenne, livrés et assemblés en position verticale en surface au Cern et testés avec succès pendant l'été 2006. L'aimant a ensuite été démonté, descendu dans la caverne de l'expérience et son remontage est en cours. Il sera opérationnel dans le courant du 1<sup>er</sup> semestre 2008. Le CEA a participé activement à la conception de l'aimant, au suivi de réalisation industrielle, à l'assemblage et aux tests à froid au Cern.

#### Des améliorations en projet

Le LHC n'est pas encore en service que les discussions au sujet de ses futures améliorations sont déjà engagées avec pour objectif, en particulier, de multiplier la luminosité<sup>(5)</sup> de la machine par un facteur 10. Des projets pour la fabrication de nouveaux quadripôles en niobium-titane à grande ouverture (130 mm), pour la réalisation de dipôles en niobium-étain fournissant un champ de 13 T dans une ouverture de 100 mm, et même des inserts utilisant les **supraconducteurs à haute température critique** (Bi2212 ou YBCO) sont en cours de préparation. Ils demanderont d'importants efforts de R&D pour lesquels le CEA apportera ses compétences.

#### > Chantal Meuris et Jean-Michel Rifflet

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

(5) Luminosité : un des deux paramètres, avec l'énergie finale, qui délimite le domaine de physique accessible par un collisionneur de particules. Elle est donnée par la formule  $L = f n^2 k / A$  (en  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), où  $k$  est le nombre de particules dans un paquet de chaque faisceau,  $n$  le nombre de paquets,  $A$  la section du faisceau et  $f$  la fréquence de croisement des faisceaux.

# Supraconductivité et supraconducteurs



P. Stroppa/CEA

Un des principaux domaines d'application de la supraconductivité est l'imagerie médicale. Ici, l'imager par résonance magnétique de 3 teslas du SHF situé à Orsay (Essonne).

## Un peu d'histoire

Des trains qui "volent" en lévitation magnétique au-dessus de leur voie, le problème du stockage de l'électricité enfin résolu grâce à d'énormes bobines magnétiques, un appareillage électrotechnique et des câbles de transport électrique qui ne présentent plus de pertes, des champs magnétiques pour explorer le corps humain et en livrer des images toujours plus précises : la supraconductivité n'a cessé de faire rêver depuis qu'en 1911, le Néerlandais Heike Kammerlingh-Onnes a découvert la propriété extraordinaire qu'ont les matériaux supraconducteurs de présenter, en dessous d'une température qualifiée de température critique (qui dépend de la masse isotopique), une résistance électrique si faible qu'elle n'est pas mesurable. Il fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1913. Outre une résistance nulle et une conductivité électrique sans entrave, les supraconducteurs découverts par Kammerlingh-Onnes (ils seront plus tard qualifiés de type I) possèdent une autre propriété remarquable qui se manifeste par l'effet Meissner, découvert en

1933 par le chercheur allemand Walter Meissner et son compatriote Robert Ochsenfeld. Ils offrent un diamagnétisme parfait (si on néglige la longueur de pénétration de London<sup>(1)</sup>), c'est-à-dire que le champ magnétique en est totalement expulsé tant que le champ est inférieur au champ critique alors qu'un matériau parfaitement conducteur devrait présenter un champ égal au champ appliqué. Là réside la deuxième barrière qui limite encore l'application des supraconducteurs : au-dessus d'un champ magnétique critique, la supraconductivité disparaît. Les physiciens ont longtemps cru qu'il n'existait qu'un type de supraconductivité et que les anomalies magnétiques constatées dans certains échantillons n'étaient dues qu'à la présence d'impuretés. Mais dès les années 50, le Russe Vitaly L. Ginzburg émettait l'idée, avec son compatriote Lev Davidovitch Landau,

(1) En 1935, Fritz et Heinz London introduisirent une autre explication de l'effet Meissner en émettant l'idée que le champ magnétique décroît à partir de la surface du supraconducteur sur une longueur caractéristique  $\lambda_L$ , appelée longueur de pénétration.

qu'il existait en fait deux types de supraconducteurs.

Ce n'est qu'en 1957 que le Russo-Américain Alexei A. Abrikosov identifia la supraconductivité de type II, présentant une aimantation complètement différente caractérisée par l'état mixte et autorisant la supraconductivité en présence de champs magnétiques très élevés. De fait, les supraconducteurs de ce type n'obéissent pas à l'effet Meissner. Les travaux d'Abrikosov lui vaudront en 2003 le prix Nobel de physique avec Ginzburg et l'Anglo-Américain Anthony J. Leggett. Et ce n'est qu'en cette même année 1957 que les Américains John Bardeen, Leon N. Cooper et John R. Schrieffer purent proposer une théorie de la supraconductivité, distinguée par le prix Nobel de physique en 1972. D'après la théorie BCS (initiales de leurs noms), les électrons se déplacent par paires de Cooper (deux électrons de spins opposés) en formant des bosons (de spin nul), condensés dans un seul état quantique, sous l'effet de phonons, phénomène vibratoire également quantique. Cette interaction entre électrons et phonons est à l'origine de la

**résistivité** et de la supraconductivité. Attirés par le passage très rapide d'un électron ( $10^6$  m/s), les **ions** se déplacent et génèrent une zone électriquement positive qui le demeure après ce passage, permettant l'attraction d'un nouvel électron qui s'apparie au premier en dépit de la **répulsion coulombienne**. Cette configuration ne résiste toutefois pas à l'**agitation thermique**, ce qui explique pourquoi la température est l'ennemi du phénomène de supraconductivité.

La théorie BCS, valable pour les **supraconducteurs** dits **conventionnels**, ne permettait d'ailleurs pas d'envisager l'apparition de la supraconductivité à des températures relativement élevées, c'est-à-dire supérieures à celle de l'azote liquide (77 K, soit -196 °C), *a fortiori* à la température ambiante. Ce palier des 77 K fut atteint avec des composés tels que Y-Ba-Cu-O (les records sont actuellement de l'ordre de 165 K, à pression élevée, et de 138 K, soit -135 °C, à pression normale). L'Allemand Johannes Georg Bednorz et le Suisse Karl Alexander Müller se virent décerner en 1987 le prix Nobel pour la découverte des **supraconducteurs non conventionnels** sous forme de matériaux à structure **pérovskite** de cuivre à base de lanthane qui présentent une supraconductivité à une température de 35 K (-238 °C). En remplaçant le lanthane par de l'yttrium, en particulier dans l' $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , il a été par la suite possible d'augmenter sensiblement la température critique et de développer la famille des cuprates, supraconducteurs efficaces mais difficiles à mettre en œuvre pratiquement pour l'électrotechnique dans la mesure où ce sont des céramiques. Les **supraconducteurs à haute température critique** sont tous des supraconducteurs de type II.

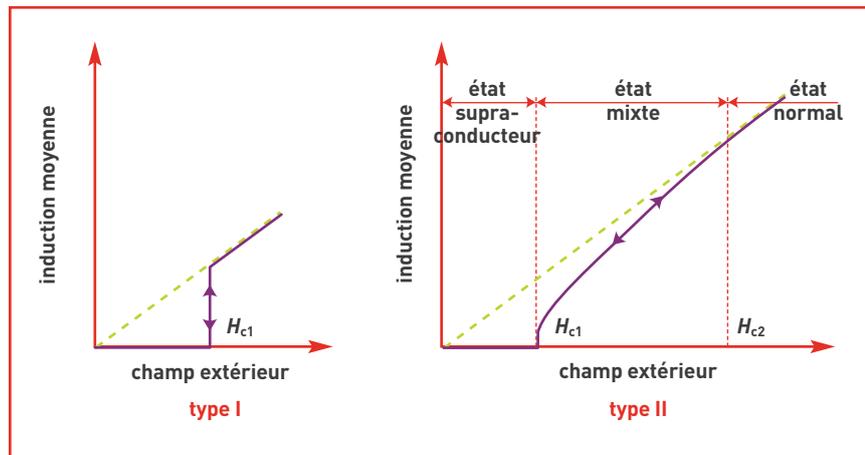


Figure 1. Induction moyenne dans des supraconducteurs de type I et de type II en fonction du champ extérieur.

### Le magnétisme étrange des supraconducteurs de type II

En présence d'un champ magnétique, les supraconducteurs de type II offrent un diamagnétisme parfait jusqu'au champ  $H_{c1}$  de manière comparable aux supraconducteurs de type I. À partir de  $H_{c1}$ , le supraconducteur de type II est dans l'état mixte qui autorise une pénétration partielle du champ jusqu'au champ  $H_{c2}$  (figure 1) et donc une supraconductivité à haut champ. L'état mixte se présente comme un ensemble de cœurs à l'état normal qui emplissent le matériau supraconducteur à partir de  $H_{c1}$ , chacun contenant un quantum de flux ( $2,07 \cdot 10^{-15}$  weber) et entouré d'un vortex de courants supraconducteurs (figure 2). Lorsque le champ magnétique augmente, le réseau se densifie jusqu'à combler complètement le matériau supraconducteur à  $H_{c2}$ .

La distinction entre les deux types de supraconductivité est très liée à la notion de longueur de cohérence  $\xi$  et à la notion de pro-

fondeur de pénétration  $\lambda_L$ , qui caractérisent l'interface entre une région normale et une région supraconductrice.  $\xi$  représente la variation spatiale de l'état supraconducteur (densité d'électrons supraconducteurs) et  $\lambda_L$  la longueur de pénétration de London du champ magnétique. Le rapport de ces deux longueurs caractéristiques, appelé **paramètre de Ginzburg-Landau** et noté  $\kappa$  ( $\kappa = \lambda_L/\xi$ ) détermine le type de supraconductivité. Si  $\kappa < \sqrt{2}/2$ , le supraconducteur est de type I, si  $\kappa > \sqrt{2}/2$ , le supraconducteur est de type II.

À l'interface, la pénétration du champ magnétique, définie par  $\lambda_L$ , correspond à une augmentation de l'énergie libre dans le matériau supraconducteur, tandis que la constitution de l'état supraconducteur, caractérisée par la longueur de cohérence, se rapporte à une diminution de l'énergie libre. Le bilan énergétique de l'interface dépend du rapport  $\kappa$ . Dans le cas des supraconducteurs de type II, l'état mixte résulte

Suite page 18

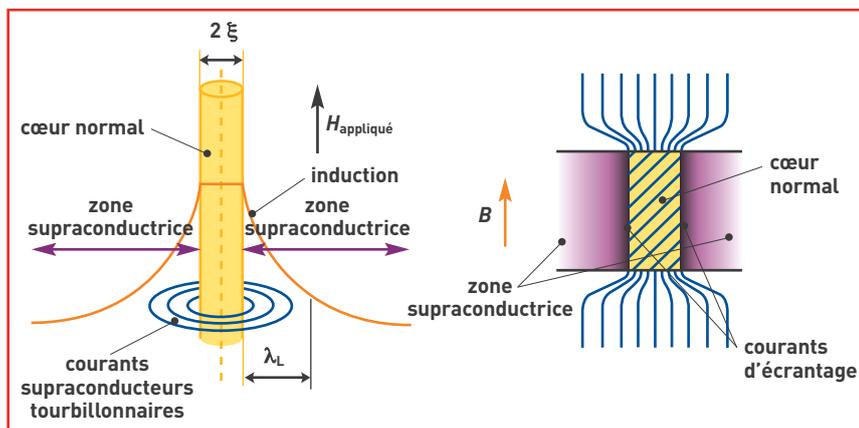
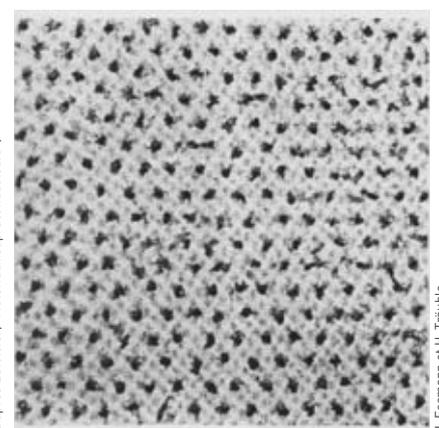


Figure 2. Schéma d'un vortex mettant en évidence la longueur de cohérence et la profondeur de pénétration.



Décoration magnétique de la surface d'un supraconducteur dans l'état mixte.

(d'après Lavoisier, "Matériaux supraconducteurs")

(d'après Lavoisier, "Matériaux supraconducteurs")

U. Essmann et H. Trauble

matériau		$\xi$ ( $\mu\text{m}$ ) 0 K	$\lambda_L$ ( $\mu\text{m}$ ) 0 K	$\kappa$	$T_c$ (K)	$\mu_0 \cdot H_{c1}$ (teslas) 0 K	$\mu_0 \cdot H_{c2}$ (teslas) 0 K
type I	Al	1,36	0,05	0,04	1,18	0,010 5	
	Pb	0,083	0,037	0,5	7,18	0,080 3	
type II	NbTi	0,005	0,3	60	9,25	0,01	14
	Nb <sub>3</sub> Sn	0,003 6	0,065	18	18	0,017	25,5
	YBaCuO	plan	0,003	plan 0,8	$\approx 300$	93	
axe c		0,000 6	axe c 0,2				

Tableau. Les caractéristiques de quelques supraconducteurs de type I et de type II.  $\mu_0 \cdot H_{c1}$  et  $\mu_0 \cdot H_{c2}$  représentent les inductions magnétiques,  $\mu_0$  étant la perméabilité magnétique du vide (et du matériau dans le cas présent).

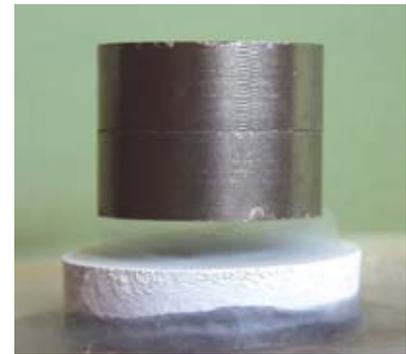
Suite de la page 17  
donc de la création d'un grand nombre d'interfaces. Chaque interface correspond en effet à un bilan négatif d'énergie qui rend énergétiquement favorable la supraconductivité au-delà de  $H_{c1}$  (tableau).

**Les applications**

Du point de vue des applications, la supraconductivité de type I ne présente pas grand intérêt. La température critique, qui limite donc les applications de la supraconductivité, est malheureusement très faible dans le cas des deux supraconducteurs qui autorisent aujourd'hui des applications concrètes : le **niobium-titane NbTi** (9,2 K) – les premiers câbles supraconducteurs en alliage niobium-titane sont apparus au début des années soixante – et le **niobium-étain Nb<sub>3</sub>Sn** (18 K). La mise en œuvre de leur supraconductivité nécessite une réfrigération à la température de l'hélium

liquide [4,2 K]<sup>(2)</sup>, température qui a constitué le premier jalon vers la température ambiante, véritable Graal de la supraconductivité.

Si les supraconducteurs de type II peuvent supporter des champs magnétiques très élevés, ils sont également capables de transporter des densités de courant impressionnantes, jusqu'à une valeur elle aussi critique, fonction du champ magnétique (figure 3) : les premiers **aimants** supraconducteurs vont ainsi apparaître. Dans ces conditions, les densités de courant possibles sont très grandes devant celles qui sont réalisables dans l'électrotechnique domestique ou industrielle (de l'ordre de 10 A/mm<sup>2</sup>). Depuis les années soixante-dix, le CEA s'intéresse essentiellement aux applications liées à la production de champs magnétiques **permanents** intenses dans des grands volumes (**confinement magnétique** de **plasmas de fusion**, physique des particules, imagerie médicale).



La découverte de la supraconductivité à haute température critique a rendu possible la vision directe à l'air libre d'une manifestation de la supraconductivité qui est celle de l'aimant flottant au-dessus d'une pastille d'YBaCuO refroidie à l'azote liquide et qui est maintenant bien connue.

Ce sont en fait les applications largement dominantes des supraconducteurs de type II, essentiellement le NbTi<sup>(3)</sup>. Dans ce cas, la supraconductivité permet d'économiser une puissance électrique considérable, même en prenant en compte le rendement **cryogénique** des installations, qui fait qu'un watt dissipé à 4,2 K nécessite de dépenser au minimum 300 W à la température ambiante pour les installations industrielles de très grande puissance. Certains chercheurs dans le monde entier rêvent toujours d'une supraconductivité à température ambiante, mais la supraconductivité appliquée semble encore liée pour longtemps à la réfrigération à très basse température.

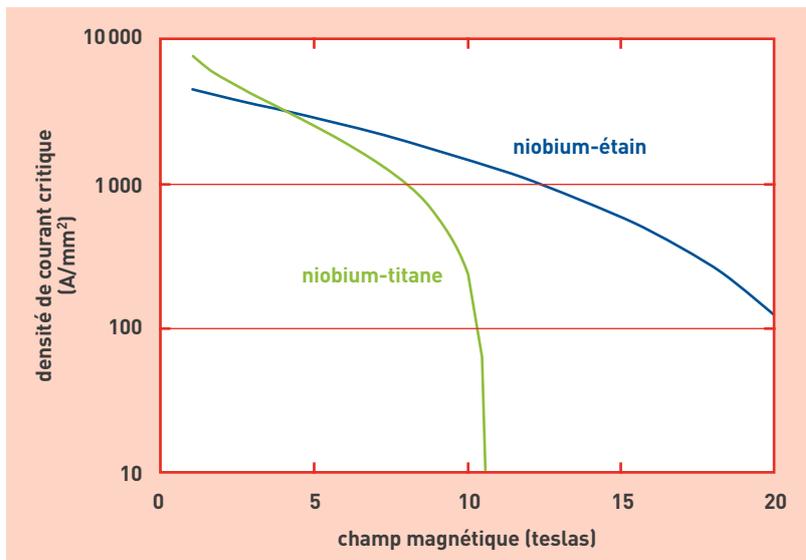


Figure 3. Densités de courant critique caractéristiques en fonction du champ magnétique à 4,2 K pour les deux matériaux supraconducteurs les plus utilisés, notamment pour la fabrication d'aimants supraconducteurs.

(2) Il faudrait en fait faire remonter l'histoire de la supraconductivité à William Ramsay qui, en 1895, fut le premier à isoler l'hélium. Que serait en effet la supraconductivité sans l'hélium qui est le vecteur de la réfrigération à très basse température? Rappelons que Kammerlingh-Onnes finit par liquéfier l'hélium en 1908 après les tentatives infructueuses de James Dewar à la fin du dix-neuvième siècle, ouvrant la voie à la découverte de la supraconductivité.

(3) Sa production est de l'ordre de 1 500 à 2 000 tonnes par an.

LEG 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*

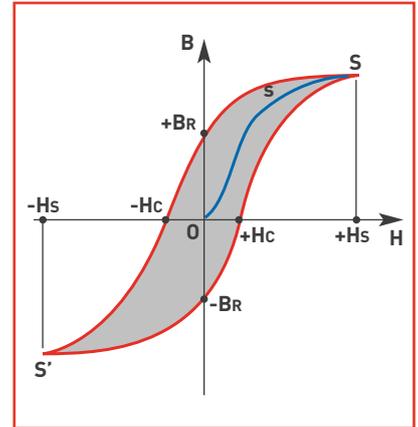


Figure E2. L'induction  $B$  d'un matériau magnétique par une bobine n'est pas proportionnelle à l'excitation magnétique (champ  $H$ ). Si la première aimantation dessine une courbe de type  $OS$  en bleu sur la figure, elle manifeste à partir de  $s$  une saturation. L'induction n'est conservée qu'en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

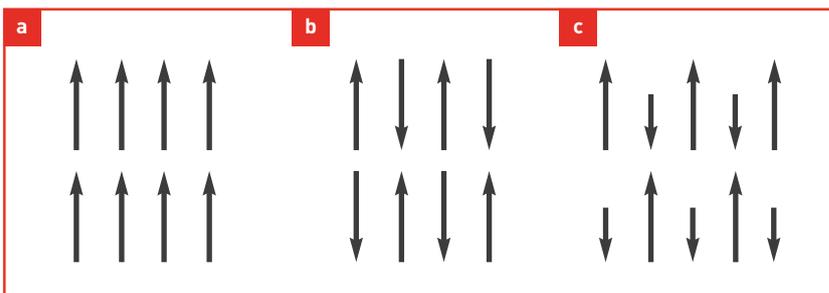


Figure E1. Les moments magnétiques élémentaires sont de même sens dans les substances ferromagnétiques (a), de sens opposés mais de somme nulle dans les antiferromagnétiques (b) et de sens opposés et de grandeur différente dans les ferrimagnétiques (c).



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.

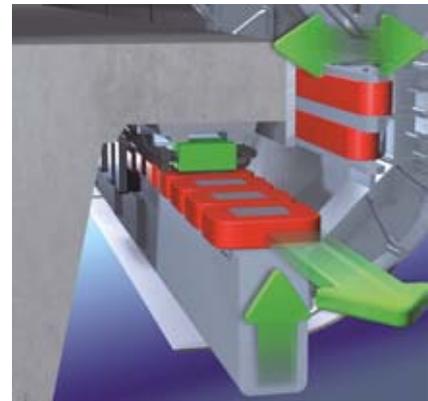
**3.** Les matériaux **diamagnétiques** présen-

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 câblages 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.