



CERN/Maximilien Brice

2. LES ACCÉLÉRATEURS ET DÉTECTEURS DE PARTICULES font désormais appel à la supraconductivité, notamment pour créer des champs magnétiques intenses. Ainsi, le nouveau collisionneur protons-

protons du CERN, le LHC, est équipé tout au long de son tunnel circulaire de 1 232 électroaimants supraconducteurs utilisant l'alliage niobium-titane (NbTi), qui produisent chacun un champ de 8,3 teslas.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Célébrations des 100 ans de la supraconductivité : www.supra2011.fr

Consortium européen des entreprises de la supraconductivité : www.conectus.org/index.html

J.-M. Courty et É. Kierlik, Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs, *Pour la Science*, n° 401, mars 2011.

P. Bertet et al., Des processeurs quantiques supraconducteurs ?, *Dossier Pour la Science*, n° 68, pp. 62-69, juillet-septembre 2010.

L. Plévert, « Notoriété internationale », dans Pierre-Gilles de Gennes, l'enchantement de la physique, *Les génies de la Science*, n° 40, pp. 40-47, 2009.

Ph. Lebrun, Cryogénie et supraconductivité pour le grand collisionneur de hadrons du CERN, *La Revue Générale du Froid*, vol. 95, n° 1050, pp. 33-40, 2005 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/811057?ln=fr>

J. Matricon et G. Waysand, La guerre du froid, Seuil, 1994.

aimants perdaient rapidement leur supraconductivité lorsque le champ magnétique produit dépassait la valeur critique (0,04 tesla pour le mercure).

Il fallut attendre la fin des années 1950 pour qu'apparaissent les premiers matériaux supraconducteurs ayant des champs magnétiques critiques élevés – plusieurs teslas –, notamment l'alliage niobium-zirconium NbZr ou le composé de niobium et d'étain Nb₃Sn. L'émergence de ces matériaux a fait passer la supraconductivité du statut de seul phénomène physique à celui de nouvelle technologie.

Ainsi, dès 1964, un aimant supraconducteur était utilisé pour détecter des particules dans une chambre à bulles au Laboratoire américain d'Argonne, près de Chicago. Les années 1950 ont été aussi importantes pour l'explication du phénomène de supraconductivité, avec les travaux du Russe Alexeï Abrikosov (prix Nobel en 2003) et la théorie dite BCS (du nom de ses trois auteurs, les Américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer, lauréats du prix Nobel en 1972) publiée en 1957. Notons cependant que la théorie de la supraconductivité reste inachevée, la théorie BCS ne s'appliquant apparemment pas aux nouvelles familles de supraconducteurs découvertes depuis 1986.

Pour réaliser des électroaimants puissants, le supraconducteur doit transporter un courant intense. Or un supraconducteur perd sa propriété lorsque la densité de courant dépasse un certain seuil, qui dépend

de la température et du champ magnétique (la densité de courant est l'intensité divisée par l'aire de la section du conducteur).

La densité de courant critique dépend aussi de l'élaboration du matériau, et l'art du métallurgiste est d'augmenter la densité de courant critique *via* une microstructure et une nanostructure adaptées. Les densités de courant atteintes en pratique sont souvent très supérieures à celles obtenues dans le cuivre dans des conditions normales (des centaines ou milliers d'ampères par millimètre carré pour un supraconducteur, contre quelques ampères par millimètre carré pour le cuivre).

Température, courant et champ critiques

Dans l'espace où les trois coordonnées représentent la température, l'intensité du champ magnétique et la densité de courant, l'état supraconducteur non dissipatif est délimité par une surface dite « critique » (voir la figure 4). La température critique joue un rôle particulier puisqu'elle définit le coût de la cryogénie requise. En pratique, la température de fonctionnement des dispositifs supraconducteurs doit rester inférieure à une fraction de la température critique, de l'ordre de la moitié, pour que le matériau conserve une capacité convenable de transport de courant.

Il existe deux grandes classes de supraconducteurs. D'abord, ceux à basse température critique, tels le NbTi à 9,5 kelvins

ou le Nb_3Sn à 18 kelvins. Ensuite, les composés à haute température critique, tels le YBaCuO à 93 kelvins ou le BiSrCaCuO à 110 kelvins.

Les premiers supraconducteurs à haute température critique ont été découverts en 1986 par Johannes Bednorz et Karl Müller (prix Nobel en 1987), des Laboratoires IBM à Zurich. Il s'agissait d'un composé BaLaCuO , autour de 30 kelvins alors que la température critique du supraconducteur le plus « chaud » connu à l'époque (Nb_3Ge) était de 23,3 kelvins. Une quête enthousiaste d'autres matériaux s'ensuivit et les records de température critique tombèrent : YBaCuO (janvier 1987), BiSrCaCuO (1988), etc. Le record est aujourd'hui détenu par le composé HgTlBaCaCuO avec 164 kelvins sous une pression de 30 gigapascals, valeur qui descend à 138 kelvins (-135°C) à la pression atmosphérique.

La découverte du composé YBaCuO a marqué une étape : c'était le premier matériau restant supraconducteur au-dessus des 77 kelvins de l'azote liquide, jusqu'à 93 kelvins.

En 2001, Jun Akimitsu, un chercheur de Tokyo, découvrait que le diborure de magnésium (MgB_2) est supraconducteur à 39 kelvins. Cette température critique est, certes, plus faible que pour bien d'autres supraconducteurs, mais ce matériau est simple et peu onéreux à produire. Des dispositifs d'imagerie fondés sur des électroaimants à MgB_2 sont fabriqués et commercialisés depuis 2006, alors que ce n'est toujours pas le cas avec les supraconducteurs à haute température critique.

Une dernière famille de supraconducteurs a été découverte en 2008. Il s'agit de pnictures de fer, des semi-métaux à base de fer et d'arsenic ou de phosphore. Ces nouveaux supraconducteurs ont des températures critiques allant jusqu'à 56 kelvins. Ils ouvrent une voie nouvelle pour comprendre la supraconductivité et les conditions de son apparition, puisqu'une explication satisfaisante de la supraconductivité à haute température critique manque encore. Et comme on ignore s'il existe une limite supérieure à la température critique, un objectif ultime serait de découvrir ou de concevoir un supraconducteur à température ambiante, qui n'exigerait plus de cryogénie !

Un supraconducteur ne présente aucune perte, mais cette propriété n'est réalisée que lorsque l'environnement électromagnétique du supraconducteur ne varie

LES AUTEURS



Pascal TIXADOR est professeur à l'Institut polytechnique de Grenoble [Grenoble INP/ENSE³] et chercheur à l'Institut Néel et au Laboratoire de génie électrique de Grenoble [G2Elab]. **Philippe LEBRUN** travaille au CERN, le Laboratoire européen pour la physique des particules, à Genève, sur les applications de la supraconductivité et de la cryogénie aux accélérateurs de particules.

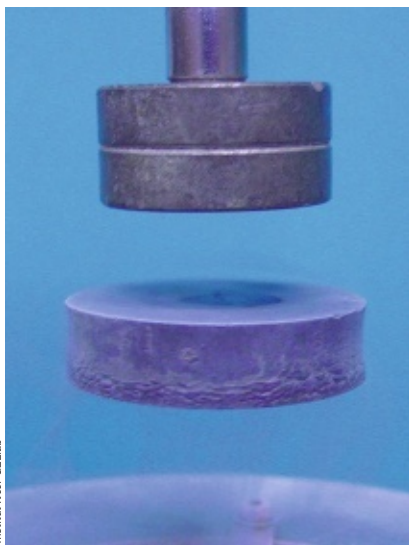
pas au cours du temps. Traversé par un courant variable ou soumis à un champ magnétique variable dans le temps, un supraconducteur est le siège de « pertes CA » (pour *courant alternatif*) : d'après les lois de l'électromagnétisme, toute variation temporelle du champ magnétique (extérieur ou lié au courant transporté) induit un champ électrique qui, associé aux courants dans le supraconducteur, crée des pertes. C'est pourquoi les supraconducteurs sont surtout utilisés en courant continu.

Une rupture technologique

Comme nous l'avons vu, un matériau n'est supraconducteur que dans des conditions bien particulières, et c'est pourquoi la technologie correspondante est onéreuse. Le cuivre ou l'aluminium sont de très mauvais conducteurs en comparaison des supraconducteurs, mais ils répondent en général assez bien aux cahiers des charges actuels de l'électrotechnique – les techniques de production, de transport et de distribution de l'électricité – avec des rendements pouvant atteindre 99,6 pour cent pour les très gros transformateurs par exemple.

La supraconductivité améliore notablement les performances électrotechniques et offre de nouvelles perspectives (nous y reviendrons). En revanche, elle constitue une rupture technologique totale, face à laquelle les électriciens et les distributeurs d'électricité restent assez conservateurs. Quelques chiffres permettent de mieux les comprendre. Une seule heure d'arrêt de l'alternateur des futures centrales nucléaires EPR (1 650 mégawatts) représentera 132 000 euros de manque à gagner et ruinera le gain de 0,1 pour cent en rendement apporté par la supraconductivité pour une durée d'environ 42 jours. La question de la fiabilité se pose donc immédiatement. Reste que de multiples réalisations en exploitation donnent des chiffres plus encourageants. En témoigne l'entreprise française *Nexans*, qui a plus de 12 ans d'expérience en conditions opérationnelles avec des câbles supraconducteurs (voir l'encadré page 82).

Les matériaux à basse température critique NbTi et Nb_3Sn représentent plus de 98 pour cent en volume du marché actuel des supraconducteurs. Cela paraît surprenant alors que, par exemple, le composé YBaCuO découvert en 1987 a une température critique d'environ 90 kelvins,



3. UN ASPECT SPECTACULAIRE et bien connu de la supraconductivité est la lévitation stable d'une pastille de matériau supraconducteur au-dessus ou au-dessous d'un aimant permanent. L'aimant induit dans la pastille des courants électriques ; ces derniers créent un champ magnétique dont l'interaction avec l'aimant entraîne une sustentation stable. L'utilisation de supraconducteurs pour les trains à lévitation magnétique est envisagée par certains.