



1. L'IMAGERIE par résonance magnétique (IRM) a fourni à la supraconductivité son principal débouché actuel.

se révélait bien devenir un «super» conducteur : la supraconductivité était découverte. Avec la liquéfaction de l'hélium, elle valut à Kammerlingh Onnes le prix Nobel de physique en 1913, premier d'une série d'une dizaine de ces prix attribuée pour des travaux liés à la supraconductivité.

Du courant sans pertes

Examinons de plus près ce phénomène de disparition de la résistance électrique. Une résistance nulle n'a pas de sens expérimentalement, car sa valeur dépend de la précision des appareils de mesure. Des mesures très fines de la décroissance du courant dans une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée, dite « en mode persistant », ont indiqué que la baisse du courant atteindrait seulement 0,07 pour cent au bout d'un siècle ! Cela a fourni une borne supérieure à la résistivité électrique d'un supraconducteur (10^{-24} ohm-mètre). Avec la même bobine, mais en cuivre à température ambiante ($1,7 \times 10^{-8}$ ohm-mètre), le courant diminue de 0,07 pour cent en moins de 0,2 microseconde...

La circulation sans pertes d'un courant électrique dans une pastille supraconductrice est à l'origine de sa suspension au-dessous d'un aimant permanent, phénomène qui fascine toujours (*voir la figure 3*) : le champ magnétique de l'aimant crée une force électromagnétique sur le courant persistant porté par la pastille.

Un supraconducteur est donc un matériau qui ne connaît pas l'effet Joule, c'est-à-dire qui ne dissipe aucune chaleur lors du passage d'un courant. Cette propriété exceptionnelle n'existe qu'au-dessous d'une certaine température, la température critique. La contrainte de refroidissement limite l'exploitation commerciale de la supraconductivité. La cryogénie, science et technologie des basses températures, reste complexe et surtout très coûteuse.

Quel est le coût énergétique du refroidissement nécessaire ? Des calculs thermodynamiques montrent que, pour une machine thermique fonctionnant à température ambiante (300 kelvins ou 27 °C), il faut fournir au minimum 74 watts pour extraire un watt à un fluide refroidi à 4 kelvins (hélium liquide), tandis que ce mini-

mum est de 2,9 watts seulement à 77 kelvins (azote liquide). Il est donc 25 fois plus avantageux de fonctionner à la température de l'azote liquide...

En pratique, les installations de liquéfaction sont bien moins efficaces, d'où des coûts énergétiques trois à quatre fois supérieurs. Ces coûts élevés se reflètent pour partie dans le prix des fluides cryogéniques. En grosses quantités, l'hélium liquide à 4,2 kelvins coûte quatre à cinq euros par litre, contre 0,1 euro par litre pour l'azote liquide à 77 kelvins. Ces chiffres résument tout l'intérêt des matériaux qui sont supraconducteurs à relativement haute température.

La supraconductivité disparaît si la température dépasse une certaine valeur, mais la température n'est pas le seul acteur. Un champ magnétique trop intense, supérieur à une valeur dite critique, détruit aussi l'état supraconducteur. Kammerlingh Onnes en avait fait la mauvaise expérience dès 1913. Il avait immédiatement compris l'intérêt des supraconducteurs pour réaliser de puissants électroaimants, mais toutes ses tentatives furent vaines. Les



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](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