

La supraconductivité à l'ère industrielle

Certains matériaux perdent toute résistance électrique au-dessous d'une certaine température. Ce phénomène découvert il y a tout juste 100 ans a des applications méconnues, mais de plus en plus présentes.

Pascal Tixador et Philippe Lebrun

L'ESSENTIEL

- ✓ En ce mois d'avril 2011, la découverte de la supraconductivité a 100 ans.
- ✓ Les applications de la supraconductivité sont limitées par le coût et la complexité de la cryogénie requise.
- ✓ La découverte en 1986 des premiers supraconducteurs à haute température critique a fait croire à une révolution technologique imminente.
- ✓ Cette révolution a pris du retard, mais les applications de la supraconductivité (imagerie médicale, électrotechnique, etc.) se multiplient.

© Shutterstock/Levent Konuk

Dans le monde, plus de 26 000 appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique) fournissent de précieux diagnostics médicaux. L'IRM est maintenant familière au grand public (*voir la figure 1*), mais combien savent qu'une bobine supraconductrice fonctionnant à -269°C , près du zéro absolu (0 kelvin ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), est à la base de ce remarquable équipement médical ?

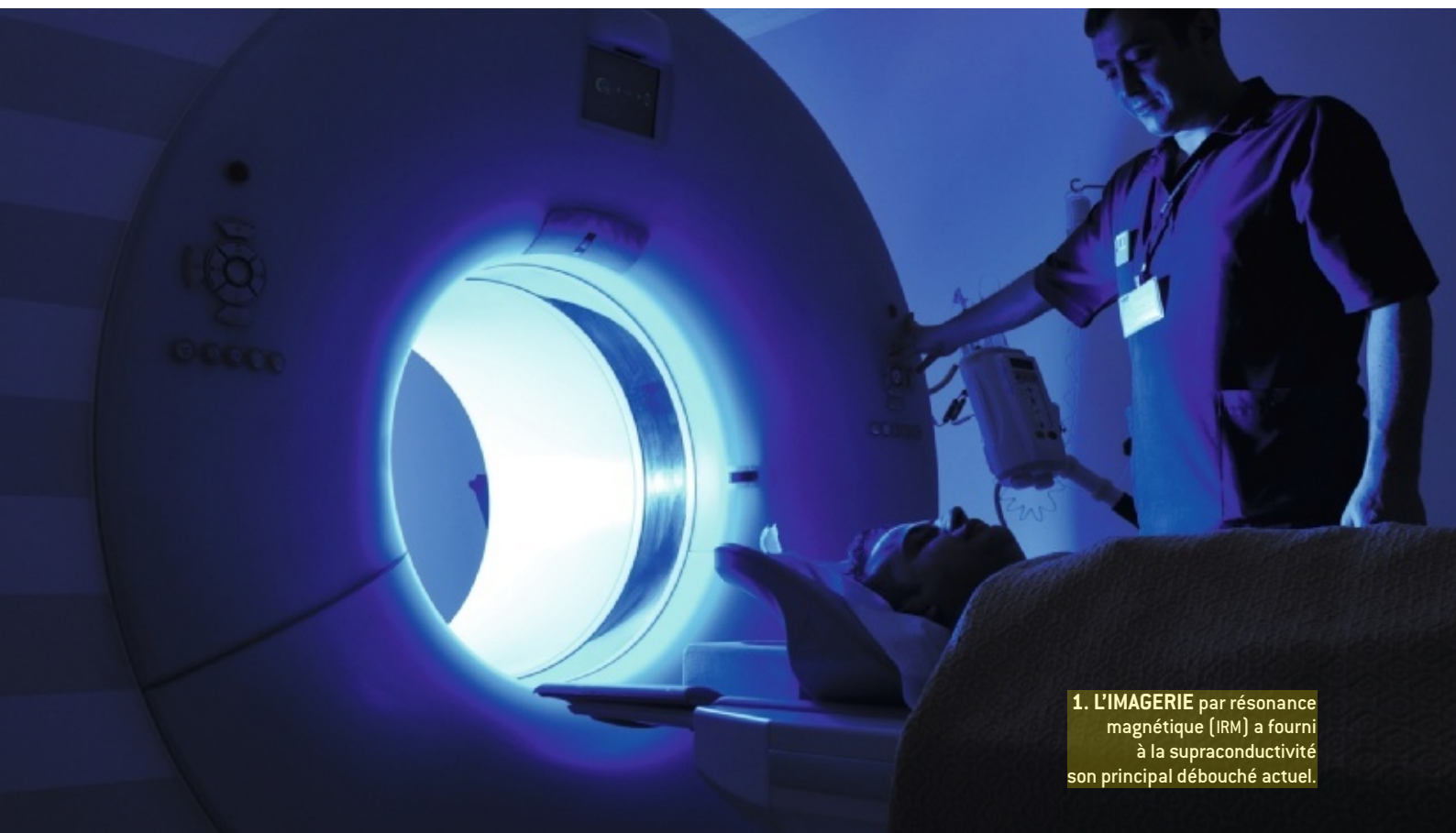
Plus généralement, les applications de la supraconductivité, phénomène extraordinaire découvert il y a 100 ans, restent méconnues, car discrètes. C'est l'occasion de passer en revue quelques-unes des utilisations les plus importantes des matériaux supraconducteurs : imagerie médicale, puissants aimants pour la physique des particules, détection et mesure de champs magnétiques infimes, transport de l'électricité, conception de circuits quantiques.

Mais commençons par rappeler ce qu'est la supraconductivité, comment elle a été découverte et quelles sont les principales propriétés des matériaux supraconducteurs. Cela nous permettra de comprendre les difficultés qui ont can-

tonné la supraconductivité à des niches particulières.

L'histoire commence dans une petite ville universitaire des Pays-Bas, Leyde, qui devint le 10 juillet 1908 l'endroit le plus froid au monde. Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926) y avait réussi, le premier, à liquéfier de l'hélium, donc à atteindre la température record de 4,2 kelvins (-269°C). La liquéfaction de ce gaz découvert en 1895 faisait l'objet d'une compétition internationale : c'était le dernier des « gaz non condensables » qui résistait à la liquéfaction, après celle de l'hydrogène en 1898.

En ayant accès à l'hélium liquide, Kammerlingh Onnes pouvait étudier la résistivité des métaux aux très basses températures. Or le 8 avril 1911, Gilles Holst, un étudiant de Kammerlingh Onnes, qui sera l'un des fondateurs du Centre de recherche de Philips et son premier directeur, constata que la résistance électrique du mercure placé dans un capillaire en verre devenait brusquement non mesurable au-dessous de 4,15 kelvins. Après de multiples et méticuleuses vérifications, tant le phénomène paraissait extraordinaire, le mercure



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