

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.

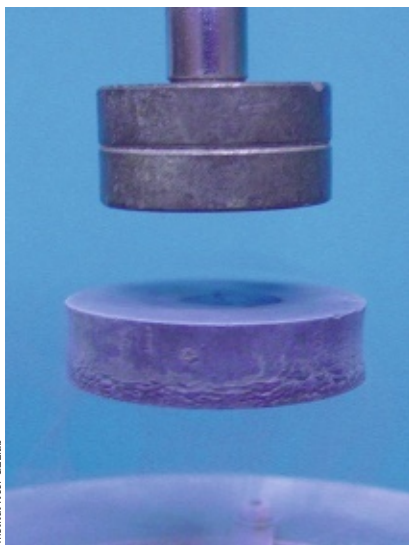
Une dernière famille de supraconducteurs a été découverte en 2008. Il s'agit de pnictures de fer, des semi-métaux à base de fer et d'arsenic ou de phosphore. Ces nouveaux supraconducteurs ont des températures critiques allant jusqu'à 56 kelvins. Ils ouvrent une voie nouvelle pour comprendre la supraconductivité 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.



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.

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 Nb Ti 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,

ce qui autorise un refroidissement à l'azote liquide et non plus à l'hélium liquide. Mais la disponibilité industrielle, la facilité de mise en œuvre, le coût ou la constance des performances sont d'autres critères souvent plus importants.

C'est déjà le cas parmi les supraconducteurs à basse température critique : les conducteurs à base de Nb_3Sn (une vingtaine de tonnes en 2009, mais le projet ITER de réacteur expérimental pour la fusion nucléaire en utilisera plus de 500 tonnes) sont nettement moins utilisés que les conducteurs à base de NbTi (2000 tonnes

en 2009) ; pourtant, leurs température et champ critiques sont bien plus favorables et ils ont été découverts quelques années plus tôt. Mais le Nb_3Sn est beaucoup plus onéreux et plus complexe à mettre en œuvre. Il n'est donc utilisé que lorsque le NbTi ne convient plus, notamment pour de très hauts champs magnétiques, supérieurs à 12 teslas.

Les matériaux à haute température critique se sont révélés très complexes à mettre en œuvre et il a fallu redoubler d'imagination pour y faire passer des courants intenses. Ce sont des céramiques très

fragiles, et le transport du courant électrique y est sensible aux défauts et à l'orientation des grains cristallins. Les défis ont cependant été relevés et la production de conducteurs YBaCuO performants atteint désormais le stade préindustriel. Le coût de ces conducteurs reste très élevé, mais, comme il est dû au procédé plus qu'aux matériaux, l'industrialisation devrait le faire décroître rapidement.

Venons-en aux applications proprement dites de la supraconductivité. L'une des plus importantes porte sur l'imagerie médicale, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) en particulier. C'est d'ailleurs l'IRM qui a apporté à la supraconductivité son principal débouché commercial.

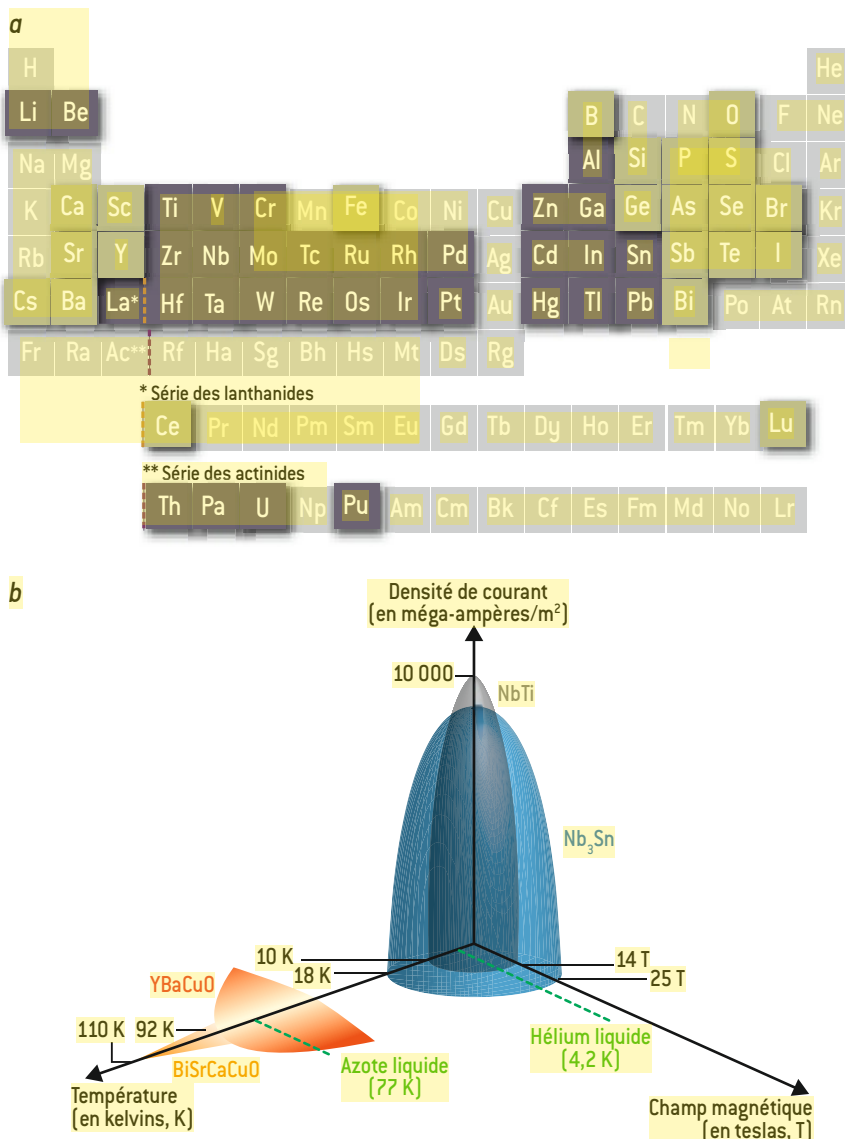
Au service de l'imagerie médicale

L'IRM est une technique d'imagerie de choix pour tous les tissus mous, tels les muscles ou le cerveau. La résolution peut être meilleure que le millimètre dans tout le volume étudié. L'IRM va maintenant au-delà de la simple imagerie si l'on suit l'activité cérébrale *via* les variations locales des débits sanguins (IRM fonctionnelle, ou IRMf). Plus récemment est apparue l'IRM de diffusion (IRMd) qui permet de suivre le mouvement des molécules d'eau à l'échelle microscopique et qui apporte d'autres informations précieuses sur le fonctionnement du cerveau.

Toutes ces techniques utilisent un champ magnétique uniforme et constant pour aligner les spins (moments cinétiques intrinsèques) de noyaux atomiques, tels ceux d'hydrogène, et les faire tourner autour de l'axe du champ à des fréquences radio (quelques dizaines de mégahertz). Excités par un champ magnétique perpendiculaire variant à la même fréquence, les spins nucléaires oscillent et entrent en résonance, ce qui produit un signal à l'arrêt de l'excitation. L'analyse de ce signal permet de construire des images qui reflètent l'activité des tissus ou leur composition chimique.

Les bobines (classiques) qui fournissent le champ aux fréquences radio sont responsables des claquements perçus lors d'un examen d'IRM. La bobine supraconductrice, elle, est très discrète, mais son refroidissement utilise des cryoréfrigérateurs qui produisent un bruit sourd à quelques hertz.

Le rapport signal sur bruit et la résolution spatiale augmentent avec l'amplitude



4. LA SUPRACONDUCTIVITÉ EST ASSEZ FRÉQUENTE dans la nature : une trentaine (a, cases en gris foncé) des 103 éléments du tableau de Mendeleïev sont supraconducteurs à température suffisamment basse et sous pression atmosphérique. Une vingtaine d'autres (en vert) ne sont supraconducteurs que sous haute pression. Par ailleurs, l'état supraconducteur ne se maintient que si le champ magnétique et la densité de courant qui circule ne sont pas trop élevés. Dans une représentation où les trois axes de coordonnées représentent les valeurs maximales de la température, du champ magnétique et de la densité de courant, l'état supraconducteur est délimité par une surface dite critique (b, les surfaces critiques de quelques supraconducteurs).