

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.

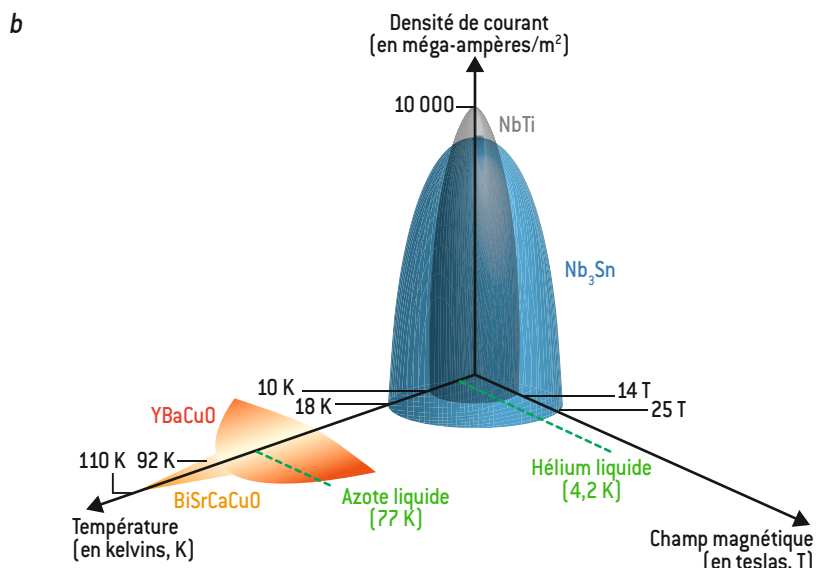
Le rapport signal sur bruit et la résolution spatiale augmentent avec l'amplitude

a

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac**	Rf	Ha	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							

* Série des lanthanides
Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

** Série des actinides
Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr



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).

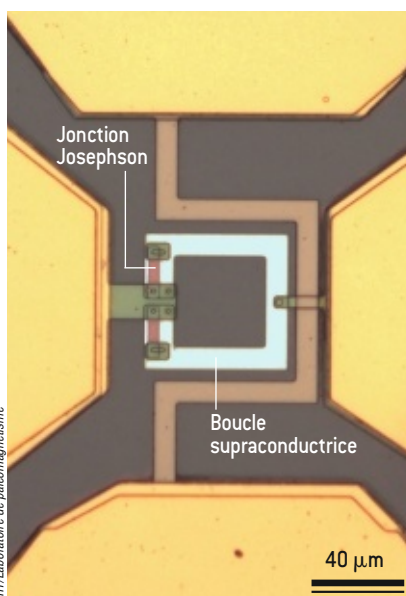
du champ magnétique constant. Celle-ci doit être particulièrement stable dans le temps (dérive moyenne inférieure à 0,1 partie par million et par heure). Une bobine supraconductrice est la meilleure réponse à ces exigences pour des champs magnétiques supérieurs à 0,5 tesla environ. Il faut noter qu'un imageur classique à 0,6 tesla consomme 225 kilowatts, alors qu'un imageur supraconducteur à 1,5 ou même 3 teslas ne consomme que 7,5 kilowatts pour le maintien de la basse température. La bobine fonctionne généralement en mode persistant, donc sans alimentation.

La tendance de l'imagerie par résonance magnétique est à une augmentation du champ. Les appareils courants utilisent un aimant solénoïde de 1,5 tesla, pesant environ cinq tonnes. Le marché des appareils à 3 teslas est en forte croissance. Des appareils à haut ou très haut champ (supérieur à 7 teslas) sont plus rares, mais ils se multiplient dans les laboratoires de recherche. Ainsi, le projet français Iseult/INUMAC (*Imaging of Neuro Disease Using High Field Magnetic Resonance and Contrastophores*), en construction à Saclay, près de Paris, vise un champ de 11,7 teslas. Il offrira pour l'imagerie du cerveau une résolution spatiale et temporelle dix fois supérieure à celle des instruments actuels. L'aimant, long de quatre mètres et d'un diamètre proche de cinq, pèsera 150 tonnes...

La magnétoencéphalographie (voir la figure 5) et la magnétocardiographie sont deux autres outils d'investigation médicale où la supraconductivité est primordiale. Elles reposent sur la mesure du champ magnétique créé par l'activité du cerveau et du cœur respectivement. L'analyse des signatures magnétiques renseigne sur certaines pathologies.

Pour l'heure, la magnétoencéphalographie et la magnétocardiographie sont utilisées principalement à des fins de recherche dans une centaine de laboratoires à travers le monde, mais elles sont en passe de devenir des outils de diagnostic dans les hôpitaux.

Les champs magnétiques en question sont extrêmement faibles, d'où le recours aux SQUID (*Superconducting Quantum Interference Devices*, ou dispositifs supraconducteurs à interférences quantiques). Ces petits circuits à base de boucles supraconductrices interrompues en deux endroits par une mince tranche isolante, une « jonction Josephson », sont les capteurs magnétiques les plus sensibles



5. LA MAGNÉTOENCÉPHALOGRAPHIE consiste à enregistrer les infimes champs magnétiques produits par l'activité du cerveau. Pour cela, le patient porte un casque (*en haut*) tapissé de centaines de petits capteurs à base de SQUID. Un SQUID est un circuit supraconducteur très sensible au champ magnétique qui le traverse (*ci-dessus*).

qui existent. Ils exploitent le fait que la supraconductivité est un état quantique, observable à l'échelle macroscopique.

Un courant peut circuler (par effet tunnel) à travers la jonction Josephson sans qu'il y ait une tension à ses bornes. Et le couplage des états quantiques dans les supraconducteurs situés de part et d'autre de chaque jonction fait qu'un SQUID est très sensible au champ magnétique qui traverse la boucle.

Plus généralement, la jonction Josephson est la brique de base de toute une électronique « quantique ». Des circuits avec ces jonctions Josephson peuvent se comporter comme des sortes d'atomes artificiels, où l'énergie ne peut prendre que des valeurs bien déterminées. Ils constituent des systèmes modèles pour mener des expériences et sonder les concepts de la mécanique quantique. Ils sont aussi intéressants pour la nanoélectronique, où les dimensions nanométriques font apparaître des effets quantiques. Enfin, ils ouvrent la voie aux processeurs quantiques à base de qubits (bits quantiques), c'est-à-dire à de possibles ordinateurs quantiques.

Traquer les particules

La supraconductivité est également le compagnon indissociable d'un autre domaine, la physique des particules élémentaires, dont les outils de base sont les accélérateurs et détecteurs de particules. Ces appareils font appel à des champs électromagnétiques dans de grands volumes pour accélérer, guider, focaliser et analyser les trajectoires des particules chargées. En donnant accès à des champs plus élevés et en réduisant la consommation d'énergie, aimants supraconducteurs et cavités supraconductrices à champs de radiofréquence ont rendu possibles les progrès spectaculaires de ces machines.

C'est pour la physique des particules qu'ont été développés les premiers aimants supraconducteurs, dès les années 1960. Ce domaine a donné une grande impulsion aux matériaux supraconducteurs et continue de faire progresser les techniques.

Le premier cyclotron, construit à Berkeley en 1930, tenait dans la paume d'une main. Aujourd'hui, le grand collisionneur LHC du CERN accélère des protons à une énergie 100 millions de fois supérieure, le long d'un cercle de 26,7 kilomètres de circonférence. Ces énergies sont nécessaires pour sonder la matière à la très petite échelle