

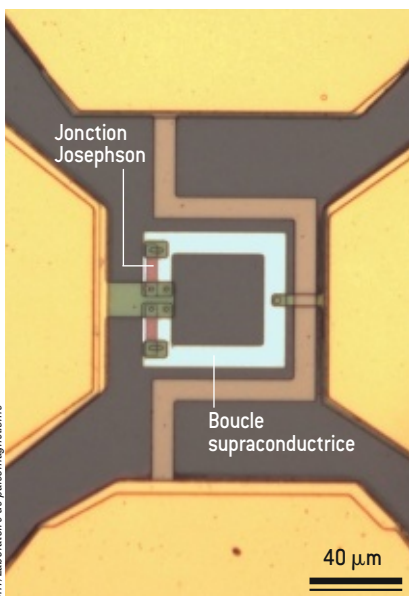
du champ magnétique constant. Celle-ci doit être particulièrement stable dans le temps (dérive moyenne inférieure à 0,1 partie par million et par heure). Une bobine supraconductrice est la meilleure réponse à ces exigences pour des champs magnétiques supérieurs à 0,5 tesla environ. Il faut noter qu'un 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

LE MARCHÉ DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

En 2009, le marché mondial de la supraconductivité était de 4,3 milliards d'euros, dominé à 78 pour cent (3,355 milliards d'euros) par l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN). La supraconductivité pour les instruments de recherche représentait 765 millions d'euros. Le reste concerne les applications émergentes : électrotechnique (100 millions d'euros) et électronique (80 millions d'euros). On s'attend à une croissance modérée des marchés dominants, mais à une très forte augmentation des marchés émergents.



Pour la LIPA, l'un des principaux opérateurs de réseaux électriques des États-Unis, la Société française Nexans a fabriqué et installé un câble de transport supraconducteur mis sous une tension de 138 000 volts. C'est la liaison supraconductrice la plus longue (600 mètres) et la plus puissante du monde (ci-contre, une coupe du câble ; ci-dessus, son raccordement au réseau).

des constituants élémentaires, et pour produire des particules de masse élevée qui ont pu exister juste après le Big Bang. Les masses des particules appartenant au « modèle standard » de la physique des particules restent aujourd'hui inexplicables. Il y a plusieurs décennies, le physicien britannique Peter Higgs a proposé un mécanisme théorique qui suppose l'existence d'une particule, le boson de Higgs ; l'interaction de ce dernier avec les particules connues leur conférerait leurs masses.

Mais ce boson de Higgs aurait une masse très élevée et il faut donc des accélérateurs de particules particulièrement puissants pour le découvrir. Deux accélérateurs, tous deux à technologie supraconductrice, sont sur les rangs : le *Tevatron* américain (0,9 téraélectronvolt par faisceau, donc le double pour l'énergie des collisions) qui sera bientôt arrêté et le LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons) du CERN, à Genève (7 téraélectronvolts par faisceau).

Dans ces accélérateurs, des aimants maintiennent les particules sur une trajec-

toire circulaire. À énergie donnée, plus le champ magnétique fourni par les aimants est intense, plus le rayon de l'accélérateur est petit, d'où l'intérêt de la technologie supraconductrice.

Les chiffres pour le LHC sont sans appel. Grâce à ses 1 232 aimants en niobium-titane (NbTi) qui produisent sans pertes un champ de 8,3 teslas, la circonférence du LHC n'est « que » de 26,7 kilomètres, avec un système de cryogénie qui consomme 40 mégawatts seulement (voir la figure 2). La technologie classique, avec des aimants résistifs, limite le champ à 1,8 tesla. Elle aurait conduit à une circonférence de 110 kilomètres et une consommation de 900 mégawatts. Sans la supraconductivité, le LHC n'était tout simplement pas concevable...

2 000 tonnes de niobium-titane au LHC

Au LHC, qui a démarré en 2008, d'autres aimants jouent le rôle de lentilles magnétiques et focalisent les faisceaux. Le champ magnétique se révèle aussi très utile autour des zones de collisions pour dévier les particules chargées produites et ainsi mieux les analyser. Ces aimants de détection doivent produire des champs intenses dans de grands volumes et être peu encombrants pour laisser le maximum de place aux détecteurs eux-mêmes : c'est le cahier des charges idéal pour un aimant supraconducteur. Le LHC fait ainsi appel à plusieurs très grands aimants supraconducteurs de détection, tel le toroïde supraconducteur ATLAS, dont la masse de matériau supraconducteur est de 376 tonnes. Au total, le LHC utilise plus de 2 000 tonnes de niobium-titane.

Notons que les accélérateurs de particules ont aussi des applications médicales, telle la protonthérapie où des faisceaux de protons déposent leur énergie avec une précision millimétrique et sans endommager les tissus traversés. La production des protons avec la bonne énergie (plusieurs centaines de mégaélectronvolts) fait, là encore, intervenir des aimants, auxquels la supraconductivité peut conférer une masse, un volume et une consommation réduits.

Un autre domaine d'application de la supraconductivité, et qui prend de plus en plus d'importance, est celui des réseaux de distribution de l'électricité. Étant donné la place que cette forme d'énergie occupe dans la vie moderne, les réseaux électri-