

R

ENDEZ-VOUS

P.86 Idées de physique
P.90 Art & science
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

LA CLÉ DES CHAMPS FORTS

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

Il est difficile de créer des champs magnétiques à la fois permanents et très intenses. Les records actuels ne dépassent pas 50 teslas.

Produire des champs magnétiques très intenses est un enjeu de taille, tant en recherche fondamentale, pour sonder les propriétés de la matière, que du côté de la santé, pour augmenter la résolution de l'IRM (imagerie par résonance magnétique). Mais le champ à la surface des meilleurs aimants permanents n'atteint que quelques teslas, environ 30 000 fois le champ magnétique terrestre. Une valeur modeste et, de plus, limitée à de petits volumes.

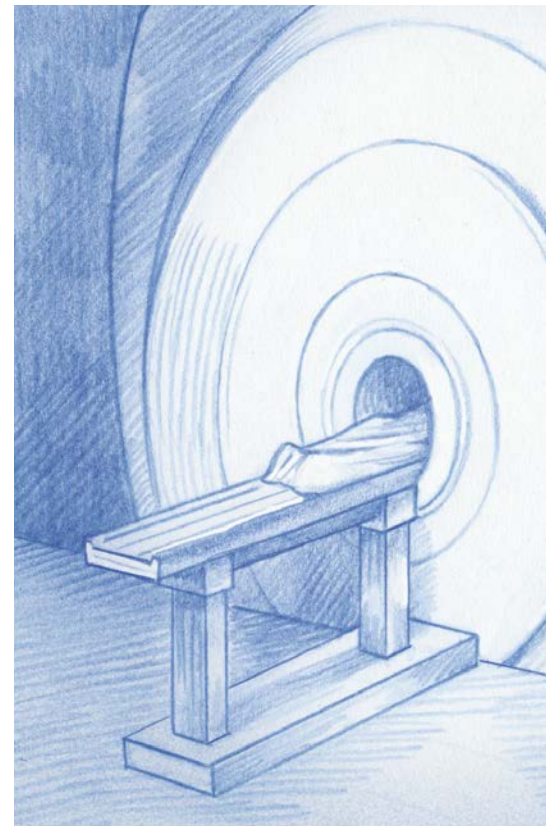
Pour des champs plus intenses et plus étendus, il y a les électroaimants, présents dans de nombreuses applications du quotidien, par exemple les moteurs électriques ou les verrouillages de porte. Mais des obstacles apparaissent dès que l'on souhaite des champs de plusieurs dizaines de teslas. Lesquelles, et comment les surmonter ?

Voyons d'abord le principe d'un électroaimant. Tout courant électrique

crée un champ magnétique dans son voisinage. Celui-ci est toutefois très faible, même pour des courants intenses : pour atteindre 1 millième de tesla, il faut se placer à 2 centimètres d'un conducteur où circulent 100 ampères !

DU COURANT ÉLECTRIQUE AU CHAMP MAGNÉTIQUE

Afin d'obtenir un champ plus intense, on enroule le fil conducteur autour d'un cylindre. Le champ magnétique d'un tel solénoïde est non seulement plus intense que pour un fil droit, il est aussi quasiment uniforme à l'intérieur de cette bobine (voir l'encadré page ci-contre). Le champ central est proportionnel au courant et au nombre de tours de fil par unité de longueur de la bobine. Avec un courant de 10 ampères et 20 000 tours de fil par mètre, on atteint déjà 0,25 tesla. Ne suffit-il donc pas d'augmenter l'intensité et le nombre de tours par unité de longueur, bref de faire des

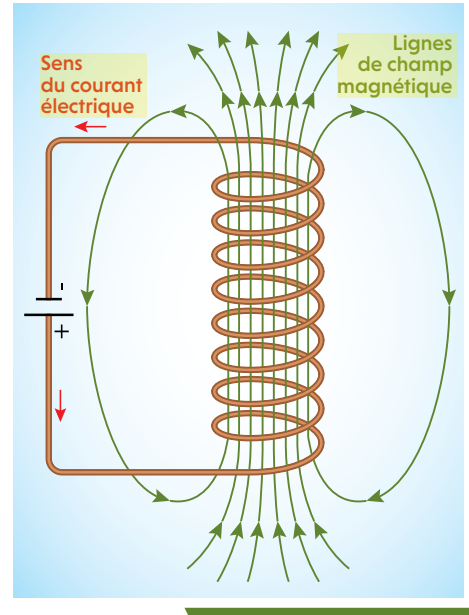
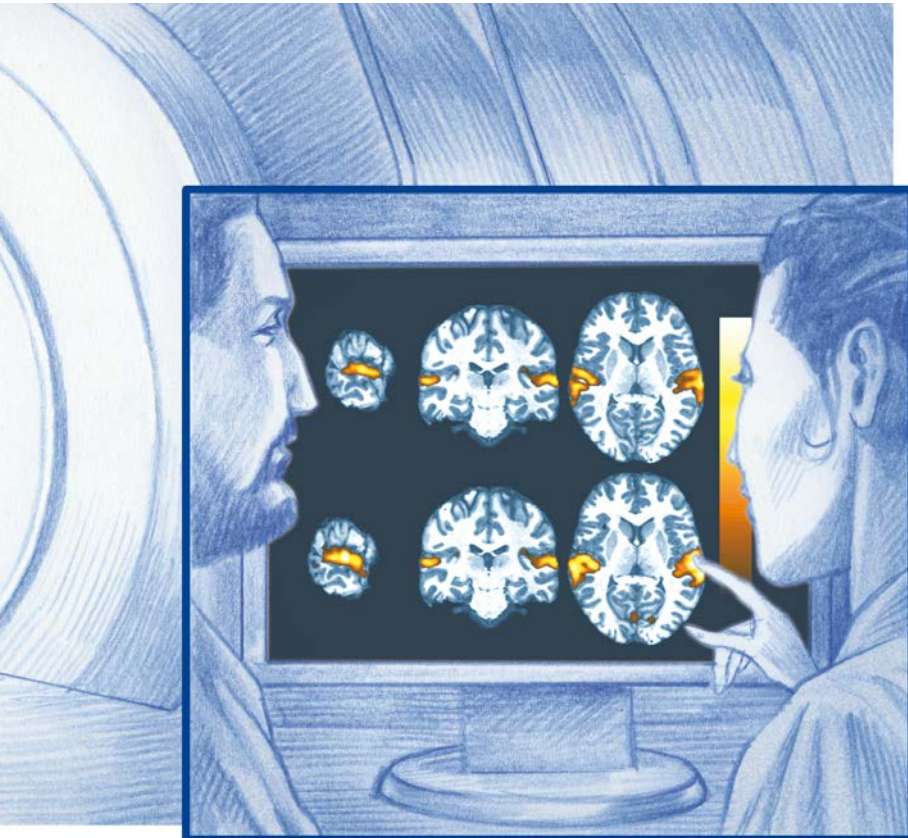


bobines géantes, pour obtenir des champs aussi forts que souhaité ?

On est vite confronté à deux problèmes. Le premier est l'effet Joule, c'est-à-dire la chaleur dégagée à cause de la résistance électrique du conducteur. Si notre bobine faisait 10 centimètres de long et de diamètre, avec du fil de cuivre de 1 millimètre carré de section, il faudrait un courant de 40 ampères pour obtenir 1 tesla, mais la puissance dissipée serait d'environ 16 kilowatts, de quoi faire fondre rapidement le dispositif. Et inutile de chercher à réduire cette valeur en augmentant le diamètre du fil comme on le fait pour les rallonges électriques des appareils électroménagers : pour garder un même encombrement, il faudrait réduire le nombre de tours, donc

PRINCIPE D'UN ÉLECTROAIMANT

Tout courant électrique s'accompagne d'un champ magnétique. Pour un fil conducteur rectiligne, ce champ, proportionnel à l'intensité du courant, est faible et décroît comme l'inverse de la distance au fil. En enroulant le fil conducteur autour d'un cylindre, on montre que le champ magnétique produit à l'intérieur de ce solénoïde est considérablement plus intense, car il est proportionnel au nombre de tours que fait le conducteur par unité de longueur mesurée le long de l'axe. De plus, ce champ est relativement uniforme à l'intérieur du solénoïde.



Au centre NeuroSpin du CEA, au sud de Paris, une infrastructure de neuro-imagerie par IRM est en passe d'utiliser un électroaimant supraconducteur de 11,7 teslas, un record pour ce type d'application.

augmenter le courant, et la puissance dissipée serait exactement la même.

Ce n'est pas tout. Un fil parcouru par un courant électrique et placé dans un champ magnétique subit une force dite «de Laplace». Il s'ensuit que les fils de la bobine se repoussent les uns les autres, avec une pression proportionnelle au carré du courant électrique – une dizaine d'atmosphères dans la bobine que nous avons considérée. En raison de la puissance dissipée ou des contraintes mécaniques, les bobines ne semblent donc pas adaptés à l'obtention de champs magnétiques très intenses.

Une solution parfois adoptée est d'accepter la destruction de la bobine! À ce prix, on produit des champs atteignant 300 teslas et, quitte à tout détruire, on

peut «compresser le flux magnétique» avec des explosifs et obtenir ainsi près de 2000 teslas pendant quelques dizaines de microsecondes. Laissons de côté ces solutions extrêmes et concentrons-nous sur la production de champs forts permanents.

UN COURANT DANS LA MASSE

En 1933, le physicien américain Francis Bitter a proposé une solution consistant à utiliser un empilement de disques conducteurs percés, séparés par des isolants dont la découpe impose une circulation hélicoïdale du courant, afin d'engendrer un champ magnétique le long de l'axe (*voir l'encadré page suivante*).

Grâce à l'emploi d'un matériau massif, les contraintes mécaniques sont bien mieux supportées; par ailleurs, les perces

permettent la circulation d'eau qui refroidit efficacement le dispositif. Le National high magnetic field laboratory, au Nouveau-Mexique, a ainsi obtenu un champ de 35 teslas dans une zone cylindrique d'environ 3 centimètres de diamètre en faisant circuler 40000 ampères à 500 volts, soit 40 mégawatts de puissance électrique et 15000 litres d'eau par minute! On comprend pourquoi on n'envisage pas forcément de faire des électroaimants de Bitter encore plus gros... ➤

Les auteurs ont récemment publié:
En avant la physique!, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



Une autre solution pour obtenir des champs intenses est de faire appel aux matériaux supraconducteurs, qui perdent leur résistance électrique à température suffisamment basse. Pas de résistance, pas d'effet Joule et, cerise sur le gâteau, une alimentation électrique très réduite. Ainsi, les 9000 électroaimants du collisionneur LHC, au Cern, qui produisent un champ de 8 teslas, sont faits d'un alliage niobium-titane supraconducteur. Hélas, cette solution est elle aussi fortement limitée: la supraconductivité disparaît si le matériau est plongé dans un champ magnétique trop élevé, 9 teslas par exemple pour l'alliage niobium-titane à sa température de refroidissement au LHC.

LES SUPRACONDUCTEURS À LA RESCOUSSE

D'où l'idée de construire des électroaimants hybrides, avec un électroaimant extérieur supraconducteur et un électroaimant intérieur «résistif». Dans cette configuration, le champ magnétique à la périphérie du dispositif n'est pas suffisant pour faire perdre sa supraconductivité à l'électroaimant externe, tandis qu'au centre, les champs créés par les deux électroaimants s'ajoutent: on atteint aujourd'hui 45 teslas, mais au prix d'une grande consommation d'énergie.

Plusieurs équipes dans le monde cherchent à réaliser des dispositifs entièrement à base de supraconducteurs en utilisant des matériaux, tels les cuprates, qui restent supraconducteurs à des températures moins basses et à des champs de plusieurs dizaines de teslas, et qui supportent des courants très intenses – par exemple plus de 1000 ampères pour un fil en alliage ReBCO (pour *rare-earth barium copper oxyde*) de 1 millimètre carré de section.

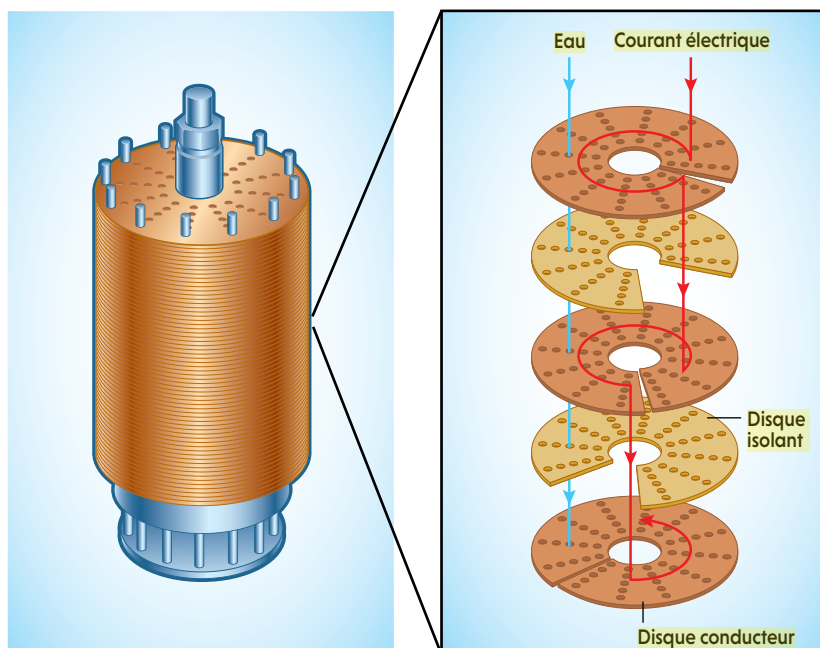
Pour des raisons de fabrication et de résistance mécanique, on élabore ces matériaux sous la forme de films de 1 micromètre d'épaisseur déposés sur un ruban isolant épais de quelques dizaines de micromètres et de largeur centimétrique. Les aimants sont alors construits en empilant plusieurs galettes obtenues en enroulant le ruban sur lui-même.

Reste une difficulté: pour des champs très intenses, le moindre incident peut faire perdre localement sa supraconductivité au matériau. L'effet Joule réapparaît, réchauffe le matériau, la perte de supraconductivité s'étend de proche en proche et le circuit tout entier est menacé d'endommagement par échauffement.

Pour remédier à ce problème, les physiciens du Laboratoire national des

LES ÉLECTROAIMANTS DE BITTER

Un électroaimant de Bitter est constitué d'un empilement qui alterne disques conducteurs et disques isolants. Ces disques sont fendus et disposés de telle façon que le courant, qui circule dans toute la masse du matériau conducteur, décrit globalement une trajectoire hélicoïdale, comme dans un solénoïde. Les disques sont par ailleurs percés de nombreux trous à travers lesquels circule de l'eau, ce qui assure un refroidissement efficace. La masse du conducteur autorise le passage d'un courant très intense et offre une bonne résistance aux contraintes mécaniques exercées par le champ magnétique, qui peut alors atteindre des valeurs record.



champs magnétiques intenses, à Grenoble, ont fait le choix d'utiliser, en guise d'isolant entre les enroulements de ruban... du métal. Lorsque tout fonctionne bien, le courant circule dans le supraconducteur, de résistance électrique nulle, plutôt que dans le métal: malgré sa faible résistance, ce dernier se comporte comme un isolant. Mais en cas d'incident, le courant bloqué par la perte de supraconductivité passe par le métal sur tout le périmètre de la bobine. Au lieu d'être local et destructeur, l'échauffement, réparti sur toute la galette, est bien plus faible et n'endommage plus le dispositif.

Ainsi, cette année à Grenoble, la bobine prototype nommée Nougat, placée pour être testée au sein d'un électroaimant classique produisant déjà 20 teslas, a permis d'atteindre un champ magnétique total de 32,5 teslas pendant plusieurs minutes. Ces expériences ouvrent la voie à la production de champs magnétiques très intenses – 30 à 50 teslas – en continu, par des dispositifs intégralement supraconducteurs, compacts et économes en énergie. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Battesti et al., **High magnetic fields for fundamental physics**, *Physics Reports*, vol. 765-766, pp. 1-39, 2018.

P. Pugnât et al., **Progress in the construction of the 43 T hybrid magnet at LNCMI-Grenoble**, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28(3), pp. 1-7, 2018.