

 IDÉES DE PHYSIQUE

Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs

Grâce à des circuits supraconducteurs, on est capable de mesurer d'infimes champs magnétiques, tels ceux produits par l'activité du cerveau.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Quelles sont les zones du cerveau qui sont sollicitées lors de telle ou telle tâche cognitive ou qui présentent des anomalies ?

Pour répondre à ces questions, les méthodes d'exploration se sont multipliées : IRM, électroencéphalographie et plus récemment magnétoencéphalographie (ou MEG)... Cette dernière technique (voir la figure 1) est un tour de force, car les champs magnétiques créés par le cerveau sont un milliard de fois plus faibles que le champ magnétique

terrestre ! Mesurer de tels champs est néanmoins possible grâce à la supraconductivité, dont on fête cette année le centenaire de la découverte.

Le cerveau est le siège d'une activité physico-chimique et électrique. La propagation de signaux par les neurones est associée à des mouvements d'ions, donc à des courants électriques. Cela se traduit par la génération de champs électriques et magnétiques. Les potentiels électriques, de l'ordre de quelques dizaines de microvolts, sont

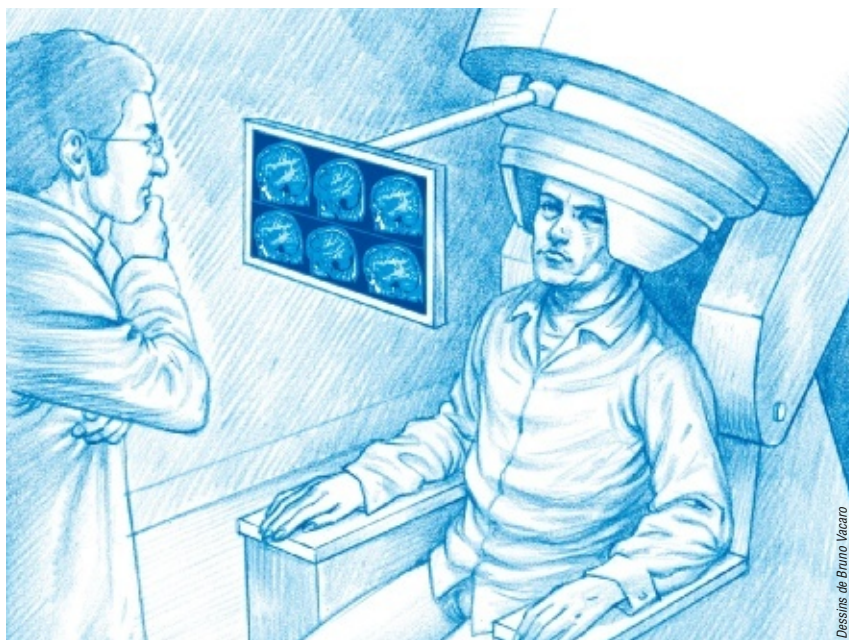
aisément détectés (par électroencéphalographie). C'est beaucoup plus difficile pour les champs magnétiques cérébraux, qui sont de l'ordre de 10^{-13} tesla – le champ magnétique terrestre vaut environ 5×10^{-5} tesla –, c'est-à-dire 100 fois moins que le champ magnétique créé au niveau de la tête par l'activité électrique du cœur. Or la supraconductivité, phénomène extrêmement sensible au champ magnétique, permet de détecter des champs aussi faibles.

La supraconductivité à la rescousse

Découverte en 1911 par le Néerlandais Kamerlingh Onnes, la supraconductivité apparaît brusquement dans certains matériaux au-dessous d'une très basse température (4 kelvins pour le mercure, soit -269°C !) ou dans certains composés à des températures un peu moins basses. Elle se manifeste par deux propriétés remarquables, l'une électrique et l'autre magnétique : un matériau supraconducteur conduit le courant électrique sans aucune résistance et expulse de son sein tout champ magnétique (effet Meissner).

L'origine de ces propriétés réside dans le comportement collectif des électrons libres : après s'être liés deux à deux en « paires de Cooper » malgré leur répulsion électrostatique, ils se regroupent dans un même état quantique qui s'étend dans tout le volume du matériau. Il s'agit d'une des rares manifestations directes de la physique quantique à l'échelle macroscopique.

Comment utiliser la supraconductivité pour mesurer des champs magnétiques ?



Dessins de Bruno Vacaro

1. LA MAGNÉTOENCÉPHALOGRAPHIE permet de suivre en temps réel l'activité du cerveau grâce à la mesure des minuscules champs magnétiques produits par les circuits neuronaux. La tête du patient est recouverte d'un casque tapissé de centaines de capteurs à base de SQUID, des circuits supraconducteurs. Ces circuits, très sensibles au champ magnétique, doivent être refroidis à très basse température, condition indispensable à la supraconduction.

La première étape fut, en 1961, la découverte que le flux du champ magnétique à travers un anneau supraconducteur, c'est-à-dire le produit de la valeur du champ par l'aire traversée, est quantifié : il ne peut prendre que des valeurs égales à un multiple entier d'un « quantum » de flux, noté Φ_0 .

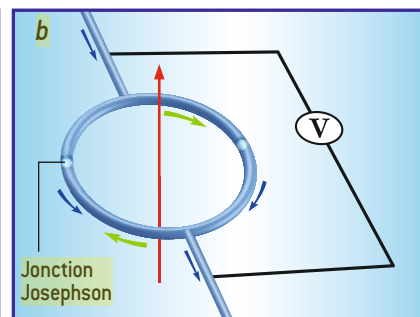
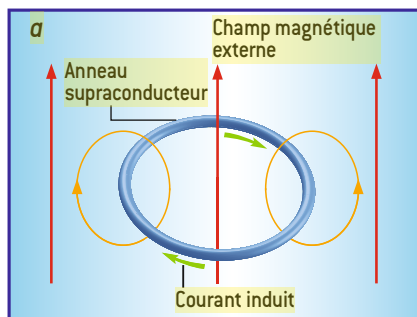
Les valeurs du flux étant discontinues, que se passe-t-il lorsqu'on fait varier continûment le champ magnétique extérieur à travers l'anneau ? Cette opération induit un courant le long de l'anneau, son intensité étant telle que le flux magnétique total, dû au champ extérieur et au champ engendré par le courant, soit conservé ou saute à la valeur permise la plus proche.

Ainsi, en augmentant peu à peu le champ extérieur, on observe que le courant induit dans l'anneau varie périodiquement avec le champ magnétique, ce courant ne s'annulant que pour les valeurs du champ extérieur qui donnent un flux multiple de Φ_0 . Or le quantum de flux (égal au rapport de la constante de Planck sur deux fois la charge électrique élémentaire) est extrêmement petit : il correspond au flux d'un champ magnétique de 2×10^{-11} tesla sur un centimètre carré. On détient donc potentiellement le phénomène ayant la bonne sensibilité pour mesurer les champs magnétiques cérébraux.

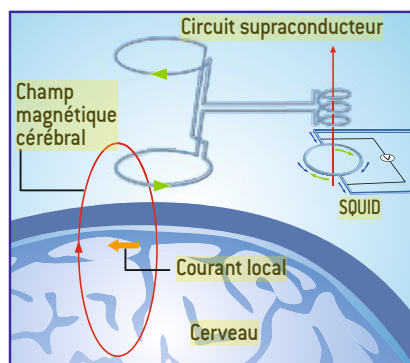
Un circuit astucieux : le SQUID

La seconde étape fut l'invention en 1964 de circuits nommés SQUID (voir la figure 2). Connectons de part et d'autre d'un anneau supraconducteur un fil supraconducteur où circule un courant, le « courant de polarisation ». En l'absence de champ magnétique, ce courant se répartit également entre les deux branches de l'anneau. Avec un champ magnétique, s'ajoute le courant induit ; dans l'une des branches, le courant est alors plus intense que la moitié du courant de polarisation (et plus faible dans l'autre). Enfin, au milieu de chacune des branches, introduisons dans le fil supraconducteur une coupure, assez mince pour que les paires d'électrons puissent la traverser par effet tunnel.

À cet endroit, nommé jonction Josephson, tant que le courant est inférieur à une



2. LORSQU'UNE BOUCLE DE MATÉRIAU supraconducteur (a) est soumise à un champ magnétique externe (flèches rouges), un courant y est induit (flèche verte). Ce courant induit crée un champ magnétique (lignes orange) qui compense le champ externe, de façon que le flux magnétique à travers la boucle reste égal à zéro ou à un multiple entier du quantum de flux. Dans un SQUID (b), la boucle supraconductrice est interrompue en deux endroits et reliée à un fil supraconducteur où passe un courant (flèches bleues). Le courant induit (flèche verte) par le champ externe s'ajoute et fait que dans la branche droite de la boucle, le courant total peut dépasser le seuil au-delà duquel la supraconductivité disparaît. Une tension aux bornes de la boucle est alors mesurable, tension qui permet de déterminer l'intensité du champ magnétique externe.



3. POUR MESURER LE CHAMP MAGNÉTIQUE à proximité du cerveau tout en s'affranchissant des champs magnétiques parasites (champ terrestre, champ créé par l'activité du cœur, etc.), un SQUID est couplé à un second circuit supraconducteur comportant deux boucles et un petit bobinage. Le champ magnétique (ligne rouge) créé par un petit courant électrique (flèche orange) dans le cerveau est plus intense au niveau de la première boucle que de la seconde. Pour que le flux magnétique soit constant dans le circuit, un courant y est induit (flèches vertes), lequel crée dans le petit bobinage un champ magnétique (flèche rouge). Ce champ est détecté et mesuré par le SQUID.

valeur critique (qui dépend notamment de l'épaisseur de la coupure), la supraconductivité persiste comme si de rien n'était. En revanche, dès que le courant dépasse la valeur critique, les paires d'électrons se dissocient, les électrons redeviennent libres et se cognent au réseau cristallin : il apparaît une résistance, donc une tension de part et d'autre de la jonction, d'autant plus élevée que le courant dépasse le courant critique.

Toute l'astuce consiste alors à polariser le SQUID en faisant circuler un courant très légèrement inférieur au double du courant critique. En l'absence de champ magnétique, le courant qui passe dans chacune des branches est inférieur au courant critique : aucune tension n'apparaît dans le circuit. En revanche, la présence d'un champ magnétique se traduit, en raison du courant induit, par un courant supérieur à la valeur critique dans l'une des branches et donc par une tension aux bornes de l'anneau. Plus le champ est intense, plus le courant induit et l'écart au courant critique seront forts, et plus la tension sera élevée.

En calibrant le SQUID, on peut donc remonter de la valeur de la tension à celle du champ magnétique qui traverse l'anneau. Avec cette géométrie, ce dispositif est semblable dans son principe à un interféromètre où deux ondes quantiques passant par des chemins distincts interfèrent. D'où le nom de SQUID,

LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

BIBLIOGRAPHIE

J. C. Gallop, *SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics*, Institute of Physics Publishing, 1991.



Retrouvez les articles de J.-M. Courty et E. Kierlik sur www.pourlascience.fr

pour *Superconducting Quantum Interference Device* (dispositif supraconducteur à interférence quantique).

L'utilisation directe d'un SQUID est toutefois délicate : sa surface est petite (une dizaine de micromètres carrés) et il est sensible à toutes les perturbations magnétiques. Pour y remédier, on utilise un capteur constitué d'un circuit supraconducteur comportant deux boucles de un centimètre de diamètre, distantes de cinq et enroulées en sens opposés, et un petit enroulement couplé au SQUID (voir la figure 3).

À cause de l'effet Meissner, les lignes de champ ne peuvent pas traverser le fil supraconducteur pour entrer ou sortir des anneaux : il s'ensuit que le flux magnétique total dans le circuit reste constant. Pour un champ magnétique uniforme ou presque, tels le champ terrestre ou des champs para-

sites dont la source se trouve loin du détecteur (cas du champ magnétique associé au cœur), le même champ traverse les deux boucles et comme ces dernières ont des sens de circulation opposés, le flux magnétique total est nul.

En revanche, pour une source proche, par exemple un ensemble de neurones, le champ n'est pas homogène ; il est bien plus intense dans la boucle la plus proche de la source. Par conséquent, la somme des flux à travers les deux boucles n'est pas nulle : un courant est induit dans le circuit afin que le flux magnétique dans le petit enroulement compense le flux des grandes boucles et maintienne un flux total nul. Le champ magnétique engendré par l'enroulement, proportionnel au champ magnétique cérébral, est ainsi plus facilement mesurable par le SQUID.



Et tout s'éclaire



La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

SCIENCE & GASTRONOMIE

Dernières nouvelles des soufflés

Pour que le soufflé monte bien, assurez-vous que la préparation contienne beaucoup d'eau et d'air avant de l'enfourner.

Hervé This

Le soufflé est le prototype du produit culinaire qui gonfle à la cuisson. Il n'est pas seul : les gougères, les petits choux, les canelés gonflent... Une partie du monde culinaire attribuait le gonflement à la dilatation des bulles d'air, qui proviennent des blancs d'œuf battus, comme dans les soufflés ; mais la raison n'y trouvait pas son compte : la loi de la dilatation des gaz, appliquée aux soufflés, ne prévoyait qu'un gonflement de moins de 30 pour cent, bien inférieur à celui obtenu quotidiennement par les cuisiniers.

Nous avons montré que le mécanisme principal du gonflement des soufflés et des autres plats analogues était l'évaporation de l'eau de la préparation. D'une part, un soufflé de 300 grammes perd environ dix grammes à la cuisson, ce qui (si cette masse est de l'eau évaporée, mais que pourrait-elle être d'autre ?) correspond à dix litres de vapeur ! D'autre part, la cuisson des soufflés dans des moules transparents et équipés de capteurs de température montre qu'au fond des ramequins, on atteint bien les 100 °C indispensables à l'évaporation de l'eau, tandis que l'on voit, à travers les parois des ramequins, des bulles monter dans la préparation et venir crever en surface.

Tout est-il dit ? Apparemment pas. Lors de récentes réunions du *Groupe d'étude des précisions culinaires*, à Paris, nous avons testé diverses précisions relatives aux soufflés, notamment la retombée des soufflés cuits dans des fours dont on ouvre la porte, l'influence du farinage des moules, etc. Nous avons testé des soufflés au fro-

mage de composition « professionnelle » : la base dense comportait 75 grammes de farine, 75 grammes de beurre, 750 grammes de lait, quatre jaunes d'œuf, 200 grammes de fromage râpé ; après cuisson, deux jaunes d'œuf supplémentaires étaient ajoutés, ainsi que dix blancs d'œuf battus en neige ferme.

Les ramequins étaient des objets professionnels en céramique blanche, et les conditions de production des « appareils » à soufflés (les cuisiniers nomment « appareil » la préparation destinée à cuire), tout comme celles de cuisson, étaient aussi bien contrôlées que possible. Cette rigueur a révélé des surprises. Tout d'abord, les ramequins n'étaient identiques qu'en apparence : alors que leur taille était constante, leur masse variait considérablement, ce qui indique que leurs épaisseurs étaient différentes ; pas étonnant, donc, que l'on obtienne parfois en cuisine des résultats très différents.

En ce qui concerne la tenue des soufflés à l'ouverture de la porte, nous avons constaté une tenue bien supérieure à tout ce qui est prétendu. Le soufflé ayant été cuit à 180 °C dans un four à convection, un gonflement notable a été observé après dix minutes de cuisson.

C'est le moment qui a été choisi pour l'ouverture du four : durant une minute, nous avons laissé le soufflé dans le four, en espérant le voir redescendre... mais non, il est resté stable. Nous l'avons même sorti du four, et après 3 minutes et 40 secondes, il était très peu redescendu. Bref, à ce stade, la croûte superficielle, et sans doute la cuisson de la partie supérieure, suffit à tenir le soufflé gonflé, la vapeur ne s'échappant pas par la partie supérieure ni ne se recondensent.

Le soufflé fut alors remis au four, parce que nous avions voulu le comparer à un soufflé dont les blancs d'œuf n'auraient pas été battus en neige : après tout, puisque la théorie stipulait que la dilatation des bulles d'air était presque sans effet sur le gonflement, pourquoi s'embarrasser de ce battage préalable ?

Le verdict expérimental a été sans appel, à la surprise des professionnels : le soufflé aux blancs non battus en neige est monté presque autant que le soufflé identique, mais avec des blancs battus. Presque autant... mais pas tout à fait, parce que l'air introduit contribue au volume de la masse.

Cette observation, qui a stupéfié le monde professionnel, donne de nouvelles clefs pour réussir les soufflés : nous savons maintenant que l'objectif est de vaporiser le plus d'eau possible et nous savons que tout l'air initialement introduit dans les soufflés sous la forme de blancs d'œuf en neige contribue au volume final. Puisque l'on sait produire des litres et des litres de blanc en neige à partir d'un seul blanc d'œuf, en lui ajoutant de l'eau quand on le bat, on sait partir d'un fort volume initial... qui augmentera encore à la cuisson.



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé This sur www.pourlascience.fr