

Des livres à offrir ou à s'offrir à découvrir et à commander sur www.pourlascience.fr



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

224 pages • 19 euros • 075110

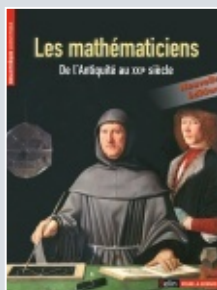


Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

La supraconductivité à l'ère industrielle

Certains matériaux perdent toute résistance électrique au-dessous d'une certaine température. Ce phénomène découvert il y a tout juste 100 ans a des applications méconnues, mais de plus en plus présentes.

Pascal Tixador et Philippe Lebrun

L'ESSENTIEL

- ✓ En ce mois d'avril 2011, la découverte de la supraconductivité a 100 ans.
- ✓ Les applications de la supraconductivité sont limitées par le coût et la complexité de la cryogénie requise.
- ✓ La découverte en 1986 des premiers supraconducteurs à haute température critique a fait croire à une révolution technologique imminente.
- ✓ Cette révolution a pris du retard, mais les applications de la supraconductivité (imagerie médicale, électrotechnique, etc.) se multiplient.

© Shutterstock/Levent Konuk

Dans le monde, plus de 26 000 appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique) fournissent de précieux diagnostics médicaux. L'IRM est maintenant familière au grand public (*voir la figure 1*), mais combien savent qu'une bobine supraconductrice fonctionnant à -269°C , près du zéro absolu (0 kelvin ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), est à la base de ce remarquable équipement médical ?

Plus généralement, les applications de la supraconductivité, phénomène extraordinaire découvert il y a 100 ans, restent méconnues, car discrètes. C'est l'occasion de passer en revue quelques-unes des utilisations les plus importantes des matériaux supraconducteurs : imagerie médicale, puissants aimants pour la physique des particules, détection et mesure de champs magnétiques infimes, transport de l'électricité, conception de circuits quantiques.

Mais commençons par rappeler ce qu'est la supraconductivité, comment elle a été découverte et quelles sont les principales propriétés des matériaux supraconducteurs. Cela nous permettra de comprendre les difficultés qui ont can-

tonné la supraconductivité à des niches particulières.

L'histoire commence dans une petite ville universitaire des Pays-Bas, Leyde, qui devint le 10 juillet 1908 l'endroit le plus froid au monde. Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926) y avait réussi, le premier, à liquéfier de l'hélium, donc à atteindre la température record de 4,2 kelvins (-269°C). La liquéfaction de ce gaz découvert en 1895 faisait l'objet d'une compétition internationale : c'était le dernier des « gaz non condensables » qui résistait à la liquéfaction, après celle de l'hydrogène en 1898.

En ayant accès à l'hélium liquide, Kammerlingh Onnes pouvait étudier la résistivité des métaux aux très basses températures. Or le 8 avril 1911, Gilles Holst, un étudiant de Kammerlingh Onnes, qui sera l'un des fondateurs du Centre de recherche de Philips et son premier directeur, constata que la résistance électrique du mercure placé dans un capillaire en verre devenait brusquement non mesurable au-dessous de 4,15 kelvins. Après de multiples et méticuleuses vérifications, tant le phénomène paraissait extraordinaire, le mercure



1. L'IMAGERIE par résonance magnétique (IRM) a fourni à la supraconductivité son principal débouché actuel.

se révélait bien devenir un «super» conducteur : la supraconductivité était découverte. Avec la liquéfaction de l'hélium, elle valut à Kammerlingh Onnes le prix Nobel de physique en 1913, premier d'une série d'une dizaine de ces prix attribuée pour des travaux liés à la supraconductivité.

Du courant sans pertes

Examinons de plus près ce phénomène de disparition de la résistance électrique. Une résistance nulle n'a pas de sens expérimentalement, car sa valeur dépend de la précision des appareils de mesure. Des mesures très fines de la décroissance du courant dans une bobine supraconductrice soigneusement court-circuitée, dite « en mode persistant », ont indiqué que la baisse du courant atteindrait seulement 0,07 pour cent au bout d'un siècle ! Cela a fourni une borne supérieure à la résistivité électrique d'un supraconducteur (10^{-24} ohm-mètre). Avec la même bobine, mais en cuivre à température ambiante ($1,7 \times 10^{-8}$ ohm-mètre), le courant diminue de 0,07 pour cent en moins de 0,2 microseconde...

La circulation sans pertes d'un courant électrique dans une pastille supraconductrice est à l'origine de sa suspension au-dessous d'un aimant permanent, phénomène qui fascine toujours (*voir la figure 3*) : le champ magnétique de l'aimant crée une force électromagnétique sur le courant persistant porté par la pastille.

Un supraconducteur est donc un matériau qui ne connaît pas l'effet Joule, c'est-à-dire qui ne dissipe aucune chaleur lors du passage d'un courant. Cette propriété exceptionnelle n'existe qu'au-dessous d'une certaine température, la température critique. La contrainte de refroidissement limite l'exploitation commerciale de la supraconductivité. La cryogénie, science et technologie des basses températures, reste complexe et surtout très coûteuse.

Quel est le coût énergétique du refroidissement nécessaire ? Des calculs thermodynamiques montrent que, pour une machine thermique fonctionnant à température ambiante (300 kelvins ou 27 °C), il faut fournir au minimum 74 watts pour extraire un watt à un fluide refroidi à 4 kelvins (hélium liquide), tandis que ce mini-

mum est de 2,9 watts seulement à 77 kelvins (azote liquide). Il est donc 25 fois plus avantageux de fonctionner à la température de l'azote liquide...

En pratique, les installations de liquéfaction sont bien moins efficaces, d'où des coûts énergétiques trois à quatre fois supérieurs. Ces coûts élevés se reflètent pour partie dans le prix des fluides cryogéniques. En grosses quantités, l'hélium liquide à 4,2 kelvins coûte quatre à cinq euros par litre, contre 0,1 euro par litre pour l'azote liquide à 77 kelvins. Ces chiffres résument tout l'intérêt des matériaux qui sont supraconducteurs à relativement haute température.

La supraconductivité disparaît si la température dépasse une certaine valeur, mais la température n'est pas le seul acteur. Un champ magnétique trop intense, supérieur à une valeur dite critique, détruit aussi l'état supraconducteur. Kammerlingh Onnes en avait fait la mauvaise expérience dès 1913. Il avait immédiatement compris l'intérêt des supraconducteurs pour réaliser de puissants électroaimants, mais toutes ses tentatives furent vaines. Les



CERN/Maximilien Brice

2. LES ACCÉLÉRATEURS ET DÉTECTEURS DE PARTICULES font désormais appel à la supraconductivité, notamment pour créer des champs magnétiques intenses. Ainsi, le nouveau collisionneur protons-

protons du CERN, le LHC, est équipé tout au long de son tunnel circulaire de 1 232 électroaimants supraconducteurs utilisant l'alliage niobium-titane (NbTi), qui produisent chacun un champ de 8,3 teslas.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Célébrations des 100 ans de la supraconductivité : www.supra2011.fr

Consortium européen des entreprises de la supraconductivité : www.conectus.org/index.html

J.-M. Courty et É. Kierlik, *Le cerveau ausculté avec des supraconducteurs*, *Pour la Science*, n° 401, mars 2011.

P. Bertet et al., *Des processeurs quantiques supraconducteurs ?*, *Dossier Pour la Science*, n° 68, pp. 62-69, juillet-septembre 2010.

L. Plévert, « Notoriété internationale », dans Pierre-Gilles de Gennes, *l'enchantement de la physique*, *Les génies de la Science*, n° 40, pp. 40-47, 2009.

Ph. Lebrun, *Cryogénie et supraconductivité pour le grand collisionneur de hadrons du CERN*, *La Revue Générale du Froid*, vol. 95, n° 1050, pp. 33-40, 2005 ; <http://cdsweb.cern.ch/record/811057?ln=fr>

J. Matricon et G. Waysand, *La guerre du froid*, Seuil, 1994.

aimants perdaient rapidement leur supraconductivité lorsque le champ magnétique produit dépassait la valeur critique (0,04 tesla pour le mercure).

Il fallut attendre la fin des années 1950 pour qu'apparaissent les premiers matériaux supraconducteurs ayant des champs magnétiques critiques élevés – plusieurs teslas –, notamment l'alliage niobium-zirconium NbZr ou le composé de niobium et d'étain Nb₃Sn. L'émergence de ces matériaux a fait passer la supraconductivité du statut de seul phénomène physique à celui de nouvelle technologie.

Ainsi, dès 1964, un aimant supraconducteur était utilisé pour détecter des particules dans une chambre à bulles au Laboratoire américain d'Argonne, près de Chicago. Les années 1950 ont été aussi importantes pour l'explication du phénomène de supraconductivité, avec les travaux du Russe Alexeï Abrikosov (prix Nobel en 2003) et la théorie dite BCS (du nom de ses trois auteurs, les Américains John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer, lauréats du prix Nobel en 1972) publiée en 1957. Notons cependant que la théorie de la supraconductivité reste inachevée, la théorie BCS ne s'appliquant apparemment pas aux nouvelles familles de supraconducteurs découvertes depuis 1986.

Pour réaliser des électroaimants puissants, le supraconducteur doit transporter un courant intense. Or un supraconducteur perd sa propriété lorsque la densité de courant dépasse un certain seuil, qui dépend

de la température et du champ magnétique (la densité de courant est l'intensité divisée par l'aire de la section du conducteur).

La densité de courant critique dépend aussi de l'élaboration du matériau, et l'art du métallurgiste est d'augmenter la densité de courant critique *via* une microstructure et une nanostructure adaptées. Les densités de courant atteintes en pratique sont souvent très supérieures à celles obtenues dans le cuivre dans des conditions normales (des centaines ou milliers d'ampères par millimètre carré pour un supraconducteur, contre quelques ampères par millimètre carré pour le cuivre).

Température, courant et champ critiques

Dans l'espace où les trois coordonnées représentent la température, l'intensité du champ magnétique et la densité de courant, l'état supraconducteur non dissipatif est délimité par une surface dite « critique » (voir la figure 4). La température critique joue un rôle particulier puisqu'elle définit le coût de la cryogénie requise. En pratique, la température de fonctionnement des dispositifs supraconducteurs doit rester inférieure à une fraction de la température critique, de l'ordre de la moitié, pour que le matériau conserve une capacité convenable de transport de courant.

Il existe deux grandes classes de supraconducteurs. D'abord, ceux à basse température critique, tels le NbTi à 9,5 kelvins

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.

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 NbTi 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,



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.

Institut Néel-G2Elab

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 Nb₃Sn (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 Nb₃Sn 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

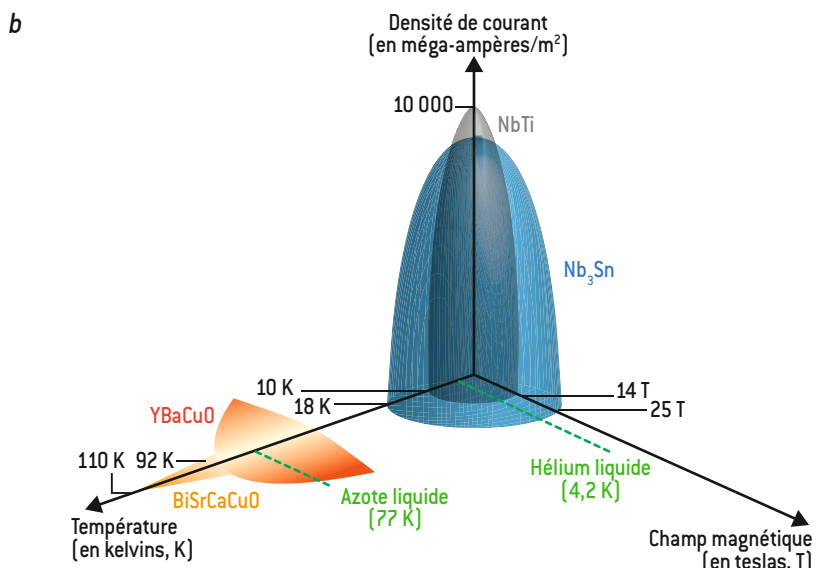
H																	He				
Li	Be															B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg															Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	Ac**	Rf	Ha	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg											

* 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).

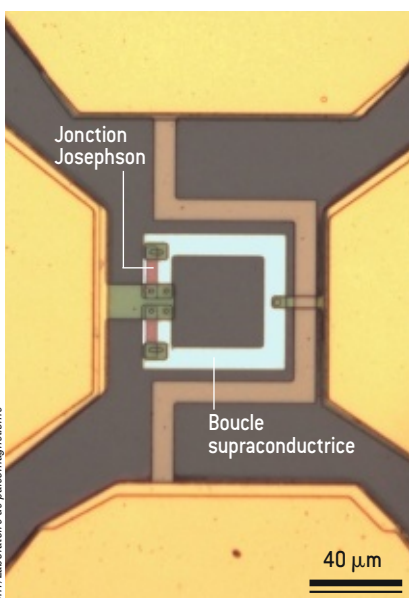
du champ magnétique constant. Celle-ci doit être particulièrement stable dans le temps (dérive moyenne inférieure à 0,1 partie par million et par heure). Une bobine supraconductrice est la meilleure réponse à ces exigences pour des champs magnétiques supérieurs à 0,5 tesla environ. Il faut noter qu'un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

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-

ques sont devenus une infrastructure critique, qu'il faut sécuriser au mieux, avec une qualité (en termes de tension notamment) garantie.

Sécuriser les réseaux électriques

Une façon simple de sécuriser la fourniture d'électricité à un point de consommation donné est de multiplier les chemins possibles d'alimentation. Cette technique très efficace est limitée par le problème des « courants de défaut » (dus à un court-circuit par exemple). En effet, un disjoncteur ne coupe pas instantanément un courant de défaut, ce qui laisse le temps à un tel courant d'occasionner des dégâts sérieux. Par exemple, les forces électrodynamiques étant proportionnelles au carré du courant, un courant de défaut 20 fois supérieur au courant normal conduit à des forces 400 fois plus élevées.

Or lorsqu'on multiplie les chemins d'alimentation, les courants de défaut s'additionnent. La solution à ce problème est de limiter le courant de défaut, et pas seule-

ment de l'interrompre. Comment ? La seule réponse satisfaisante est fournie par la supraconductivité, grâce au courant critique qui caractérise un matériau supraconducteur.

Pourquoi ? Parce que dès que le courant dépasse la valeur critique, l'élément supraconducteur perd sa supraconductivité et développe presque instantanément une résistance qui limite le courant de défaut. En revanche, pour des courants inférieurs à la valeur critique, l'élément est électriquement transparent, puisque sans résistance. Deux limiteurs supraconducteurs ont ainsi déjà été installés dans le réseau européen et les distributeurs d'électricité s'intéressent de plus en plus à ces appareils.

D'autres équipements supraconducteurs ont fait leur apparition en électrotechnique. Notamment, une liaison supraconductrice de 600 mètres fonctionne depuis avril 2008 dans le réseau électrique américain à très haute tension (138 kilovolts) ; elle peut transporter 600 mégavoltampères (puissance nécessaire pour 600 000 habitants environ).

Ainsi, les supraconducteurs sont devenus indispensables pour certaines applications, notamment en électrotechnique comme nous venons de le voir. Sans supraconductivité, l'IRM n'aurait pas connu son développement actuel et le LHC aurait été inconcevable. Les supraconducteurs sont à la base de détecteurs ultrasensibles pour la physique ou de nouveaux outils de diagnostic médical pour le cerveau ou le cœur, ils permettent de construire des systèmes modèles pour la physique et l'ingénierie quantiques. Et ils rendent bien d'autres services, par exemple dans les réacteurs expérimentaux pour la fusion nucléaire.

La supraconductivité représente une technologie de rupture, qui prend du temps pour s'imposer, surtout dans un marché bien établi et parce qu'elle est tributaire de la cryogénie. Mais le centenaire de la découverte de la supraconductivité coïncide avec deux faits : la préindustrialisation de matériaux à haute température critique performants (YBaCuO) et de nouvelles exigences pour les réseaux d'électricité. L'avenir des supraconducteurs n'en est que plus prometteur. ■



le collège universcience
à la Cité des sciences et de l'industrie

Colloque
Vendredi 8 avril à 14 h
Samedi 9 avril à 10 h

L'océan et le climat vus de l'espace
Colloque organisé en partenariat avec le COSPAR (Committee on space research).

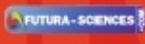
L'océan, qui couvre les deux tiers de la surface de la Terre, joue un rôle déterminant dans le contrôle et l'évolution du climat de la planète. Observer l'océan est devenu l'affaire des satellites, qui permettent d'en survoler la totalité en un temps très court, et qui donnent accès à un ensemble de données essentielles : température, vent et vagues, niveau de la mer, salinité, glaces de mer... La combinaison des observations spatiales et de celles acquises par les mesures de la mer constitue un outil puissant au service de la surveillance des océans et du changement climatique.

Le colloque est placé sous la présidence de **Giovanni Bignami**, président du COSPAR et de **Roger-Maurice Bonnet**, directeur de l'Institut international des sciences spatiales.

Il est organisé à l'occasion de l'ouverture de l'exposition *Océan, climat et nous* que la Cité des sciences et de l'industrie propose à partir du 6 avril 2011.

Programme complet : universcience.fr

Avec le soutien de



HISTOIRE DES SCIENCES

Madame d'Arconville, femme de sciences au temps des Lumières

De la traduction scientifique à ses travaux sur la putréfaction, cette femme du XVIII^e siècle, savante reconnue par ses pairs, mit un point d'honneur à rester dans l'anonymat.

Patrice BRET

1 804. Fortunée Briquet, femme de lettres, dédie au Premier consul Napoléon Bonaparte, sur le point d'accéder au trône impérial, un dictionnaire féministe dans lequel elle fait sortir une inconnue de l'anonymat : « Elle joignit à l'étude de la physique et de la chimie, celle de la morale, de la littérature et des langues. » L'entrée « Arconville » ignore que l'auteur vit encore et, à 80 ans passés, continue d'écrire même si elle ne publie plus depuis 20 ans. Elle omet aussi l'histoire, dernier domaine d'étude de celle qui fut un auteur original du siècle des Lumières et l'une des quelques femmes de l'époque à avoir produit de la science. Qui est donc cette Mme Thiroux d'Arconville, née Marie Geneviève Charlotte Darlus (1720-1805), à la production si variée que l'on redécouvre aujourd'hui après une longue éclipse ?

« Une des femmes les plus instruites et les plus modestes du XVIII^e siècle », déclare en 1820 le bibliographe Antoine-Alexandre Barbier, qui ajoute : « Ses nombreuses productions obtinrent, de son vivant, beaucoup de lecteurs ; par leur seul mérite. » La même année, la *Biographie nouvelle des contemporains*, dictionnaire des Français célèbres depuis la Révolution, lui ouvre le champ des grands dictionnaires historiques. Des extraits de ses œuvres morales sont cités, et l'on se réfère à ses traités scientifiques. Sa gloire posthume s'éteint cependant au fil des décennies.

Bien éphémère au regard de l'histoire, cette réputation vient de rebondir en ce début de XXI^e siècle avec la mise au jour inattendue des *Pensées, réflexions et anecdotes*

de Mme d'Arconville : 12 volumes de manuscrits inédits rédigés à la fin de sa vie, soit plus de 200 textes que l'on croyait perdus à jamais. « Il paraît que Mme d'Arconville n'avait d'autre but, en écrivant, que celui de se rendre utile », écrit encore Fortunée Briquet. C'est le cas pour une bonne part de sa production imprimée, mais elle est surtout mue par le besoin d'« écrire à tout prix », besoin qui l'anime jusqu'à la mort. Car, quand elle reprend la plume après la Révolution,



1. MME D'ARCONVILLE (1720-1805) fut un auteur prolifique tant en sciences qu'en lettres.

elle n'entend plus écrire que pour une poignée de proches, rédigeant pour passer le temps une série de petits essais de facture très libre ou recopiant des œuvres de jeunesse inédites. Elle a un ton plus personnel et un regard distancié, parfois non dénué d'humour. Si elle est loin de Rousseau, dont

elle admire l'éloquence, ses textes rappellent l'introspection de ses maîtres à penser Montaigne et Pascal, ou le style incisif de ses contemporains les écrivains Jacob Grimm et Louis-Sébastien Mercier. Revenant comme une nostalgie ou un regret, la science reste un leitmotiv de ce recueil hybride, à l'image de l'intérêt qu'elle lui a porté toute sa vie.

Traductrice et expérimentatrice

Certes, Mme d'Arconville n'eut ni l'envergure intellectuelle ni la notoriété d'Émilie du Châtelet (1706-1749), traductrice des *Principia* de Newton et compagne de Voltaire – faute, peut-être, d'avoir bénéficié de l'éducation de celle-ci... Enfant, elle aurait aimé être ambassadeur, si elle avait été un homme. Adulte, elle jongle entre sciences, littérature et histoire – activités masculines –, traductions et production personnelle. Elle est pourtant bien plus qu'un simple écrivain. Fille d'un riche fermier général, mariée à 14 ans à un jeune conseiller – bientôt président – au Parlement de Paris, elle est d'abord une lectrice acharnée que guident la curiosité et le goût du savoir. À 20 ans – déjà mère de ses trois fils ! –, elle prend son éducation en mains et se mue en femme savante autodidacte. Femme de sciences, elle l'est à la fois en tant que traductrice critique et, cas plus rare, comme expérimentatrice patiente et rigoureuse. Tout cela dans le plus parfait anonymat, choisi et maintenu parce qu'elle a une conscience aiguë du risque social pour les femmes de lettres : « Affichent-elles la

Avec l'aimable autorisation du château de Chèvremont