

campus 60

Magazine de l'Université de Genève

Octobre – Novembre 2002



Nouveaux matériaux :
petits, rapides, étranges



UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Le pôle MaNEP: vers l'électronique de demain

Lancé depuis une année, le pôle de recherche sur les nouveaux matériaux a ouvert ses portes au public le mois dernier. L'occasion de découvrir de quoi pourrait être faite l'électronique du futur, au moment où la course effrénée vers la miniaturisation, la rapidité et la puissance pousse les matériaux conventionnels à leurs premières limites.

BIENVENUE dans le monde des matériaux bizarres. Le Pôle de recherche national MaNEP (matériaux avec des propriétés électroniques exceptionnelles) a ouvert ses portes pour se présenter au public le mois dernier à l'Université de Genève. Les visiteurs ont ainsi pu pousser des petits trains en lévitation qui, grâce à leur chargement supraconducteur, restent accrochés à leur rail sans jamais le toucher, même s'ils se retrouvent la tête en bas; apprendre l'existence de matériaux dotés d'une «magnétorésistance colossale»; découvrir l'économie d'énergie que représente l'utilisation de la supraconductivité dans le transport de l'électricité; et, s'ils se sont promenés entre les atomes géants, admirer une structure cristalline régulière très prise des chercheurs, celle des «perovskites».

L'objectif de MaNEP, qui a son centre de gravité à Genève, est de contribuer à préparer les technologies du futur. Les applications potentielles des nouveaux matériaux sont nombreuses. Cependant, la maîtrise de leur fabrication et la compréhension de leurs propriétés exceptionnelles n'en sont encore qu'à leurs débuts. La supraconductivité à haute température, les nanotubes de carbone et bien d'autres phénomènes sont loin d'avoir dévoilé tous leurs secrets. Ces défis scientifiques fondamentaux rejoignent en partie les préoccupations des industries de pointe qui remarquent que les matériaux conventionnels de l'électronique d'aujourd'hui se montrent de moins en moins capables de satisfaire les exigences actuelles en matière de miniaturisation, de vitesse de calcul ou d'intensité de champ magnétique.

Ainsi, les composants électroniques des ordinateurs deviennent si petits et si performants que certains composés en silicium atteignent des limites physiques de fonctionnement.

Le stockage de l'information sur des disques durs ou des bandes magnétiques fait des progrès, mais pour le rendre encore plus dense, il faudra probablement passer par de nouveaux matériaux possédant des caractéristiques électroniques ou magnétiques supérieures.

La médecine, la biologie, la chimie et la recherche fondamentale requièrent des champs magnétiques si intenses, que ce soit pour des scanners, des spectromètres ou des accélérateurs de particules, que les bobines de fil de cuivre ne suffisent plus depuis bien longtemps. Ce sont désormais des bobines supraconductrices qui les remplacent.

Une des activités phares de MaNEP sera justement la supraconductivité. Le problème, c'est que les métaux ou les alliages utilisés aujourd'hui ne deviennent supraconducteurs qu'à une température extrêmement basse, proche du zéro absolu (-273 °C). Il existe des supraconducteurs dits à haute température mais ce sont des céramiques, très cassantes et difficiles à mettre en forme. Par ailleurs, le mécanisme fondamental derrière cette supraconductivité à haute température reste inconnu et représente peut-être le plus grand défi posé aux physiciens du solide.

Parmi les nombreux projets de MaNEP, on compte aussi l'étude de matériaux ayant des propriétés magnétiques entièrement nouvelles: certains présentent une résistance électrique très sensible au champ magnétique — on dit qu'ils sont dotés d'une magnétorésistance «colossale»; d'autres se révèlent être des isolants d'un type nouveau, particulièrement performants.

Les chercheurs ont remarqué que ces matériaux aux qualités électroniques extraordinaires possèdent souvent une structure cristalline et des caractéristiques électroniques similaires. Cette structure cristalline, appelée perovskite, possède une maille cristallographique de base cubique. Ces similarités alimentent un autre volet du pôle, celui qui s'attache à élaborer — ou à contribuer à élaborer — une description théorique de ces nouveaux matériaux. La théorie actuelle a eu du succès en expliquant la physique des métaux et des semi-conducteurs classiques, mais se révèle impuissante au-delà.

ANTON VOS •

Le Pôle en bref

MaNEP est un réseau suisse de laboratoires de pointe. Les groupes de recherches qui en font partie sont complémentaires, permettant ainsi de nouvelles synergies et un partage des possibilités expérimentales. En plus de développer une recherche forte dans le domaine de la physique du solide, le pôle déploie des efforts particuliers pour attirer et former des jeunes chercheurs.

Début : juillet 2001

Cadre financier pour les 4 premières années (en millions de francs)

Subsides Fonds national pour la recherche scientifique :	19,1
Fonds propres de l'institution hôte :	3,0
Fonds propres des projets individuels :	21,5
Contributions de tiers :	1,8

Nombre de collaborateurs scientifiques

entre 100 et 200 postes à temps partiel (à préciser)

Institution hôte du pôle de recherche

Université de Genève

Institutions participantes :

Ecole polytechnique fédérale de Zurich
 Université de Zurich
 Université de Fribourg
 Institut Paul Scherrer à Villigen
 Université de Neuchâtel
 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne
 Université de Lausanne

Industries partenaires :

IBM
 ABB
 Bruker

Contacts :

► Pôle MaNEP, Section de physique
 Faculté des sciences, Université de Genève
 Quai Ernest-Ansermet 24, 1211 Genève 4
 T 022 702 62 18
 F 022 702 68 69
 manep@physics.unige.ch
 www.manep.ch



Un supraconducteur a la propriété de léviter au dessus d'une surface aimantée grâce à l'«effet Meissner» (ci-dessus).

Cette pointe de microscope à force atomique est agrandie de l'échelle de quelques centimètres à celle du nanomètre à laquelle on perçoit les atomes (ci-contre).



E N T R E T I E N

ILLUSTRATION ORIGINALE
PATRICK TONDEUX

JEAN-MARC TRISCONE

«Comprendre et faire connaître les nouveaux matériaux»

« *Campus*: — Quel est l'intérêt de chercher des matériaux avec des comportements électroniques étranges?

Jean-Marc Triscone: — Plutôt qu'étranges, je qualifierais ces comportements de nouveaux ou d'exceptionnels. D'une manière générale, ces matériaux sont également appelés «fonctionnels», dans le sens qu'ils répondent à un stimulus externe et c'est ce qui les rend intéressants. L'application d'un champ électrique, d'un champ magnétique ou d'une déformation mécanique génère une réaction, une réponse de la part du matériau. Cela en fait donc des senseurs potentiels qui sont aujourd'hui très demandés, l'industrie étant sans cesse à la recherche de nouveaux types de dispositifs électroniques ou de micro-systèmes.

» Par ailleurs, certains matériaux clés «conventionnels», au cœur de la micro-électronique, atteignent aujourd'hui leurs limites. Par exemple, l'isolant SiO_2 utilisé dans les transistors pose des difficultés fondamentales pour une miniaturisation future (lire en page 18).

Certains nouveaux matériaux (étudiés dans MaNEP) possédant une constante diélectrique plus élevée que le SiO_2 pourraient éventuellement le remplacer.

— Quel genre de matériaux seront étudiés dans le pôle MaNEP?

— Principalement des composés céramiques sous formes de cristaux, de couches minces, de rubans ou de fils. Leur structure cristalline ABO_3 (deux atomes A et B liés à de l'oxygène) est souvent cubique ou proche de la structure cubique simple. On les appelle les perovskites. La particularité et la richesse de cette structure résident dans le fait que, suivant le choix des atomes A et B, les propriétés diffèrent complètement. Avec du strontium et du titane, le matériau est isolant avec une très haute constante diélectrique. Avec du plomb et du titane, le matériau devient ferro-électrique et piézoélectrique avec des performances remarquables. Avec du lanthane et du manganèse, le matériau présente des propriétés de magnéto-résistance colossale, intéressantes pour des senseurs magnétiques.

Avec du strontium et du ruthénium, c'est un métal. Avec de l'yttrium, du baryum et du cuivre, il devient supraconducteur à basse température, permettant de transporter du courant électrique sans perte (dans ce dernier cas, la structure cristalline est plus complexe, mais reste proche de la perovskite).

On peut ainsi imaginer combiner différentes perovskites (une sorte de Lego au niveau atomique) pour créer artificiellement de nouveaux matériaux ayant des propriétés optimales. C'est l'un des nombreux projets du pôle MaNEP.

» Par ailleurs, le pôle s'intéressera aussi aux nanotubes de carbone et à de nou-

velles nanofibres dont les propriétés remarquables pourraient aboutir à une nouvelle électronique «moléculaire».

— En plus de la structure cristalline, existe-t-il d'autres points communs entre ces matériaux ferromagnétiques, diélectriques, supraconducteurs, etc.?

— Leurs propriétés, si différentes, sont toutes dominées par un faible nombre d'électrons interagissant fortement entre eux. Cette particularité rend le traitement théorique de ces systèmes très difficile, mais elle se trouve probablement à l'origine des propriétés exceptionnelles rencontrées. Il est important ici de noter que si l'on parle ou explique plus facilement les enjeux de ces matériaux en se référant à des applications futures, les questions fondamentales, liées à la compréhension des mécanismes à l'origine des propriétés nouvelles, sont au cœur des préoccupations de MaNEP. D'ailleurs 85 % des projets MaNEP sont des projets essentiellement de physique de base.

— Ces matériaux sont complexes. Sera-t-il possible d'en tirer une application concrète?

— Actuellement, nous arrivons à préparer beaucoup de ces nouveaux matériaux sous forme de couches minces monocristallines, de rubans et de fils. Il faut cependant améliorer encore la qualité de ces matériaux, préparer des couches minces sur de grandes surfaces, augmenter le courant maximum pouvant passer dans les fils et rubans supraconducteurs, arriver à aligner les nanotubes, etc. De très gros efforts sont à faire dans ce domaine.

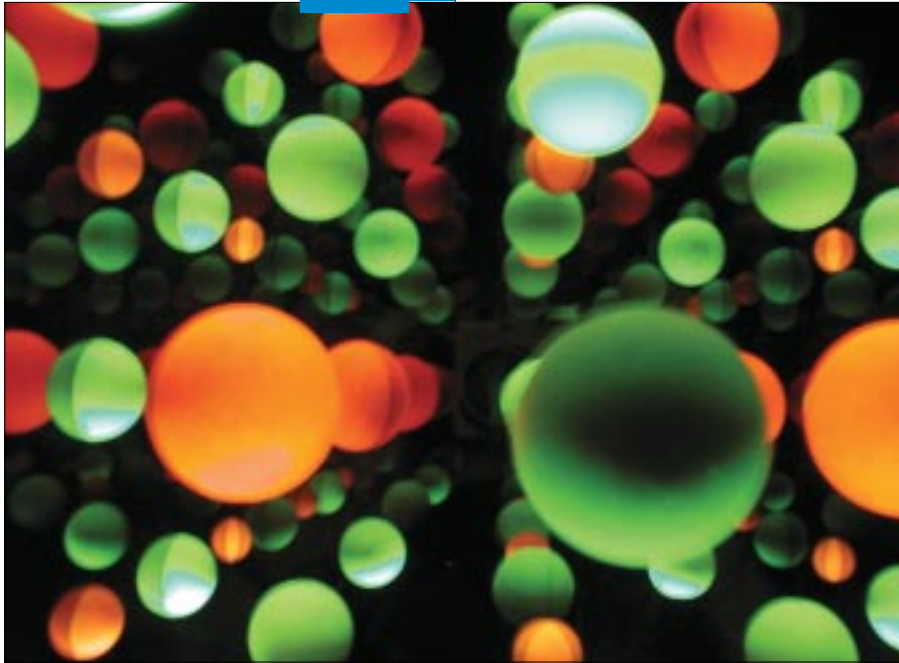
» Le défi consiste donc non seulement à comprendre la physique de base de ces matériaux et à développer des techniques de préparation à grande échelle mais aussi, plus simplement — en apparence en tout cas —, à les faire connaître aux industriels.

— Avec votre équipe, vous avez publié l'année dernière une étude sur des matériaux ferroélectriques qui permettraient de stocker beaucoup d'information sur peu de place. De quoi s'agit-il?

— Les matériaux ferroélectriques sont comme un assemblage de petits dipôles électriques qui possèdent une polarisation permanente. Par exemple, avec le côté positif dirigé vers le haut et le négatif vers les bas. Cette polarisation peut être inversée en appliquant un champ électrique. Le «microscope à force atomique» permet d'appliquer très localement un tel champ et donc de créer des réseaux de domaines polarisés très petits. Ces expériences sont faites sur des couches minces de haute qualité. Le même microscope permet ensuite de «lire» la structure du domaine. Sur nos graphiques, un domaine avec une polarisation positive vers le haut apparaît par exemple en blanc alors qu'un domaine retourné apparaît en noir. On obtient ainsi des «bits» d'informations, comme les 1 et les 0 en informatique. La densité que l'on a atteinte récemment est de 30 milliards de bits par centimètre carré [soit 4 fois mieux que les meilleurs disques durs actuels, ndlr]. Ces mémoires sont non volatiles, c'est-à-dire qu'il n'est pas nécessaire de maintenir une tension pour garder l'information, ce qui est un avantage important. Cette approche, combinée avec des réseaux de pointes de microscopes à force atomique (une seule pointe serait trop lente) semble prometteuse pour certains types de mémoires à très haute densité.»

Propos recueillis par
ANTON VOS •

Jean-Marc Triscone, professeur au Département de physique de la matière condensée à l'Université de Genève, est le directeur adjoint du pôle de recherche national MaNEP.



Les contacts avec l'industrie

Le Pôle de recherche MaNEP est dédié en majorité à la recherche fondamentale, destinée à comprendre les lois de la physique régissant la matière. Malgré tout, la direction a décidé de faire un effort significatif dans ses contacts avec l'industrie. Trois partenaires font partie intégrante du pôle (ABB, Bruker et IBM), mais l'objectif est de multiplier ce genre de contacts tout au long des dix ans que durera le Pôle. Pour cela, il dispose de plusieurs outils.

Il existe d'abord Unitec, le service de l'Université de Genève chargé du transfert de technologie entre la recherche et l'industrie. Ce sont les collaborateurs d'Unitec qui aident au dépôt de brevets, à la recherche de firmes intéressées à acquérir une licence sur ceux-ci ou encore à la signature de contrats.

Mais le Pôle MaNEP a décidé d'aller plus loin et de rechercher activement des contacts auprès du monde de l'industrie. L'idée est de sensibiliser certaines firmes aux travaux que réalisent les chercheurs du pôle. Il ne s'agit pas de débusquer des sources financières, mais de tenter de valoriser la recherche en éveillant l'intérêt de ces industriels.

A.Vs ●

Miniglossaire

Ferroélectrique

Les matériaux ferroélectriques sont caractérisés par une densité de polarisation électrique élevée aux températures inférieures à un certain seuil. Cette polarisation est dirigée suivant certaines directions cristallines et ne peut être renversée que par l'application d'un champ électrique suffisamment élevé.

Diélectrique

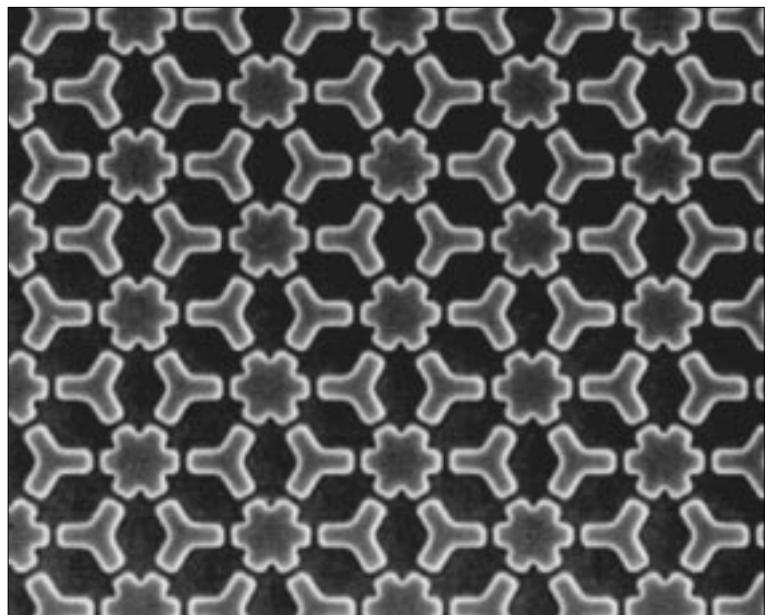
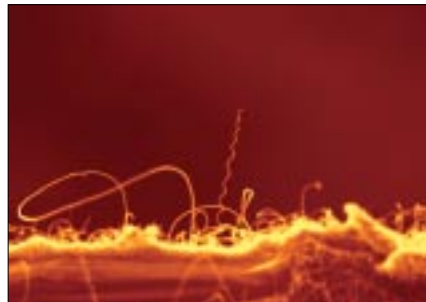
Un matériau diélectrique est un isolant.

Magnétorésistance

Un matériau magnétorésistant voit sa résistance électrique augmenter ou diminuer sous l'effet d'un champ magnétique extérieur.

Piézoélectrique

Un matériau est dit piézoélectrique s'il apparaît une charge électrique de surface lorsqu'on le soumet à une contrainte mécanique. Et si on soumet ce matériau à un champ électrique, il se déforme.



La supraconductivité dans tous ses états

Limiteurs de courant ou générateurs de champs magnétiques intenses: les matériaux supraconducteurs ont déjà plusieurs applications, effectives et potentielles, dans l'industrie. Les chercheurs genevois travaillent à la compréhension des propriétés et des phénomènes de base à l'origine de la supraconductivité dite à haute température.

S l'Université de Genève a obtenu la direction du pôle de recherche national MaNEP, c'est en partie grâce à ses activités reconnues dans le domaine des supraconducteurs. Il n'est dès lors pas étonnant que la majorité des projets concerne ce type de matériaux. En plus de la recherche fondamentale qui mobilise le plus de forces — il reste encore beaucoup à découvrir sur ces matériaux — certaines études sont clairement dirigées vers des applications industrielles. Petit tour d'horizon.

LIMITEURS DE COURANT

Une des particularités des supraconducteurs est qu'ils perdent leurs propriétés lorsqu'un courant trop important les traverse. Cela peut être vu comme un inconvénient par certains, puisque cela limite les possibilités de transport d'électricité ou de génération de champs magnétiques intenses. Pour d'autres, en revanche, cela a été la source de nouvelles idées.

Øystein Fischer, le directeur du Pôle, a ainsi lancé un projet en collaboration avec la firme ABB pour la conception de limiteurs de courant basés sur des couches minces. «*Nous voulons fabriquer un*

disjoncteur très performant, explique le professeur genevois. *Il s'agit de mettre au point un dispositif qui soit supraconducteur lorsque le courant qui le traverse reste en dessous d'un certain seuil et qui devienne subitement résistant lorsque ce seuil est dépassé.*»

Un tel appareil serait utile dans les centrales électriques, par exemple. Aujourd'hui, en cas de court-circuit, le dispositif de sécurité est un disjoncteur mécanique. Le courant est coupé grâce à un levier qui se soulève rapidement. Ce type de dispositif demande cependant des dizaines ou des centaines de millisecondes pour réagir. C'est pourquoi les centrales sont toujours surdimensionnées pour résister à d'éventuels pics de courants qui peuvent intervenir dans ce court laps de temps.

Un disjoncteur supraconducteur, en principe, réagira plus rapidement. Il introduit également une sécurité passive. C'est le courant lui-même qui provoque la rupture de la «supraconduction». Entre la théorie et la pratique, et surtout le stade industriel, il y a toutefois beaucoup de travail. «*Nous avons des idées sur le design que devrait avoir un tel dispositif*, poursuit Øystein Fischer. *Mais les obstacles technologiques ne manquent pas. C'est ce qui fait l'intérêt du projet.*»

Les matériaux supraconducteurs qui sont étudiés dans ce projet sont des céramiques assez complexes dont la température critique est suffisamment élevée pour qu'ils puissent être refroidis avec de l'azote liquide (lire ci-contre). Récemment, des ingénieurs de chez ABB ont mis au point un limiteur expérimental — en $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$ — capable d'atténuer un pic de courant de 20 000 ampères. Le projet genevois propose, lui, d'utiliser des couches minces épitaxiales — donc quasi monocristallines — pour réaliser de tels dispositifs leur donnant notamment l'avantage de réagir très rapidement.

GÉNÉRATION DE CHAMPS MAGNÉTIQUES

Le débouché majeur pour les supraconducteurs dans l'industrie est actuellement la génération de champs magnétiques persistants et très intenses — l'unité de mesure est le tesla (T). Le domaine d'application de champs magnétiques moyens (inférieurs ou égaux à 3 tesla) est la résonance magnétique nucléaire. Elle est utilisée, sous forme

d'imagerie à résonance magnétique (IRM), comme méthode d'analyse et de dépistage dans pratiquement tous les hôpitaux.

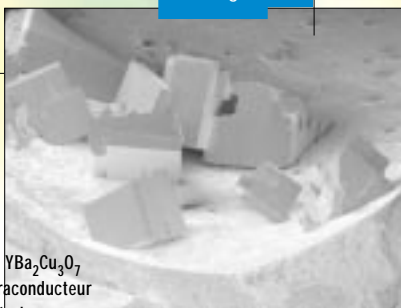
Dans les laboratoires de développement de l'industrie, en revanche, l'analyse de structures moléculaires en chimie, en médecine, en biologie et en pharmacie est réalisée par une résonance magnétique nucléaire (RMN) qui requiert des champs beaucoup plus intenses (plus de 20 tesla). En effet, plus le champ magnétique est intense, plus la résolution de la mesure sera grande.

De par leur nature, les supraconducteurs sont capables de créer des champs persistants, extrêmement stables. Ces derniers sont générés par des courants électriques qui circulent indéfiniment dans le circuit supraconducteur, caractérisé par une résistance électrique nulle. En d'autres termes, il n'y a pas de pertes dues à l'échauffement. Seule limite: l'intensité du champ produit par le courant supraconducteur ne peut pas dépasser un seuil critique (appelé champ critique), au-delà duquel le matériau redevient résistant et perd ses propriétés.

La firme Bruker Biospin, près de Zurich, est un des plus grands fabricants d'appareils de RMN. Aujourd'hui, elle fabrique des systèmes générant un champ allant jusqu'à 21 tesla. Cette compagnie se livre, comme ses concurrents, à la «course aux teslas», le but étant de pousser la valeur du champ magnétique le plus loin possible. Un projet auquel collabore René Flükiger, président de la section de physique de l'Université de Genève. Le matériau de base est le Nb_3Sn (un alliage de niobium et d'étain) dont la température critique est de 18°kelvin — il doit donc être refroidi à l'hélium liquide. Grâce à l'infrastructure de ce laboratoire, l'équipe genevoise est capable non seulement de fabriquer des câbles supraconducteurs prototypes à volonté, mais aussi de tester et améliorer leurs propriétés.

UN NOUVEAU VENU

Ce groupe de chercheurs a également lancé une partie de son équipe sur un nouveau venu: le MgB_2 , qui possède la température critique la plus élevée, à savoir 39°kelvin. Découvert en 2000 au Japon, il a tout de suite éveillé l'attention des chercheurs genevois: grâce à la température de transition relativement élevée, il est en effet possible



Ces cristaux de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ deviennent supraconducteur à «haute» température, soit à 92° au dessus du zéro absolu.

d'assurer le refroidissement autrement qu'avec de l'hélium liquide, une technique somme toute assez chère. Pour ses résultats sur des rubans de MgB_2 dans des gaines en fer ou en nickel, l'équipe de René Flükiger vient de recevoir un prix international récompensant la meilleure contribution mondiale sur ce matériau en 2001.

A l'état pur, le champ magnétique critique du MgB_2 est d'environ 16 teslas à 4.2 K, ce qui n'est pas suffisant pour de nombreuses applications. Mais d'autres laboratoires ont montré qu'il est possible de doubler le champ critique du MgB_2 en manipulant le réseau cristallin. Les chercheurs genevois s'attendent à ce qu'en jouant sur différents paramètres, ce seuil critique puisse être repoussé bien plus loin.

FABRICATION DE CÂBLES

En principe, ce sont les supraconducteurs dits à haute température, à base de bismuth ou d'yttrium, qui devraient intéresser le plus les industriels ou les chercheurs. Ils pourraient se passer de l'hélium liquide et se contenter de refroidir leurs dispositifs à l'azote liquide, ce qui est beaucoup plus économique. Cependant, ces matériaux sont très cassants. Il n'est pas possible d'en faire des câbles aussi souples que le fil de cuivre. Toutefois, on peut aujourd'hui fabriquer des rubans mécaniquement stables en disposant le supraconducteur en un grand nombre de filaments très minces (de l'ordre de 5 micromètres) dans une matrice métallique. Ce genre de câbles ne peut être que très faiblement courbé, sous peine de dégrader sérieusement ses performances. L'expérience a pourtant montré qu'il est possible de maîtriser ce problème et de construire des systèmes supraconducteurs de grande taille suffisamment stables. Quoi qu'il en soit, cette technologie est, pour l'instant, beaucoup plus chère à la fabrication que les conducteurs conventionnels en Nb_3Sn .

ANTON VOS •

La supraconductivité c'est...

Un matériau est dit supraconducteur lorsque sa résistance électrique tombe à zéro. Non pas à peu près zéro, mais exactement zéro. Les charges électriques traversent la matière sans dissiper ni énergie, ni chaleur. Les conducteurs conventionnels, le cuivre par exemple, chauffent lorsqu'ils sont traversés par un courant électrique. Ils fondent même si ce courant est trop important. La lumière d'une ampoule provient d'un filament de tungstène chauffé à blanc par le courant électrique qui le traverse. Un supraconducteur, lui, permet de conduire parfaitement le courant, sans perte aucune. Une fois lancé dans une boucle supraconductrice, un courant électrique tournerait indéfiniment, créant un champ magnétique persistant.

Température et champ magnétique critique

Les supraconducteurs sont caractérisés par une température et un champ magnétique critiques. Quand l'une des deux grandeurs dépasse un certain seuil, le matériau acquiert de nouveau une résistance et perd ses propriétés supraconductrices. Ces seuils varient selon la nature de la matière étudiée. Le défi des scientifiques est de relever la température critique qui, pour la plupart des matériaux, se situe proche du zéro absolu qui vaut 273°Celsius . A une température aussi basse, le refroidissement doit se faire à l'hélium liquide, ce qui est particulièrement cher. Aujourd'hui, ce sont des céramiques qui détiennent le record de la plus haute température critique – les métaux et les alliages simples se situant loin derrière – et peuvent être refroidies à l'azote liquide, nettement plus économique.

Découverte en 1911

C'est le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes qui découvre la supraconductivité en 1911 en refroidissant du mercure à 4°kelvin – c'est-à-dire à 4° au-dessus du zéro absolu. Dans les décennies qui suivent, on trouve d'autres matériaux possédant les mêmes propriétés, tels que le nitrure de niobium (NbN), qui devient supraconducteur à 16°K , ou le composé vanadium silicium (SiV_3), qui fait de même à $17,5^\circ\text{K}$.

Lévitation

En 1933, Walter Meissner et Robert Ochsenfeld découvrent qu'un supraconducteur n'accepte pas d'être traversé par

un champ magnétique. Ainsi, lorsqu'on approche un aimant, cela génère dans le supraconducteur un courant électrique qui crée un champ exactement opposé. Résultat : l'aimant est repoussé. Cet effet, baptisé « effet Meissner », est si fort qu'un aimant peut être soulevé – entrer en « lévitation » – au dessus d'un supraconducteur.

Première théorie

Ce sont les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer qui ont élaboré la première théorie de la supraconductivité, la théorie BCS (selon les initiales des trois chercheurs). Leur modèle permet une compréhension remarquable des supraconducteurs conventionnels. En revanche, la théorie BCS n'est pas capable d'expliquer les propriétés des nouveaux oxydes supraconducteurs découverts en 1986, appelés supraconducteurs à haute température.

Supraconducteurs à haute température

En 1986, Alex Müller et Georg Bednorz, deux chercheurs (suisse et allemand) du laboratoire IBM à Rüslikon près de Zurich, découvrent l'existence de supraconducteurs totalement nouveaux. Le premier de ces matériaux – des céramiques normalement isolantes – perd toute résistance électrique au-dessous de 30°K , le meilleur résultat à cette époque. Leur découverte leur a valu le prix Nobel de physique en 1987.

En substituant les atomes de ces céramiques, les chercheurs sont progressivement parvenus à faire augmenter la température critique. Le désormais classique $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, par exemple, est supraconducteur jusqu'à 92°K , soit – 181°C . Du coup, il est possible d'utiliser de l'azote liquide, qui bout à 77°K – un fluide aisément disponible – pour refroidir les échantillons.

Record

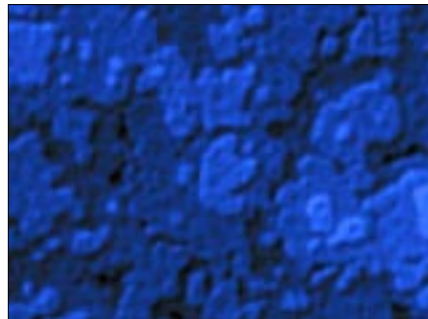
A pression atmosphérique, la plus haute température critique est détenue par le $\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$, découvert dans le groupe du professeur Ott à l'EPFZ, un des membres de MaNEP. Cette céramique devient supraconductrice dès 133°K (-140°Celsius). Il est possible d'obtenir de meilleurs résultats (entre 30 et 40°K de plus) en appliquant une pression allant jusqu'à 300 000 atmosphères.

A.Vs •

Les ordinateurs butent sur les limites de la miniaturisation

Le Pôle de recherche MaNEP travaille en partenariat avec la firme IBM sur des matériaux possédant une constante diélectrique élevée. L'idée est de pouvoir les utiliser un jour dans les microprocesseurs et de permettre à la miniaturisation des composants de se poursuivre au-delà des limites actuelles.

Ce ruban dont on voit la section est composé de cristaux supraconducteurs à haute température fixés dans un gaine de métal. C'est la seule manière connue aujourd'hui pour fabriquer des câbles avec ces matériaux.



Si IBM contribue au Pôle de recherche MaNEP, c'est bien parce que son domaine de prédilection, les ordinateurs, attend beaucoup des nouveaux matériaux. Il existe une loi empirique qui trotte dans la tête de tous les spécialistes de la branche : la loi de Moore. Énoncée en 1965, elle stipule que la performance des composants des microprocesseurs doublera tous les dix-huit mois. Par conséquent, leur taille diminuera de moitié dans le même laps de temps. Cette tendance, qui ne repose sur aucune loi physique, mais découle de l'observation des progrès technologiques, n'a pas été démentie jusqu'à aujourd'hui.

Résultat : un transistor mesure aujourd'hui moins d'un micron (un millième de millimètre). Si la technologie s'améliore en obéissant à la loi de Moore, il arrivera un moment où ce transistor sera si petit que des limites physiques interdiront son fonctionnement. Limites qui seront atteintes, pour certaines parties du transistor du moins, d'ici à 2010, voire peut-être même avant.

Il s'agit notamment de la mince couche d'oxyde de silicium (SiO_2) qui sert d'isolant dans les minuscules transistors. Dans une petite décennie, l'épaisseur de cet élément devrait diminuer jusqu'à environ 20 angström, c'est-à-dire environ 20 atomes mis côte à côte. L'oxyde de silicium, à cette échelle, devient littéralement transparent pour les électrons et ne sert plus à rien.

« En revanche, on peut montrer qu'avec des matériaux possédant des constantes diélectriques plus élevées — il s'agit d'une grandeur caractéristique qui rend compte de la perméabilité des matériaux au champ électrique — on peut pousser encore plus loin la miniaturisation, note Øystein Fischer, directeur du Pôle MaNEP. On connaît déjà des matériaux intéressants, comme le SrTiO_3 (un atome de strontium pour un de titane et trois d'oxygène), mais il y en a beaucoup d'autres. Les transistors représentant un marché énorme, l'intérêt que l'on porte à ces nouveaux matériaux est grand. Notre but, au sein du Pôle, est de les étudier davantage et de pouvoir, notamment, les déposer en couches minces sur une surface de silicium — car pour l'instant, le support de base restera encore un bon moment dans cette matière. Cette dernière opération s'avère extrêmement complexe. Si on arrive un jour à résoudre ces difficultés, alors il sera possible de poursuivre la miniaturisation jusqu'à la prochaine limite qui se présentera lorsqu'on arrivera à l'échelle des atomes. » Une limite qui sera atteinte, elle, dans vingt ans, si les progrès techniques avancent au rythme prévu par Moore.

ANTON VOS •



Du tube à vide au nanoprocesseur

Les premiers ordinateurs vraiment performants ont émergé grâce à l'invention du transistor en 1947. John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley des Laboratoires Bell dans le New Jersey ont découvert qu'il était possible d'utiliser un morceau de germanium (un matériau semi-conducteur) comme amplificateur de courant, à la manière des tubes à vide (les lampes), utilisés depuis déjà un demi-siècle.

Ces lampes sont toutefois trop gourmandes en énergie, fragiles et volumineuses. L'ordinateur ENIAC de l'armée américaine, par exemple, achevé en 1945, remplissait ainsi plusieurs chambres, comptait 19000 tubes à vide et ne consommait pas moins de 200 kilowatts.

La découverte du transistor a ainsi permis de résoudre ces problèmes. Très vite le silicium, abondant sur terre sous forme de silice, a pris la place du germanium, trop rare et trop cher. Les semi-conducteurs, qui peuvent fonctionner comme isolants, conducteurs ou amplificateurs suivant la tension qui leur est appliquée, ont rapidement envahi le monde. D'abord celui du téléphone, dans lequel ils ont permis de remplacer les relais mécaniques par des connexions électroniques. Puis, celui des calculateurs. En 1954, IBM annonce qu'il sort son premier ordinateur entièrement fabriqué à base de transistors. En 1959, le circuit intégré est inventé, ouvrant la porte aux ordinateurs modernes.

La technologie du silicium a ensuite évolué progressivement. Aujourd'hui, les techniques sont si performantes que les transistors ne sont plus visibles à l'œil nu. Dans un microprocesseur classique, on ne compte pas moins de 3,5 millions de transistors confinés dans quelques centimètres carrés.

A.Vs •

E N T R E E T I E N

ILLUSTRATION
ORIGINALE
PATRICK TONDEUX



GEORG BEDNORZ

Le Nobel des supraconducteurs

« *Campus*: — Vous avez découvert en 1986 le premier matériau supraconducteur dit à haute température. Il s'agit d'une céramique qui est en fait un isolant électrique à température ambiante. Était-ce un hasard?

Georg Bednorz: — Non. Au début des années 80, nous avions déjà effectué des expériences sur des isolants, comme le SrTiO₃ dopé au niobium, qui deviennent supraconducteurs à 1 °K, c'est-à-dire très proches du zéro absolu. Nous avons alors remplacé les éléments de titane et strontium par d'autres — du lanthane, du baryum et du cuivre — pour voir si on pouvait améliorer les performances. Nous y sommes parvenus, et c'est ainsi que nous avons découvert le premier supraconducteur à haute température. En fait la température de transition était de 30 °K, une valeur qui a été considérablement améliorée depuis en jouant sur les éléments chimiques.

— Travaillez-vous toujours sur les supraconducteurs?

— Non. Nous nous sommes intéressés à ces matériaux durant une période limitée. On s'est rendu compte que ces céramiques un peu particulières, les perovskites, avaient d'autres propriétés intéressantes. A IBM, nous avons donc élargi le spectre de nos recherches en étudiant des échantillons ferroélectriques, ou possédant une constante diélectrique élevée, etc. Aujourd'hui, mon activité est surtout concentrée sur des matériaux susceptibles de pouvoir stocker de la mémoire de manière très dense et durable.

— Vos recherches sont-elles guidées par les besoins spécifiques d'IBM?

— Parfois, mais pas toujours. Il y a des projets, notamment sur les matériaux avec une constante diélectrique élevée, qui intéressent mon employeur directement. Nous essayons notamment de trouver un matériau qui puisse remplacer le SiO₂ dans les microprocesseurs (lire ci-contre). Mais pour cela, il faut aussi que l'on mette au point un procédé pour déposer un tel matériau couche atomique par couche atomique sur un substrat de silicium, qui reste malgré tout la base de la technologie de l'électronique aujourd'hui.»

Propos recueillis par
ANTON VOS •

Georg Bednorz est chercheur au IBM Research Laboratory de Rüschlikon. Il dirige un projet au sein du pôle MaNEP. Il a obtenu le prix Nobel de physique en 1987 pour la découverte du premier supraconducteur dit à haute température.