

# Le journal de l'expo...

Galerie Eurêka - Centre de Culture Scientifique et Technique  
de la Ville de Chambéry

## SUPRAQUOI ?

Une exposition créée par le MaNEP et l'Université de Genève  
du 22 septembre 2015 au 9 janvier 2016

À travers un parcours mélangeant expression artistique et démonstrations scientifiques, l'exposition SUPRAQUOI ? vous invite à découvrir un phénomène physique étonnant : la supraconductivité.

Découverte par hasard en 1911, la supraconductivité est en effet une aventure scientifique exceptionnelle, à l'origine de milliers de travaux et de 13 prix Nobel. Elle reste pourtant l'un des plus grands défis de la physique actuelle.

Pourquoi la supraconductivité provoque-t-elle un tel engouement chez les scientifiques ? Quelles sont ses propriétés ? En quoi pourrait-elle transformer notre futur ? Le Journal de l'exposition vous donne les clés nécessaires pour percer tous ses secrets !

### UN PHÉNOMÈNE ÉTONNANT

Avant de se lancer dans la découverte de la supraconductivité, il convient d'aborder quelques notions concernant la conductivité tout court.

#### CONDUCTIVITÉ ET RÉSISTANCE

Rappelons qu'un courant électrique est un déplacement d'ensemble d'électrons au sein d'un matériau. Cependant, tous les matériaux ne peuvent pas conduire l'électricité. Les métaux, par exemple, sont des matériaux dits conducteurs, puisque les électrons peuvent y circuler. À l'inverse, de nombreux plastiques et caoutchoucs ne permettent pas aux électrons de se déplacer et ne conduisent donc pas l'électricité : ils sont dits isolants. Cependant, tout matériau, aussi

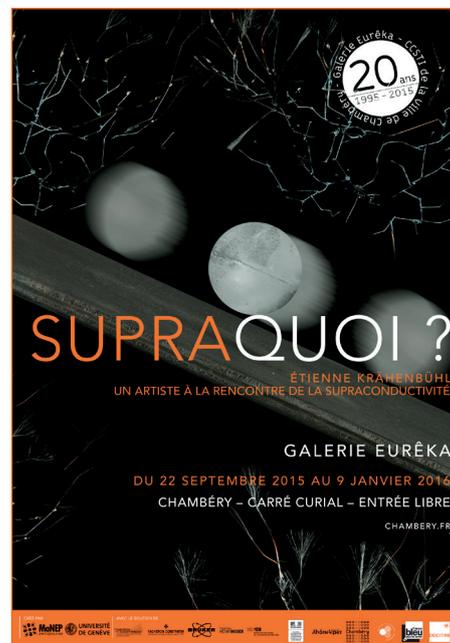
conducteur soit-il, oppose une résistance au passage du courant. En effet, lorsqu'ils se mettent en mouvement, les électrons entrent sans cesse en collision avec les atomes constituant le matériau et ralentissent, gênés dans leurs déplacements. C'est ce phénomène que l'on appelle la résistance électrique. Ces chocs entraînent une dissipation de l'énergie électrique sous forme de chaleur, et l'échauffement du matériau : c'est l'effet Joule. Ainsi, même les fils électriques les plus conducteurs gâchent une partie de l'électricité en la transformant en chaleur !

#### DU MERCURE À -269°C

Il y a un peu plus de 100 ans, une étonnante découverte chamboule tout ce que l'on sait alors sur l'électricité.

Le premier épisode se déroule le 8 avril 1911 dans le laboratoire d'Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) à l'Université de Leyden, aux Pays-Bas. À l'époque, ce laboratoire est le seul à maîtriser la liquéfaction de l'hélium, le liquide le plus froid connu. Grâce à cette technologie, ce jour-là, le physicien et son collaborateur Gilles Holst (1886-1968) mesurent pour la toute première fois la résistance électrique d'un métal, le mercure, à -269°C, à seulement quelques degrés du zéro absolu (-273,15°C). Ils découvrent alors que cette résistance est tout simplement... nulle ! C'est la première manifestation de la supraconductivité.

Ainsi, certains matériaux, dits supraconducteurs, ont la propriété exceptionnelle, à très basse température, de laisser passer le courant électrique sans aucune résistance. Il n'y a donc ni perte d'énergie, ni échauffement. Imaginez : il suffit d'injecter du courant dans un



circuit fermé de fil supraconducteur pour le conserver indéfiniment, même quand la pile est débranchée !

#### LA COURSE AUX TEMPÉRATURES

Un an plus tard, en décembre 1912, Kamerlingh Onnes teste avec succès l'étain et le plomb et, petit à petit, les physiciens découvrent que la supraconductivité n'est pas un phénomène exceptionnel. Ces premiers supraconducteurs conventionnels, dits supraconducteurs conventionnels, sont des métaux et des alliages (notamment des alliages de Niobium). Mais pour devenir supraconducteurs, ils doivent être refroidis à des températures proches du zéro absolu, au-dessous d'un seuil appelé « température critique ». Ce seuil est compris, selon les matériaux, entre -272 et -250°C, ce qui nécessite l'emploi d'hélium liquide.

Pendant 75 ans, il semble ainsi impossible d'observer la supraconductivité à des températures supérieures à -250°C. Mais en 1986, l'incroyable se produit. Le physicien suisse Karl Alexander Müller (1927-) et l'allemand Johannes Georg Bednorz (1950-) observent ce phénomène à -238°C, dans une nouvelle famille d'oxydes de cuivre, les cuprates. Ces 12 degrés de plus semblent bien modestes, mais ils marquent une ère nouvelle : celle des supraconducteurs dits « à haute température critique ». Le coup de génie de Müller et de Bednorz est d'avoir cherché la supraconductivité dans un matériau improbable : un oxyde de type céramique, donc a priori un isolant.

Cette annonce provoque une véritable effervescence dans le monde des physiciens et les découvertes se multiplient. En 1987, des chercheurs décrivent un cuprate qui devient supraconducteur à  $-180^{\circ}\text{C}$ . En 1993, une température record de  $-135^{\circ}\text{C}$  est atteinte. Une étape cruciale est désormais franchie : de tels matériaux peuvent se refroidir à l'azote liquide ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), bien moins coûteux que l'hélium liquide ( $-269^{\circ}\text{C}$ ). Cela change la donne et ouvre de nouveaux champs de recherche.

Aujourd'hui encore, les recherches se poursuivent. Ainsi, en 2008, l'équipe du japonais Hideo Hosono (1953-) a réussi à synthétiser une nouvelle famille de supraconducteurs à haute température critique : les pnictures, d'excellents supraconducteurs à base de fer. Ces matériaux, dont les propriétés diffèrent de celles des cuprates, suscitent également beaucoup d'intérêt depuis leur découverte. En effet, en étudiant et en comparant les cuprates et les pnictures, les physiciens espèrent enfin percer les mystères de la supraconductivité.

## LES MYSTÈRES DE LA SUPRA

Par quel prodige un métal laisse-t-il brusquement passer le courant sans opposer la moindre résistance ? En 1911, les chercheurs ne font que constater le phénomène, sans pouvoir expliquer ce qui se passe au cœur de la matière. Ils s'acharnent pendant les décennies suivantes à percer le mystère. Ce n'est qu'en 1957 que trois physiciens américains, John Bardeen (1908-1991), Leon Neil Cooper (1930-) et John Robert Schrieffer (1931-), développent une théorie, baptisée BCS (selon leurs initiales).

Que dit cette théorie ? À température ambiante, dans un métal ordinaire, les électrons libres sont gouvernés par les lois de la physique quantique. Celles-ci les décrivent comme autant d'ondes individuelles qui se déplacent au sein du réseau d'atomes, et qui sont freinées par ses imperfections et ses vibrations : c'est le phénomène de résistance électrique. Selon la théorie BCS, à basse température, dans un matériau supraconducteur, les électrons n'ont plus ce comportement individuel, mais adoptent un comportement collectif. Ils s'associent en paires, dites paires de Cooper. Toutes ces paires d'électrons se superposent

alors les unes aux autres pour former une seule onde quantique collective. Celle-ci, tout à fait insensible aux imperfections du matériau, se propage sans subir de collision dans la matière, et permet donc la conduite du courant sans perte d'énergie.



### La théorie BCS

Plusieurs analogies permettent de mieux comprendre cette idée, même si chacune a ses limites. On peut par exemple imaginer l'électron comme un poisson dans la mer. L'onde collective serait alors un banc formé de milliers de poissons, au mouvement harmonieux et puissant !

Néanmoins, selon la théorie BCS, ce phénomène ne peut se produire qu'à très basse température : au-dessus de  $-250^{\circ}\text{C}$ , les atomes vibrent trop pour permettre aux électrons de s'apparier. Pourtant, des paires de Cooper se forment aussi dans les cuprates et les pnictures. Mais aujourd'hui, il n'existe toujours pas de théorie convaincante pour l'expliquer et le mystère reste entier. Il s'agit

d'ailleurs d'un des enjeux majeurs de la recherche dans le domaine de la supraconductivité. En effet, la compréhension des propriétés et des mécanismes de fonctionnement des supraconducteurs à haute température critique permettra peut-être, un jour, d'obtenir le même phénomène à plus haute température...

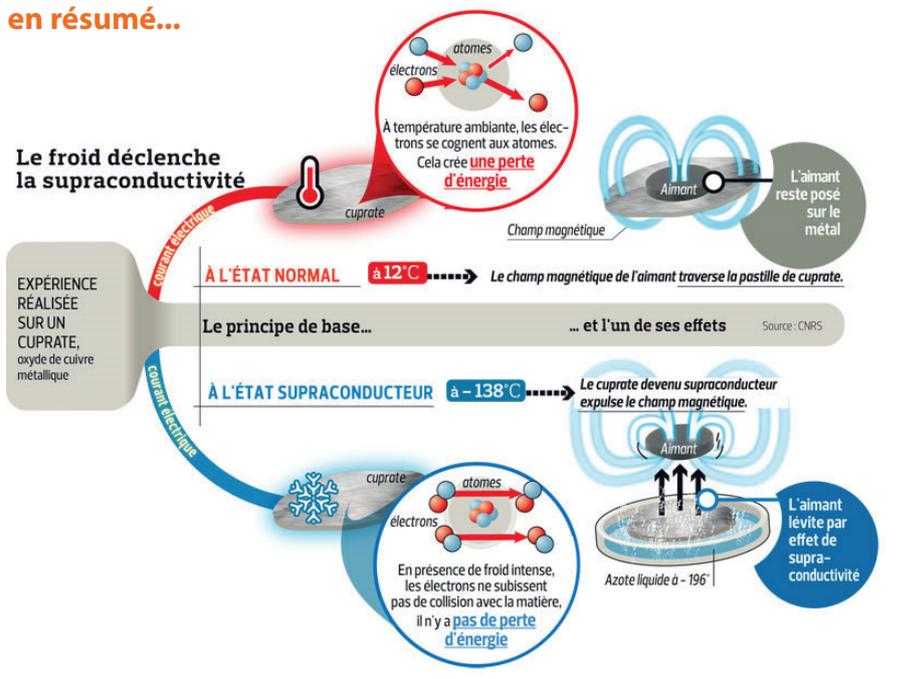
## LÉVITATION MAGNÉTIQUE

Une autre manifestation surprenante de la supraconductivité est la lévitation magnétique. Cet étrange phénomène est rendu possible par l'effet Meissner, qui expulse le champ magnétique.



L'œuvre SUPRA 100, du sculpteur Étienne Krähenbühl, présente une sphère lévitant au-dessus d'un plan carré incliné. Elle devrait tomber, mais elle demeure en l'air : c'est la magie de la supraconductivité !

## La supraconductivité, en résumé...



C'est en 1933 que le physicien allemand Walther Meissner (1882-1974) et son collègue Robert Ochsenfeld (1901-1993) ont observé cette deuxième propriété tout aussi spectaculaire des supraconducteurs : soumis à un champ magnétique, le supraconducteur refroidi au-dessous de sa température critique génère un champ magnétique exactement opposé. Ces deux champs se repoussent, ce qui permet au supraconducteur de flotter au-dessus de l'aimant ou vice-versa. L'expulsion du champ magnétique est appelée effet Meissner, du nom de l'un de ses découvreurs.

Ainsi, plus de 100 ans après sa découverte, la supraconductivité reste l'un des sujets les plus étudiés dans les laboratoires. Certains cherchent à mieux cerner les origines de ce phénomène encore mal compris, pour peut-être un jour être en capacité de synthétiser le « Graal supra » : un supraconducteur à température ambiante. Mais de nombreuses équipes se consacrent également à son exploitation.

## APPLICATIONS D'AUJOURD'HUI ET DE DEMAIN

Les applications de la supraconductivité se retrouvent dans les laboratoires de recherche, mais elles peuvent également être présentes dans notre quotidien, dans des domaines aussi variés que le médical, les télécommunications ou les transports.

Ces applications restent toutefois limitées pour la simple raison qu'aujourd'hui, il est encore nécessaire de refroidir les installations à de très basses températures, ce qui rend leur exploitation coûteuse et techniquement complexe. Mais si les méthodes de refroidissement devenaient plus rentables, ou mieux encore, si on découvrait des matériaux supraconducteurs à température ambiante, alors de nombreuses applications déjà opérationnelles en laboratoire pourraient envahir notre quotidien.

### DES SUPRA-AIMANTS !

De nombreuses applications des supraconducteurs exploitent leur

capacité à générer des champs magnétiques intenses.

En effet, pour produire un champ magnétique élevé sur un gros volume, les scientifiques utilisent des électroaimants. Il s'agit d'une bobine de fil métallique dans laquelle circule un courant électrique, ce qui crée un champ magnétique. Plus l'intensité du courant est forte, et plus le champ magnétique l'est aussi. Il est donc possible de contrôler la force de l'aimant. Mais qui dit courant dit également résistance, ce qui pose deux problèmes. D'une part, une partie du courant est dissipée sous forme de chaleur, ce qui explique les coûts parfois exorbitants des électroaimants en électricité. D'autre part, les fils s'échauffent et en cas de courant trop élevé, finissent par fondre.

Les fils supraconducteurs permettent donc de résoudre ces deux problèmes. Puisqu'ils ne sont pas résistants, on peut y faire circuler des courants très forts et produire ainsi des champs magnétiques intenses. De plus, une fois le courant initié, on peut débrancher l'alimentation électrique et court-circuiter la bobine : le courant circulera indéfiniment, sans dissipation d'énergie, et le champ magnétique se maintiendra. La bobine doit cependant être continuellement refroidie, le plus souvent à l'hélium liquide. Les électroaimants supraconducteurs ont malgré tout une grande variété d'applications.



#### L'IRM

C'est une technique d'imagerie médicale permettant de « voir » dans le corps humain sans aucun effet néfaste, grâce un champ magnétique intense généré par des bobines supraconductrices.

### RÉVOLUTION ÉNERGÉTIQUE

Aujourd'hui, les tensions croissantes autour de l'approvisionnement énergétique et la nécessité de protéger l'environnement imposent

le développement des énergies renouvelables. Malheureusement, leur exploitation est toujours freinée par deux obstacles de taille : le transport de l'électricité sur de grandes distances et son stockage. Du fait de leurs propriétés physiques exceptionnelles, les supraconducteurs sont, dans ce domaine, porteurs de solutions.

### 1- Transport de l'électricité

En effet, à l'heure actuelle, un volume d'électricité produit ne peut être acheminé jusqu'au consommateur final sans pertes. Celles-ci sont essentiellement liées à la résistance électrique des matériaux conducteurs et se traduisent par un dégagement de chaleur. Une des solutions pour limiter ces pertes est l'utilisation, sur de grandes distances, de lignes à haute et très haute tension. Elles assurent un transport avec des pertes raisonnables sur 1 000 à 2 000 km maximum.

Grâce à la disparition de la résistance électrique, l'utilisation de fils supraconducteurs réduirait ces pertes à zéro ! Outre l'économie d'énergie que cela engendrerait, les avantages seraient nombreux. En effet, il ne serait plus nécessaire d'augmenter la tension pour réduire les pertes. Des lignes supraconductrices à basse tension simplifieraient et sécuriseraient le réseau de transport. Mais surtout, l'électricité pourrait être produite dans des sites très éloignés des centres habités avant d'y être acheminée, permettant le développement des énergies renouvelables : usines photovoltaïques dans les déserts, éoliennes en haute mer, etc.

#### À VOIR DANS L'EXPOSITION



#### Transport de l'électricité

Cette démonstration permet de comparer le transport d'électricité dans des câbles en cuivre et dans un câble supraconducteur refroidi à l'azote liquide.

Cependant, à l'heure actuelle, même si la réalisation de ce type d'installations supraconductrices est techniquement possible, leur coût reste extrêmement élevé. Elles ne sont donc pas encore rentables sur de grandes distances. En revanche, elles pourraient déjà être adoptées sur de petites distances, dans les grandes agglomérations où l'espace souterrain pour insérer davantage de câbles est saturé. En effet, à diamètre égal, un câble supraconducteur est beaucoup plus performant qu'un câble classique et permet le transport d'une densité de courant beaucoup plus élevée. Leur utilisation serait donc une réponse efficace à la croissance toujours plus grande de la demande en électricité des zones urbaines.

## 2- Stockage de l'électricité

Par ailleurs, la plupart des énergies renouvelables, comme l'éolien ou le photovoltaïque, sont intermittentes : elles ne sont pas disponibles en permanence et les pics de production ne correspondent pas forcément aux périodes de forte demande. Un plus grand développement de ces énergies passe donc nécessairement par une amélioration des capacités de stockage de l'électricité. Dans ce domaine, la supraconductivité figure en bonne place dans les pistes explorées par les scientifiques.

L'énergie peut ainsi être stockée dans une bobine supraconductrice : un courant électrique est envoyé dans une bobine de fil supraconducteur. Une fois la bobine court-circuitée (refermée sur elle-même), le courant circule indéfiniment sans pertes et peut être récupéré en un temps très court. La bobine doit cependant être continuellement refroidie.

L'énergie peut aussi être emmagasinée sous forme d'énergie mécanique au moyen d'un disque en rotation très rapide (volant d'inertie ou flywheel). Plus le disque est massif et tourne vite, plus l'énergie stockée est importante. Dans le cas d'un volant d'inertie utilisant la supraconductivité, de l'énergie électrique est transmise par un moteur à un aimant en rotation sous lequel se trouvent des supraconducteurs refroidis à l'azote liquide. Grâce à l'effet Meissner, l'anneau lévite. Sans contact avec le support et donc sans frottement (seul subsiste le frottement de l'air), il peut tourner à très grande vitesse sans pertes d'énergie. L'énergie ainsi stockée pourra par la suite être rapidement récupérée.

## TRANSPORT DU FUTUR

Contrairement aux trains classiques, un train à sustentation magnétique ne roule pas, mais lévite sur des rails magnétiques. Les frottements mécaniques sont donc réduits, et la vitesse des véhicules peut être accrue. De tels trains existent déjà, et certains utilisent des supraconducteurs : c'est par exemple le cas du train le plus rapide au monde, le JR-Maglev (603 km/h en 2015).

Ce dernier lévite grâce à une technologie utilisant de puissants champs magnétiques créés par des bobines supraconductrices placées et refroidies à bord du train et qui s'opposent au champ magnétique des rails produit par des électroaimants conventionnels.

En 2011, le ministre des transports japonais, Akihiro Ohata, a confirmé le développement commercial du JR-Maglev sur les tronçons Tokyo-Nagoya en 2027 et Tokyo-Osaka en 2045 pour un coût global d'environ 65 milliards d'euros !

Avec des supraconducteurs à température ambiante, ce type de transport pourrait



se développer, et la roue ne tarderait pas à être définitivement détrônée ! Les trains à sustentation magnétique, ultra-rapides, moins bruyants et plus sûrs, permettraient alors de se déplacer en des temps record.

**D**écouverte en 1911, la supraconductivité est longtemps restée une curiosité de laboratoire. Aujourd'hui, elle est pourtant présente dans tous les hôpitaux, permet de transporter de l'électricité sans pertes et fait léviter le train le plus rapide au monde.

Mais de nombreuses technologies prometteuses sont encore en sommeil. Le plus grand frein empêchant le marché de se développer est la difficulté liée au refroidissement : si un matériau supraconducteur à température ambiante était découvert, tout changerait.

Les recherches se poursuivent donc, dans l'espoir d'atteindre un jour ce « Graal ». Après un siècle d'aventures scientifiques extraordinaires, la supraconductivité reste l'un des sujets les plus stimulants de la physique moderne.



Document réalisé par l'équipe médiation de la Galerie Euréka

Galerie Euréka - C.C.S.T.I. de la Ville de Chambéry  
Hôtel de Ville BP 11 105  
73 011 CHAMBERY cedex  
tel : 04-79-60-04-25

e-mail : galerie.eureka@ccsti-chambery.org

Site Internet : www.chambery.fr/galerie.eureka

