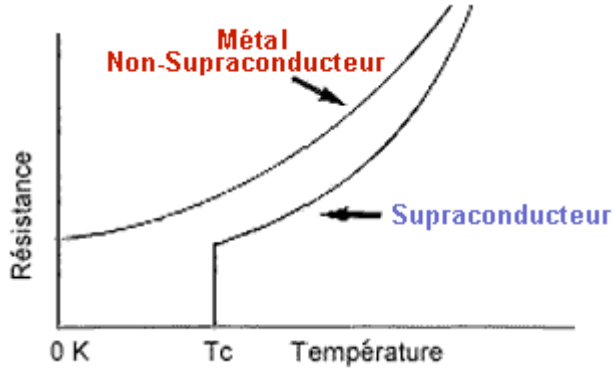
Groupe ___
AHMAD Waïs
DEHLINGER Pierre
JUYAUX Alexandre
Professeur accompagnateur :
M. SEGHEZZI

La supraconductivité, évolution des matériaux

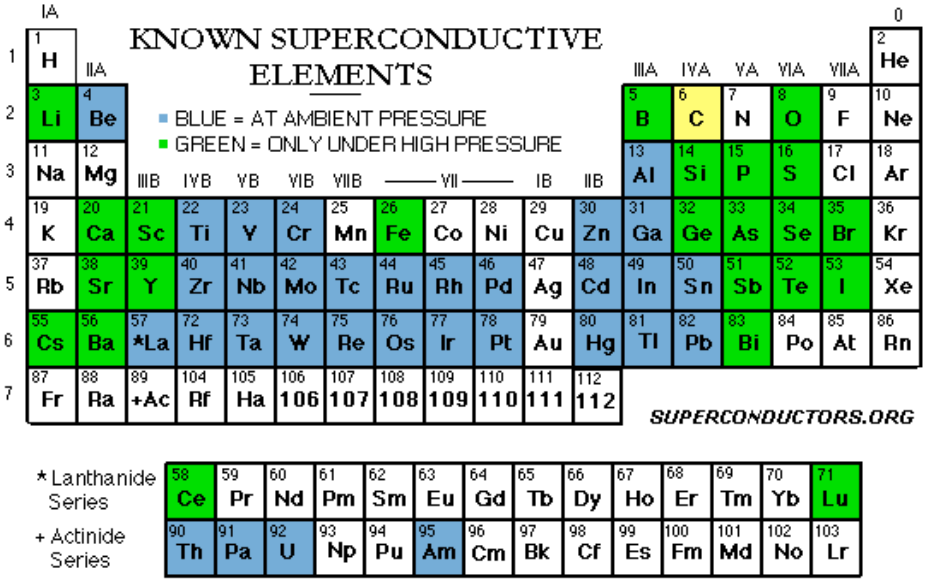
Les matériaux supraconducteurs de 1911 à nos jours.

La supraconductivité est un état particulier de la matière dans lequel le matériau perd toute résistance électrique. Ainsi, tout courant parcourant une boucle supraconductrice peut perdurer indéfiniment sans perte d'énergie liée à l'effet Joule. Les supraconducteurs sont également diamagnétiques, ils repoussent tout champ magnétique auquel ils sont soumis. Pour qu'un matériau passe à l'état supraconducteur, il doit se trouver en dessous d'une certaine température, appelé température critique (Tc), mais il existe aussi une limite à l'intensité du courant qui le parcours (intensité critique Ic), et à l'intensité du champ magnétique auquel il est soumis (champ critique Hc). Les matériaux supraconducteurs connus actuellement ont des Tc allant de moins d'un micro Kelvin à 138K (-135°C).



Le phénomène de supraconductivité à été découvert par hasard par Heike Onnes en 1911. Le scientifique Danois faisait des expériences sur l'hélium liquide, qui n'existe qu'à des températures inférieures à 4K, un record à ce moment là. On avait déjà remarqué que la résistance électrique des conducteurs diminuait avec leur température, mais quand l'échantillon de mercure fut refroidi par l'hélium liquide, sa résistance passa brusquement à 0. Onnes découvrit par la suite plusieurs autres supraconducteurs, et il reçut en 1913 le prix Nobel de physique pour son travail sur la supraconductivité.

Après la découverte de Onnes en 1911, on testa tous les éléments du tableau périodique pour trouver ceux qui pouvaient devenir supraconducteurs. Ainsi, la majorité des métaux de transition peuvent superconduire. A l'époque, on croyait que seuls des matériaux conducteurs pouvaient supraconduire. Or, trois des meilleurs conducteurs à température ambiante, le cuivre, l'or et l'argent, ne présentent aucune propriété supraconductrice, et des matériaux normalement isolants pouvaient devenir supraconducteurs. Une pression importante permettait d'atteindre des températures critiques plus importantes, et certains éléments ne sont supraconducteurs qu'à de fortes pressions. Le phosphore fut même pendant un temps le matériau supraconducteur avec la plus haute température critique, de 14K, mais seulement sous une pression de 2.5 Mbar. Des alliages métalliques permirent d'atteindre des températures critiques plus élevées, jusqu'à 23K pour un alliage de niobium et d'étain.



Quand les propriétés diamagnétiques des supraconducteurs furent découverts en 1933, une séparation dans la famille des supraconducteurs apparut, entre la majorité des matériaux élémentaux d'une part, qui seront appelés de type I, et le niobium, le technétium, le vanadium, et les alliages métalliques d'autre part, les types II. Les matériaux de type I passent brutalement à l'état supraconducteur une fois leur température critique atteinte, alors que les types II changent d'état plus progressivement. De plus, le diamagnétisme des supraconducteurs de type II n'est pas parfait, et un certain champ magnétique pénètre dans le matériau. Les supraconducteurs de type II peuvent atteindre des températures critiques plus élevées que ceux de type I.

En 1933, les scientifiques Meissner et Ochsenfeld découvrirent que les matériaux supraconducteurs refroidis sous un champ magnétique externe expulsent les lignes de champ tant que ce dernier reste inférieur à un certain champ critique Hc.

Pour expliquer ce phénomène spectaculaire, il faut un champ magnétique indépendant du temps. Donc, si le champ magnétique interne est nul avant l'application d'un champ externe, alors, une fois celui-ci appliqué, le champ interne doit rester nul. C'est l'effet Meissner. Cet effet est à l'origine des phénomènes de lévitation.

Au départ, aucune théorie n'était mise en place pour pouvoir expliquer la supraconductivité, les chercheurs se fiaient aux constations expérimentales et le tâtonnement était la règle. Les théories de London et de Ginzburg&Landau, introduites respectivement en

1935 et 1950, proposèrent une description phénoménologique de la supraconductivité. Mais celles-ci avaient leurs limites de validité, car au cours du temps, certaines découvertes contredirent ces théories, et elles furent complétées par la théorie BCS(Bardeen, Cooper, Schrieffer).

Introduite en 1957, cette théorie propose une explication à la supraconductivité. Les vibrations de la grille des atomes sont responsables de la circulation du courant. En effet, les électrons sont forcés de se regrouper par paires et peuvent donc passer au travers des obstacles. Ce couplage, connu sous le nom de paires de Cooper, trouve une explication dans les phonons: paquets d'ondes présents dans la grille lorsqu'elle vibre naturellement. Les interactions entre les électrons et les phonons sont à la l'origine de la résistivité et de la supraconductivité.

Lorsqu'un électron passe au travers de la grille, non loin d'un ion positif, celle-ci se déforme, sous l'effet de la vitesse (10^{+6} m/s). Cela engendre la formation de phonons ainsi que celle d'un vide chargé positivement autour de l'électron. Du fait de l'inertie générale du métal, la déformation de la grille persiste durant un laps de temps néanmoins suffisant pour qu'un autre électron soit projeté dans ce vide. Malgré la répulsion liée aux charges, les deux électrons se couplent, par l'action de la force exercée par les phonons, tout en étant séparés d'une certaine distance.

La théorie BCS montre comment deux atomes peuvent s'attirer du fait des interactions avec la grille d'atome. Le pairage des électrons est favorable à l'explication de la supraconduction car il plonge le métal dans un état de faible énergie. Lorsque les électrons sont couplés, ils se déplacent de façon ordonnée sans rencontrer de résistance au sein du supraconducteur (équilibre des forces appliquées sur les électrons). Ceci est explicable par l'effet Josephson.

L'Effet Josephson provient de la nature ondulatoire de l'électron qui permet d'envisager des déplacements normalement impossibles de part les barrières de potentiel.

L'Effet Josephson a été découvert par Bryan Josephson en 1962. Si un isolant, d'épaisseur 1 à 2 nanomètres, est placé entre deux supraconducteurs, il est possible que des paires d'électrons passent au travers de la barrière sans aucune résistance, comme dans un tunnel. Cet effet, aussi nommé Effet Tunnel, illustre un phénomène impossible dans des conditions d'expérimentation normales, en dehors des états de supraconduction. Tant que la densité du courant est inférieure à *Jc*, il n'y à pas de résistance produite par l'isolant. La proximité d'une ligne électrique diminue la valeur de *Jc*. La densité de courant circulant au travers de l'isolant reste inchangée tout en ayant une valeur supérieure à la nouvelle valeur de *Jc*. Dés lors, l'Effet Josephson est susceptible de disparaître du fait de l'apparition de résistivité.

La théorie BCS prévoyait que le phénomène de supraconductivité ne pouvait exister au-delà de 25-30K, ce qui eu pour effet de ralentir la quête pour de nouveaux matériaux supraconducteurs. Mais tout changea en 1986 avec la découverte d'une céramique supraconductrice à 30K. La course aux Tc élevées repartit de plus belle, pour arriver en 1987 à l'YBCO (composé d'yttrium, de baryum, de cuivre et d'oxygène), qui devint, avec une Tc de 92K le premier matériau supraconducteur dans de l'azote liquide (l'azote boue à 77K, soit -196°C), et finalement à une Tc de 138K en 1994. Cette dernière Tc a été obtenue avec une céramique à base de mercure et de cuivre dopée au thallium, ce qui la rend assez toxique. Ces céramiques sont toutes du type II. Bien qu'il existe des hypothèses sur les causes de la supraconductivité de ces céramiques (des structures planaires, des oxygènes hypochargés), aucune théorie globale n'explique pour le moment leur comportement supraconducteur.

Parallèlement dans les années 80, on s'intéressa aux supraconducteurs organiques. Il a en effet découvert que, même si le carbone brut n'est pas un supraconducteur, il peut le devenir dans des structures spécifiques, comme les fullerènes et les nanotubes. Les fullerènes sont des sphères de 60 atomes de carbone nommées après M. Fuller, l'inventeur du dôme géodésique auquel elles ressemblent. Des fullerènes dopées au $CHBr_3$ ont atteint une Tc de 117K. Les autres supraconducteurs organiques ont des Tc beaucoup plus faibles, mais ils peuvent avoir des propriétés surprenantes. Ainsi, des chercheurs ont découvert en 1997 que le premier supraconducteur organique $(TMTSF)_2PF_6$, fabriqué en 1980, reste supraconducteur en étant soumis à un champ de 6 Tesla, bien plus que n'importe quel autre matériau.

En 1997 également, un alliage or/niobium s'est révélé être à la fois un supraconducteur et un aimant naturel, phénomène qui avait été prouvée impossible plusieurs années auparavant. Depuis, d'autre matériaux ont été découverts ayant les mêmes propriétés, pour une Tc allant jusqu'à 58K.

Les premiers fils supraconducteurs, d'un alliage de niobium et de titane, ont été commercialisés en 1962, et servent principalement à la fabrication de bobines supraconductrices, pour créer des champs magnétiques, plus petites et consommant moins d'énergie que celles utilisant des fils en cuivre. Ces bobines supraconductrices sont utilisées dans l'imagerie médicale, avec les IRM, dans les accélérateurs de particules et les tokamaks pour confiner de la matière, dans les trains expérimentaux à propulsion magnétique, mais aussi pour conserver de l'énergie électrique, où elles peuvent servir à stabiliser un réseau d'alimentation électrique. Des bobines supraconductrices ont également été utilisées pour créer des bombes électromagnétiques, visant à détruire tout système électronique au point d'impact. Le principal désavantage de ces fils supraconducteurs est qu'ils ont une température critique de seulement 16K, et doivent donc être refroidis à l'hélium liquide, qui coûte assez cher. Les supraconducteurs à haute température sont actuellement trop fragiles pour subir les contraintes subies par les fils d'une bobines, mais des tronçons de SHT refroidis à l'azote liquide utilisés dans des réseaux d'alimentation électrique sont en cours d'expérimentation. Lors d'une de ces expériences 125kg de fils supraconducteurs ont remplacés 9t de fils de cuivre. Les conséquences de l'effet Josephson sont également étudiées dans le but de créer des ordinateurs plus rapides. Malgré toutes les promesses des supraconducteurs, les températures cryogéniques nécessaires à leur utilisation restent le frein majeur à leur mise en pratique.

Bibliographie

CRC Handbook of Chemistry and Physics

http://superconductors.org