

8 Exploiter des documents

Ce dossier comporte trois textes et un graphique sur les supraconducteurs.

Répondre aux questions suivantes à l'aide de ces documents.

- a. Pourquoi la liquéfaction de l'hélium a-t-elle permis la découverte de la supraconductivité ?
- b. Qu'appelle-t-on « effet Meissner » ?
- c. Quelle expérience spectaculaire peut-on réaliser pour mettre en évidence cet effet ? Représenter sur un schéma les lignes de champ magnétique « expulsées » par un matériau supraconducteur.
- d. Citer une application en médecine de la création de champs magnétiques intenses par des supraconducteurs.
- e. Quel phénomène cause des pertes lors du transport de l'électricité ?
- f. Rechercher les prix Nobel attribués pour des travaux sur la supraconductivité.
- g. Quel seuil de température a été franchi en 1986 ?
- h. Si demain, on découvrait un matériau supraconducteur à température ambiante, proposer quelques applications qui changeraient notre vie quotidienne. Discuter du saut restant à franchir pour atteindre cet objectif.

DOCUMENT 1

En 1911, deux ans après avoir réussi la liquéfaction de l'Hélium - atteignant alors la plus basse température connue : 4,2 Kelvin (K), c'est-à-dire -269 °C - le physicien Heike Kamerlingh Onnes proposa à son élève Gilles Holst de mesurer la résistivité d'un barreau de mercure. Ils découvrirent que celle-ci s'annulait en dessous de 4,15 K. Holst fit et refit les expériences, vérifia les instruments de mesure mais le doute n'était plus permis : le comportement se confirmait.

L'année suivante, Onnes découvrit que l'étain et le plomb (qui est un très mauvais conducteur à température ambiante) perdaient leur résistance respectivement à 3,7 K et 6 K. L'absence de résistivité du matériau, c'est-à-dire que celle-ci ne soit ni faible ni très faible mais totalement absente, est le premier phénomène spectaculaire de la supraconductivité.

En 1933, W. Meissner et R. Oschenfeld découvrirent la propriété d'un barreau de métal pur à être imperméable aux champs magnétiques : le diamagnétisme parfait, que l'on appelle depuis effet Meissner. Ce diamagnétisme, qui est le second effet surprenant de la supraconductivité, se traduit par la capacité d'un supraconducteur à émettre un champ magnétique opposé à un autre champ qui lui serait appliqué, et ce, quelle que soit la polarité du champ appliqué.

Sans aucune théorie sur laquelle s'appuyer, les chercheurs durent se contenter d'expérimenter, presque au hasard, différents alliages à base de titane, de strontium, de germanium et surtout de niobium, qui donnait les meilleurs résultats. Des recherches furent même menées dans le domaine des molécules organiques, essentiellement avec les fullerènes ou footballènes, avec des températures de l'ordre de 33 K.

La question de l'origine de la supraconductivité hantait les scientifiques : « D'où vient ce phénomène qu'aucune théorie n'avait soupçonné auparavant ? » En 1935, des théories

8 Exploiter des documents

incomplètes bien que puissantes furent proposées par les frères London, puis en 1950 par V. Ginzburg et L. Landau.

Mais en 1957 apparut la théorie B.C.S, du nom de ses découvreurs John Bardeen, Leon Cooper et John Schiffer, qui décrivait en partie le principe fondamental de la supraconductivité. Cette théorie, que nous expliciterons dans la suite de ce projet, stipule qu'à basse température, les électrons se déplacent par paires, appelées paires de Cooper, sous la forme de phonons. C'est grâce à cette théorie de base que les chercheurs ont pu progresser dans leur recherche de matériaux supraconducteurs à « haute température ». Les alliages contenant du Niobium se révélant les plus efficaces, on l'utilisa donc dans la majorité des composés supraconducteurs. Malheureusement, tous les alliages testés ne dépassaient pas une température supérieure à 23 K et la théorie B.C.S semblait avoir trouvé ses limites.

Parallèlement à ces recherches, Brian Josephson prédit en 1962 les effets quantiques qui portent son nom et sont utilisés en détection ultrasensible des champs magnétiques. La découverte de Josephson, qui laissa pantois tous les chercheurs, explique qu'un courant électrique non nul pouvait circuler d'un bloc supraconducteur à un autre bloc supraconducteur séparé du premier par une mince couche isolante, en l'absence même de différence de potentiel entre les deux blocs. Cette théorie fut vérifiée expérimentalement quelques années plus tard, ce qui valut à Josephson et Gjaever de recevoir le prix Nobel en 1974.

C'est en 1986, année charnière dans l'histoire des supraconducteurs, que la théorie B.C.S fut remise en cause, avec la découverte, par des ingénieurs d'IBM Zurich (Suisse), d'un supraconducteur à 34 K puis, neuf mois plus tard, à 92 K. Ainsi virent le jour de nouvelles générations de composés tels que Ba-La-Cu-O, Y-Ba-Cu-O et Ti-Sr-Ca-Cu-O, les deux derniers permettant de dépasser la température de l'azote liquide (77 K, soit -196 °C), coûtant dix fois moins cher que l'hélium liquide et refroidissant vingt fois mieux. Ainsi Ti-Sr-Ca-Cu-O atteignait une température critique de 125 K, laissant loin derrière la barrière psychologique de liquéfaction l'azote liquide.

Cette découverte suscita l'engouement de toute la communauté scientifique, qui repartit dans la course aux supraconducteurs à « Haute Température Critique (H T_c) », espérant alors découvrir un supraconducteur à température ambiante. Mais plus cette température augmentait et plus les performances des matériaux diminuaient, le courant pouvant être transporté sans déperditions devenant faible. Le record de température critique reproductible fut atteint en 1995 avec une température de 164 K mais nécessitant de hautes pressions.

La course aux T_c s'essouffant faute de compréhension au niveau atomique, les recherches se sont donc orientées vers la compréhension des phénomènes physiques régissant la supraconductivité. Cette nouvelle recherche conduit à des théories qu'il est actuellement difficile de confirmer ou infirmer. Toutefois, les scientifiques ne désespèrent pas de trouver des matériaux supraconducteurs à température ambiante.

8 Exploiter des documents

Résumé de l'histoire de la supraconductivité :

1908	Liquéfaction de l'hélium (4,2 K, soit -269 °C) par Kamerlingh Onnes.
1911	K. Onnes découvre la supraconductivité en proposant à G. Holst de mesurer la résistivité du mercure à très basse température.
1913	Échec du premier aimant supraconducteur.
1933	Mise en évidence du diamagnétisme des supraconducteurs (Meissner et Ochsenfeld).
1954	Premier aimant supraconducteur (Nb) qui fonctionna (0,71 Tesla (T) à 4,2 K).
1957	Théorie microscopique BCS de la supraconductivité (Bardeen, Cooper et Schieffer). Théorie d'A. Abrikosov des supraconducteurs de type II (réseau de vortex).
1958	Mise au point de conducteurs de type II en NbTi et Nb 3 Sn.
1960	Découverte des fortes densités de courant sous induction élevée (Nb 3 Sn).
1962	B. Josephson prédit les effets quantiques qui portent son nom et qui sont utilisés en détection ultrasensible de champ magnétique (jonctions Josephson et Squid).
1964	Première application significative des supraconducteurs : chambre à bulles d'Argon (2,5 T dans plusieurs m^3).
1965	Premiers cryoalternateurs.
1968	Définition du brin multifilamentaire par le laboratoire Rutherford.
1974	Mise en service de la plus puissante chambre à bulles au CERN (830 MJ).
1982	Première images IRM : elles assureront à la supraconductivité sa première application industrielle et commerciale.
1983	Mise au point des brins multifilamentaires alternatifs. Premier accélérateur supraconducteur.
1986	Bednorz et Müller découvrent la supraconductivité dans de nouveaux oxydes.
1987	Envolée des températures critiques. Démarrage de TORE SUPRA, tokamak supraconducteur refroidi à 1,8 K et installé à Cadarache (France).
1995	Record reproductible à 164 K (-109 °C).

(Tableau tiré de <http://www.lema.phys.univ-tours.fr>)

La supraconductivité est donc un phénomène dont la découverte et la compréhension s'étalent sur tout le XX^{e} siècle, permettant l'attribution de pas moins de quatre prix Nobel, ainsi que la découverte de nouveaux domaines d'utilisation liés aux nouveaux matériaux qui ont été créés.

Extrait de <http://superconductors.free.fr/historique.php>

8 Exploiter des documents

DOCUMENT 2

LA RÉSISTANCE DANS UN SUPRACONDUCTEUR

Dans un supraconducteur, en dessous d'une température appelée « température critique », très soudainement, la résistance électrique s'annule. Le matériau conduit alors parfaitement le courant. C'est incompréhensible car les défauts et vibrations des atomes devraient provoquer la résistance du matériau au passage des électrons. Et pourtant, dans un supraconducteur, la résistance électrique est rigoureusement nulle bien qu'il y ait toujours des défauts et toujours des vibrations !

Dans un supraconducteur, la résistance électrique est strictement nulle. Ainsi, un courant électrique peut continuer à circuler indéfiniment dans un anneau supraconducteur même une fois que la pile a été débranchée ! C'est comme cela qu'on crée les champs magnétiques dans les IRM. Il pourrait sembler curieux qu'une pile parvienne à créer une tension de quelques volts au bornes d'un circuit supraconducteur, où justement la tension électrique est nécessairement nulle puisqu'il n'y a pas de résistance électrique. En réalité, la tension imposée par la pile se répartit dans les autres parties du circuit, c'est-à-dire dans les fils métalliques qui la relient au supraconducteur et à l'intérieur de la pile (la résistance interne).

La résistance est vraiment nulle : les mesures, menées sur plusieurs années, montrent que le courant ne décroît pas du tout. Attention, même si ce courant est perpétuel, ce n'est pas une violation des lois de thermodynamique (qui interdisent les machines à mouvement perpétuel), car ici il n'y a pas création d'énergie. L'énergie électrique est juste stockée dans l'anneau.

L'explication en deux mots : les électrons forment un nouvel état collectif quantique tout à fait original qui n'est plus sensible aux moindres chocs. Les électrons ne sont plus freinés, la résistance électrique a donc disparu.

A l'échelle microscopique, la physique quantique nous apprend que dans un métal, les électrons [...] se comportent comme des ondes périodiques étalées sur plusieurs atomes, indépendantes les unes des autres. Dès qu'un défaut se présente, ou que l'un des atomes du réseau cristallin vibre, ces ondes sont perturbées. A très basse température, quand un métal devient supraconducteur, ses électrons s'associent par paire. Toutes les paires d'électrons se superposent alors les unes aux autres pour former une seule onde quantique qui occupe tout le matériau. Cette onde tout à fait particulière devient insensible aux défauts du matériau : ils sont trop petits pour freiner l'ensemble de l'onde. La résistance électrique a disparu.

Extrait de <http://www.supraconductivite.fr/fr/index.php#supra-intro>

EFFETS MAGNÉTIQUES DES SUPRACONDUCTEURS

Le schéma 7 (**fig.7**) montre ce qui se produit lorsqu'un supraconducteur est placé dans un champ magnétique ($T > T_c$). Quand la température passe au-dessous de la température critique (T_c), le supraconducteur repousse le champ magnétique hors de lui ($T < T_c$). Il réalise ceci en créant des courants de surface qui produisent un champ magnétique contrant exactement le champ extérieur, réalisant un « miroir magnétique ». Le supraconducteur devient alors parfaitement diamagnétique, privant son intérieur de tout champ.

8 Exploiter des documents

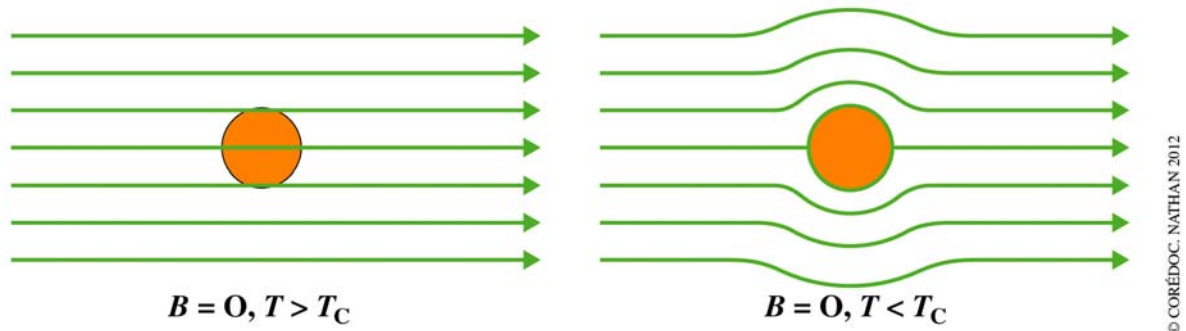


fig.7

Cette propriété de diamagnétisme parfait des supraconducteurs est peut-être la propriété macroscopique la plus fondamentale d'un supraconducteur. L'exclusion de flux, due à ce que l'on appelle l'effet Meissner, peut être facilement démontrée en plaçant un petit aimant au-dessus d'un supraconducteur, et en abaissant la température de ce dernier en dessous de son T_c . L'aimant commencera alors à flotter au-dessus du supraconducteur (cf. **figure 8**).

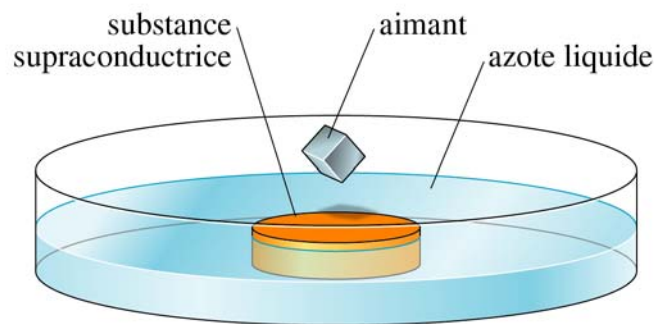


fig.8

Dans la plupart des cas, le champ magnétique initial de l'aimant reposant sur le supraconducteur sera assez fort pour qu'une partie le pénètre, ayant pour résultat une région non-supraconductrice. L'aimant, donc, ne lévitera pas aussi haut que s'il avait été introduit après obtention de l'effet de supraconduction.

Extrait de http://superconductors.free.fr/effets_magnetiques.php

8 Exploiter des documents

DOCUMENT 3. Les applications médicales

Un des premiers domaines où furent appliqués les supraconducteurs est la médecine avec l'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique).

Les années 1990 sont celles de l'IRM, devenu l'enjeu commercial majeur de la décennie. Cette technique très souple se développe surtout aux dépens de la tomodensitométrie X. Elle fournit des images analogues à celles de la tomodensitométrie, sans utiliser de rayonnement ionisant, donc sans risque connu pour le patient et l'opérateur. De plus, l'IRM devrait remplacer certains actes, réalisés aujourd'hui grâce à la radiologie conventionnelle, le scanner, l'angiographie ou l'échographie.

L'imagerie médicale est une réalité quotidienne, révolutionnaire par sa technique ultraperfectionnée et en perpétuelle mutation ; elle entraîne une véritable métamorphose du corps médical, la technique se mêlant à la connaissance classique. Elle offre des possibilités qui étaient encore imperceptibles au début des années 1980.

L'IRM repose sur le principe que les atomes d'hydrogène du corps réémettent l'énergie accumulée par l'induction d'un fort champ magnétique à une fréquence vibratoire pouvant être détectée.

Sans la supraconductivité, cette nouvelle technologie n'aurait jamais pu voir le jour. En effet, l'IRM repose intégralement sur la puissance de l'électroaimant qui est la base même de l'appareil. Pour en prendre conscience, il faut savoir qu'il faudrait des centaines de kilowatts pour qu'un aimant conventionnel atteigne le champ magnétique requis. Par conséquent, l'utilisation d'un aimant supraconducteur est très intéressante.

Les supraconducteurs apparaissent en deux points : tout d'abord dans l'électroaimant qui induit le fort champ magnétique nécessaire à l'accumulation d'énergie par les atomes, ensuite dans le détecteur d'ondes électromagnétiques, qui fournit l'image magnétique du cerveau. La taille des aimants nécessaire est fortement réduite du fait de l'utilisation de supraconducteurs, et l'alimentation électrique ne se fait qu'au moment de l'établissement du courant dans l'électroaimant (champ magnétique auto-induit).

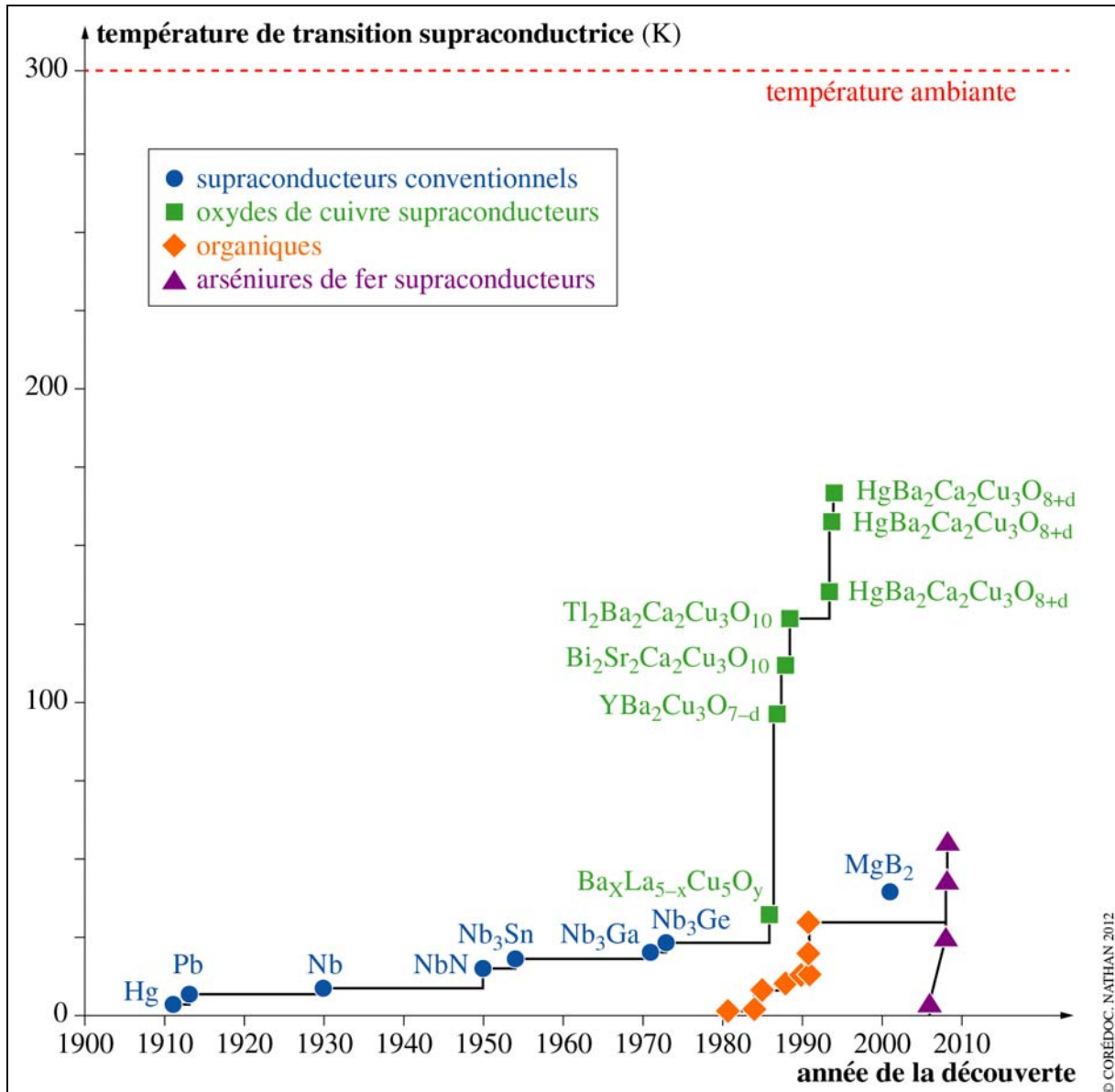
Néanmoins, l'IRM coûte très cher pour son installation, mais aussi lors de son utilisation, notamment en raison de l'obligation de maintenir l'aimant supraconducteur à une température très basse ($-193\text{ }^{\circ}\text{C}$, soit 80 K, dans de l'azote liquide), permettant ainsi la visualisation des organes.

Basée sur un principe très proche, la spectroscopie par résonance magnétique nucléaire (RMN) nécessite deux champs magnétiques perpendiculaires (l'un à haute fréquence, l'autre continu) d'une puissance d'environ 10 Teslas, et uniquement atteignable avec des supraconducteurs.

Extrait de <http://superconductors.free.fr/applications.php>

8 Exploiter des documents

DOCUMENT 4



PROLONGER LA LECTURE - À REGARDER

<http://www.cnrs.fr/supra2011/spip.php?article54>