

Projet libre sur la supraconductivité

Bibliographie

PAR AZAIEZ AMINA, BOUDET CHARLES (GROUPE D01)

14 Mai 2019

Certains matériaux remarquables ont pour propriété d'avoir, au-dessous d'une certaine température - appelée "température critique" - d'une part, de conduire un courant électrique sans pertes Joule¹ (conductivité parfaite) mais aussi, d'autre part, de pouvoir expulser les champs magnétiques extérieurs (superdiamagnétisme).

Aujourd'hui, les supraconducteurs peuvent être utilisés dans la réalisation de train à sustentation électrodynamique, les IRM, le stockage d'énergie, ou encore les accélérateurs de particules. Cependant, il apparaît que la température critique de ces matériaux est souvent extrêmement faible (proche du zéro absolu), ce qui en limite les applications (puisqu'il nécessite une infrastructure de refroidissement appropriée, parfois coûteuse).

Nous nous proposons d'étudier, pendant les séances de projet libre, la loi d'évolution de la résistance en fonction de la température d'un matériau supraconducteur. Au-dessous de la température critique, le comportement des électrons dans le matériau change. Ce phénomène est prédit par la mécanique mais inenvisageable par la théorie classique. En effet, les électrons peuvent circuler indéfiniment car la résistivité devient nulle.

En utilisant simplement un ohmmètre qu'on brancherait aux bornes du supraconducteur, il apparaîtrait que les résistances des fils, des soudures ainsi que l'air ambiant ne pourront pas être négligées puisque la résistance qu'on cherche à mesurer est de l'ordre du milliohm. Il faut donc utiliser un milliohmètre.

Dans cette bibliographie, nous nous attacherons d'une part à discuter de l'expérience historique ayant conduit à la découverte de la supraconductivité; et d'autre part à poser quelques bases théoriques sur la supraconductivité.

1 Une expérience historique : la découverte de la supraconductivité par Onnes en 1911

En 1906, dans son laboratoire situé à Leiden Université de Heike, Kamerlingh Onnes² réussit pour la première fois à liquéfier de l'hélium, ce qui fit émerger un nouveau domaine de la physique : celui de la physique des basses températures. C'est ainsi qu'il découvrit la supraconductivité en 1911. Cependant, les archives concernant cette découverte sont difficiles à trouver et ce n'est qu'en déchiffrant ses cahiers de notes écrits au crayon à papier avec une écriture peu lisible, que les historiens des sciences réussirent à reconstituer l'expérience de Onnes. Ci-dessous est restituée la méthode expérimentale qui a mené à la découverte de la supraconductivité.

1. Ainsi, le courant électrique émis circulera pour toujours dans une boucle fermée de matériau supraconducteur, ce qui en fait la chose la plus proche du mouvement perpétuel dans la nature.

2. Surnommé *the coolest scientist on earth* dans le milieu scientifique.

était sensible à l'action des pompes⁵. L'expérience fut réalisée en décembre 1910. Le travail acharné des expérimentateurs avait enfin porté ses fruits, et la résistivité mesurée du platine était tombée à une valeur résiduelle⁶. La supraconductivité était découverte.

2 Supraconductivité théorique

Dans cette section, des éléments de supraconductivité théoriques sont donnés.

2.1 Théorie BCS

La théorie BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer) énonce que la supraconductivité résulte de formations de paires d'électrons de spins opposés⁷ - appelées paires de Cooper, qui se comportent comme des bosons de spin zéro⁸ - qui constituent ensuite une fonction d'onde macroscopique. Ces paires d'électrons peuvent se former grâce à la présence d'une certaine attraction entre les électrons - résultant de l'échange de phonons, suffisante pour compenser la loi de Coulomb. En fait, il est nécessaire qu'une certaine énergie ΔE soit fournie⁹ pour exciter le fluide d'électrons et former les paires.

C'est aujourd'hui la théorie la plus acceptée dans la communauté scientifique pour décrire la supraconductivité. Cependant, tous les matériaux supraconducteurs ne peuvent, en fait, pas être décrits par la théorie BCS. De tels supraconducteurs, comme les cuprates, sont appelés supraconducteurs non conventionnels.

2.2 Résistivité nulle

Ainsi, un courant dans un matériau supraconducteur ne se réduit pas à des électrons, mais à des paires d'électrons. Si l'énergie ΔE fournie pour créer ces paires de Cooper est supérieure à l'énergie thermique du réseau, alors les paires de Cooper peuvent se déplacer librement : elles forment un fluide sans viscosité, c'est-à-dire un superfluide¹⁰. Les défauts du réseau cristallin ne ralentissent donc plus le déplacement des paires de Cooper, l'écoulement s'effectue sans frottements. C'est-à-dire qu'il n'y a plus d'effet Joule : la résistivité du matériau est alors nulle.

2.3 Effet Meissner

Si l'on applique un champ magnétique faible à un matériau possédant des propriétés de supraconductivité, alors, lors de la transition de celui-ci vers l'état supraconducteur, des courants surfaciques apparaissent sur le matériau. Ceux-ci engendrent¹¹ alors un champ magnétique, qui va compenser le champ magnétique extérieur, à l'intérieur du matériau. Le supraconducteur est alors dit être dans un état Meissner, et est qualifié de superdiamagnétique¹². De plus, la résistance d'un supraconducteur

5. Les galvanomètres d'époque étant composés d'aiguilles fines sensibles aux vibrations.

6. Qui dépendait vraisemblablement de la pureté de l'échantillon. En fait, les scientifiques ne s'attendaient pas à une telle valeur, mais à la formule classique de la résistivité (qui augmente lorsque la température diminue).

7. En fait, les deux électrons sont reliés l'un à l'autre par renversement du temps.

8. Les électrons sont des fermions, et la statistique de Bose-Einstein n'était pas connue à l'époque.

9. En particulier, cette énergie dite de "gap" tend vers zéro lorsque la température tend vers zéro selon la loi $E = k_B \times T$.

10. Tout comme l'hélium liquide qu'Onnes étudiait justement.

11. D'après le théorème d'Ampère.

teur étant nulle, les courants restent et tournent éternellement en boucle dans le matériau sans perte Joule. Le matériau reste donc superdiamagnétique après la transition vers l'état supraconducteur.

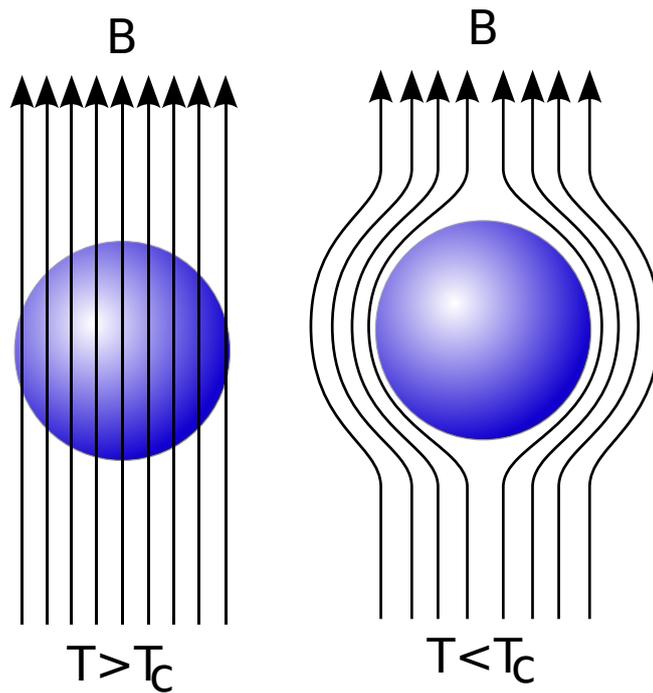


Figure 2. Supraconducteur, sur lequel est appliqué un champ magnétique extérieur \vec{B} , au-dessus et au-dessous de la température critique.

Ainsi, si l'on pose un aimant sur un supraconducteur et que l'on fait passer ce dernier en dessous de sa température critique, le champ magnétique de l'aimant va être expulsé par le supraconducteur et c'est ainsi que l'on va observer celui-ci léviter au-dessus du matériau.

Il faut toutefois noter que ce phénomène est différent de celui de conductivité infinie, puisque la propriété d'expulsion du champ magnétique apparaît aussi lors de la transition du matériau à l'état supraconducteur¹³.

Ainsi, le fait de placer un aimant au dessus d'un matériau dans l'état supraconducteur et de le faire léviter par la suite ne constitue pas une démonstration de l'effet Meissner.

Par ailleurs, si le champ magnétique appliqué est suffisamment important, il est possible d'observer deux sortes d'effets selon le matériau utilisé, et donc d'exhiber deux catégories de matériaux supraconducteurs différentes :

- **Supraconducteur de type I** : au-delà d'un certain champ magnétique dit "critique", la propriété de supraconductivité s'arrête brusquement. Les supraconducteurs de type I sont souvent des éléments purs.
- **Supraconducteur de type II** : au-delà d'un certain champ magnétique dit "critique inférieur", celui-ci va commencer par pénétrer à l'intérieur du supraconducteur le long de "trous" cylindriques dans le matériau appelés "vortex", sans que la propriété de résistance nulle ne cesse. Puis, au-delà d'un champ magnétique "critique supérieur", la propriété de supraconductivité s'arrête. Les supraconducteurs de type II sont les éléments composés, les éléments impurs, ainsi que quelques éléments purs.

12. Dont la susceptibilité magnétique est $\chi_m = -1$.

13. Ce qui ne peut pas être expliqué seulement par la conductivité finie.

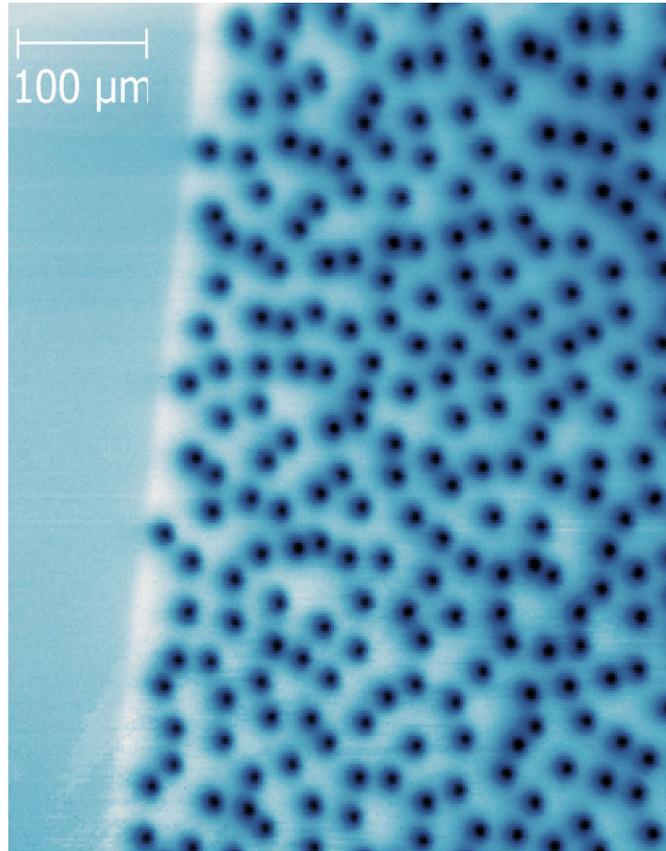


Figure 3. Ensemble de vortex, vu au microscope SQUID.

Ainsi, dans tous les cas, les supraconducteurs ne peuvent porter qu'un courant limité¹⁴, et donc une puissance électrique finie, ce qui en limite les applications.

A Bibliographie

- [1] Dirk van Delft et Peter Kes, "The discovery of superconductivity", *Physics Today* 63, No. 9, pp. 38-42, 2010. <https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/RN16e.pdf>.
- [2] Charles Kittel, *Physique de l'état solide*, 7ème édition, Dunod, 1998.
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper, et J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* 108, pp. 1175–1204, 1957. <https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.108.1175>.
- [4] Landau, L. D. et Lifschitz, E. M., *Physique Théorique. Tome 8, Électrodynamique des milieux continus.*, 2ème édition, Éditions Mir, 1990.
- [4] Pierre-Gilles de Gennes, *Superconductivity of metals and alloys*, Perseus Books, 1999.
- [5] Wikipedia, *Abrikosov vortex*. https://en.wikipedia.org/wiki/Abrikosov_vortex.

14. Puisque les courants sont sources des champs magnétiques d'après le théorème d'Ampère.