

# Partie B

Cette partie a pour but de vulgariser le domaine de recherche dans lequel mon stage s'est déroulé.

## Introduction

La supraconductivité dans les cuprates est un domaine de la recherche en physique très actif et très prometteur, car ses débouchés peuvent révolutionner plusieurs domaines. Ce document a pour but de vous introduire au domaine des cuprates et de vous parler brièvement des mesures de résonance magnétique nucléaire sur les cuprates. Une petite capsule historique sur les supraconducteurs sera fait pour ensuite entré dans le domaine des cuprates et finir avec la résonance magnétique nucléaire.

## Historique supraconducteur

En 1911, Heike Kamerlingh Onnes [5] et son équipe observe pour la première fois la supraconductivité dans du mercure. Cette nouvelle phase de la matière permet d'obtenir un matériau avec une résistance nulle et une expulsion du champ magnétique. Caractéristiques qui permettent la lévitation, la construction de super aimant et le transport énergétique sans aucune perte. C'est grâce à la supraconductivité que nous pouvons construire des accélérateurs de particules comme au CERN et pratiquer l'imagerie par résonance magnétique (IRM) dans les hôpitaux. Seul problème, ce phénomène apparaît qu'à très basse température. Effectivement, le matériau perd toute sa résistivité à une température très précise, nommé température critique  $T_c$  (voire figure 5). L'objectif est donc de trouver un matériau ayant une température critique supérieure à la température ambiante. La course venait de commencer. Pendant plus d'une trentaine d'année des chercheurs de partout essaient de trouver ou de synthétiser ce fameux matériau. En 1957, John Bardeen, Leon Cooper, et John Robert Schrieffer (BCS)[3] clos le débat en publiant une théorie décrivant la supraconductivité et son existence très peu probable à température ambiante. Le sujet évolue lentement jusqu'en 1986, quand Johannes Georg Bednorz et Karl Alexander Müller [4] découvrent une nouvelle famille de matériaux qui dépassent les attentes de la théorie BCS avec leur température critique élevée. Les cuprates venaient d'être découvert.

## Les cuprates

Les cuprates sont des cristaux<sup>1</sup> constitués de plans de cuivre-oxygène ( $\text{CuO}_2$ , d'où leur nom<sup>2</sup>). Ces plans forment un grand quadrillage d'atomes semblable à un jeu de dame où les

---

1. Un cristal est un solide dont les constituants (atomes, molécules ou d'ions) sont assemblés de manière périodique (motif qui se répète).

2. Cuprate est le nom chimique pour le  $\text{CuO}_2$

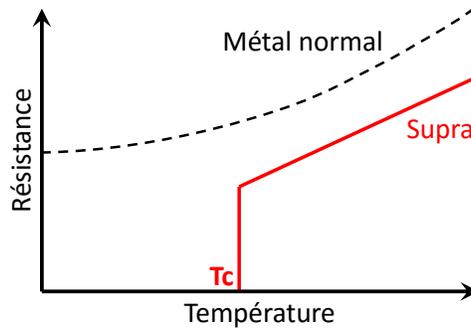


FIGURE 1 – Schéma de la résistance électrique en fonction de la température pour un métal normal et un supraconducteur.

électrons représentent les pions (voir figure 2). Ces plans sont entrecoupés d'un isolant fait d'autres éléments qui varient selon le cuprate.

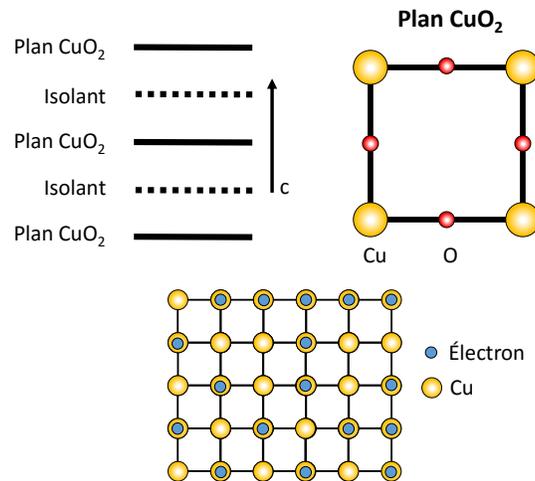


FIGURE 2 – Illustration des plans de cuivre-oxygène et de la disposition des électrons.

Toute la physique des cuprates se déroule dans ces plans, car c'est là que peuvent se propager les électrons, c'est-à-dire l'électricité. Un aspect important des cuprates est qu'on peut, à l'aide de procédé chimique, changer la concentration d'électrons qui se trouve dans ces plans, on dit alors que le cuprate est dopé en trou<sup>3</sup>(ou en électron). Cela a pour effet de changer complètement la nature du cuprate, il change de phase<sup>4</sup>. Moins(plus) le dopage est

3. Il faut le voir comme si on ajoute des trous au lieu d'enlever des électrons.

4. L'analogie ce fait avec l'eau qui change de phase gazeuse, liquide ou solide selon sa température ou sa

grand, plus(moins) il y a d'électrons. La température a aussi beaucoup d'impact sur la nature des cuprates, comme sur plusieurs matériaux. Par exemple, ce n'est qu'à une température précise, nommé température critique, qu'un matériau peut devenir supraconducteur. En combinant le changement de température ( $T$ ) et de dopage ( $p$ ) on peut alors obtenir un diagramme montrant toutes les phases possibles qu'un cuprate peut avoir. Cela introduit l'important diagramme de phase(voire figure 3).

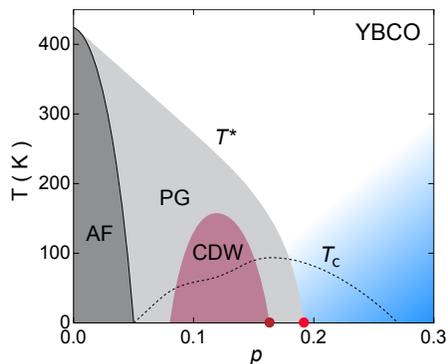


FIGURE 3 – Diagramme de phase de température en Kelvin en fonction du dopage pour le cuprate supraconducteur  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (ou YBCO) [1], [2]. AF est la phase antiferromagnétique, PG est le pseudogap, CDW est l'ordre de charge, la supraconductivité est délimitée par la ligne pointillée  $T_c$  et la région blanche est l'état normal ou la phase métallique.

### Phase antiferromagnétique

Pour comprendre la phase antiferromagnétique il faut connaître quelques propriétés des électrons et comprendre ce qu'est un matériau ferromagnétique. Premièrement, chaque électron possède un moment magnétique, appelé *spin*. Deuxièmement, le *spin* agit comme une boussole, c'est-à-dire qu'elle pointe toujours dans le sens du champ magnétique (voire figure 4). Troisièmement, deux électrons ayant le même *spin* se repousse. Donc, lorsqu'un cuprate est dans la phase antiferromagnétique, il a un dopage très bas, il se retrouve donc avec tellement d'électrons dans ses plans de cuivre-oxygène que ceux-ci ne peuvent circuler sans se retrouver au même endroit. Comme un embouteillage. Il n'y a donc aucun courant électrique possible. Le cuprate dans la phase antiferromagnétique est alors un isolant. De plus, un matériau ferromagnétique est un matériau aimanté, c'est-à-dire qu'il produit un champ magnétique. Cela est causé par tout les *spins* d'électrons orientés dans la même direction. Dans les cuprates sous-dopés, les électrons ne peuvent avoir leur *spin* dans la même direction, car ceux-ci vont alors vouloir se repousser mais ne pourrons pas en raison du trafic d'électron. On dit alors qu'il est antiferromagnétique.

---

pression. La différence est que les phases des cuprates se situent toutes dans l'état solide.

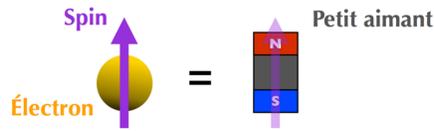


FIGURE 4 – Illustration du spin d'un électron qui agit comme une petite aimant.

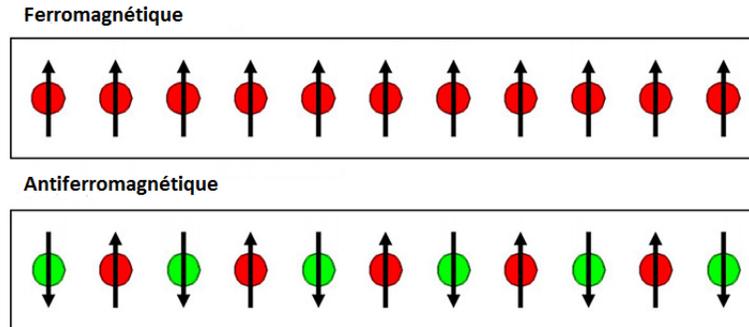


FIGURE 5 – Illustration de l'organisation électronique d'un matériau ferromagnétique et antiferromagnétique.

### Phase métallique ou état normal

Un métal a la particularité de conduire l'électricité. Le cuprate devient métallique lorsque le dopage est élevée, car la concentration d'électron dans les plans cuivre-oxygène est faible. Les électrons peuvent donc facilement transporter l'électricité. Toutefois, les électrons ont un mouvement assez chaotique et finissent par percuter les atomes, les impuretés et les autres électrons ayant comme conséquence de ralentir le courant. C'est ce qu'on appelle la résistance électrique.

### Phase supraconductrice

Dans la phase supraconductrice, les électrons se fusionnent en paires formant des bosons<sup>5</sup>. Ceux-ci finissent par tous agir ensemble en harmonie, comme un banc de poisson. Il n'y a donc plus aucun choque entre les électrons et leur environnement, donc plus de résistance dans le matériau. Lorsqu'un matériau supraconducteur est placé dans un champ magnétique, les électrons (maintenant en paires) créent des courants électriques dans le matériaux (super

5. Les bosons forment une famille de particule élémentaire qui, contrairement aux électrons, peuvent se condenser, c'est-à dire qu'ils ne se repoussent pas et peuvent être au même endroit.

courant) de telle sorte à créé un champ magnétique inverse au champ externe. On observe alors une expulsion du champ magnétique (voire figure 6).

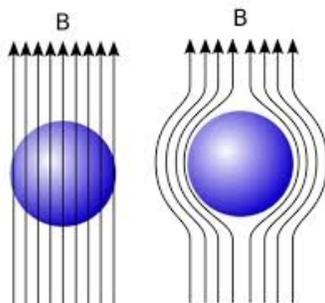


FIGURE 6 – Ligne de champ magnétique  $B$  expulsé par un supraconducteur.

### Phase *pseudogap*

La phase *pseudogap* est le plus gros mystère des cuprates. Elle semble être un mélange entre la phase antiferromagnétique et la phase métallique mais ayant toutefois certaines signatures expérimentales bien à elle. La délimitation  $T^*$  est diffuse, rendant la vie difficile aux chercheurs puisqu'on observe plusieurs changements à des températures différentes. Toutefois, il y a des raisons de croire qu'à température nulle, il serait possible d'observer une transition claire entre le *pseudogap* et l'état normal, mais la vérification de cette hypothèse comporte de nombreux défis expérimentaux qui restent à relevés. La compréhension du *pseudogap* est un sujet très actif en recherche puisqu'il contient peut-être le secret des cuprates.

### L'ordre de charge

Dans un métal, les électrons ont tendance à se répartir de façon homogène. Dans l'ordre de charge, les électrons se répartissent de façon in-homogène créant des fluctuations de densité d'électron ou de charge. Le point important de ce phénomène est qu'il s'oppose à celui de la supraconductivité, c'est-à-dire que l'ordre de charge empêche les électrons de former des paires. Cette phase est encore un sujet très actif en recherche.

La recherche fondamentale sur les cuprates se fait avec différent type de mesures. Par exemple, dans le groupe du professeur Louis Taillefer, les mesures les plus utilisées sont les mesures de transport. Ces mesures consistent à faire passer une quantité physique au travers de l'échantillon et d'observer comment cette quantité a été modifiée. La mesure de transport la plus commune est la mesure de résistivité. Il faut appliquer une tension aux bords de l'échantillon et mesurer le courant. On peut faire le même principe avec la chaleur.

Ensuite, on peut ajouter un champ magnétique autour de l'échantillon et voir comment la charge électrique ou thermique se propage dans l'échantillon. Il existe toutefois d'autre type de mesure dont la résonance magnétique nucléaire(RMN).

## Qu'est-ce que la RMN

La résonance magnétique nucléaire(RMN) désigne une propriété que certains atomes ont, une fois placés dans un champ magnétique. Pour que l'atome ait cette propriété, il faut qu'il possède un *spin* nucléaire, c'est-à-dire que son noyau agit comme un petit aimant. Lorsque cet atome est soumis à un rayonnement électromagnétique<sup>6</sup>, le noyau atomique peut absorber l'énergie du rayonnement et ensuite le relâcher. Pour que l'absorption se produise, il faut que le rayonnement soit à une fréquence très précise, appelé fréquence de résonance.

## RMN dans les cuprates

L'atome de cuivre possède un spin nucléaire. Donc en plus d'être un élément clé dans les cristaux de cuprate, il est sensible à la RMN. La motivation de faire des mesures de RMN sur les cuprates est de voir comment la résonance magnétique des plans de cuivre change en fonction du dopage et de la température. Par exemple, un cuprate en phase *pseudogap* ne donnera pas le même signal que dans la phase métallique.

---

6. Un rayonnement électromagnétique peut prendre plusieurs forme selon leur fréquence. La lumière est un rayonnement électromagnétique tout comme les ondes radios et les rayons X.

## Références

- [1] S. Badoux, S. A. A. Afshar, B. Michon, A. Ouellet, S. Fortier, D. LeBoeuf, T. P. Croft, C. Lester, S. M. Hayden, H. Takagi, K. Yamada, D. Graf, N. Doiron-Leyraud, and Louis Taillefer. Critical doping for the onset of fermi-surface reconstruction by charge-density-wave order in the cuprate superconductor  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ . *Phys. Rev. X*, 6 :021004, Apr 2016.
- [2] S Badoux, W Tabis, F Laliberté, G Grissonnanche, B Vignolle, D Vignolles, J Béard, DA Bonn, WN Hardy, R Liang, et al. Change of carrier density at the pseudogap critical point of a cuprate superconductor. *arXiv preprint arXiv :1511.08162*, 2015.
- [3] John Bardeen, Leon N Cooper, and J Robert Schrieffer. Theory of superconductivity. *Physical Review*, 108(5) :1175, 1957.
- [4] J George Bednorz and K Alex Müller. Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba—La—Cu—O system. In *Ten Years of Superconductivity : 1980–1990*, pages 267–271. Springer, 1986.
- [5] H Kamerlingh Onnes. The resistance of pure mercury at helium temperatures. *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*, 12(120) :1, 1911.