

La revanche des électrons dans un monde organique

Ou
Une brève revue des sels de Bechgaard

Samuel Desrosiers, Université de Sherbrooke,
Sous la supervision de Pr Claude Bourbonnais.

Crédit d'image: Claude, Jerome, Physics World (1998).

Ca semble presque tiré tout droit d'un livre de science-fiction, imaginez: faire passer un courant électrique dans un matériau... sans aucune perte! C'est pourtant ce que permet le phénomène de supraconductivité. Un peu partout dans le monde, des physiciens spécialistes de la matière condensée s'activent afin de percer les secrets d'une nouvelle génération de supraconducteurs paraissant contre nature.

De ces matériaux, des sels organiques appelés sels de Bechgaard présentent des caractéristiques très intéressantes et non conventionnelles. Explorons le fonctionnement de ce matériau supraconducteur et ce qui motive la recherche dans ce domaine.

La fameuse supraconductivité

Vous avez bien lu, on parle d'une résistivité parfaitement nulle quand on parle de supraconductivité. Et s'il n'y a pas de résistance, il n'y a pas de réchauffement au passage d'un courant et donc aucune perte d'énergie. Jusqu'à présent les matériaux supraconducteurs découverts nécessitent toujours une très basse température pour le rester, ce qui en limite les applications. Voilà pourquoi l'atteinte de supraconductivité à température et pression am-

biante en fait rêver plusieurs.

Un tel matériau aurait des applications dépassant l'entendement. Que ce soit pour la création d'électroaimants d'une puissance gigantesque ne demandant pas d'énergie d'alimentation, pour une optimisation du transport du courant ou encore pour le stockage d'énergie à travers des bobines de courant, un supraconducteur à température ambiante donnerait lieu à une véritable révolution technologique. Le supraconducteur à haute température est un véritable saint-Graal de la physique moderne [1].

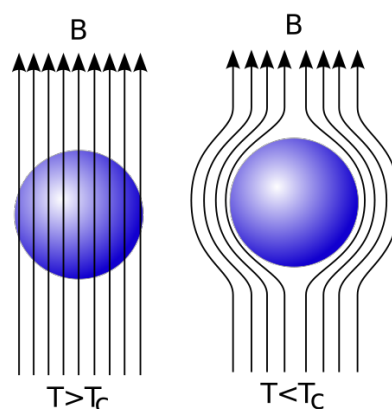


Figure 2: Représentation schématisée de l'effet Meissner [Ref: Piotr Jaworski, image libre de droits].

La supraconductivité est aussi caractérisée par ce

Kamerlingh Onnes et la découverte de la supraconductivité

Le phénomène de la supraconductivité fut observé dès 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes. Celui-ci était déjà le premier à avoir su liquéfier l'hélium. Les moyens techniques qu'il avait ainsi développés permettaient d'atteindre des températures plus basses que ce qui était préalablement possible en laboratoire. Il eut alors l'idée d'observer les propriétés des métaux à ces basses températures [9].

Plusieurs prédictions sur le comportement de la résistivité des matériaux à basse température avaient déjà été avancées, mais personne n'avait prévu l'existence de la supraconductivité. C'est tout d'abord dans le mercure que Kamerlingh Onnes observa une chute soudaine de la résistivité aux alentours de 4 K (environ $-269.15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Le mercure n'était pas le seul supraconducteur, des années de recherches auront permis d'identifier une large gamme de métaux aussi supraconducteurs. La course à la compréhension de la supraconductivité était lancée [1].

Heike Kamerlingh Onnes fut honoré du prix Nobel de physique de 1913 pour ses études sur les propriétés de la matière à basse température ayant mené à la production d'hélium liquide [9].



Figure 1: Heike Kamerlingh Onnes. Image tirée de [9]

que l'on appelle l'effet Meissner. Un supraconducteur soumis à un champ magnétique externe produira son propre champ magnétique interne qui s'opposera au champ initialement appliqué (voir la figure 2). En déposant un aimant sur un matériau supraconducteur à température suffisamment élevée, le champ magnétique de l'aimant le pénètre. En le refroidissant en dessous de sa température critique (la température à laquelle il devient supraconducteur), celui-ci annulera le champ magnétique à l'intérieur de lui. Il en résulte alors une force magnétique repoussant l'aimant du supraconducteur qui contrera l'effet de la gravité. L'aimant se mettra alors à léviter au-dessus du supraconducteur (voir la figure 3). Le matériau sera même en quelque sorte capturé par l'aimant, entouré par ses lignes de champ (son champ magnétique) [2].

La phase supraconductrice de plusieurs matériaux reste toujours un mystère. Il est alors primordial d'explorer les différentes avenues possibles et les différents phénomènes de supraconductivité répertoriés pour espérer percer son secret. Les sels de Bechgaard ($TMTSF$)₂X (où X est un anion variable) sont un bon exemple de matériaux supraconducteurs dits non conventionnels. Les mécanismes de supraconductivité y sont bien différents de ceux des supraconducteurs conventionnels, tels les métaux

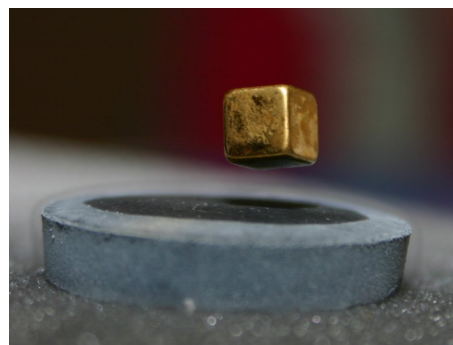


Figure 3: Démonstration de l'effet Meissner. On peut voir l'aimant en lévitation sur l'échantillon supraconducteur [Source: Wikipedia Allemand première publication 11:59, 20. Nov 2005 par Peter Nussbaumer, image libre de droits].

ordinaires comme l'aluminium ou le plomb.

Pour comprendre adéquatement la supraconductivité, plus spécifiquement celle dans les sels de Bechgaard, il est nécessaire de revoir quelques notions de base sur la résistivité.

Un peu de conduction...

On pourrait commencer par étudier le cas d'un métal normal. Imaginons un fil électrique permettant d'alimenter une ampoule. Vous vous doutez bien qu'une

force électrique s'applique sur les électrons pour leur permettre de circuler.

Dans le métal composant votre fil, les électrons sont plus libres de se déplacer que dans un isolant électrique comme le bois ou le caoutchouc. Cela s'explique par la structure des couches électroniques des molécules ou des atomes formant le matériau. Les électrons d'un atome, par exemple, sont en orbite autour d'un noyau positif formé de neutrons et de protons. Si le nombre d'électrons formant une certaine couche est maximisé, la couche électronique devient plus stable. Elle n'acceptera plus d'électrons supplémentaires, selon certains principes fondamentaux de la mécanique quantique. Il est alors plus difficile de déloger un électron de sa position autour de l'atome ou de la molécule. On parle ainsi d'un isolant électrique. Un métal, vous l'aurez compris, est formé de molécules présentant des couches électroniques incomplètes, les électrons sur la couche partiellement remplie (appelés électrons de valence) vont quitter plus facilement leur position [3].

Dans un métal, la vitesse de transmission du signal électrique est presque instantanée (on parle de la vitesse de progression d'une onde électromagnétique). La vitesse de dérive des électrons dans le sens du courant, elle, est très faible. On parle de quelques fractions de millimètres par seconde pour un courant continu.

En effet, si à la base les électrons dans le fil se déplacent très rapidement mais aléatoirement, l'application d'un champ électrique sur les électrons causera un certain flux net d'électrons dans une direction. La vitesse des électrons ainsi fournie est appelée vitesse de dérive. Les électrons qui alimenteront votre ampoule sont donc ceux étant déjà dans les fils que vous branchez à la prise, à moins d'une utilisation incroyablement prolongée [5]. Voilà qui est assez contre-intuitif!

La théorie BCS

Il aura fallu attendre plusieurs années avant qu'une théorie suffisante de la supraconductivité des métaux ordinaires ne soit formulée. C'est en 1957 que le trio formé de John Bardeen, Leon Neil Cooper et John Robert Schrieffer publia un article dans le fameux journal *Physical Review* introduisant un modèle théorique satisfaisant. La théorie BCS (du nom de ses trois créateurs) était née [7].

Brièvement, la théorie BCS peut être expliquée en supposant un appariement des électrons dans le matériau. Si vous vous y connaissez un peu en

électromagnétisme, l'appariement des électrons peut apparaître contre-intuitif vu la répulsion coulombienne entre les électrons. Normalement, deux charges négatives se repoussent, il faut considérer des charges de signe opposé pour provoquer une attraction. Expliquons les mécanismes d'appariement d'électrons en paires de Cooper et comment celles-ci donnent naissance à la supraconductivité.

Soit un réseau d'atomes ou de molécules formant le supraconducteur. Les électrons de valence du matériau métallique se déplacent à travers ce réseau, laissant les atomes qu'ils quittent comme des charges positives (étant donné que l'atome a normalement une charge globale nulle, le déplacement de l'électron de valence laisse une charge effective positive à l'atome). Le passage d'un électron provoquera alors un rapprochement des ions positifs (les atomes formant le réseau) de manière à déformer le réseau (la figure 4 illustre comment le réseau se déforme). Il est alors possible pour un second électron d'être attiré par la concentration de charges positives. Les forces inter-atomiques formant le réseau sont comparables à celle d'un ressort. Un mouvement dans les ions provoquera alors une vibration de ceux-ci.

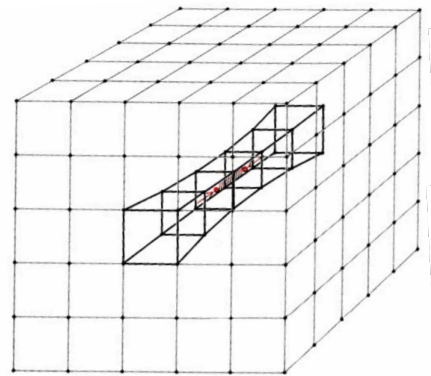


Figure 4: Les électrons sont attirés par la concentration d'ions positifs provoquée par leur propre passage [2].

Évidemment, les ions positifs sont beaucoup plus lourds que les électrons et prennent un certain temps à se déplacer. L'électron ayant causé la vibration des ions du réseau est beaucoup plus rapide que ceux-ci et pourra parcourir une très grande distance avant que les ions ne soient dans leur position d'équilibre. Le deuxième électron subira alors l'attraction de la concentration de charges positives sans subir une trop grande répulsion du premier électron. Cette attraction est l'ingrédient nécessaire à la formation d'un état lié entre les deux électrons.

Les deux électrons entrent alors dans une espèce de résonance avec le réseau. Quand ils sont éloignés,

ils sont attirés par la concentration des ions positifs. Mais quand ils sont plus proches, ils sont alors repoussés en tentant d'éviter la zone de plus faible concentration d'ions. Ils alternent alors entre la position de la figure 4 et celle de la figure 5, comme s'ils étaient reliés par un ressort. La paire de Cooper est alors formée.

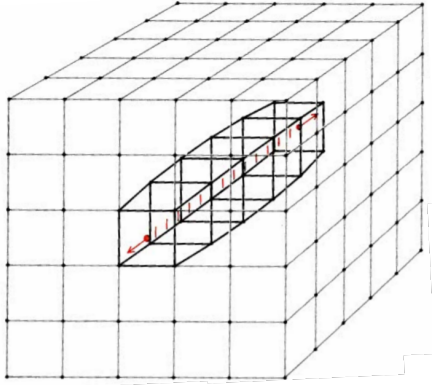


Figure 5: *Au moment de leur rapprochement, les électrons évitent la plus faible concentration d'ions positifs [2].*

L'état supraconducteur est fait d'une superposition cohérente d'un nombre macroscopique de paires de Cooper. Le courant dans un supraconducteur est alors causé par un mouvement collectif de toutes ces paires. Sans application de champ électrique, le centre de masse (position moyenne des deux électrons pondérés selon leur masse, ce qui revient ici à la position moyenne des électrons) des paires de Cooper reste alors stable. L'application d'un champ électrique entraînera le déplacement graduel du centre de masse de chacune des paires [3].

Mais, pourquoi un matériau n'opposera pas de résistance au passage des paires de Cooper s'il en oppose aux électrons libres non appariés dans un métal ordinaire, par exemple?

Dans un métal, les électrons libres seront diffusés par les atomes et leurs vibrations thermiques. Théoriquement, un métal aurait une résistance nulle à température nulle, vu l'absence de vibrations pouvant provoquer ces diffusions. Évidemment, il y a aussi les défauts du matériau qui causent une part de la résistance. Comme nous l'avons vu, le passage des électrons peut facilement être forcé par un champ dans ce processus, mais une résistance est toujours présente.

Dans le matériau supraconducteur, les paires de Cooper sont regroupées dans un état collectif et demandent une énergie seuil pour être déviée de leurs trajectoires. Il faut donner plus d'énergie thermique aux ions (en augmentant la température du matériau)

pour qu'ils vibrent assez pour briser les paires et dévier les électrons maintenant célibataires les composant. C'est ce qui explique la chute de résistivité du matériau si brusque dans un supraconducteur [2].

Les cuprates supraconducteurs... Un sujet chaud!

La recherche d'un supraconducteur à température normale eut une grande recrudescence notamment grâce à la découverte des cuprates supraconducteurs en 1986. Il s'agit d'une famille d'oxydes de cuivre supraconducteurs jusqu'à une température de 164 K, un record à ce jour. Un tel supraconducteur ravive l'optimisme des physiciens.

Plusieurs équipes de recherche s'activent un peu partout dans le monde autour de ce matériau. On est maintenant techniquement à mi-chemin vers l'obtention d'un supraconducteur à conditions normales [4].

Une nouvelle génération de matériaux

Pendant très longtemps, la théorie BCS fut suffisante pour expliquer le fonctionnement des supraconducteurs connus. Celle-ci donnait des prédictions très pessimistes sur la possibilité d'un supraconducteur à haute température. Cependant, certains physiciens firent plusieurs découvertes très surprenantes.

Des matériaux étant normalement isolants et ayant des propriétés semblant rendre impossible la supraconductivité furent découverts comme étant supraconducteurs. On parle notamment des premiers oxydes de métaux supraconducteurs comme le titanate de strontium ou le titanate de lithium.

Cette nouvelle génération de matériaux présentait une supraconductivité ne pouvant pas être expliquée par la théorie BCS. Certains d'entre eux présentaient même de la supraconductivité à des températures très hautes. De nouveaux modèles théoriques devaient alors être développés. Avec ces découvertes venait la possibilité de comprendre le pourquoi de ces températures critiques autrement impossibles selon la théorie BCS. La course au supraconducteur à température ambiante était ainsi commencée.

L'idée d'un supraconducteur organique rendait plusieurs sceptiques. Il semblait impossible de retrouver de la supraconductivité dans des molécules aussi complexes et grosses que celles normalement traitées en chimie organique. Cependant, parmi cette nouvelle génération de supraconducteurs allait figurer

les sels de Bechgaard [1].

Les sels de Bechgaard

Klaus Bechgaard conçut les premiers matériaux organiques supraconducteurs. Ceux-ci furent découverts dans un laboratoire français par l'équipe de Denis Jérôme en décembre 1979. Ces sels organiques auront permis de convaincre plusieurs sceptiques de la possibilité d'un supraconducteur organique. Plusieurs avancées dans la compréhension de la supraconductivité non conventionnelle découlent de la conception de ces matériaux [8].

Pourquoi des organiques?

C'est en 1964 que William Little de l'Université Stanford, proposa un mécanisme d'appariement des paires d'électrons alternatif à celui de la théorie BCS. Il imagina un appariement ne dépendant pas de la déformation du réseau d'ions dans le matériau. D'après lui, un supraconducteur pouvait être fabriqué avec des chaînes parallèles de molécules organiques (dont l'un des éléments les composants est le carbone). Il imaginait ces chaînes faites de molécules facilement polarisables présentant des couches électroniques incomplètes. L'appariement de deux électrons à travers une même chaîne ne dépendait alors plus du déplacement des ions positifs, mais du déplacement d'un autre électron sur les molécules en périphérie du centre en carbone à travers lequel les électrons circulent (voir la figure 6).

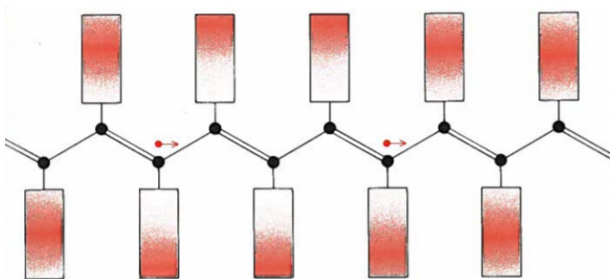


Figure 6: Dans le matériau imaginé par Little, les paires de Cooper sont formées par la polarisation des molécules en périphérie d'une chaîne d'atomes de carbone [2].

Les supraconducteurs dits conventionnels étaient limités par la masse des ions composant le réseau. Une grande masse des ions signifiait une plus grande difficulté à les déplacer, et il était donc plus difficile de créer des paires de Cooper. La température critique du supraconducteur conventionnel varie inversement à la racine carrée de la masse des ions formant le réseau.

Avec le supraconducteur organique, le problème serait alors contourné, la masse d'un électron étant ridiculement petite par rapport à celle d'un atome presque complet. Little estimait que la température critique dans un tel matériau, selon ces principes, serait possible à des températures d'environ 2000 K. La simplicité d'étude de tels matériaux, la possibilité d'en concevoir un supraconducteur à haute température critique, ainsi que la disponibilité de moyens techniques déjà développés en chimie organique justifiaient la recherche d'un supraconducteur organique.

Si aucun matériau organique n'a su fonctionner selon ce principe ou atteindre les prévisions optimistes de Little, de belles avancées ont su être faites dans le domaine. De nouveaux matériaux organiques aux propriétés intéressantes restent sans doute possibles [2].

Les sels $(TMTSF)_2X$ et leur structure

Les sels de Bechgaard ressemblent d'une certaine manière au matériau que Little imaginait, même s'ils ne fonctionnent pas selon le même principe. Ceux-ci sont formés de longues chaînes parallèles de molécules organiques planaires empilées. Une interaction demeure cependant possible entre les électrons situés sur des branches différentes. Il est important de considérer ces interactions si on veut bien comprendre et représenter le fonctionnement de ces supraconducteurs. Ils peuvent donc être approximés comme étant quasi-unidimensionnels. En effet, si les interactions des électrons d'une chaîne étaient faites qu'à travers cette même chaîne (dont la largeur est nettement négligeable par rapport à la longueur) on pourrait les approximer comme étant unidimensionnels. Vu l'interaction finie des électrons sur des chaînes proches les unes des autres, on dit qu'ils sont quasi-unidimensionnels.

Le fait que ces sels soient composés de chaînes de molécules parallèles leur confère aussi des propriétés anisotropes. Une propriété anisotrope variera selon l'axe observé dans le matériau. Par exemple, la résistivité des sels sera différente en faisant passer un courant dans une direction perpendiculaire aux chaînes plutôt que parallèle. La résistivité dans les sels de Bechgaard est donc anisotrope. Cette anisotropie du matériau permet à la supraconductivité d'y être moins fragile à l'application d'un champ magnétique. Les électrons formant l'état supraconducteur suivent un mouvement à travers

leurs chaînes respectives. Ils sont plus difficiles à déloger que dans un matériau fait d'un réseau régulier d'ions, comme ceux vus dans la section sur la théorie BCS.

Plus spécifiquement, les sels $(TMTSF)_2X$ sont formés d'un empilement de molécules de tétraméthyltétrasélenafulvalène (que nous nous permettrons d'appeler simplement $TMTSF$). Pour deux de ces molécules empilées, un anion X , est placé près des bouts des deux molécules de manière alternée (voir la figure 7). Ces anions, en arrachant une moitié d'électron sur la couche de chacune des molécules, facilitent leur conduction et leur confèrent des propriétés métalliques à basse température.

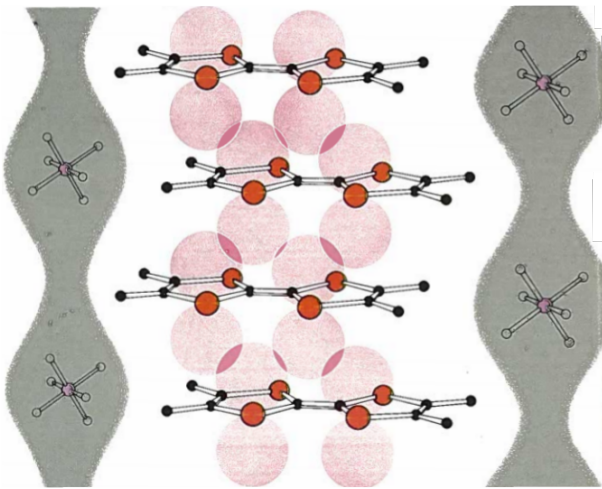


Figure 7: Représentation des sels $(TMTSF)_2X$, où X est ici l'anion PF_6^- . Un anion est présent pour deux molécules $TMTSF$ [2].

Les sels $(TMTSF)_2 PF_6^-$ furent les premiers supraconducteurs organiques synthétisés. Ils présentent une température critique de 1.1 K à une pression de 6.5 kbar. N'étant supraconducteurs qu'à des températures très basses et des pressions très élevées, les sels de Bechgaard ont tout de même permis de grandes avancées dans la compréhension des mécanismes de la supraconductivité. Leur quasi-unidimensionalité décrite plus haut les rend plus faciles à simuler d'un point de vue théorique. L'étude des sels de Bechgaard ouvre potentiellement la voie à la compréhension d'autres supraconducteurs non conventionnels [3].

Si la supraconductivité dans les sels de Bechgaard est possible en considérant la création des paires de Cooper à travers une même chaîne, il est aussi possible de voir un appariement entre les électrons de chaînes différentes en faisant varier la pression dans le matériau. Par combinaison de ce que l'on appelle une onde de densité de charge et une onde

de densité de spin, deux électrons peuvent avoir une attraction l'un à l'autre. Brièvement les ondes de densité de charge et de spin des électrons consistent en une redistribution périodique de la charge et du spin dans un matériau [3]. Le spin est une propriété quantique d'une particule qui n'a pas vraiment d'équivalent en mécanique classique, on l'assimile cependant souvent au moment cinétique de la particule en rotation sur elle-même. Il est à noter que selon un principe bien connu de mécanique quantique, le principe d'exclusion de Pauli, deux électrons ne peuvent se trouver dans le même état en ayant le même spin. La particule qui nous intéresse toujours, l'électron, peut prendre deux valeurs de spin, soit $1/2$ et $-1/2$ [6].

Les sels de Bechgaard permettent d'observer le comportement de la supraconductivité à un très haut champ magnétique. On peut aussi y voir un type de supraconductivité relativement peu commun. Les paires de Cooper peuvent en effet y présenter une configuration de type triplet. On distingue la configuration de type triplet de celle plus régulière, dite singulet, par l'orientation du spin des électrons formant une même paire de Cooper. En ayant des spins opposés ce qui est plus fréquent vu le principe d'exclusion de Pauli, on obtient la paire singulet. En ayant des spins alignés, les deux électrons d'une paire ont une configuration de type triplet [3].

La formation d'une paire formée de deux électrons sur une même chaîne est impossible en configuration triplet. Les électrons de même spin passent trop proches l'un de l'autre, de sorte que leurs fonctions d'onde (en mécanique quantique on reconnaît que tout objet est représentable par une onde) se rencontrent. Puisque des électrons de même spin ne peuvent pas se situer dans un même état au même endroit, ce type d'appariement à travers une même chaîne est fortement supprimé.

L'appariement des électrons sur deux branches différentes laisse une plus grande distance entre les électrons. Les fonctions d'onde des deux électrons formant la paire ne peuvent alors pas se rencontrer. Les électrons peuvent alors avoir le même spin et respecter le principe d'exclusion de Pauli. Une paire de configuration triplet est donc possible.

Ce type d'appariement plutôt rare mais tout de même présent dans plusieurs supraconducteurs de nouvelle génération peut être étudié facilement dans les sels de Bechgaard. C'est aussi le cas de plusieurs caractéristiques qu'ont en commun ces matériaux avec d'autres supraconducteurs.

L'étude des points critiques quantiques

On sait que les sels de Bechgaard peuvent être dans un état métallique, onde de densité de spin ou supraconducteur, tout dépendant des conditions dans lesquelles ils se trouvent. Mais qu'est-ce qui régit le passage de l'un de ces états à l'autre?

Le diagramme de phases: de nouveaux états de la matière

Quand on parle de phase supraconductrice, métallique, isolante d'un matériau... On peut s'imaginer ces phases comme des états de la matière au même titre que les états gazeux, liquide ou solide que l'on connaît. Évidemment, les propriétés mécaniques du matériau ne changent pas vraiment d'une phase à l'autre, mais d'autres comme les propriétés électriques et magnétiques changeront.

Un diagramme de phase indiquant l'état de la matière pour un matériau soumis à différentes contraintes (souvent la pression et la température) est interprétable de la même manière que ceux utilisés pour représenter les phases supraconductrices, métalliques et isolantes. On peut voir les figures 8 et 9 présentant respectivement un diagramme de phase habituel des états de la matière plus classiques ainsi qu'un diagramme de phase des sels de Bechgaard obtenu expérimentalement.

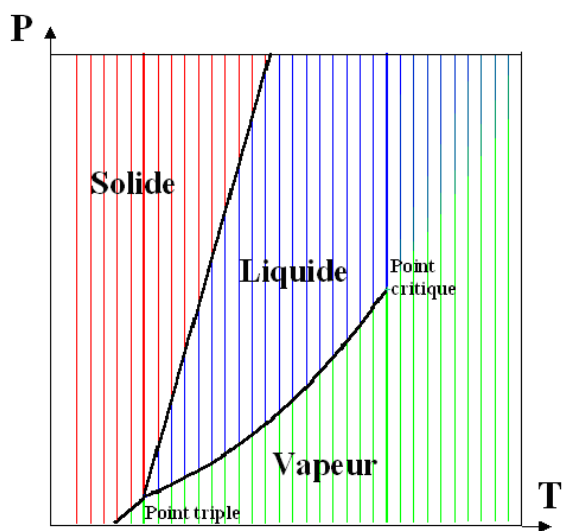


Figure 8: Diagramme de phase affichant les états plus classiques de la matière [Source: Wikipedia Français, première publication 5 avril 2006 par Alain Lerille, image libre de droits].

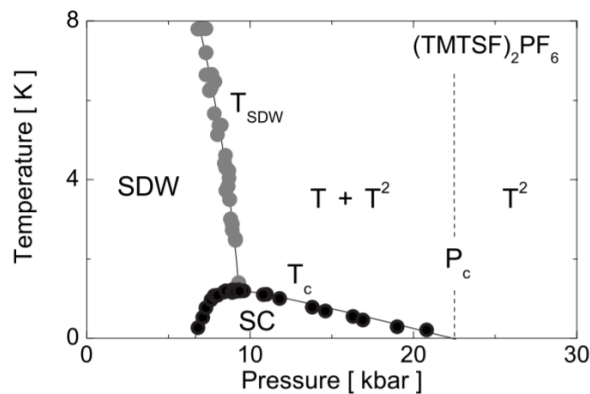


Figure 9: Diagramme de phase des sels $(TMTSF)_2PF_6$ obtenu expérimentalement avec des mesures de transport électrique [10].

À la frontière des phases, pour percer les secrets...

Un point critique quantique est un point à température nulle dans le diagramme de phase d'un matériel où il y a transition d'une phase à une autre. On trouve des points critiques quantiques antiferromagnétiques dans de nombreux supraconducteurs, y compris les sels de Bechgaard et les cuprates.

Les cuprates supraconducteurs et les sels de Bechgaard présentent plusieurs similitudes dans leur transition de phase. Les cuprates supraconducteurs sont les supraconducteurs ayant la plus haute température critique à ce jour dans des conditions normales de pression. La simplicité d'étude des sels de Bechgaard pourrait donner des indices sur le comportement des cuprates. La phase dite de pseudo-gap des cuprates est une phase très énigmatique derrière laquelle la compréhension des cuprates pourrait bien se cacher. Ici, les organiques peuvent servir de guide à l'approfondissement de notre compréhension des cuprates [4].

Que nous a laissé la supraconductivité?

Les propriétés presque spectaculaires des supraconducteurs permettent un grand enthousiasme de la part du public. Si l'atteinte d'un supraconducteur à température critique ambiante promet des applications grandioses, celui-ci n'arrivera peut-être pas avant encore de nombreuses années.

Heureusement, plusieurs débouchés dans le domaine ont déjà eu des applications plus proches de notre vie quotidienne qu'on pourrait le penser. Et tout porte à croire que d'autres suivront.

Une application très notable de la recherche en supraconductivité sont les électroaimants supraconducteurs. Normalement, un électroaimant est fait d'une bobine de fil conducteur. On fait alors passer un courant dans cette bobine pour provoquer un champ magnétique à intensité variable. Ce processus peut parfois coûter très cher en électricité et limiter le champ magnétique atteint à cause du réchauffement des bobines. La bobine supraconductrice ne nécessite pas de coût en énergie pour maintenir le courant passant à l'intérieur, car elle n'a pas de résistance. Il est alors plus facile de créer des champs magnétiques beaucoup plus forts.

Ces bobines sont utilisées dans d'autres domaines de la physique, notamment en physique des particules et dans le développement de centrales à fusion nucléaire. Le fonctionnement des appareils d'imagerie à résonance magnétique dans le monde médical est aussi permis par la force des électroaimants supraconducteurs (voir la figure 10).



Figure 10: L'imagerie par résonance magnétique est l'une des applications des bobines supraconductrices [Source: Wikipedia Anglais, première publication 12 Février 2008 par Jan Ainali, image libre de partage].

L'effet Meissner présent dans chaque supraconducteur est aussi exploité. Les trains à lévitation magnétique peuvent atteindre des vitesses très grandes en évitant la friction du train sur les rails. Ces rails sont supraconducteurs ce qui permet la lévitation du train [1].

Une chose est sûre, la supraconductivité n'a pas fini de nous surprendre. D'autres applications verront sûrement le jour dans le domaine. Qui sait? Les sels de Bechgaard auront peut-être un rôle à jouer dans plusieurs de ces découvertes.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Pr Claude Bourbonnais pour son aide plus que précieuse dans la rédaction de cet article ainsi que pour sa patience et ses encouragements tout au long de mon stage. L'aide de Maryam Shahbazi, ancienne étudiante au doctorat, sur l'utilisation des programmes de simulation dans son temps libre fut aussi grandement appréciée.

Références

- [1] S. Blundell, *SUPERCONDUCTIVITY: A Very Short Introduction*. Oxford, United States: Oxford University Press, 2009.
- [2] K. Bechgaard et D. Jérôme, *Organic Superconductors*. Scientific American; Jul82, Vol. 247 Issue 1, p52-61, 10p. 1982
- [3] T. Ishiguro, K. Yamaji, et G. Saito, *Organic Superconductors*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Springer books, Springer Series in Solid-State Sciences vol. 88, 1998.
- [4] L. Taillefer, *Scattering and Pairing in Cuprate Superconductors*. Annual Reviews of Condensed Matter Physics; Volume 1, p51-70, 20p. 2010.
- [5] Griffiths, David (1999). *Introduction to Electrodynamics* (3 ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall. p. 289.
- [6] R. Côté, *Mécanique Quantique I: Notes de cours*, édition de septembre 2015, Département de physique de l'Université de Sherbrooke.
- [7] J. Bardeen, L. N. Cooper et J. R. Schrieffer, *Theory of Superconductivity*. Physical Review; Volume 102, number 5, p1175-1204, 25p. 1957.
- [8] S S P Parkin, M Ribault, D Jerome et K Bechgaard, *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 41, 95 (1980).
- [9] "Heike Kamerlingh Onnes - Facts". Nobel-prize.org. Nobel Media AB 2014. Web. 31 Mar 2017. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1913/onnes-facts.html.
- [10] N. Doiron-Leyraud, P. Auban-Senzier, S. René de Cotret, C. Bourbonnais, D. Jérôme, K. Bechgaard, et L. Taillefer, *Phys. Rev. B* 80, 214531 (2009).