

# 1 La guerre du froid

Pour vous parler des supraconducteurs, j'ai d'abord envie de vous raconter un peu l'histoire de leur découverte. Parce que les supra sont apparus un peu par hasard, au cours de la Grande Guerre du Froid, livrée par les physiciens du monde entier à partir de 1702.

- Qu'est ce que le froid ?

Guillaume Amontons (1702) : agitation atomes. Plus les atomes bougent vite, plus la température est élevée. Moins les atomes bougent vite, plus la température est basse. Limite si les atomes ne bougent plus du tout : 0 absolu. Parler des K.

$10^{18}$	QGP du LHC		$273\text{ K} = 0^\circ\text{C}$	Solidication eau
14 MK	Centre du Soleil		$183\text{ K} = -89^\circ\text{C}$	Min Terre
5800 K	Surface du Soleil		$138\text{ K} = -135^\circ\text{C}$	Max $T_c$
2000 K	Bec Bunsen		$77\text{ K} = -196^\circ\text{C}$	<i>Ebullition azote</i>
$373\text{ K} = 100^\circ\text{C}$	Ebullition eau		$4.2\text{ K} = -269^\circ\text{C}$	<i>Ebullition helium</i>
$331\text{ K} = 58^\circ\text{C}$	Max Terre		450 pK	Record de froid

- Qu'est ce qui se passe à basse température ?

En 1780, on n'en sait rien, mais on a des idées

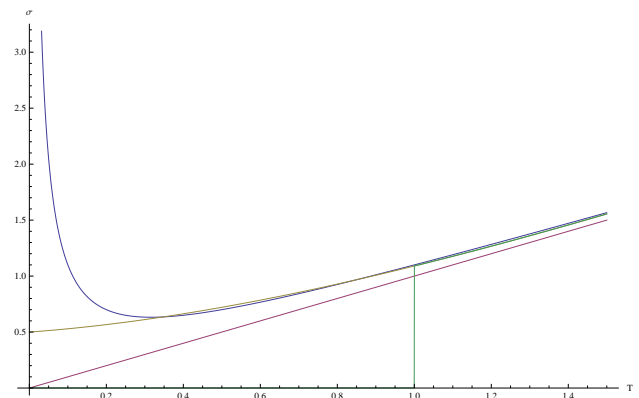
*“si la Terre se trouvait tout à coup placée dans des régions très froides, par exemple de Jupiter et de Saturne, l'eau qui forme aujourd'hui nos fleuves et nos mers, et probablement plus grand nombre des liquides que nous connaissons, se transformeraient en montagnes solides ... L'air dans cette supposition, ou du moins une partie des substances aériformes qui le composent, cesserait sans doute d'exister dans l'état de fluide invisible, faute d'un degré de chaleur suffisant. Il reviendrait donc à l'état de liquidité et ce changement produirait de nouveaux liquides dont nous n'avons aucune idée.”* -Lavoisier

Guerre du froid : atteindre les températures les plus basses pour découvrir les propriétés de la matière.

- En particulier, liquéfaction des gaz.

Tous les gaz sont ils liquéfiables ou existent ils des gaz permanents ? En particulier, liquéfaction de l'azote (gaz découvert par Daniel Rutherford en 1772, nommé par Lavoisier en 1779).

1784	Monge, dioxyde de sulfure
???	azote
1877	Pictet, Cailletet, oxygène
1908	Kammerlingh Onnes, helium



Journée de la découverte de l'hélium : rien n'apparaissait, K.O. pensait avoir échoué. L'expérience commence à 5h30 le 10 Juillet 1908 par la liquéfaction de 20 litres d'hydrogène sensés permettre le refroidissement de l'hélium. Dans l'Université de Leyde, tout le monde a entendu parlé de l'expérience des collègues de Onnes viennent régulièrement le voir. Mais à 19h30, Kammerlingh Onnes n'observe aucun résultat et s'apprête à abandonner. L'un de ses collègues suggère alors qu'il y a peut être déjà de l'hélium liquide sans qu'on puisse le voir ; en modifiant l'éclairage de la cuve, Kammerlingh Onnes se rendit compte qu'elle était presque pleine !

- Etude de la résistivité électrique à basse température : *Expérience avec la bobine de cuivre*. Mercure (car plus facile à purifier puisque facilement liquide). Plusieurs hypothèses sur le résultat :  $\sigma \rightarrow +\infty$  car électrons immobiles,  $\sigma \rightarrow 0$  linéairement,  $\sigma \rightarrow \sigma_0$  à cause des impuretés... En 1911, résultat complètement inattendu :  $\sigma_{T < T_c} = 0$  ! Temps de vie des courants :  $> 10^5$  ans. Discontinuité interprétable comme un changement d'état.
- Supra Haute  $T_c$  : on peut maintenant faire des expériences avec de l'azote liquide et non de l'hélium liquide..

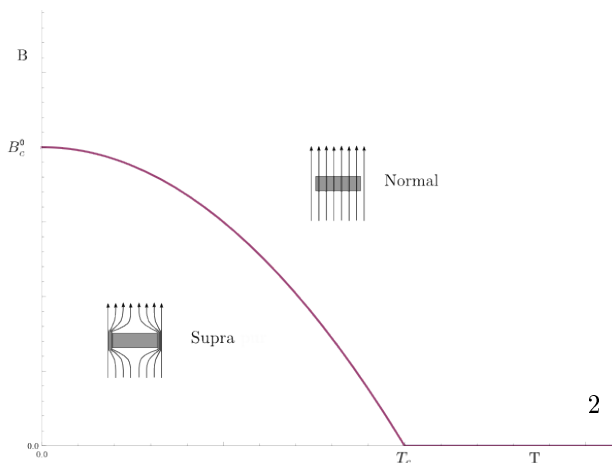
## 2 Un supraconducteur, diamagnétique (presque) parfait

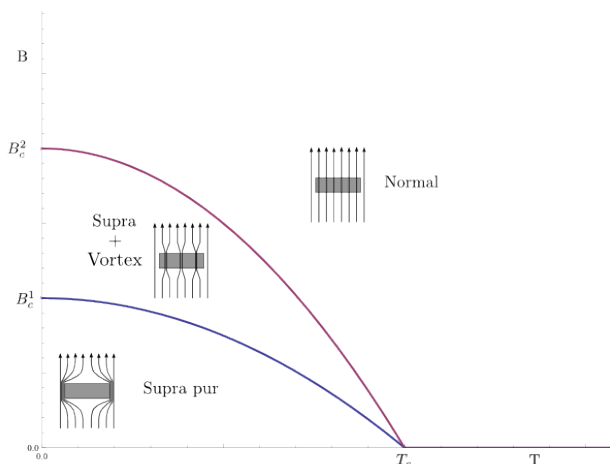
- Un autre effet des supraconducteurs a été découvert un peu par hasard en 1933 par Walther Meissner et Robert Ochsenfeld. A température ambiante, les céramiques n'ont aucune propriété magnétique. *Le montrer*. Mais à basse température, quand la céramique devient supra, elle repousse les aimants ! *Expérience de répulsion de l'aimant quand la pastille est supra*. Bien faire remarquer la différence avec la répulsion entre deux aimants car ici indépendant des poles de l'aimant. C'est comme si le supra devenait un aimant toujours opposé à l'autre. *Montrer la différence avec deux aimants permanents*

normal/supra	$B = 0$		$B \neq 0$
$T < T_c$	<i>oui/non</i>	←	<b>oui/non</b>
			↑
$T > T_c$	<b>non/non</b>	→	<b>oui/oui</b>

normal/supra	$B = 0$		$B \neq 0$
$T < T_c$	<b>non/non</b>	→	<b>non/non</b>
	↑		
$T > T_c$	<b>non/non</b>		

- Interprétation : sous l'effet de l'aimant, la pastille devient elle même aimantée : elle devient un aimant parfaitement opposé au premier. Pour créer cette aimantation, elle crée des supercourants de surface. Comme la résistance est nulle, ces courants se maintiennent en permanence.
- Explication cependant insuffisante : l'aimant est repoussé quand la pastille devient supra, même s'il est initialement posé sur la pastille chaude et qu'il n'en bouge pas (ce n'est donc *PAS* un phénomène d'induction car  $\phi = cste$ , mais ça donne une image pour le public.). Pour comprendre vraiment l'apparition des supercourants, il faut utiliser la théorie quantique. C'est parce que c'est vraiment compliqué qu'il a fallu 40 ans pour trouver une explication !
- Ce n'est pas la seule transition magnétique connue : transition ferro/para du fer à la température de Currie. *Expérience température Currie*.
- En réalité, la situation est un peu plus compliquée que ce que je vous ai raconté. Les supraconducteurs que nous utilisons sont des supra de type II, à haute température critique, qui ne marchent pas tout à fait comme les premiers. En réalité, si le champ magnétique imposé par l'aimant est trop fort, il va réussir à rentrer dans l'échantillon, mais pas partout. La pastille devient normale par endroit et reste supra partout ailleurs. *dessins* On appelle ces zones normales des vortex. Le champ magnétique crée par l'aimant est piégé dans ces vortex, qui s'accrochent aux impuretés de l'échantillon. Si on essaie de bouger le champ magnétique, on bouge les vortex et ça coûte de l'énergie.
  1. Conséquence : lévitation stable, car les tubes sont piégés. *Expérience de lévitation*. *Poser la pastille à côté pour voir l'aimant retomber*.
  2. Conséquence : apparition d'une force d'attraction qui permet de soulever la pastille *Expérience*





- Expérience du train

Des trains utilisent des supra pour léviter (MagLev...) mais uniquement pour l'aspect conducteur parfait, pas du tout par effet Meissner. Le seul dispositif utilisant l'effet Meissner est le surf à lévitation MagSurf du laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques de Paris 7.

### 3 Un supraconducteur supraconduit

Comment comprendre le phénomène ? Avec  $U = RI$  et  $R = 0$ , on trouve  $I = \infty...$  Il faut une autre théorie !

- Théorie BCS (John Bardeen, Leon Neil Cooper, John Robert Schrieffer), 1957. (Cooper donne son nom à Sheldon Cooper de Big Bang Theory !)
  - Les électrons forment des paires et ces paires forment un superfluide : elles forment un ensemble dont on ne peut plus distinguer les composants. Ce superfluide de paires d'électrons se comporte comme un seul système. Analogie avec banc de poisson (comportement ordonné d'une multitude d'individus). Interprétation en terme d'énergie pour perturber le courant (ça coûte bcp d'énergie de perturber tout le banc).
  - Formation des paires avec des électrons qui se repoussent ?! Importance du réseau atomique pour créer une force attractive
- Applications
  - IRM, fils supra, LHC.

## 4 Annexes

Liste prix Nobel supra

1913	Kammerlingh Onnes	Pour ses recherches sur les propriétés de la matière aux basses températures, qui conduisirent, entre autres, à la production d'hélium liquide.
1972	BCS	Pour leur théorie, développée conjointement, sur les supraconducteurs, habituellement nommée théorie BCS.
1973	Ivar Giaever, Leo Esaki	Pour leurs découvertes expérimentales sur les phénomènes d'effet tunnel dans les semi-conducteurs et les supraconducteurs respectivement.
1973	Brian David Josephson	Pour ses prédictions théoriques sur les propriétés d'un super-courant à travers une barrière tunnel, en particulier les phénomènes connus en général sous le nom d'effet Josephson.
1987	Johannes Georg Bednorz, Karl Alexander Müller	Pour leur percée importante dans la découverte de la supraconductivité de matériaux céramiques.
2003	Alexei Alexeyevich Abrikosov, Vitaly Ginzburg, Anthony Leggett	Pour des travaux novateurs dans la théorie des supraconducteurs et des superfluides