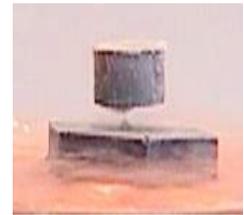


# La Supraconductivité

Printemps des Sciences 2002 : l'énergie sous toutes ses formes

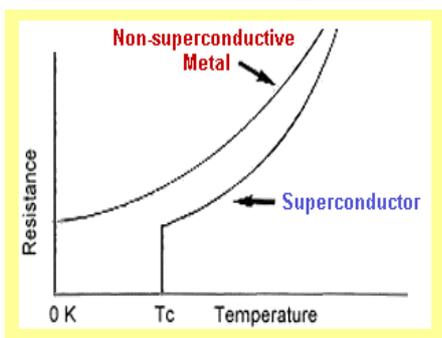
**Présentation** Andrieux David, Ngô Fabien



Il s'agit de l'un des rares phénomènes *quantique* macroscopique : un supraconducteur est un matériau qui, en-dessous d'une certaine température  $T_c$ , va présenter des caractéristiques exceptionnelles! Ce qui entraîne une série de phénomènes surprenants comme la lévitation,...

Les supraconducteurs sont donc caractérisés par deux propriétés particulières :

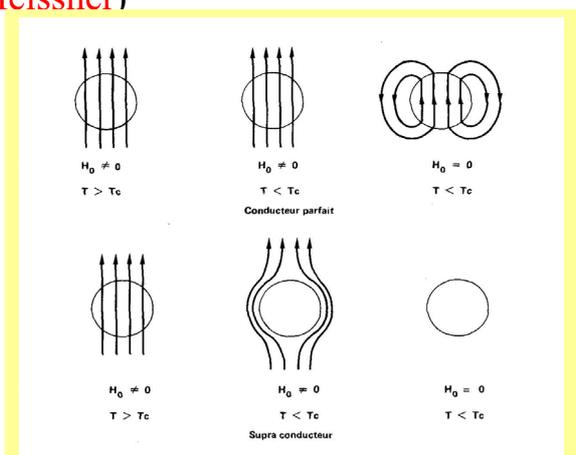
## 1) Résistance électrique nulle



Un supraconducteur, refroidi en-dessous de sa température critique  $T_c$ , va présenter une résistance électrique nulle :

$$R = 0 \Omega$$

## 2) Diamagnétisme parfait (ou effet **Meissner**)



Quand on applique un champ magnétique  $B_0$  au-dessus de  $T_c$  et qu'on refroidit en-dessous de  $T_c$  : dans le conducteur parfait, la conductivité s'oppose à la variation du flux alors que le supraconducteur exclut le flux de son volume.

Un supraconducteur va donc expulser tout champ magnétique extérieur (sauf sur une minuscule couche en surface) tant que celui-ci est inférieur à une certaine valeur  $B_c$  qui dépend de  $T$  :

$$B_c = B_{c0} (1 - T^2/T_c^2)$$

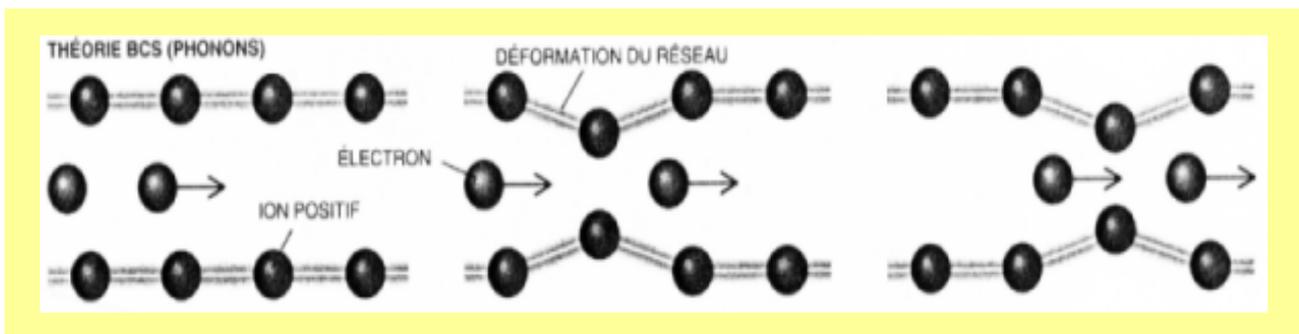
## THÉORIE BCS

En 1957, John Bardeen, Leon Cooper, John Schrieffer reçoivent le prix Nobel de physique pour la première théorie correcte sur le fonctionnement des supraconducteurs.

Tout part de l'idée que *deux électrons peuvent s'attirer* ! Comment cela est-il possible? En effet il est bien connu que deux charges de même signe se repoussent selon la loi de Coulomb :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q'}{r^2}$$

Dans un métal, lorsqu'il se déplace, un électron va modifier légèrement la position des noyaux situés sur son parcours. Ces distorsions, nommées *phonons*, créent de petites zones positives qui attirent un autre électron : on assiste donc à la création d'une paire d'électrons de spins opposés, appelée *paire de Cooper*. Comme les électrons se déplacent plus vite que les noyaux, le premier électron est loin de l'ion qu'il a déplacé lorsque le second électron arrive; la paire est donc liée par une interaction décalée à la fois dans le temps et dans l'espace.



Nous pouvons maintenant interpréter l'absence de résistance ainsi que le diamagnétisme parfait :

- tous les électrons se comportant en un ensemble cohérent, il n'y aura pas d'effet Joule, au contraire d'un flux ordinaire où certains électrons peuvent perdre de l'énergie par interaction avec des impuretés ou par l'agitation thermique des noyaux.
- les courants étant non-dissipatifs, lorsqu'un champ magnétique extérieur est imposé, un courant induit va s'installer et, en vertu de la loi de Faraday, produire un champ opposé.

$$\mathbf{J} = \frac{ne^2}{m} \mathbf{A}$$

où  $\mathbf{J}$  = densité de courant  
 $\mathbf{A}$  = potentiel vecteur

Seulement, ces paires de Cooper peuvent être brisées si on leur apporte suffisamment d'énergie : c'est le cas lorsqu'on élève trop la température ou lorsqu'on applique un champ magnétique intense. Ces effets peuvent être combinés, ce qui explique la dépendance de  $B_c$  en fonction de  $T_c$ .

# Applications

La découverte de supraconducteurs à « haute » température offre toute une série de nouvelles possibilités :

## - Transport et stockage de l'électricité :

Les supraconducteurs permettent en effet de *stocker indéfiniment* du courant, et cela sans aucune perte. On peut donc en faire des câbles : ceci a été testé dans la ville de Detroit où 110 kg de supraconducteurs ont remplacé 8200 kg de cuivre tout en multipliant par 3 la densité de courant transportée ! et ce tout en diminuant les pertes de 80% par rapport aux lignes classiques.



Dans le domaine des microprocesseurs, on cherche actuellement à utiliser des supraconducteurs pour atteindre des fréquences du “ petaflops ”, soit  $10^{15}$  opérations par seconde, alors que les meilleures performances sont aujourd’hui de l’ordre du teraflop ( $10^{12}$  Hz)



## - Lévitaiton

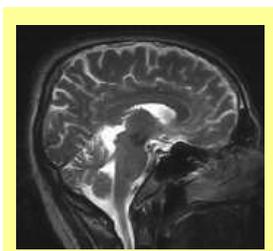


On peut faire léviter toute une série d'objets : le supraconducteur repoussant tout champ magnétique, un aimant placé au-dessus va léviter, par application directe de l'effet

(si son champ est assez puissant pour la gravité).

A ce moment-là, il ne reste plus que le frottement l'air, ce qui est un avantage évident. On a donc construit au Japon un train « magnétique », atteindre des vitesses de plus de 500 km/h.

- Et les supraconducteurs trouvent également des applications directes dans de nombreux autres domaines : accélérateurs de particules, imagerie biomédicale, ...

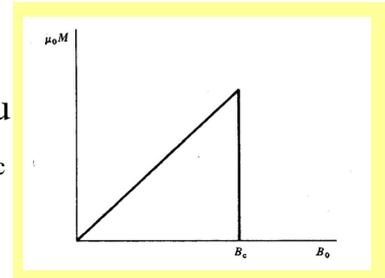


# Types de supraconducteurs

En réalité, on distingue trois types de supraconducteurs :

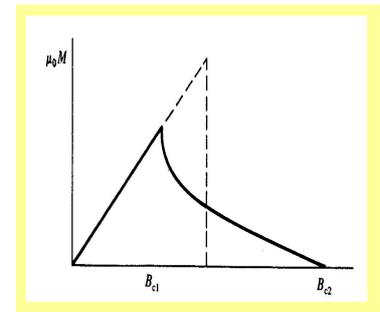
## - Supraconducteurs de type I :

Il s'agit généralement de métaux. Ces matériaux présentent un effet Meissner total : à part sur une petite profondeur en surface (la "longueur de pénétration"), tout le flux magnétique est expulsé tant qu'il est inférieur au champ magnétique critique  $B_c$ . Leur température critique  $T_c$  est très basse, les rendant impropres aux utilisations pratiques. (Ex : Al à 1.175 K)



## - Supraconducteurs de type II :

Ceux-ci sont souvent des alliages. Ils se comportent de manière plus étrange : ils commencent par expulser le flux, pour ensuite le laisser pénétrer progressivement jusqu'à son entrée complète. Entre les deux (état "mixte"), on assiste à la création de zones supraconductrices séparées par des zones non-supraconductrices. Ce type de supraconducteurs présente généralement l'avantage de posséder une température critique  $T_c$  élevée. (Ex : Nb<sub>3</sub>Sn 18.1 K)



## - Supraconducteurs à haute température :

Ils se comportent du point de vue magnétique comme les types II. Leur mécanisme n'est pas élucidé, mais ils possèdent une très haute température critique. (Ex : YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub><sup>+</sup> à 93K)

**KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS**

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE  
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1	2																	10	
1	H																	2	He
2	3	4											5	6	7	8	9	10	
2	Li	Be											5	B	C	N	O	F	Ne
3	11	12											13	14	15	16	17	18	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110	111	112							
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	106	107	108	109	110	111	112							
		* Lanthanide Series	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
		+ Actinide Series	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			