

**Science des matériaux de l'électrotechnique**

**II Conduction électrique**  
**3. Conduction électrique des métaux**

Science des matériaux de l'électrotechnique  
F.L.S. 2009-2010, 1231F Prof. dr.ing Florin Ciuprina

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## Structure du cours

Chapitre	Contenu
<b>I Propriétés générales des cristaux</b>	
1	<b>Corps cristallins</b> États des corps Réseaux cristallins Défauts des réseaux cristallins
2	<b>Electrons dans les cristaux</b> Modèles (classique et quantiques) de l'électron. Bandes d'énergie associées aux corps cristallins. Classification des matériaux en conducteurs, semiconducteurs et isolants.
<b>II Conduction électrique</b>	
3	<b>Conduction électrique des métaux.</b> Conduction aux températures usuelles Supraconductivité électrique.
4	<b>Conduction électrique des semiconducteurs</b> Mécanismes de conduction. Expressions des conductivités intrinsèque et extrinsèque.
5	<b>Conduction électrique des isolants solides</b> Conduction en champs usuels (Conduction électronique, Conduction ionique). Conduction en champs intenses (Claquage des isolants solides).
<b>III Propriétés diélectriques</b>	
6	<b>Polarisation électrique</b> Types de polarisation Polarisation en champs harmoniques. Pertes diélectriques.
<b>IV Propriétés magnétiques</b>	
7	<b>Types de magnétisme</b>

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## 3. Conduction électrique des métaux

- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3. Conduction électrique des métaux

- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

**Notions générales**

Densité microscopique du courant électrique:  $\mathbf{j}_m = \rho_m \mathbf{v}_m \quad \rho_m = Nq_m$   
 $\mathbf{j}_m = Nq_m \mathbf{v}_m$

Densité macroscopique du courant électrique:  $\mathbf{J} = \rho_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_{mc}$

porteurs de charge = électrons:  $\mathbf{J} = Nq_m \widetilde{\mathbf{v}}_D = Nq_m \mathcal{M} \mathbf{E}$  } →

Loi de la conduction électrique:  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$  } →

→  $\sigma = Nq_m \mathcal{M}$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres

**Hypothèses:**

- Métal monovalent
- $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i}$

$dN_0 = \frac{(2m_0^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} w^{\frac{1}{2}} \varphi(w) dw$

$\varphi(w) = \varphi_0(w) + \tau q_0 \mathbf{v} \mathbf{E} \frac{\partial \varphi_0(w)}{\partial w} \quad \varphi_0(w) = \frac{1}{e^{-\frac{w - \epsilon_F}{kT}} + 1}$

$w_F(0) = \frac{\hbar^2}{2m_0^*} (3n^2 N_0)^{\frac{2}{3}} \quad w_F(T) \approx w_F(0)$

$w = \frac{m_0^* v^2}{2} = \frac{m_0^*}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad \Rightarrow \quad w = \frac{3}{2} m_0^* v_x^2$

$\mathbf{v} = \mathbf{v}_T + \mathbf{v}_D \quad (v_T \gg v_D) \Rightarrow v_x = v_y = v_z$

On admet que dans  $dw$  les électrons ont tous la vitesse  $v_x$  } →

$dJ_x = dN_0(-q_0)v_x$   
 $dJ_x = -\frac{(2m_0^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} m^{\frac{1}{2}} \varphi(w) q_0 v_x dw$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---





Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

$$\rho = \frac{m_0^*}{N_0 q_0^2} \left( \frac{1}{\tau_T} + \frac{1}{\tau_{imp}} + \frac{1}{\tau_{mec}} \right) = \rho_T + \rho_{imp} + \rho_{mec}$$

$$\rho = \rho_T + \rho_{rez} \text{ - expression de Mathiessen}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence de la température

$$\sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*}$$

électron en équilibre thermodynamique avec le réseau:

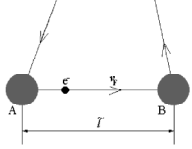
$$\Delta w = \frac{3}{2} kT \quad T > T_D$$

principe d'incertitude de Heisenberg:  $\Delta w \Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \rightarrow \frac{3}{2} kT \tau \geq \frac{\hbar}{2} \rightarrow$

$\tau = \frac{\hbar}{3kT} \rightarrow \sigma = \frac{N_0 q_0^2 \tau}{m_0^*} = \frac{N_0 q_0^2 \hbar}{3k m_0^* T} \rightarrow \sigma = \frac{C}{T}, \quad T > T_D$

Element	Cu	Ag	Au	Pt	Al
$T_D$ [K]	320	214	160	240	428

par voie empirique:  $\sigma \approx \frac{C'}{T^5}, \quad T \leq T_D$



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

L'influence de la température

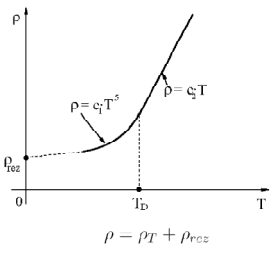
$$\sigma = \frac{C}{T}, \quad T > T_D$$

$$\sigma \approx \frac{C'}{T^5}, \quad T \leq T_D$$

$$\rho = 1/\sigma$$

$$\rho = \begin{cases} c_1 T^5, & T \leq T_D \\ c_2 T, & T > T_D. \end{cases}$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)]$$

$$\rho = \rho_T + \rho_{rez}$$


Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

**L'influence des impuretés**

$$\rho_{imp} = \frac{\pi m_0^* v_F r_i^2 N_i}{q_0^2 N_0}$$

$$\rho_{imp} \approx \text{const} \cdot N_i$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs

**L'influence des impuretés**

solutions solides

réseau de substitution      réseau interstitiel

solutions solides      mélanges eutectiques

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

**L'influence de l'état d'agrégation**

Métal	Ag	Cu	Al	Au	Bi	Sb	Ga
$\rho_{liquide}/\rho_{solide}$	2.1	2.04	2.21	2.29	0.45	0.62	0.58

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

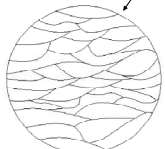
---

---

Conduction électrique des métaux

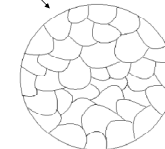
### 3.3 Dependenta conductivitatii metalelor de diferiti factori

L'influence des usinages mécaniques et des traitements thermiques



*état dur (fibreux)*

la conductivité diminue de 3 à 6%



*état doux*

la conductivité augmente de 3 à 6%

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3. Conduction électrique des métaux

- 3.1 Conductivité électrique des métaux dans l'approximation des électrons quasilibres
- 3.2 Relation entre le libre parcours et la constante du réseau
- 3.3 Dépendance entre la conductivité des métaux et différents facteurs
- 3.4 Supraconductivité électrique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

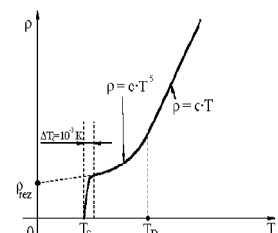
---


---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

La supraconductivité est définie comme la propriété appartenant à certains matériaux de présenter une résistivité électrique nulle lorsque la température du matériaux est inférieure à une température critique  $T_c$  et le champ magnétique n'excède pas un champ magnétique critique  $H_c$ . De tels matériaux sont appelés supraconducteurs.





Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)  
physicien/hollandais

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Effets associés à la supraconductivité

- Effet des champs magnétiques intenses
- Effet Meissner
- Effet des hautes fréquences
- Effet isotopique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---



Conduction électrique des métaux

## Effets associés à la supraconductivité

- Effet des champs magnétiques intenses

Annulation de la supraconductivité par les champs magnétiques intenses

$$H_c(T) = H_{c0} \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_{c0}} \right)^2 \right]$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## Effets associés à la supraconductivité

- Effet Meissner

Expulsion du champ magnétique de l'intérieur d'un supraconducteur

a)  $T > T_c$   
 $H < H_c$

Conducteur normal

b)  $T < T_c$   
 $H < H_c$

Supraconducteur

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## Effets associés à la supraconductivité

- Effet des hautes fréquences

Annulation de la supraconductivité a hautes fréquences ( $10^{13} - 10^{14}$  Hz)

$T < T_c$ et $H < H_c$	$T < T_c$ et $H < H_c$
$f < 10^{13} - 10^{14}$ Hz	$f > 10^{13} - 10^{14}$ Hz
Supraconducteur	Conducteur normal

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## Effets associés à la supraconductivité

- Effet isotopique

La température critique  $T_c$  varie avec la masse isotopique du métal

Exemple:

Hg	$M = 199,5$	$M = 203,4$
	$T_c = 4,185 \text{ K}$	$T_c = 4,146 \text{ K}$

$$M^\alpha T_c = \text{const}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London

Hypothèses sur les supraconducteurs (à  $T_c$ ):

- **electrons normaux (n)** – interagissent avec le réseau (subissent des collisions)
- **electrons supraconducteurs (sc)** – n'interagissent pas avec le réseau (ne subissent pas de collisions)

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_{sc}$$

$$\mathbf{J}_n = -q_0 N_n \mathbf{v}_n$$

$$\mathbf{J}_{sc} = -q_0 N_{sc} \mathbf{v}_{sc}$$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Theorie classique de la supraconductivité. Equations de London

Equations de Maxwell:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t},$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho_v,$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0.$$

Equations de London:

equation I:  $\mathbf{E} = \Lambda \frac{\partial \mathbf{J}_{sc}}{\partial t}$     sau     $\mathbf{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\Lambda \mathbf{J}_{sc})$

equation II:  $\mathbf{B} = -\text{rot} (\Lambda \mathbf{J}_{sc})$

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Theorie classique de la supraconductivité.  
Equations de London
- Theorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---




---


---

Conduction électrique des métaux

### Théorie BCS

- élaborée en 1957 par Bardeen, Cooper et Schrieffer
- explique la supraconductivité par interactions électrons – phonons
- à  $T_c$  il apparaissent des paires Cooper (coopérons)
- les coopérons ont  $m_s = 0 \rightarrow$  sont bosons (Statistique Bose-Einstein) et non fermions (statistique Fermi-Dirac)
- on peut trouver n'importe combien coopérons sur le même niveau d'énergie



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---


Conduction électrique des métaux

### Histoire des supraconducteurs


**1911** La supraconductivité a été observée pour la première fois dans le mercure par le physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes d'Université Leiden. Quand il l'a rafraîchi à la température de l'hélium liquide, 4 degrés Kelvin, sa résistance a soudainement disparu.

**1913** Onnes a gagné un Prix Nobel de physique pour sa recherche dans ce secteur.


**1933** Walther Meissner et Robert Ochsenfeld ont découvert qu'un matériel de supraconducteur repoussera un champ magnétique. On connaît ce phénomène comme *l'effet de Meissner (-Ochsenfeld)*. L'effet de Meissner est si fort qu'un aimant peut en réalité être soulevé par lévitation sur un matériau supraconducteur.



Heike Kamerlingh Onnes  
1853-1926  
physicien hollandais



Walther Meissner  
1882 - 1974  
physicien allemand



Robert Ochsenfeld  
1901 - 1993  
physicien allemand

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---


Conduction électrique des métaux

### Histoire des supraconducteurs


**1957** **Théorie BCS**: Première explication théorique de la supraconductivité, présentée par les physiciens américains John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer.

**1962** En 1962 les scientifiques à Westinghouse ont développé le **premier fil supraconducteur** commercial, un alliage de Niobium et le Titanium. La première utilisation de ce fil de haute énergie fut des électro-aimants pour accélérateur de particules.


**1962** Brian D. Josephson, un étudiant de troisième cycle à l'Université de Cambridge, a prévu que le courant électrique coulerait entre 2 matériaux supraconducteurs - même quand ils sont séparés par un élément non-supraconducteur ou un isolant. Sa prédiction fut confirmée plus tard et lui permit de gagner une part du Prix Nobel de Physique de 1973. On connaît aujourd'hui ce phénomène de tunnelage comme celui de "l'effet Josephson" et ont été appliqué aux dispositifs électroniques comme le CALMAR, un instrument capable de détecter les champs magnétiques les plus faibles.




John Bardeen (1908-1991)  
physicien américain



Leon Cooper (1930-1983)  
physicien américain



Robert Schrieffer (1921-1999)  
physicien américain



Brian Josephson (1931-2014)  
physicien britannique

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

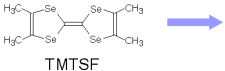
---

---

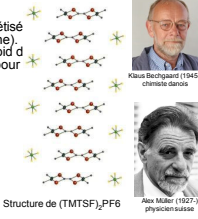
Conduction électrique des métaux

## Histoire des supraconducteurs

**1980** Le Chercheur danois Klaus Bechgaard de l'Université de Copenhague et 3 membres d'équipe française ont synthétisé le premier supraconducteur organique (à base de carbone). (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub> a dû être rafraîchi à un incroyablement froid de 1.2K (connu comme Tc) et soumis à de haute pression pour superconducture. Mais, sa simple existence a prouvé la possibilité de la création des molécules modelées pour s'exécuter d'une façon prévisible.




TMTSF




Structure de (TMTSF)<sub>2</sub>PF<sub>6</sub>


**1986** Alex Müller et Georg Bednorz (ci-dessus), des chercheurs au Laboratoire de recherches IBM à Rüschlikon en Suisse, ont créé un composé de céramique fragile qui a superconduit à la température la plus haute alors connue soit 30 K.



Klaus Bechgaard (1945-2010) chimiste danois.



Alex Müller (1927-), physicien suisse.



Johannes Georg Bednorz (1950-), physicien allemand.

Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F

---

---

---

---

---

---

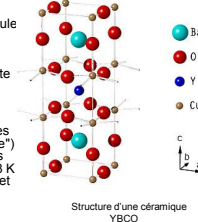
---

---

Conduction électrique des métaux

## Histoire des supraconducteurs

**1987** Une équipe de recherche de l'Université de l'Alabama - Huntsville a substitué Yttrium au Lanthanum dans la molécule de Müller et Bednorz et a réalisé un incroyable Tc de **92 K**. Pour la première fois un matériel (aujourd'hui mentionné comme YBCO) avait été trouvé qui permettait la supraconductivité à des températures plus chaud que l'azote liquide - qui est un liquide de refroidissement facilement disponible.



Structure d'une céramique YBCO

**1993** La première synthèse d'un supraconducteur de la classe des mercuro-cuprates, qui est la classe actuelle (ou "le système") de supraconducteurs de céramiques avec les températures de transition la plus haute. Une température critique de 138 K a été obtenue en 1994 à l'Institut National de Standards et de technologie du Colorado (Etats Unis) pour le matériau (Hg<sub>0.8</sub>Tl<sub>0.2</sub>)Ba<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>8.33</sub>.

**2008** Le record du monde pour Tc est de 254 K. Le matériau qui se trouve en testes pour homologuer ce record est (Tl<sub>4</sub>Ba)Ba<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>13</sub>.

Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

## 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivite
- Theorie classique de la supraconductivite. Equations de London
- Theorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, FLS, 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type I
- Supraconductori de type II

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type I
  - appelle aussi supraconducteurs légers, ont été les premiers supraconducteurs découverts et nécessite les plus bas températures ( $T_c$ ) pour supraconduire.
  - sont en général des métaux qui présente une conductivité importante a la température ambiante.
  - sont caractérisés par une transition brusque de l'état normal a l'état supraconducteurs a  $T_c$ .
  - en général  $T_c < 10$  K.

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Types de supraconducteurs

- Supraconducteurs de type I

Element	$T_c$ [K]	Element	$T_c$ [K]	Element	$T_c$ [K]
Plumb (Pb)	7,196	Lantaniu (La)	4,88	Tantal (Ta)	4,47
Mercur (Hg)	4,15	Staniu (Sn)	3,72	Indiu (In)	3,41
Paladiu (Pd)	3,3	Crom (Cr)	3	Taliu (Tl)	2,38
Reniu (Re)	1,697	Protactiniu (Pa)	1,40	Toriu (Th)	1,38
Aluminiu (Al)	1,175	Galiu (Ga)	1,083	Molibden (Mo)	0,915
Zinc (Zn)	0,85	Osmiu (Os)	0,66	Zirconiu (Zr)	0,61
Americiu (Am)	0,60	Cadmium (Cd)	0,517	Ruteniu (Ru)	0,49
Titan (Ti)	0,40	Uraniu (U)	0,20	Hafniu (Hf)	0,128
Iridiu (Ir)	0,1125	Beriliu (Be)	0,023	Wolfram (W)	0,0154
Platină (Pt)	0,0019	Rodiu (Rh)	0,000325		

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

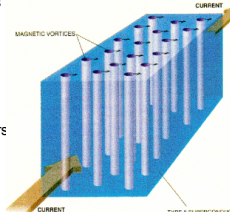
---

Conduction électrique des métaux

### Tipuri de supraconductori

#### Supraconducteurs de type II

- ont été découverts après les supraconducteurs de type I;
- en dehors de quelques éléments purs (V, Tc, Nb), sont des alliages métalliques et des composés de céramiques;
- en général (les composés de céramiques) ont  $T_c$  nettement supérieures aux supraconducteurs de type I;
- la transition de l'état normal à l'état supraconducteur ne se réalise pas brusquement (à  $T_c$ ), mais graduellement, en passant par une phase mixte. Entre  $T_{c1}$  et  $T_{c2}$  ou entre  $H_{c1}$  et  $H_{c2}$ , dans le supraconducteur il y a des "tubés" (vortex) dans lesquels le matériau est en état normal.



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

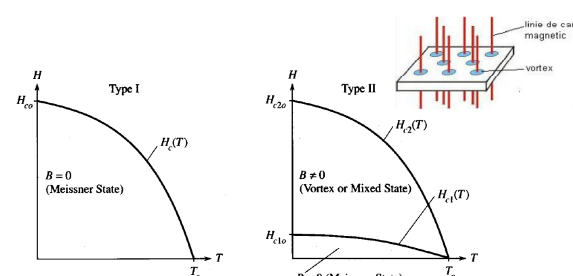
---

---

Conduction électrique des métaux

### Tipuri de supraconductori

#### Supraconducteurs de type II



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### 3.4 Supraconductivité électrique

- Effets associés à la supraconductivité
- Théorie classique de la supraconductivité. Equations de London
- Théorie BCS
- Histoire des supraconducteurs
- Types de supraconducteurs
- Utilisations des supraconducteurs

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Levitation magnétique – Trains MAGLEV
  - Ex: Yamanashi Maglev MLX01 (Japonia)  
581 km/h in 2003




Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

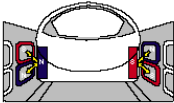
---

Conduction électrique des métaux

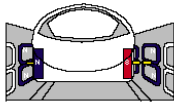
### Utilisations des supraconducteurs

- Trains MAGLEV

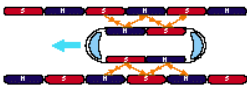
Lévitation



Guidage latérale



Propulsion



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---


---

Conduction électrique des métaux

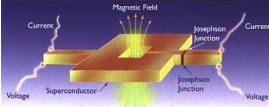
### Utilisations des supraconducteurs

- Biomagnétisme
  - Magnetic Resonance Imaging (MRI)
 

En appliquant au corps humain d'un champ magnétique intense, crée par un supraconducteur, les atomes d'hydrogènes qui existent dans les molécules d'eau et les graisses du corps permettent d'accepter l'énergie du champ magnétique. Ils laissent alors voir cette énergie à une fréquence qui peut être détectée et montrée graphiquement par un ordinateur.


  - Magnetoencephalographie - SQUID
 

A SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) is the most sensitive type of detector known to science. Consisting of a superconducting loop with two Josephson junctions. SQUIDs are used to measure magnetic fields.



Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Accélérateurs de particules

From LEP to LHC  
Superconducting magnets

27 Km

Compact Muon Solenoid

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
  - avec supraconducteurs à haute température (HTS)

■ HTS wire (De-energized)

■ Copper wire (De-energized)

■ LN-impregnated dielectric

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
  - avec supraconducteurs à haute température (HTS)

■ HTS wire (Energized)

■ Copper wire (De-energized)

■ LN-impregnated dielectric

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
  - avec supraconducteurs à haute température (HTS)
    - HTS wire (De-energized)
    - Copper wire (Energized)
    - LN-impregnated dielectric

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- Cables pour le transport de l'énergie électrique
  - avec supraconducteurs à basse température
    - Cross Sections Of Two Typical Filamentary Composites Of NbTi In A Copper Matrix

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Conduction électrique des métaux

### Utilisations des supraconducteurs

- microprocesseur avec jonction Josephson

Ordinateurs – "petaflop" (10<sup>15</sup> opération en virgule flottante / s)

Science des matériaux de l'électrotechnique, F.L.S. 1231 F

---

---

---

---

---

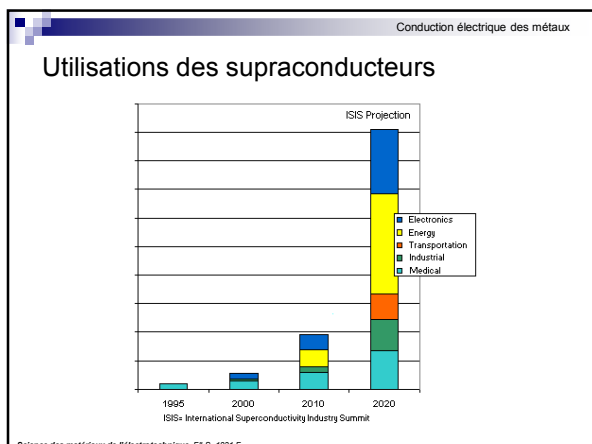
---

---

---

---

---



---

---

---

---

---

---

---

---