

Chapitre 3. Propriétés physiques

Les propriétés mécaniques des matériaux font essentiellement partie des propriétés physiques. Si on a coutume de les séparer, c'est surtout pour des motifs de commodité didactique car les concepts de base de ces matières diffèrent quelque peu de ceux utilisés dans les études traitant les propriétés mécaniques. Ces matières font intervenir des concepts traditionnels de la physique du solide, fondés notamment sur l'étude du mouvement des électrons. L'importance de ces théories en science des matériaux résulte du fait que l'ensemble des propriétés physiques y compris les propriétés mécaniques peuvent être interprétées de manière unifiée. Ce modèle traditionnel tient compte des principaux développements de la mécanique quantique.

3.1 Les propriétés électriques

3.1.1 Conductivité et résistivité électriques

La conduction électrique est une propriété des matériaux d'une grande importance technique. Comme exemples importants de ce type de phénomène, il faut citer le transport de l'énergie électrique sur des grandes distances et le chauffage électrique par résistance.

Dans le premier cas, il faut réduire au maximum les pertes d'énergie en utilisant, dans la fabrication du conducteur électrique, des matériaux ayant une conductivité élevée comme le cuivre ou l'aluminium. Cet objectif explique l'immense intérêt pour la recherche de supraconducteurs utilisables à des températures proches de l'ambiance. Dans le cas du chauffage électrique, il faut adapter la composition du matériau pour transformer le maximum d'énergie électrique en énergie thermique. Un troisième exemple tout aussi important est donné par les semi-conducteurs sur lesquels est basé toute l'électronique moderne (Hi-Fi, ordinateurs, informatique etc.). Les phénomènes de conductivité électrique peuvent être expliqués à l'aide des concepts physico-chimiques, ce sera le but de ce chapitre.

Un conducteur électrique est un matériau qui possède des électrons libres permettant le transport d'un courant électrique. Lorsqu'un courant électrique d'intensité « I » traverse un conducteur de résistance « R », on observe aux extrémités du conducteur une différence de potentiel « V » donnée par la loi d'Ohm :

$$V = R.I \qquad \text{Eq 3-1}$$

Chapitre 3 : Propriétés physiques

Les unités utilisées pour V , R et I sont le volt (V), l'Ohm (Ω) et l'ampère (A). Connaissant les dimensions géométriques du conducteur, c'est-à-dire, la section (S) et la longueur (L), on calcule **la résistance spécifique** ou **résistivité électrique** (ρ) du conducteur :

$$\rho = \frac{R.S}{L} = \frac{1}{\sigma} \quad \text{Eq 3-2}$$

La résistivité (ρ), qui s'exprime en $\Omega.m$, caractérise la résistance opposée au passage d'un courant électrique dans le matériau, pour une section et une longueur unitaire. Son inverse est **la conductivité électrique** (σ) qui est donc une mesure de la facilité de passage du courant électrique dans la matière. À partir de la loi d'Ohm et l'équation (Eq 3-1), on obtient :

$$\rho = \frac{V.S}{I.L} \quad \text{Eq 3-3}$$

La figure 3-1 présente un schéma du dispositif servant à mesurer la résistivité électrique.

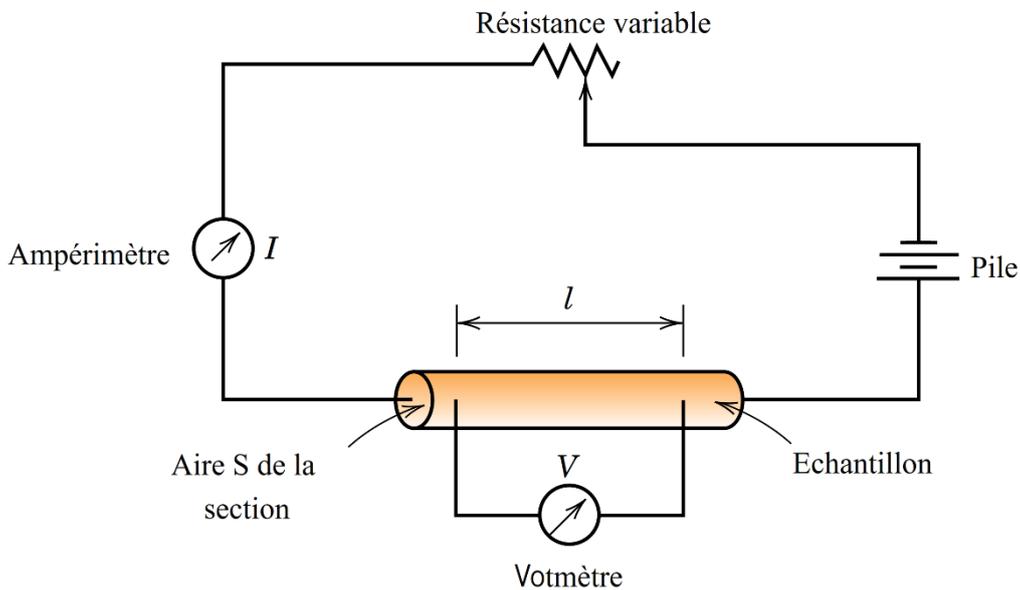


Figure 3-1: Schéma de l'appareillage de mesure de la résistivité électrique

Le transport du courant électrique à travers un conducteur s'accompagne toujours d'un dégagement de chaleur, ce phénomène est appelé « **effet Joule** » :

$$P = VI = RI^2 \quad \text{Eq 3-4}$$

Chapitre 3 : Propriétés physiques

Où « P » est *la puissance thermique dégagée*. Celle-ci s'exprime en Watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$).

La conductivité et la résistivité électriques des matériaux varient très fortement en fonction de la nature de leurs liaisons chimiques, de la composition et de la température (Figure 3-2 et Figure 3-3). Ainsi, à température ambiante, la conductivité électrique varie de $10^8 \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pour les meilleurs conducteurs métalliques (Cu, Ag) jusqu'à $10^{-16} \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ pour les isolants électriques les plus performants comme le Polytétrafluoroéthylène (PTFE).

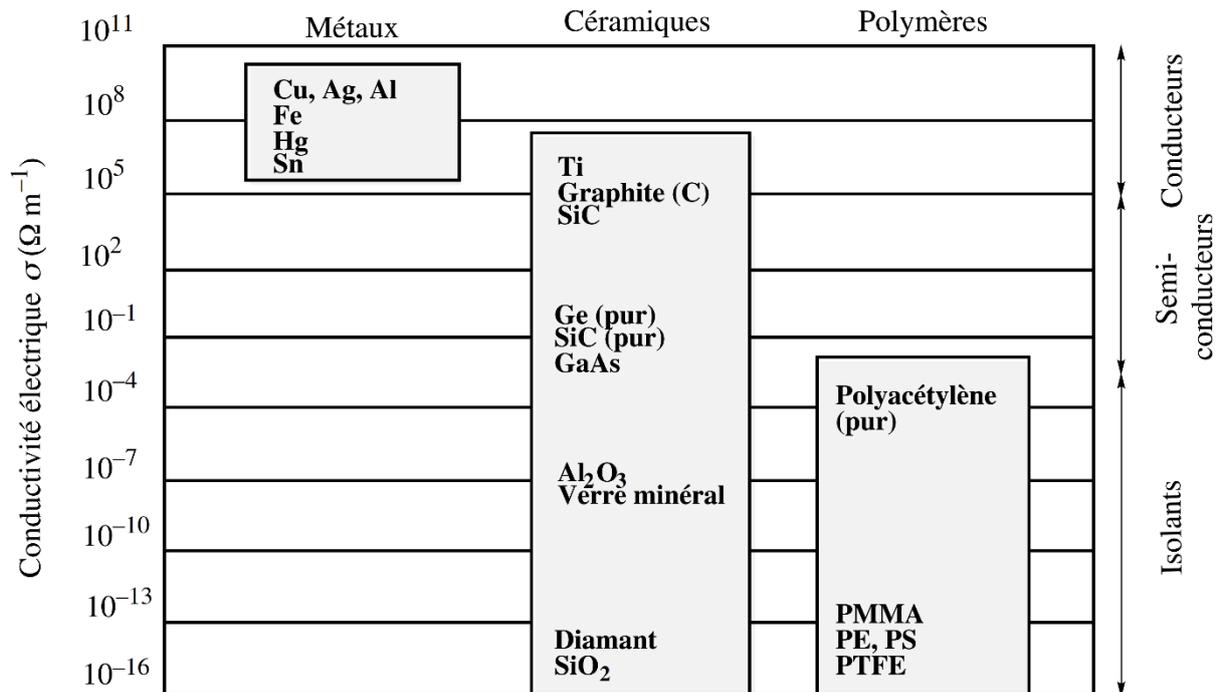


Figure 3-2: Tableau comparatif des valeurs de la conductivité électrique intrinsèque σ pour les différentes classes de matériaux à température ambiante.

Dans certains cas (*matériaux supraconducteurs* à basse température), la résistance devient nulle en dessous d'une température critique. En pratique, pour les matériaux supraconducteurs, la conductivité dépasse $10^{27} \text{ } \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Les métaux possèdent une très grande conductivité électrique à température ambiante et celle-ci augmente lorsque la température diminue. L'emploi du cuivre et de l'aluminium comme matériaux pour le transport de l'énergie électrique est bien connu.

Les céramiques représentent le groupe de matériaux qui a la plus grande variation de conductivité électrique. Ils peuvent être classés en trois groupes: *conducteurs*, *semi-conducteurs* et *isolants*. Ainsi, certains carbures (SiC, TiC) ont des liaisons partiellement

Chapitre 3 : Propriétés physiques

métalliques. Ils possèdent dans un certain nombre de cas (TiC) une conductivité électrique voisine de celle des métaux. Le graphite pyrolytique possède une conductivité électrique élevée suivant les plans de base de sa structure hexagonale. Certaines céramiques à base d'oxydes d'yttrium, de cuivre, de barium sont supraconductrices à la température de l'azote liquide ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$).

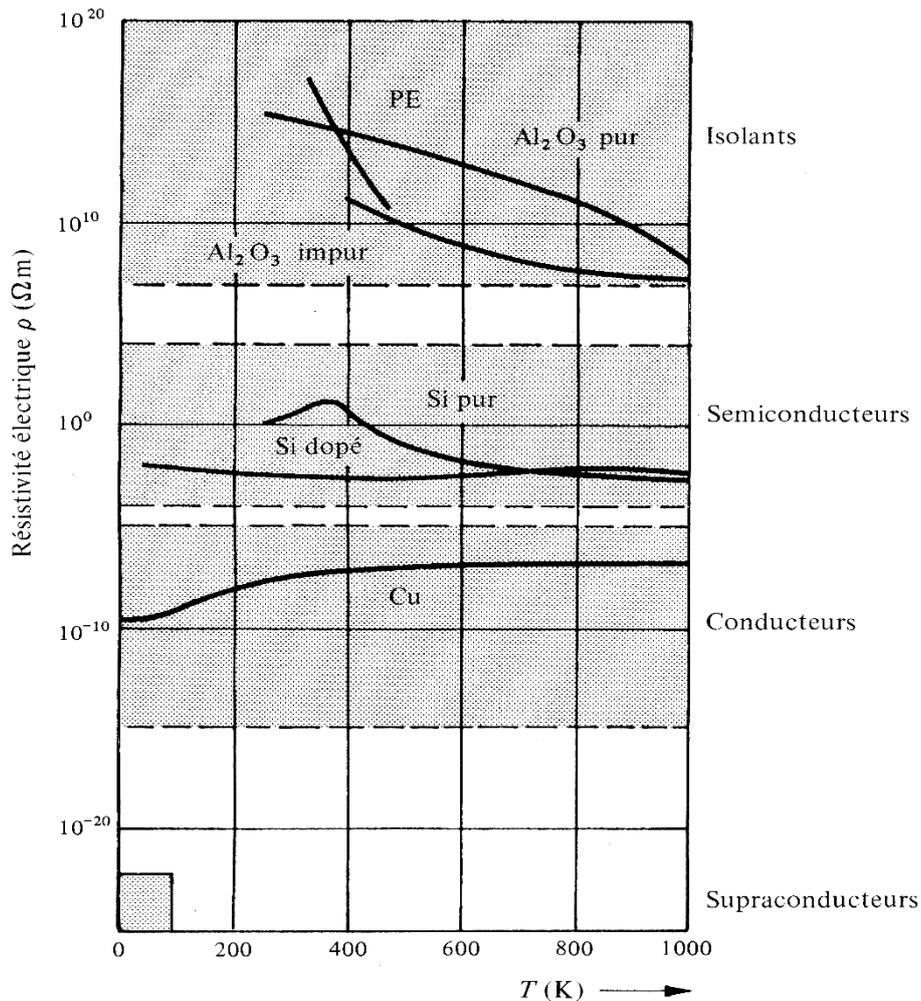


Figure 3-3: Variations de la résistivité électrique des matériaux (ρ) en fonction de la température T . Certains matériaux possèdent une conductivité électrique intermédiaire ($\sim 10^{-2}$ à $10^{-4}\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) entre celle des métaux et celle des isolants ; ces matériaux sont appelés **semi-conducteurs**. Les semi-conducteurs les plus courants (Si, Ge) sont des matériaux à liaisons covalentes. Leur conductivité électrique intrinsèque est de l'ordre de 10^{-2} à $1\ \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Celle-ci est très sensible à la présence d'impuretés.

Parmi les matériaux céramiques isolants, on distingue un grand nombre de composés à liaison ionique, covalente ou covalente polaire comme la silice amorphe, le quartz, le mica

Chapitre 3 : Propriétés physiques

(phyllosilicate) et le diamant qui est caractérisé par une conductivité électrique environ 10^{21} fois plus faible que celle du graphite.

Les polymères sont dans leur grande majorité des isolants électriques. Ainsi, on connaît l'emploi du polyéthylène (PE) comme isolant électrique pour les câbles à haute (200 kV) et basse tensions.

On développe actuellement certains *polymères conducteurs* comme le polyacétylène. Ces polymères conducteurs sont caractérisés par la présence de double liaisons conjuguées qui confèrent une certaine mobilité aux électrons. Les semi-conducteurs organiques font actuellement l'objet d'une recherche intensive.

Du point de vue de leur structure électronique, on ne distingue que deux classes de matériaux : *les conducteurs et les isolants*. Les conducteurs (métalliques surtout) sont des matériaux dont la dernière bande occupée est incomplète. Par contre, dans les isolants et les semi-conducteurs, tous les niveaux énergétiques des bandes de valence sont occupés par des électrons. *A zéro degré Kelvin*, sous l'action d'un champ électrique modéré et en l'absence de toute autre excitation extérieure comme la lumière par exemple, on observerait qu'un déplacement électronique (courant électrique) se produit chez les conducteurs, tandis que dans le cas des isolants et des semi-conducteurs, il ne se produirait aucun mouvement d'électrons. Il n'existe donc pas de différence qualitative entre un isolant et un semi-conducteur, ce qui les différencie est uniquement la largeur de la bande interdite entre la bande de valence et la bande de conduction.

Remarques :

- On appelle « **bande interdite** », la différence d'énergie E_D (ou parfois E_g) qui sépare la dernière bande occupée de la première bande vide, car aucun électron ne peut avoir une énergie comprise entre celle du niveau supérieur de la bande de valence et celle du niveau inférieur de la bande de conduction.
- Si la largeur de la bande interdite est voisine de 1 eV, un certain nombre d'électrons sont excités, à température ambiante et au-dessus de la bande de valence vers la bande de conduction. On aura alors affaire à un semi-conducteur. Quand la largeur de la bande interdite est supérieure à 2 eV, l'excitation des électrons n'est plus possible à l'ambiance et l'on parle alors d'un isolant.

Chapitre 3 : Propriétés physiques

Si on compare la variation de la conductivité électrique dans les métaux et les semi-conducteurs en fonction de la température, on observe une allure très différente. Ainsi, dans les métaux purs (Figure 3-4) à très basse température ($T < 10$ K), la conductivité ne varie pratiquement pas avec T . A plus haute température, elle diminue fortement avec la température.

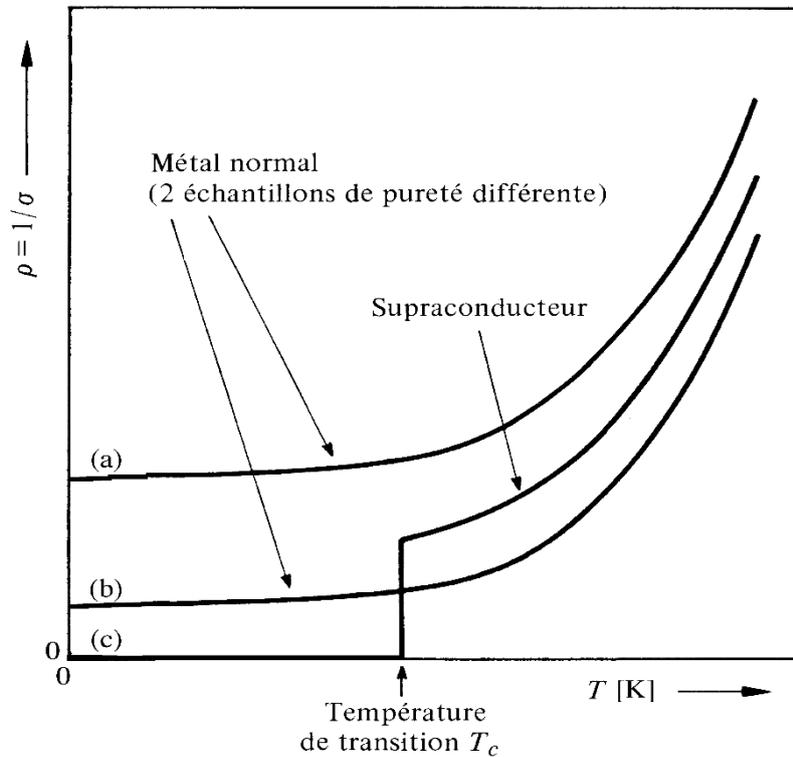


Figure 3-4 : Variation de la résistivité d'un métal normal à densité de défauts élevées (a) et à plus faible densité de défauts (b) et d'un métal supraconducteur (c) avec la température. La température T_c marque la transition entre l'état conducteur et supraconducteur.

Dans le cas des semi-conducteurs (Figure 3-4), la conductivité, qui est nulle à basse température (résistivité infinie), augmente avec T dans certains domaines de températures. Leur conductivité évolue donc généralement de manière opposée à celle des métaux. Cette différence de comportement découle du fait que dans les métaux, le nombre d'électrons mobiles ne varie pas avec la température ; leur conductivité diminue lorsque la température augmente parce que la mobilité des électrons décroît !

Dans les semi-conducteurs, c'est le nombre de porteurs qui augmente avec la température car, par activation thermique, un nombre de plus en plus élevé d'électrons passe de la bande de valence à la bande de conduction. Comme le représente la figure 3-5, la conductivité électrique est directement proportionnelle au nombre d'électrons mobiles présents dans les matériaux.

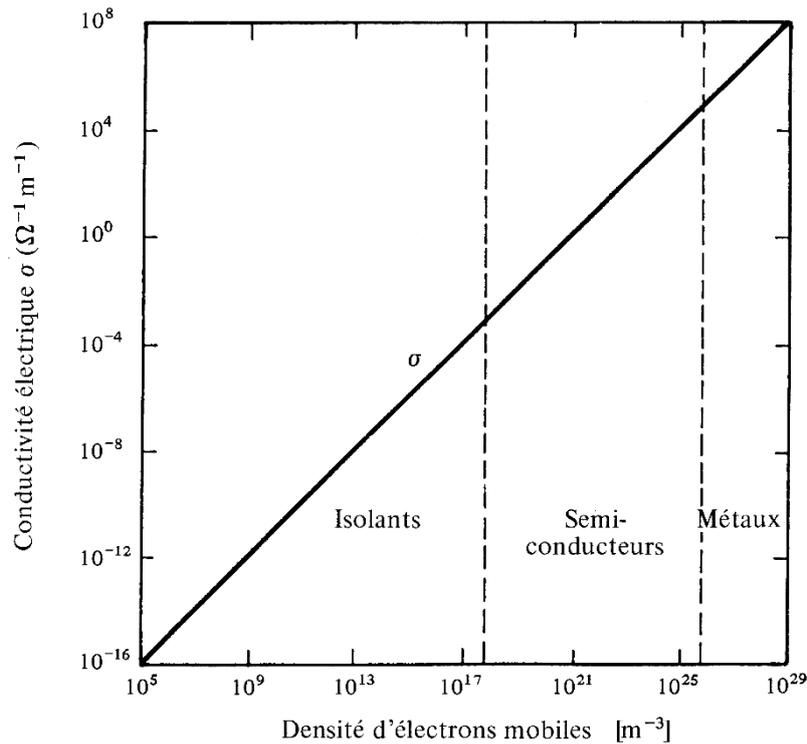


Figure 3-5: Représentation schématique de la variation de la conductivité électrique (σ) en fonction de la densité d'électrons mobiles.

3.1.2 Conductivité électrique des métaux

Contrairement à ce que beaucoup d'élèves peuvent penser, l'or n'est pas le meilleur métal concernant la conductivité dans la vie courante, mais il ne s'oxyde pas et résiste aux acides « usuels ». Souvent, dans les composants électroniques, le cuivre est recouvert d'or (pour les processeurs d'ordinateur par exemple). Son utilisation est souvent préférée, parce qu'il a une très bonne conductivité et qu'il n'est pas cher. Son seul problème reste dans son oxydation. L'argent s'oxyde beaucoup moins vite que le cuivre et c'est pour cela qu'il est utilisé dans du matériel de haute gamme. C'est un bon compromis entre son prix, son oxydation et surtout sa conductivité. Dans le *Tableau 3-1*, une liste des métaux les plus conducteur électriquement parlant, classés par ordre du meilleur au moins bon.

Tableau 3-1: Résistivités de quelques métaux purs et alliages.

Métal ou alliage de métaux	Résistivité à 300 K ($\Omega \cdot m$)
Argent	16×10^{-9}
Cuivre	17×10^{-9}
Or	22×10^{-9}
Aluminium	28×10^{-9}

Chapitre 3 : Propriétés physiques

Magnésium	43×10^{-9}
Bronze	55×10^{-9}
Zinc	61×10^{-9}
Laiton	71×10^{-9}
Cadmium	76×10^{-9}
Nickel	87×10^{-9}
Fer	100×10^{-9}
Platine	111×10^{-9}
Étain	120×10^{-9}
Plomb	208×10^{-9}
Constantan (Cu-Ni)	500×10^{-9}
Mercure	941×10^{-9}
Nichrome	$1\,000 \times 10^{-9}$

La résistivité des bons conducteurs, comme le cuivre ou l'argent, reste pratiquement constante à des températures inférieures à 10 K ($-263\text{ }^{\circ}\text{C}$). Pour un certain nombre de métaux, de composés intermétalliques et de céramiques appelés supraconducteurs (*Tableau 3-2*), il existe une température critique T_c au-dessous de laquelle le libre parcours moyen des électrons devient infini et la résistivité électrique est nulle (Figure 3-4). Ainsi, si on induit un courant électrique dans un supraconducteur, en l'absence de champ magnétique, ce courant peut se maintenir quasiment indéfiniment. On déduit de ce type d'expérience que la conductivité σ de ce type de matériau est supérieure à $10^{25}\text{ }\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$. Cette valeur est 10^{17} fois plus grande que celle du cuivre pur à basse température.

Les températures critiques déterminées pour les premiers matériaux supraconducteurs découverts au début du siècle étaient trop basses pour un grand nombre d'applications techniques. Les progrès extraordinaires accomplis récemment, laissent entrevoir la possibilité de réaliser des matériaux supraconducteurs à température proche de l'ambiance. Ceci ouvrirait la voie à des progrès industriels exceptionnels.

Tableau 3-2 : Valeurs des températures critiques T_c pour certains matériaux supraconducteurs.

Métaux, composés	T_c (K)
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	92
Nb_3Ge	23,4
Nb_3Sn	15
Nb	9,25
Pb	7,2