

CHAP 10-COURS Propriétés électriques des matériaux

Mots clés :

- Cristaux liquides
- Conducteurs, semi-conducteurs
- Supraconducteurs
- Photovoltaïques

1. CONDUCTEURS, SEMI-CONDUCTEURS, SUPRACONDUCTEURS

Les **semi-conducteurs** sont des matériaux qui ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et celle des conducteurs.

Les matériaux **supraconducteurs** ont une résistance électrique nulle dans certaines conditions.

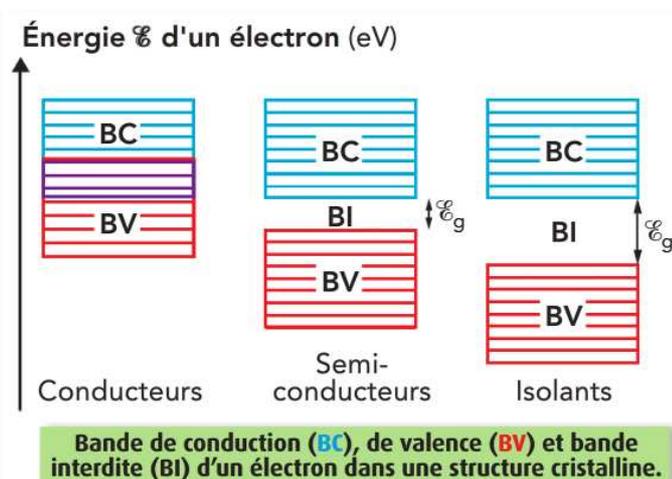
Comment expliquer ces différences de conductivité?

1.1. Bandes d'énergie

Le comportement électrique des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants est modélisé par la théorie des bandes énergétiques. Selon ce modèle, les niveaux d'énergie des électrons des atomes d'une structure cristalline forment des bandes d'énergie appelées bandes permises.

Les bandes responsables des propriétés conductrices sont la bande de valence (BV) et la bande de conduction (BC).

Les énergies comprises entre deux bandes permises constituent une bande interdite (BI). Seuls les électrons de plus hautes énergies, présents dans la bande de conduction, peuvent se détacher de la structure cristalline et participer à la conduction du courant électrique.



Pour les conducteurs, les bandes de valence et de conduction se chevauchent. Ainsi, certains électrons sont libres d'évoluer dans la structure cristalline (cas des métaux). En revanche, pour les semi-conducteurs et les isolants, les bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite. La différence entre semi-conducteur et isolant est due à la valeur E_g de cette bande interdite, voisine de 1 eV pour les semi-conducteurs et de 6 eV pour les isolants.

1.2. Dopage d'un semi-conducteur

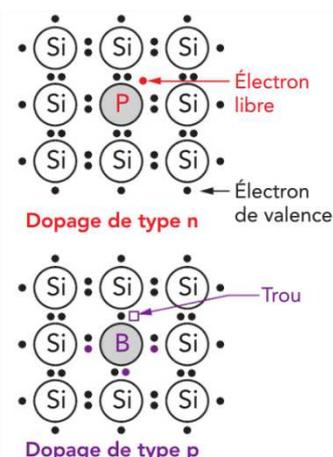
- Un réseau monocristallin d'atomes de silicium, **Si**, est un semi-conducteur.

L'atome de silicium ayant quatre électrons de valence, il établit quatre liaisons covalentes avec quatre atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des atomes d'autres éléments, appelés dopants.

Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore, **P**, remplace un atome de silicium dans le réseau.

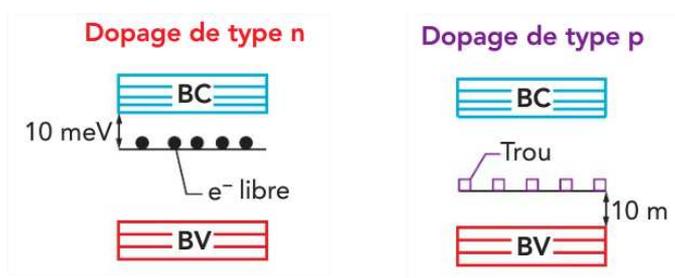
L'atome P ayant cinq électrons de valence, il forme quatre liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins; il reste un électron libre qui peut participer à la conduction électrique.

L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n (n pour négatif).



- Par un raisonnement analogue, un atome dopant possédant trois électrons de valence, comme le bore, B, conduit à un déficit d'électron de valence dans le réseau, appelé trou. Ce trou peut être comblé par un électron de valence d'un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. L'atome de bore étant accepteur d'électron, on parle de dopage de type p (p pour positif).

Les éléments dopants génèrent des niveaux d'énergies dans la bande interdite. Ces niveaux sont proches des bandes de valence ou de conduction.



1.3. Des matériaux sans résistance électrique

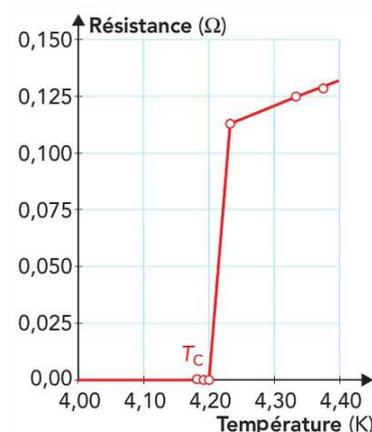
Les électrons sont responsables de la circulation du courant électrique dans les matériaux conducteurs. Lors de leurs déplacements, les électrons subissent de nombreux chocs qui les ralentissent. On appelle résistance électrique la propriété d'un matériau à ralentir le passage du courant électrique.

Cette résistance provoque un échauffement du matériau par effet Joule (grille-pain, ampoule électrique à filament, etc.).

En 1911, H. KAMERUNGH ONNES étudie la résistance électrique du mercure à très basse température. Il découvre qu'en dessous d'une certaine température, appelée température critique, T_c , la résistance du mercure s'annule (schéma ci-contre). Il nomme ce phénomène « **supraconductivité** ».

Pour confirmer la disparition totale de résistance, il initie un courant électrique dans un anneau d'étain rendu supraconducteur. Il observe effectivement que ce courant continue à circuler indéfiniment.

L'année 2011, centenaire de sa découverte, a été déclarée année mondiale de la supraconductivité.



Résistance du mercure.

Le cube métallisé gris sur l'affiche ci-contre est un aimant, il crée autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique, comme la pastille circulaire située au-dessous de lui.

À basse température ($T < T_c$), la pastille, généralement une céramique, devient supraconductrice. Elle expulse alors le champ magnétique vers l'extérieur ce qui crée une force sur l'aimant et le fait léviter : c'est l'effet Meissner. Cet effet est utilisé, entre autres, dans le fonctionnement d'un train japonais.



2. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique. Comment fonctionnent-elles ?



2.1. fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique d'épaisseur comprise entre 0,2 et 0,3 mm, et de 10 cm de côté environ.

Elle est composée de cinq couches différentes : une couche antireflet **1**, deux couches conductrices (cathode en forme de grille **2** et anode compacte **5**) et deux couches de silicium dopé **3** et **4**.

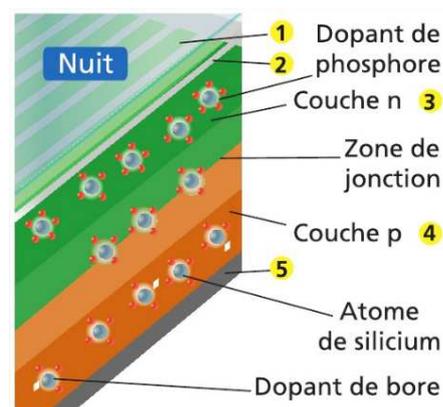
- Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques.

- La couche de silicium supérieure **3**, exposée au Soleil, est dopée avec des atomes de **phosphore** possédant **5 électrons périphériques**, soit 1 de plus que les atomes de silicium.

- La couche de silicium inférieure **4** est dopée avec des atomes de **bore** ayant **3 électrons périphériques**, soit un de moins que les atomes de silicium.

- La couche **3** est donc excédentaire en électrons et la couche **4** est déficitaire.

- Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons en excès de la couche **3** diffusent dans la couche **4**. Ainsi, la couche **3** se charge positivement, tandis que la couche **4** se charge négativement. Un équilibre se crée et un champ électrique interne apparaît.



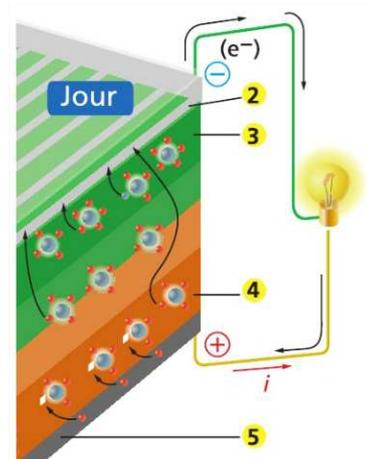
2.2. Le rôle du Soleil

Les photons du Soleil qui pénètrent dans la cellule photovoltaïque peuvent arracher des électrons aux atomes de silicium présents dans les couches **3** et **4**.

Le champ électrique interne à la cellule entraîne les électrons libérés vers la cathode **2** (-), où ils empruntent un circuit extérieur, générant ainsi un courant électrique qui alimente, par exemple, une ampoule électrique.

Les électrons rejoignent ensuite l'anode **5** (+), où ils se recombinent avec des trous.

Plus le nombre de photons absorbés est important, plus le nombre d'électrons libérés, et donc le courant généré, est important. Les cellules sont regroupées en modules formant des panneaux solaires. Aujourd'hui, les rendements énergétiques moyens des panneaux solaires sont de l'ordre de 15 %.



3. LES CRISTAUX LIQUIDES

Les cristaux liquides utilisés dans certains thermomètres, dans l'affichage numérique, dans certains écrans plats, etc. doivent leurs remarquables propriétés à leur structure spatiale. Que sont ces matériaux, intermédiaires entre les solides et les liquides ? Quelles sont leurs propriétés ?

3.1. Un siècle, de leur découverte à leur utilisation

En 1888, le botaniste autrichien F. REINITZER étudie les réactions du benzoate de cholestéryl quand il note que ce composé a deux points de « fusion » différents : à 149 °C, ce solide devient un liquide opaque, à 179 °C, il devient transparent- Le premier cristal liquide vient d'être observé.

En 1971, la société suisse Hoffmann-Laroche met au point le premier panneau à cristaux liquides.

Puis, ils font leur apparition dans les montres et les calculatrices.

Il faut attendre 1985 pour que soit présenté le premier écran plat (liquid crystal display, ou LCD) utilisable dans un micro-ordinateur.

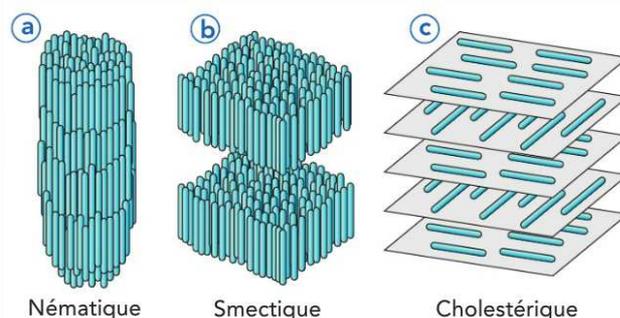
3.2. Un nouvel état de la matière aux multiples applications

Un cristal liquide est un état de la matière, état mésomorphe, qui présente à la fois des caractéristiques des liquides et des solides. Il est souvent constitué de molécules organiques dissymétriques, généralement polaires, relativement « rigides », allongées en bâtonnets ou en forme de disques qui, selon les conditions expérimentales (température, action d'un champ électrique, etc.), peuvent se déplacer et s'orienter parallèlement les unes aux autres donnant ainsi un ordre local, comme dans un solide.

Les cristaux liquides se présentent sous trois phases différent par l'arrangement des molécules.

Dans la phase **nématique** (du grec nema, « fil ») les molécules ont une orientation selon une direction donnée; Dans la phase **smectique** (du grec smegma, « savon ») (b), les molécules sont ordonnées en couches, comme dans le savon;

Dans la phase **cholestérique** (c), l'orientation des molécules est unique dans chaque plan, mais varie d'un plan à l'autre conduisant à une structure en hélice dont le pas dépend de la température.



Phases nématique (a), smectique (b) et cholestérique (c).

- Les molécules des cristaux liquides étant polaires, on peut faire varier leur orientation à l'aide d'un champ électrique, ce qui modifie leurs propriétés optiques. C'est le cas dans les écrans plats LCD

- Certains vitrages contiennent des cristaux liquides nématiques, sous forme de fines gouttelettes incluses dans un polymère maintenu entre deux plaques de verre recouvertes d'une très fine couche métallique. Ce vitrage à opacité variable passe d'un état laiteux en l'absence de tension, à un état transparent lorsqu'il est sous tension.

- La lumière réfléchi par les cristaux cholestériques est liée à leur couleur; comme celle-ci dépend de la température, ces cristaux sont utilisés dans les thermomètres à contact.

Afin d'éviter la contrefaçon, l'encre utilisée pour imprimer la valeur des billets de 50 € et plus contient des cristaux cholestériques dont la couleur change avec l'angle d'incidence de la lumière.