

DES SEMI-CONDUCTEURS AUX SUPRACONDUCTEURS

CONTEXTE DU SUJET

Un courant électrique consiste en une circulation ordonnée de porteurs de charge : des électrons dans les métaux et le graphite, des ions dans les solutions aqueuses.

Lorsqu'un conducteur est traversé par un courant électrique, il s'échauffe : on parle alors d'effet Joule. Les semi-conducteurs ont une conductivité électrique intermédiaire entre celles des isolants et celle des conducteurs. Quant aux supraconducteurs, ils ont une résistance électrique nulle dans certaines conditions.

DOCUMENTS MIS À DISPOSITION

DOCUMENT I : LA THÉORIE DES BANDES

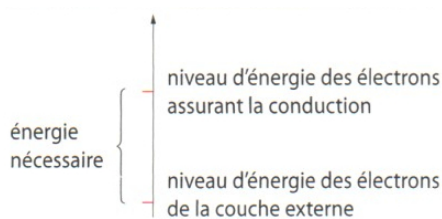
Le comportement électrique des conducteurs, des semi-conducteurs et des isolants est modélisé par la théorie des bandes énergétiques. Selon ce modèle, les niveaux d'énergie des électrons des atomes d'une structure cristalline forment des bandes d'énergie appelée bandes permises. Les bandes responsables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

D'après J.-P. PÉREZ et coll., « Électromagnétisme – Vide et milieux matériels », Masson, 1991.

DOCUMENT II : LA CONDUCTION DANS LES SEMI-CONDUCTEURS

Les matériaux semi-conducteurs ne sont ni de bons conducteurs, ni de bons isolants, mais se situent à un niveau intermédiaire, entre conducteurs et non conducteurs.

Au niveau des atomes qui constituent un matériau semi-conducteur, si les électrons de la dernière couche possèdent suffisamment d'énergie, ils peuvent se « détacher » de leur atome et assurer ainsi la conduction du courant, comme un électron libre.

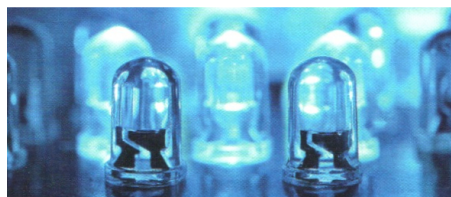


Un électron a besoin d'énergie pour se « détacher » de son atome

DOCUMENT III : PRINCIPE DE LA DEL (DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE)

Les électrons libres remplissent les trous, à condition qu'ils puissent se débarrasser de leur énergie.

Dans une diode électroluminescente, ils peuvent le faire en émettant de la lumière. La couleur de la lumière dépend du semi-conducteur.



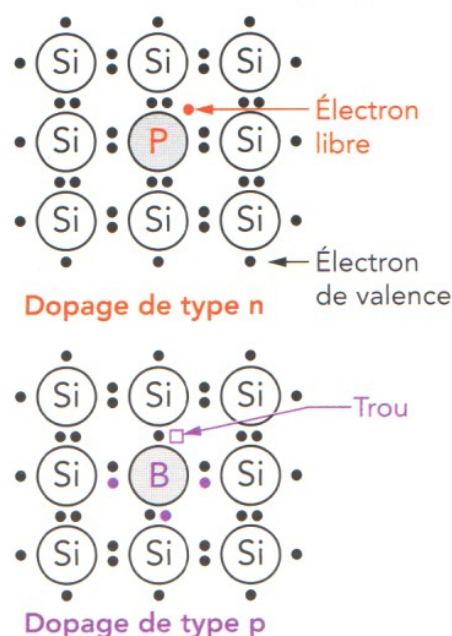
DOCUMENT IV : DOPAGE D'UN SEMI-CONDUCTEUR

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 5 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'énergie dans la bande interdite. Ces niveaux sont proches des bandes de valence ou de conduction.



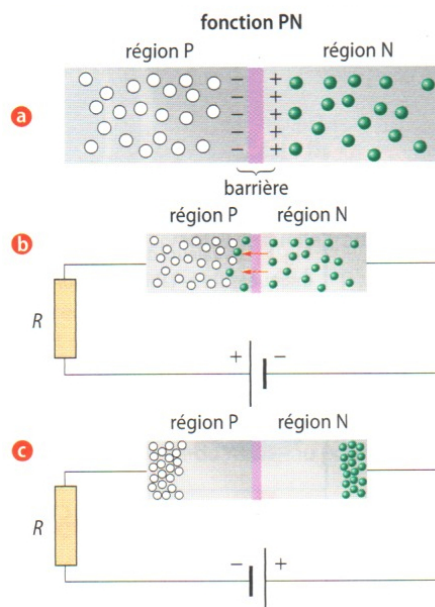
D'après J.-P. PÉREZ et coll., « Électromagnétisme – Vide et milieux matériels », Masson, 1991.

DOCUMENT V : LA JONCTION PN (OU DIODE)

Dans une diode, en l'absence de tension appliquée, le déplacement des électrons et des trous proches de la frontière PN crée une barrière infranchissable pour les autres.

En présence d'une tension appliquée, le comportement des porteurs de charge varie selon la polarisation, c'est-à-dire selon le signe de la tension.

La figure ci-contre montre le comportement des électrons et des trous dans une diode dans différentes situations : (a) en l'absence de tension, (b) en polarisation directe, (c) en polarisation inverse.



DOCUMENT VI : LE PHÉNOMÈNE DE SUPRACONDUCTIVITÉ

La supraconductivité est le phénomène caractérisé, entre autres, par la résistivité nulle d'un matériau, dit alors supraconducteur.

Par exemple, tous les métaux purs deviennent supraconducteurs en-dessous d'une certaine température, très faible (proche du zéro absolu, $-273,15^{\circ}\text{C}$).

D'autres matériaux, dits « supraconducteurs à haute température critique », présentent la propriété de supraconductivité en-dessous de -140°C .

Le film intitulé *Le jour le plus froid* raconte la découverte de la supraconductivité. Il peut être visionné à l'adresse suivante : www.supraconductivite.fr/fr/index.php#100ans-film



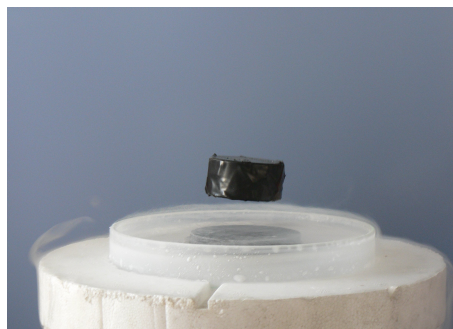
Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926)
découvreur de supraconductivité

DOCUMENT VII : UNE RÉVOLUTION QUI VENAIT DU FROID

Il ya tout juste cent ans, un étonnant phénomène chamboulait tout ce que l'on savait jusqu'alors sur l'électricité. Ou plutôt sur la résistance des matériaux à la laisser passer. Car même les fils électriques les plus conducteurs qui soient gâchaient une partie de cette énergie en la transformant en chaleur. Jusqu'à ce que, en 1911, un physicien hollandais voit littéralement « disparaître » la résistance électrique du mercure ! Pas dans n'importe quelle condition cependant : à une température frisant le zéro absolu. La supraconductivité était née et semblait concerner de nombreux métaux et alliages [...]

Pour expliquer le phénomène, nul besoin de faire appel à une transformation du matériau induite par le froid. La supraconductivité trouve son origine dans le comportement des électrons de la matière et, pour la comprendre, il faut avoir recours à la physique quantique. Au fil des ans, les recherches vont révéler bien d'autres propriétés surprenantes. En particulier, supraconductivité et magnétisme ne font pas bon mé-

nage : un supraconducteur exclut tout champ magnétique qu'on voudrait lui imposer de l'extérieur. C'est l'effet Meissner, du nom de son découvreur. « C'est d'ailleurs cette capacité qui fait qu'un supraconducteur est tout autre chose qu'un simple conducteur idéal », rappelle Georges Waysand du Laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel-Pays d'Apt.



Aimant en lévitation au-dessus
d'un supraconducteur

D'après Mathieu GROUSSON, extrait de l'article « Une révolution qui venait du froid », paru dans l'enquête « La supraconductivité prend son envol », Journal du CNRS n°255, avril 2011.

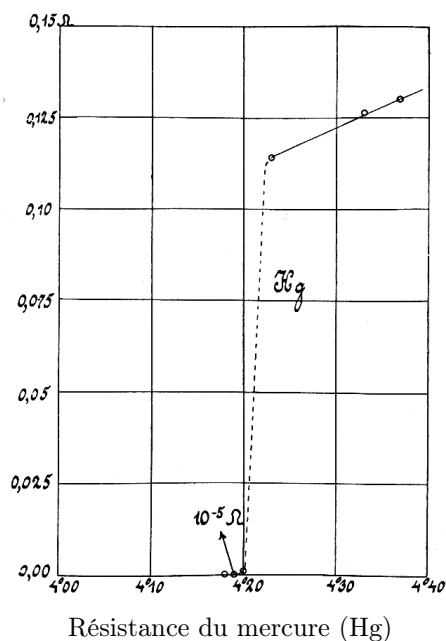
DOCUMENT VIII : DES MATÉRIAUX SANS RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

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, Heike Kamerlingh 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 (voir 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.



DOCUMENT IX : QUELQUES APPLICATIONS DE LA SUPRACONDUCTIVITÉ

La supraconductivité a de nombreuses applications possibles dans le domaine de la santé, de l'énergie, des transports, de la télécommunication ou de la recherche.



L'utilisation de câbles supraconducteurs permettrait d'éviter les pertes par effet Joule



Le train à sustentation magnétique a atteint une vitesse record de $581 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$

ÉNONCÉ DESTINÉ AU CANDIDAT

En s'aidant des documents précédents et du questionnement ci-dessous, rédiger un texte d'une vingtaine de lignes maximum résumant et expliquant le comportement électrique de ces différents matériaux.

1. En utilisant la théorie des bandes, expliquer la conductivité électrique élevée des métaux.
2. Qu'est-ce qui différencie un semi-conducteur d'un isolant dans la théorie des bandes ?
3. Pourquoi un semi-conducteur constitué d'un monocristal de silicium a-t-il une conductivité quasi nulle ?
4. *Les principaux semi-conducteurs sont constitués de réseaux cristallins d'atomes de silicium, Si, ou de germanium, Ge.* Où sont situés ces deux éléments dans la classification périodique ? Où sont situés les métaux ?
5. Quels éléments chimiques, autres que le phosphore ou le bore, permettraient d'assurer un dopage de type P ou de type N ?
6. *À température ambiante, l'énergie d'agitation thermique est d'environ 25 meV.* Pourquoi, à température ambiante, un semi-conducteur dopé peut-il conduire le courant électrique ? On utilisera notamment la théorie des bandes.
7. Comment justifier que la résistance des métaux augmente lorsque la température croît ?
8. Exprimer, en degrés Celsius, la température critique T_C du mercure.
9. Comment, au début du XX^e siècle, Heike Kamerlingh Onnes a-t-il pu atteindre une température aussi basse pour refroidir le mercure ?
10. Comment varie la résistance du mercure avec la température pour $T > T_C$ et pour $T < T_C$?
11. *Aujourd'hui, les appareils de RMN et d'IRM ainsi qu'un train à grande vitesse utilisent la supraconductivité.* Expliquer pourquoi.
12. Pourquoi le dopage d'un semi-conducteur améliore-t-il sa conductivité électrique ?
13. Rappeler les principales propriétés d'un matériau supraconducteur et citer des applications qui en découlent.