

III Aspect corpusculaire de la lumière

1 La théorie quantique

a État de la physique en 1900

La physique a considérablement progressé au 18^e et 19^e siècles, notamment grâce aux théories de Newton (18^e) et à Maxwell (19^e) qui ont établi les lois de la mécanique, de la gravitation et de l'électromagnétisme. Elles permettent d'expliquer la *quasi-totalité* des phénomènes observés.

b L'avènement de la physique quantique

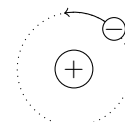
En 1900 il reste quelques phénomènes inexpliqués :

La stabilité de l'électron autour du noyau d'un atome

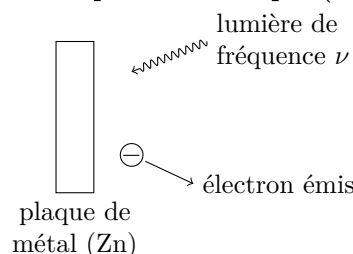
L'électron – tourne autour du noyau + donc il accélère. Maxwell a montré qu'une charge qui accélère rayonne une onde et donc perd de l'énergie.

questions :

- Pourquoi n'observe-t-on pas de rayonnement ?
- Pourquoi l'électron ne s'écrase-t-il pas sur le noyau ?



Effet photo-électrique (1883) (Heinrich Hertz 1857-1894)



Lorsqu'on éclaire un métal, dans certaines conditions des électrons sont émis par la surface éclairée.

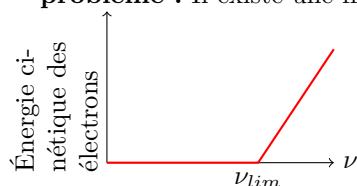
Interprétation : La lumière transfère son énergie aux électrons qui peuvent alors échapper au métal.

problème : Il existe une fréquence *seuil* ν_{lim} en dessous de laquelle aucun électron n'est émis :
Au-delà de ν_{lim} , l'énergie cinétique des électrons est

$$E_c = h\nu - W$$

$h \simeq 6.63 \times 10^{-34}$ Js : Constante de Planck.

W : Constante caractéristique du métal

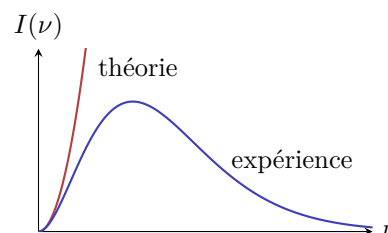


Le spectre du corps noir

Lorsqu'un corps est chauffé, il émet de la lumière. Les lois de la physique classique prévoient un spectre émis de la forme $I(\nu) \propto \nu^2$. Donc $I(\nu)$ diverge vers $+\infty$ lorsque ν augmente. C'est physiquement impossible et en contradiction flagrante avec l'expérience.

On a donné à ce problème le nom de *catastrophe ultraviolette*.

En réalité, $I(\nu) \propto \frac{\nu^3}{\exp(h\nu/kT)-1}$ qui tend vers 0 quand ν tend vers $+\infty$.

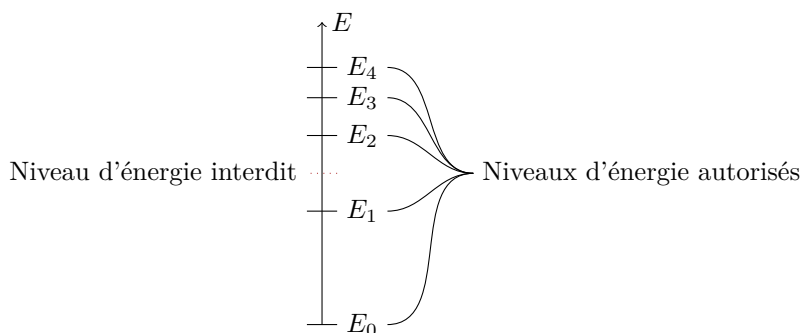


2 Les niveaux d'énergie d'un atome

Pour résoudre le problème de la stabilité des atomes, Niels Bohr (1885–1962) propose en 1913 d'ajouter deux contraintes au modèle initial :

- L'électron ne rayonne pas d'énergie lorsqu'il se trouve sur une **orbite stable**. Ces orbites sont quantifiées (c'est à dire numérotées par un entier n)
- L'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lorsqu'il change d'orbite.

On peut représenter les **niveaux d'énergie** accessibles à un électron dans un atome :



3 Quantification de la lumière : le photon

a Définition

Pour expliquer l'effet photo-électrique, Albert Einstein (1879-1955) a supposé en 1905 que l'énergie lumineuse est transportée par paquets quantifiés, des quanta de lumière.

Ce sont ces paquets d'énergie lumineuse que l'on appelle **photons**.

Pour une lumière monochromatique de fréquence ν , l'énergie d'un photon (paquet d'énergie) est

$$E = h\nu$$

avec $h \simeq 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js} \simeq 4.14 \text{ eVs}$

Application : Calcul de l'énergie d'un photon visible : $E \simeq 2.5 \text{ eV}$

b Absorption et émission de photons

Lorsqu'un électron absorbe un photon de fréquence ν , son énergie augmente de $\Delta E = h\nu$.

Un électron situé sur un niveau d'énergie E_1 ne peut absorber un photon de fréquence ν que s'il existe un niveau d'énergie E_n accessible tel que $E_n - E_1 = h\nu$.

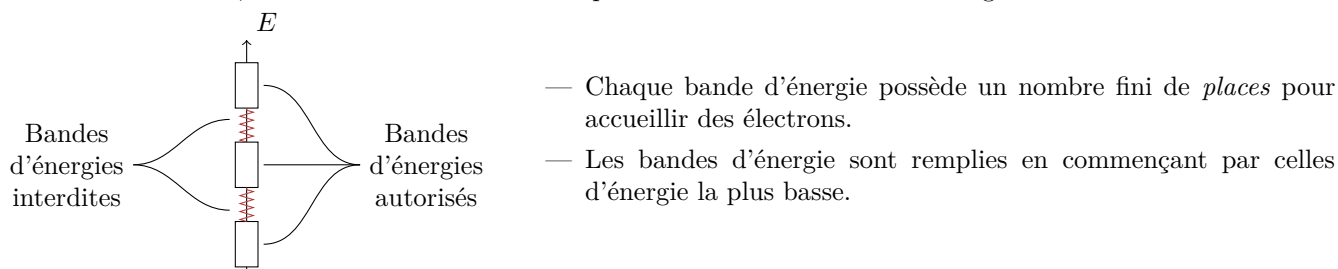
Un électron qui passe d'un niveau d'énergie élevé E_i à un niveau d'énergie plus basse E_j *peut* émettre un photon à la fréquence ν telle que :

$$E_i - E_j = h\nu$$

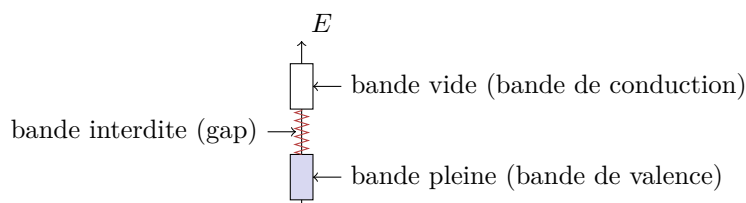
4 Les semi-conducteurs

a La conduction électrique dans les métaux

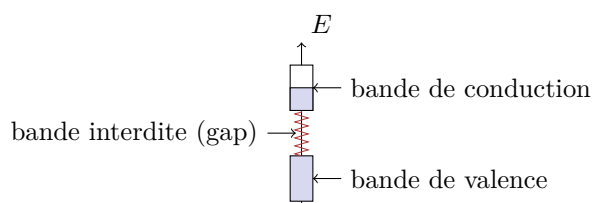
Dans un matériaux, les électrons des atomes se répartissent dans des bandes d'énergies autorisées :



Dans un matériau **isolant**, la dernière bande occupée par les électrons est pleine :

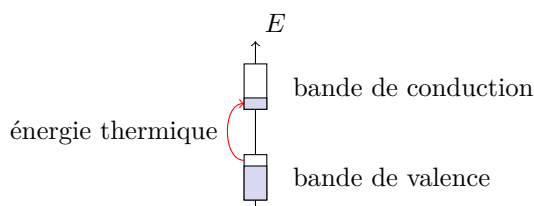


Dans un **conducteur**, la dernière bande occupée n'est pas pleine :

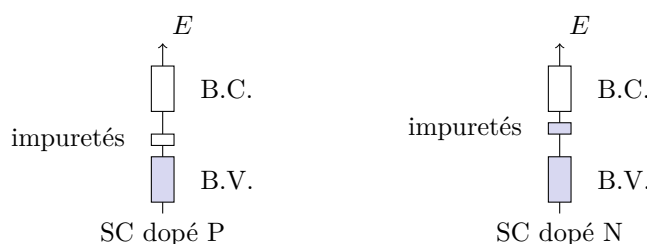


b Les semi-conducteurs

Un semi-conducteur est un isolant dont la largeur de bande interdite est *faible*. Elle est suffisamment faible pour que l'énergie d'agitation thermique suffise à faire passer quelques électrons de la bande de valence dans la bande de conduction :

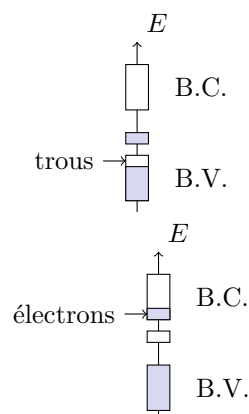


Un semi-conducteur conduit faiblement le courant à température ambiante. Pour augmenter la conductivité d'un semi-conducteur, on peut le **doper**, c'est à dire ajouter des atomes différents dont l'effet est d'insérer une bande autorisée dans la bande interdite. Généralement la bande supplémentaire est très proche de la bande de valence (dopage P) ou de la bande de conduction (dopage N).



Dans un semi-conducteur dopé P, l'énergie thermique est suffisante pour remplir la nouvelle bande d'énergie, la bande de valence peut alors conduire le courant car elle n'est plus pleine. Ce sont les lacunes d'électrons (trous) qui conduisent le courant.

Dans un semi-conducteur dopé N, l'énergie thermique vide complètement le niveau d'impuretés et les électrons de la bande de conduction peuvent conduire le courant.



c La diode électroluminescente (DEL)

Une DEL est l'assemblage d'un SC dopé P avec un SC dopé N, c'est une jonction PN.



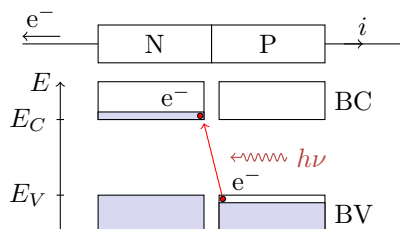
Lorsqu'un électron passe de N à P, son énergie passe de E_C à E_V et il émet un photon d'énergie :

$$E = h\nu = E_C - E_V$$

- La couleur de la lumière émise dépend de la largeur $\Delta E = E_C - E_V$ de la bande interdite ;
- l'intensité de la lumière (nombre de photons) dépend de la quantité d'électrons qui passent de N à P, donc de l'intensité du courant électrique.

d La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une DEL inversée. C'est aussi une jonction PN qui lorsqu'elle reçoit de la lumière fait passer un électron de la BV vers la BC.



Cela a pour effet de générer un courant électrique. La zone P est la borne + du générateur.

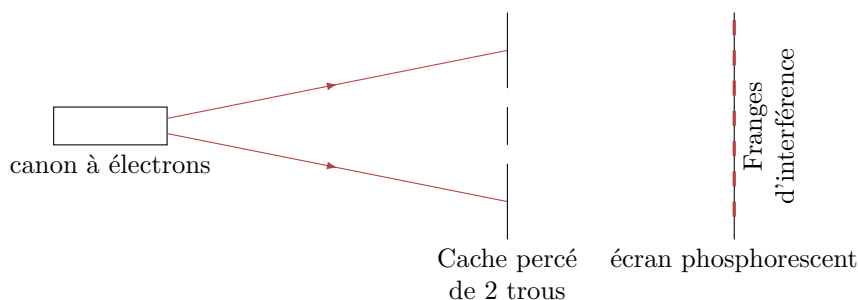
Il faut adapter la largeur de la bande interdite au niveau d'énergie des photons incidents :

$$E_C - E_V = h\nu$$

L'intensité du courant électrique dépend du nombre d'électrons transférés, donc du nombre de photons absorbés et donc de l'intensité lumineuse incidente.

5 Dualité onde-particule pour la matière

a Expérience



Lorsqu'on réalise l'expérience des fentes d'Young avec des électrons, on observe également des interférences, même lorsque les électrons sont envoyés un par un ! (Vidéo des interférences avec des électrons)

b Longueur d'onde de De Broglie (1892-1987)

On peut associer à tout objet matériel de quantité de mouvement $p = mv$ une longueur d'onde λ telle que :

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

remarques :

- Pour un objet macroscopique, $m \simeq 1 \text{ g}$ à une vitesse $v \simeq 1 \text{ m/s}$, on trouve $\lambda \simeq 7 \times 10^{-31} \text{ m}$. Ce qui explique pourquoi on n'observe pas d'effet quantique à l'échelle macroscopique.
- Lorsque v augmente, λ diminue \rightarrow principe du microscope électronique.