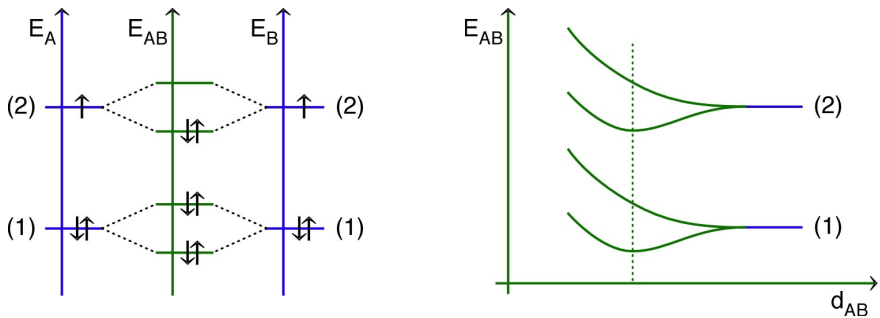


É.C.XI - CONDUCTEURS ET SEMI-CONDUCTEURS

1. Théorie des bandes d'énergie dans les solides

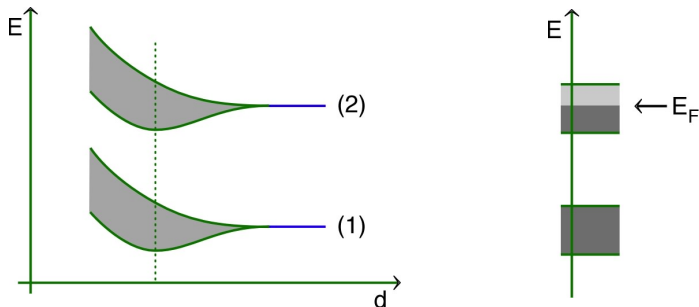
- Lorsque deux atomes sont proches, leurs interactions modifient leurs niveaux (et sous-niveaux) d'énergie électroniques : ceux-ci se dédoublent.

Si les électrons de valence peuvent se placer majoritairement dans un niveau plus bas, cela permet de former une liaison covalente.



Ces niveaux d'énergie dépendent de la distance entre les atomes ; la distance de liaison correspond au minimum de l'énergie des électrons liants.

- Lorsqu'un grand nombre d'atomes sont proches (de l'ordre de 10^{22} dans un gramme de matériau usuel), les niveaux se démultiplient d'autant : cela forme des "bandes d'énergie" comportant tellement de niveaux "infinitement voisins" que la quantification n'y a pratiquement plus d'effet.



On nomme alors “niveau de Fermi” (E_F) le niveau d'énergie jusqu'auquel sont remplis les niveaux d'énergie dans la bande de valence.

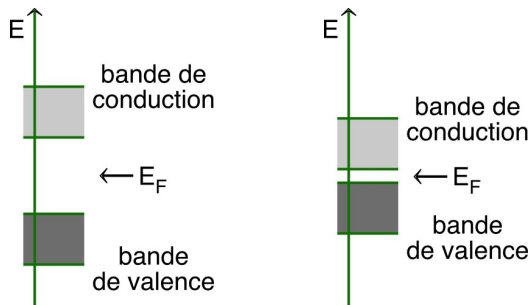
♦ remarque : compte tenu de l'agitation thermique, il y a toujours une petite proportion d'électrons à des niveaux légèrement au dessus du niveau de Fermi (et un autant de places vacantes, ou “trous”, légèrement au dessous).

2. Conducteurs et isolants

- Pour que des électrons se déplacent dans le solide, il faut qu'ils acquièrent un peu d'énergie (cinétique) supplémentaire.

Dans les matériaux pour lesquels la bande de valence est incomplète (niveau de Fermi au milieu), ceci est très facile. C'est le cas général pour les métaux : ces matériaux sont conducteurs du courant électrique (c'est la partie supérieure de la bande de valence qui permet la conduction).

Dans les matériaux pour lesquels la bande de valence est complète (niveau de Fermi en haut), ceci est très difficile : le saut d'énergie minimum autorisé peut être très grand.



Si la zone interdite entre la bande de valence et la bande supérieure (alors nommée “bande de conduction”) est très grande, le matériau est isolant.

Si la zone interdite entre la bande de valence et la bande de conduction n'est pas trop grande ($\Delta E \leq 1 \text{ eV}$), le matériau est “semi-conducteur”. Le silicium et le germanium en sont des exemples classiques.

♦ remarque : par opposition aux semi-conducteurs artificiels, ceux qui le sont naturellement sont nommés semi-conducteur “intrinsèques”.

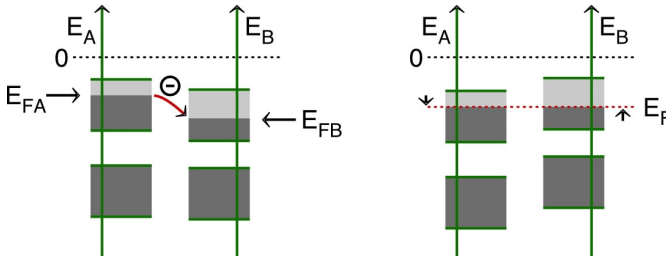
- Dans un conducteur métallique, l'effet principal d'une élévation de température est d'augmenter l'agitation thermique des atomes. Cela gêne les déplacements d'électrons en augmentant le nombre de chocs : la résistance électrique est proportionnelle à la température.

Dans un semi-conducteur, l'effet principal d'une augmentation de l'agitation thermique est de faire passer plus d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction : la résistance électrique décroît comme $e^{\Delta E/k_B T}$ (où la constante k_B de Boltzmann est liée à celle des gaz parfaits : $R = k_B N_A$).

♦ remarque : pour un semi-conducteur, les “trous” de la bande de valence contribuent au courant presque autant que les électrons de la bande de conduction, puisqu'ils permettent à des électrons de la bande de valence de s'y déplacer (les “trous mobiles” se comportent comme des porteurs de charge positifs).

3. Différence de potentiel entre deux conducteurs en contact

- Le travail nécessaire pour extraire un électron d'un conducteur dépend du niveau de Fermi : les éléments plus électronégatifs ont un niveau de Fermi plus bas.



Lorsqu'on met en contact deux métaux, quelques électrons se déplacent d'un métal à l'autre vers les niveaux disponibles de plus basse énergie.

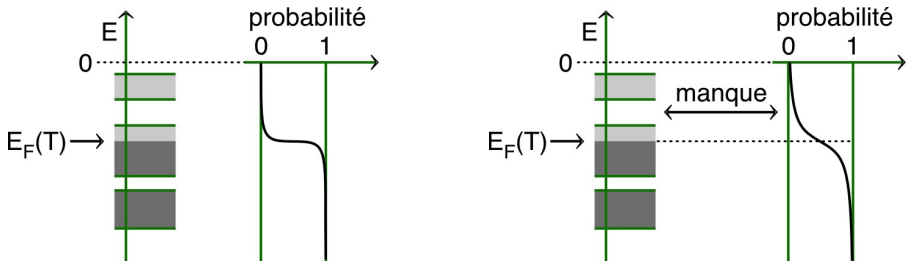
Ces électrons sont très peu nombreux : la répulsion électrique fait que les niveaux de Fermi se rééquilibrent par déplacement des niveaux d'énergie.

- Plus précisément : un électron ajouté se place à un niveau supérieur, donc augmente l'énergie de Fermi, mais extrêmement peu (le nombre de places dans la bande de valence est très grand) ; au contraire, la répulsion entre électrons augmente aussi l'énergie potentielle des autres électrons, donc augmente tous les niveaux d'énergie et aussi le niveau de Fermi.

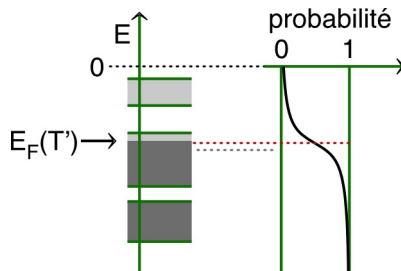
Il apparaît ainsi une différence de potentiel entre les deux métaux en contact (effet Seebeck), telle que $q_e \cdot (V_A - V_B) = E_{FA} - E_{FB}$. Ces tensions sont usuellement de l'ordre de quelques millivolts.

♦ remarque : la charge élémentaire q_e peut être notée e s'il n'y a pas ambiguïté avec une force électromotrice.

- La dissymétrie des bandes d'énergie cause une variation du niveau de Fermi en fonction de la température.



Lorsque la température augmente, l'étalement de la répartition de probabilité des électrons autour de l'énergie de Fermi (des électrons d'énergie inférieure passent à des niveaux supérieurs) est perturbée par l'interdiction de certaines bandes d'énergie.



Si certains électrons doivent pour cela atteindre des niveaux plus élevés, cela augmente l'énergie moyenne, donc aussi le niveau de Fermi.

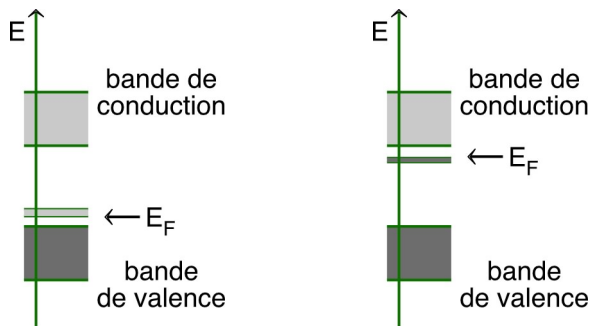
- De ce fait, non seulement la différence de potentiel entre deux métaux en contact dépend de la température, mais le potentiel en différents points d'un même bloc de métal n'est plus uniforme si sa température ne l'est pas.

Ce principe permet de repérer les températures à l'aide d'un thermocouple : circuit formé par association de fils conducteurs de métaux différents.

4. Semi-conducteurs extrinsèques

- En “dopant” un cristal de silicium (tétravalent) avec une très faible proportion (10^{-6} à 10^{-3}) d'atomes de bore (trivalent), cela fait apparaître une petite bande “de conduction” supplémentaire juste au dessus ($\approx 0,01$ eV) de la bande de valence.

♦ remarque : étant donné que le silicium reste nettement prépondérant, on continue d'appeler “bande de valence” celle qui le serait en l'absence du dopant, mais le niveau de Fermi est au voisinage de la bande supplémentaire.



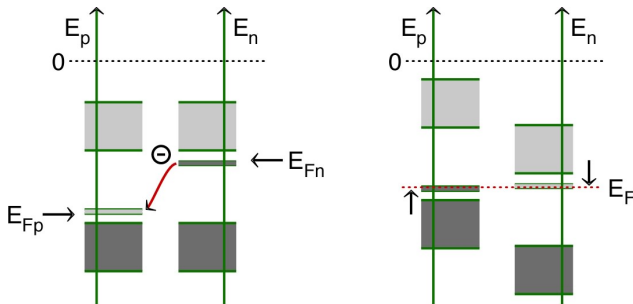
- De façon analogue, en “dopant” un cristal de silicium avec une très faible proportion d'atomes de phosphore (pentavalent), cela fait apparaître une petite bande “de valence” supplémentaire juste au dessous de la bande de conduction.

On augmente ainsi artificiellement le caractère semi-conducteur du silicium, mais surtout on le modifie de façon contrôlée. Les deux types de dopage sont

nommés respectivement de type p (trous en supplément) et de type n (électrons e^- en supplément).

5. Jonction p-n

• Lorsqu'on met en contact deux semi-conducteurs dopés p et n , quelques électrons se déplacent d'un bloc à l'autre vers les niveaux disponibles de plus basse énergie ; il apparaît une différence de potentiel de contact.

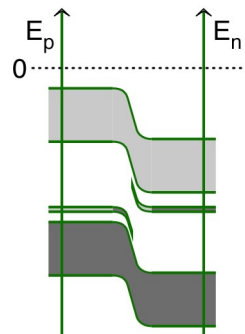
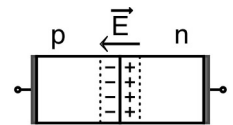


Ces électrons sont très peu nombreux et restent au voisinage de la jonction : la polarisation créée dans cette zone un champ électrique qui limite leur éloignement.

• Mais par ailleurs cette zone est relativement isolante :

- ◊ les e^- qui permettraient la conduction dans le semi-conducteur dopé p n'y sont plus ;
- ◊ les trous qui permettraient la conduction dans le semi-conducteur dopé n sont comblés.

◊ remarque : l'agitation thermique cause une circulation permanente d'électrons, donnant un courant I_0 dans chaque sens (dépendant de la concentration des porteurs et de leurs coefficients de diffusion) ; à l'équilibre les deux sens se compensent.

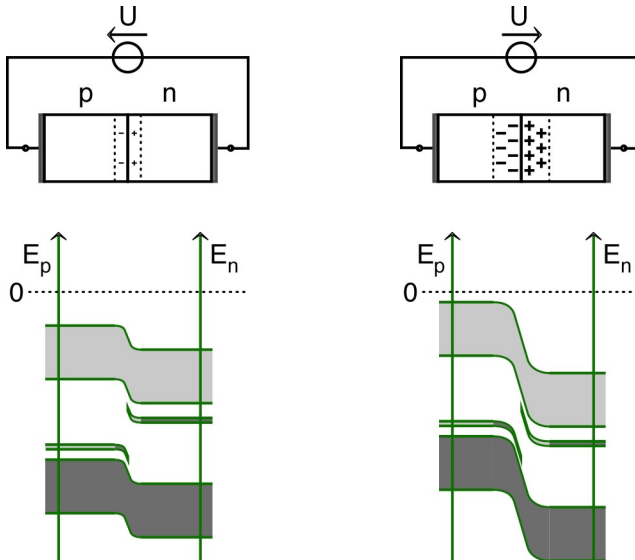


6. Effet redresseur

- Si on impose une tension U entre les deux parties, dans le sens $U_{pn} > 0$, cela tend à atténuer la zone de polarisation (voire à la supprimer).

Dans ces conditions, les électrons circulent en permanence pour tendre à rétablir la polarisation :

- ♦ il circule un courant plus grand $I_0 e^{q_e U_{pn}/k_B T}$ dans le sens direct ;
- ♦ l'agitation thermique cause un courant I_0 dans le sens inverse ;
- ♦ le courant peut s'écrire au total : $I_0 \cdot (e^{q_e U_{pn}/k_B T} - 1)$.



- Si on impose une tension U dans le sens $U_{pn} < 0$, cela tend à augmenter la zone de polarisation. Dans ce cas le courant direct est au contraire d'autant plus atténué.

La diode à jonction peut donc être utilisée pour ne laisser passer le courant que dans un sens (par exemple pour redresser le courant alternatif).

♦ remarque : polarisée en inverse, la diode se comporte comme un condensateur, dont la capacité est réglable car elle dépend de la polarisation imposée.