

APPROCHE DOCUMENTAIRE : LES SEMI-CONDUCTEURS

Les documents 1 à 3 sont issus d'un site de l'université Bordeaux 1 (www.creea.u-bordeaux.fr) ; il présente les propriétés générales des matériaux dits « semi-conducteurs ».

Le document 4 est issu d'un site de l'université du Mans (www.ressources.univ-lemans.fr) ; il évoque la « jonction P-N » qui constitue une application essentielle des semi-conducteurs.

A la suite de la lecture de ces documents, vous répondrez aux questions suivantes (très simples) :

- 1) Convertir en unités SI la gamme de valeur proposée dans le doc.1 pour la conductivité d'un isolant et d'un conducteur. L'ordre de grandeur de la conductivité du cuivre (donné en cours) s'inscrit-il bien dans cette proposition ?
- 2) Justifier, à l'aide du modèle de Drude, pourquoi on observe que la conductivité diminue avec la température pour un conducteur.
- 3) Expliquer pourquoi la conductivité du silicium pur est très faible à 300K, par comparaison à celle du cuivre.
Pourquoi ne peut-on pas se contenter simplement d'augmenter la température pour augmenter la conductivité du silicium?
- 4) Résumer (quelques lignes) comment le dopage P ou N permet d'augmenter sensiblement la conductivité.
Pour étudier la dépendance en température de la conductivité du semi-conducteur pur, peut-on faire le même type de raisonnement qu'à la question 2 ? Même question pour un semi-conducteur dopé.
- 5) La caractéristique courant-tension présentée pour la jonction P-N dans le document 4 vous fait-elle penser à un composant électronique déjà rencontré ?

L'exercice 1 du TD complétera et résumera les connaissances acquises sur les semi-conducteurs.

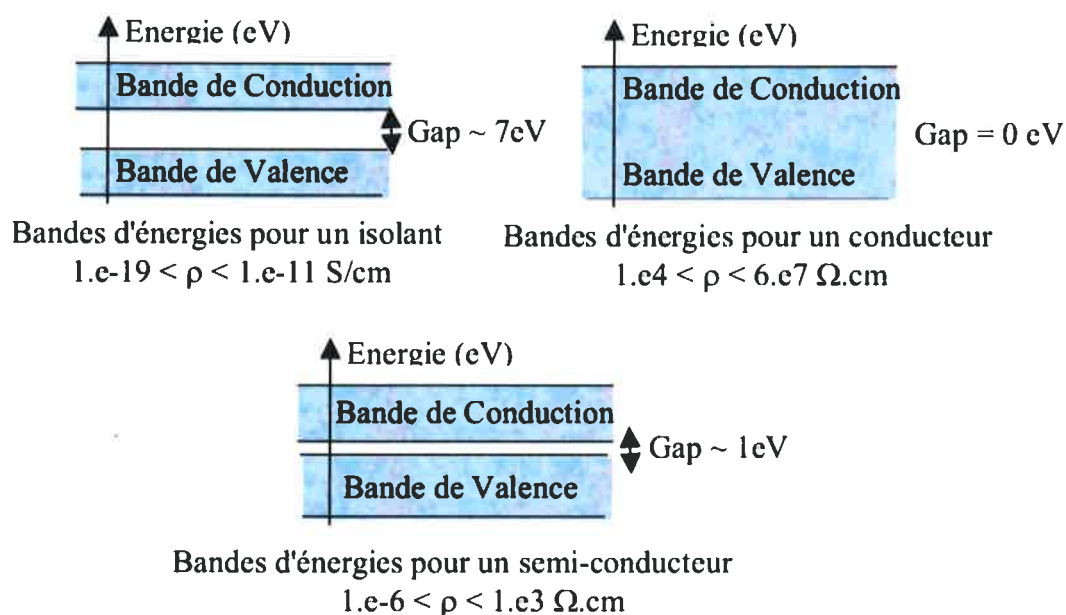
ATTENTION : dans le document 1, la conductivité est notée σ et non γ comme dans le cours.

Par ailleurs, les grandeurs marquées en caractères gras sont des grandeurs vectorielles.

Document 1 :

Bandes d'énergie et porteurs libres dans un semi-conducteur

On appelle semi-conducteur un matériau électriquement intermédiaire entre isolant et conducteur. En effet, les valeurs usuelles de la conductivité (σ) des isolants sont comprises entre $1.e-11$ et $1.e-19$ S/cm et celles des conducteurs entre $6.e7$ et $1.e4$ S/cm. Il existe pourtant des corps qui ont une résistivité intermédiaire comprise entre $1.e3$ et $1.e-6$ S/cm, on les appelle des **semi-conducteurs**. On sait qu'au sein des structures cristallines de la matière, les électrons ont des énergies distinctes qui appartiennent à certains ensembles de valeurs appelées **bandes d'énergies**. Les bandes de faible énergie correspondent à des électrons participant au maintien de la structure cristalline, ce sont les électrons dits de **Valence**. Les bandes de hautes énergies correspondent à des électrons quasi "libres" de se détacher de la structure et qui par conséquent peuvent participer à une **conduction** électrique. On distingue isolants et conducteurs par la différence d'énergie qu'il existe entre ces bandes, appelée le "**gap**" (le fossé).



- Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide, le fait d'apporter assez d'énergie pour y faire passer des porteurs en masse s'appelle le "**claquage**" et c'est un phénomène généralement destructif.
- Dans les conducteurs, la conductivité diminue avec la température puisque l'agitation thermique pénalise le mouvement organisé des porteurs libres.
- Dans les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique, ainsi le semi-conducteur "intrinsèque" en tant que mauvais conducteur ou mauvais isolant a lui une conductivité qui augmente avec la température...

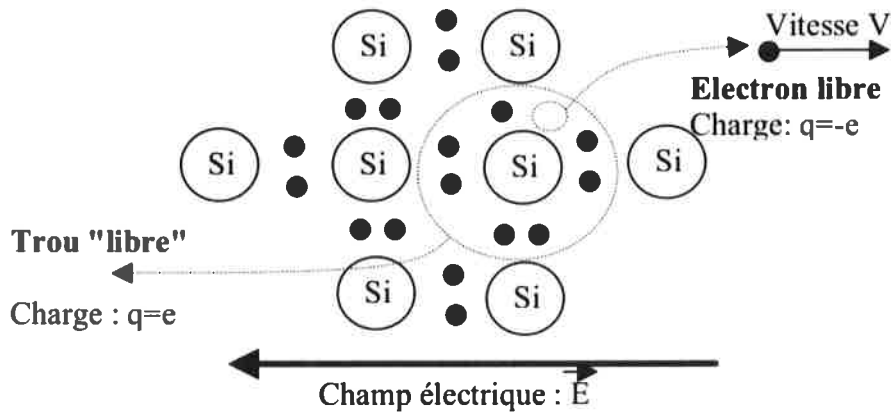
Les matériaux semi-conducteurs naturels, dits "intrinsèques", sont : le **Silicium (Si)** et le **Germanium (Ge)**.

Document 2 :

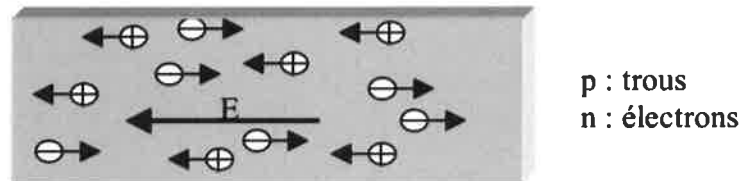
Conduction dans les semi conducteurs intrinsèques (= purs)

Dans un semi-conducteur intrinsèque, quand un électron est muni d'une énergie suffisante à l'extraire de la structure cristalline, il devient un "**porteur libre**" qui peut être mis en mouvement en présence d'un champ électrique. Il laisse ainsi derrière lui un ion représentant une charge positive que l'on appelle un "**trou**". Si un électron voisin se libère et vient se recombinaison avec le trou, il laisse derrière lui une nouvelle charge positive. On peut ainsi considérer que le trou s'est déplacé par combinaisons d'électrons.

La structure cristalline du Silicium pur est la suivante :



Ainsi, dans la matière, le courant généré par le champ électrique sera la somme du courant d'électrons et du courant de trous.



$$J = J_p + J_n$$

L'aptitude à la conduction électrique est chiffrée par la conductivité σ du matériau qui est l'inverse de la résistivité ($\sigma = 1/\rho$) et qui relie la densité de courant J au champ électrique E .

$$J = \sigma \cdot E$$

Or, pour chaque type de porteurs : $J = q \cdot n \cdot V$

où V est la vitesse moyenne des porteurs, n la densité des porteurs libres.

V est lié au champ électrique par un coefficient appelé la mobilité.

$$V = \mu \cdot E$$

Donc : $J = q \cdot n \cdot \mu \cdot E$ pour chaque type de porteurs.

Dans le cas d'une conduction dite "bipolaire", c'est à dire avec deux types de charges (électrons et trous) et avec n et p les concentrations respectives en porteurs libres :

$$J = (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot e \cdot E$$

et

$$\sigma = (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot e$$

Si le semi-conducteur est extrêmement pur, $n = p$.

Δ la résistivité, notée ici ρ , n'a rien à voir avec la densité volumique de charge ρ .

La conductivité du silicium intrinsèque est donc liée essentiellement au nombre de porteurs libres qui lui varie avec la température.

La loi de variation de n est : $n^2 = A.T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k.T}\right)$

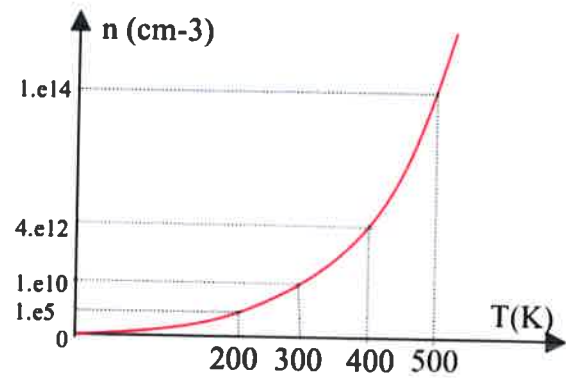
où :

E_g est la hauteur du gap = 1.1eV

k est la constante de Boltzmann (8.62.E-5 eV)

T est la température en Kelvin

On représente l'évolution de la concentration des porteurs libres en fonction de la température sur la courbe ci-contre :

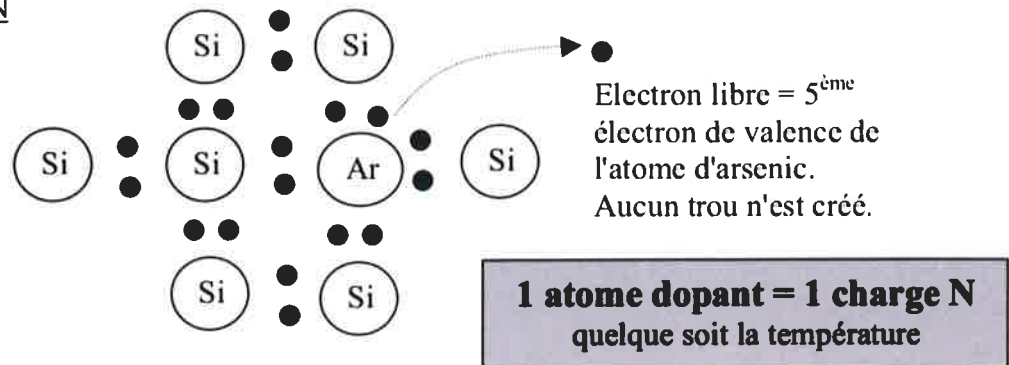


Document 3 :

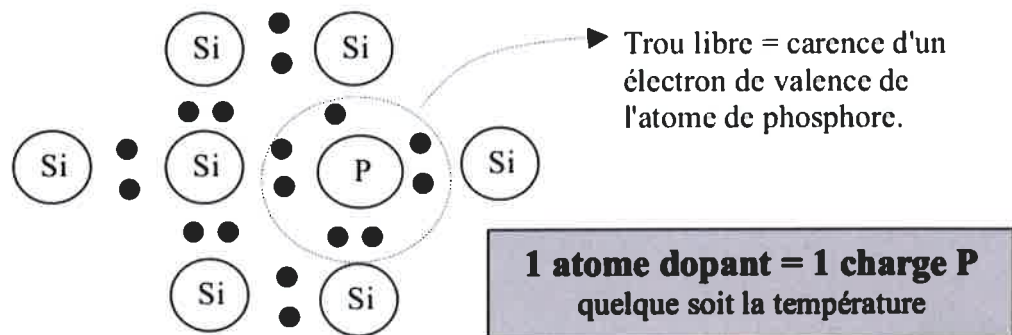
Conduction dans les semi conducteurs extrinsèques ou "dopés"

Pour palier la forte dépendance à la température des semi conducteurs intrinsèques, on peut "**doper**" ceux-ci, c'est à dire insérer dans la structure cristalline des atomes ayant soit 3 soit 5 électrons de valence. Il y aura donc respectivement autant de trous et d'électrons libres que d'atomes apportés, et ce quelque soit la température. On peut ainsi fixer la concentration en porteurs libres c'est à dire la conductivité. Si on dope avec des atomes "donneurs" d'électrons on parle de **dopage de type N**, si on dope avec des atomes accepteurs d'électrons on parle de **dopage de type P**.

- Dopage de type N

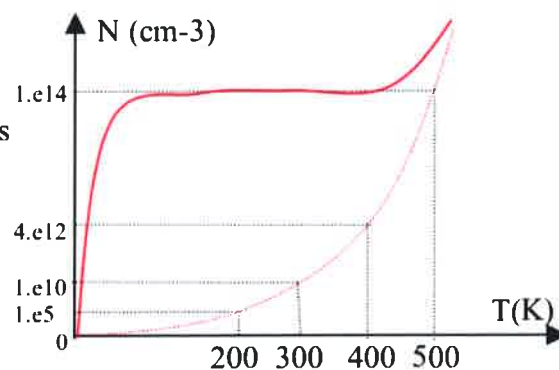


- Dopage de type P



Ainsi, en dopant à une concentration donnée, on impose une conductivité donnée jusqu'à une certaine température.

Exemple d'un dopage de type N à une concentration $N=1.E14 \text{ cm}^{-3}$, en pointillé l'évolution de la concentration des porteurs libres "intrinsèques" dus à l'agitation thermique.



Ainsi, pour chaque cas de dopage, on distinguera les porteurs dits "**majoritaires**" c'est à dire apportés par le dopage et les porteurs "**minoritaires**" c'est à dire du à la température uniquement.

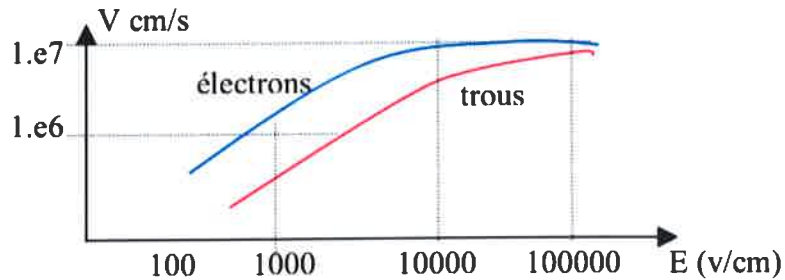
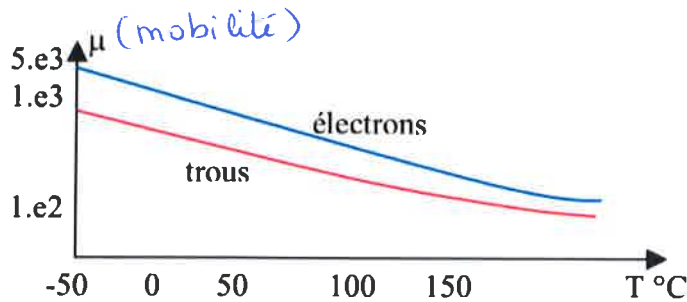
DOPAGE de type P : Trous majoritaires électrons minoritaires

Conductivité fixée : $\sigma \approx \mu_p \cdot P \cdot e$ avec $P = \text{cte}$

DOPAGE de type N : Electrons majoritaires trous minoritaires

Conductivité fixée : $\sigma \approx \mu_n \cdot N \cdot e$ avec $N = \text{cte}$

Pour finir, les figures suivantes montrent l'influence du champ électrique et de la température sur la vitesse moyenne des porteurs, c'est à dire l'évolution de la mobilité.



Pour résumer :

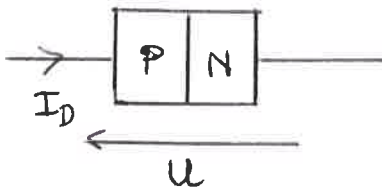
La conductivité croît avec la concentration N ou P et diminue avec la température et avec le champ électrique à partir de 10000 V/cm

NB : On remarquera que la mobilité des électrons est toujours supérieure à celle des trous.

Document 4 :

Une jonction P-N est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N.

On relève la caractéristique courant - tension de la jonction.



En dessous du seuil V_S le courant est très faible. Au-delà, on montre que le courant j_{jonc} est lié au courant de saturation par :

$$I_D = I_{\text{sat}} \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Le courant I_{sat} est appelé courant inverse car si la jonction est polarisée en inverse ($V < 0$) $I_D = -I_{\text{sat}}$. Ce courant résulte du débit des charges (trous thermogénérés et électrons) qui traversent la jonction sous l'action du champ électrique.

