

Physiques des semi-conducteurs et des composants

A.U : 2021/2022

Enseignante: Mme Rabia Benabderrahmane

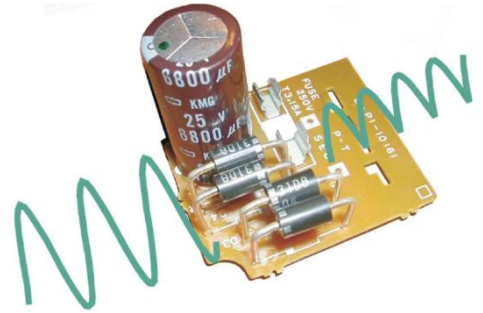
Objectifs

- ✓ Les composants à base de semi-conducteurs sont omniprésents dans notre vie
- ✓ Ils sont à la base de tous les composants électroniques et optoélectroniques qui entrent dans les dispositifs informatiques, de télécommunications, de télévision, dans l'automobile et les appareils électroménagers, etc...

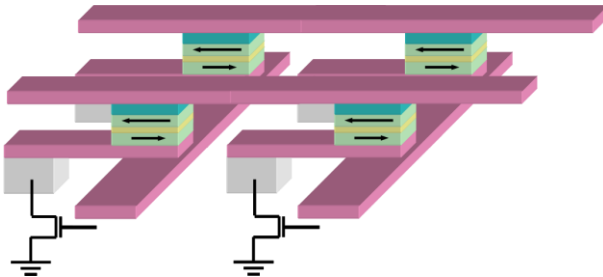
- Têtes de lecture:



- Composants électroniques:



- Mémoires magnétiques:



Historique

- 1833 : Michael Faraday remarque l'augmentation du pouvoir conducteur de certains métaux lorsque l'on augmente la température, contrairement aux métaux classiques dont la résistivité augmente avec la température.
- 1839 : Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. Il constate une différence de potentiel en éclairant le point de contact entre un conducteur et un électrolyte.
- 1879 : Edwin Herbert Hall découvre une différence de potentiel dans le cuivre dans la direction perpendiculaire au courant et au champ magnétique.
- 1947 : John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain découvrent l'effet transistor.
- 1947 : Herbert Mataré et Heinrich Welker développent, le premier « transistor français » réellement opérationnel en même temps des travaux des chercheurs américains, entre 1945 et 1948.
- 1951 : Herbert Mataré fonde la première compagnie au monde à proposer sur le marché des diodes et des transistors : Intermetall à Düsseldorf.
- 1954 : Fabrication des premiers transistors en silicium.
- 1958 : Réalisation du premier circuit intégré par Jack Kilby.
- 1961 : Théorie moderne des semi-conducteurs. Kenneth Geddes Wilson décrit les semi-conducteurs comme isolant à faible bande interdite.

- ❑ Le premier transistor, appelé Transistor à contact, a été inventé par John Bardeen et Walter Brattain en 1947 au laboratoire de physique de la société BELL (Figure 1(a)).
- ❑ En 1948, Herbert Mataré et Heinrich Welker ont inventé aussi le transistor à contact en France. Ce transistor est nommé « Transistron » (Figure 1(b)).
- ❑ William Schockley a proposé en 1948 le transistor à jonction ou bipolaire (Figure 1(c)).

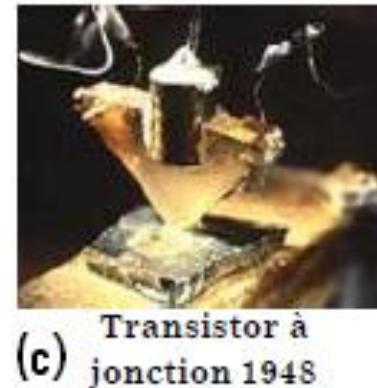
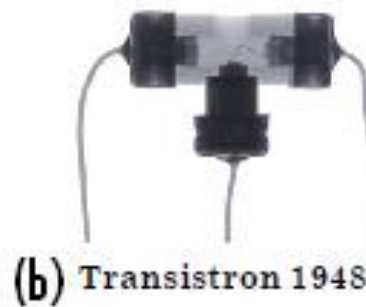
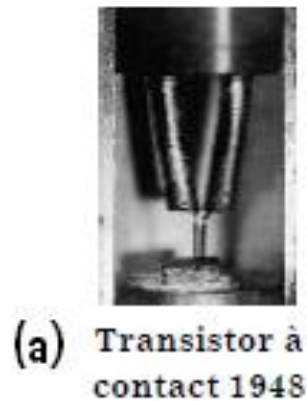


Figure 1 : Les premiers transistors

Les transistors bipolaires ont été intégrés dans les centraux téléphoniques, les calculateurs, les radios



1953 – calculateur
(93 transistors + 550 diodes)



1954 : première radio
à transistors.

Figure 2 : Les premières applications du transistor bipolaire

Chapitre I:

Généralités sur les semi-conducteurs

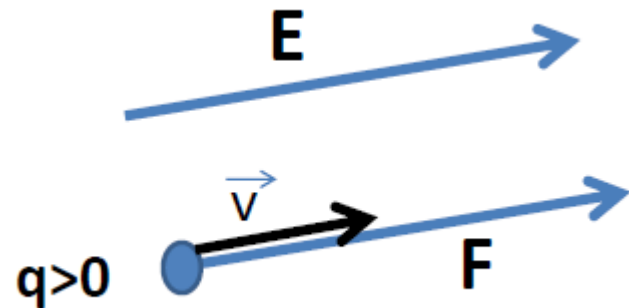
I. Conductivité électrique des matériaux:

1. Action d'un champ électrique sur un système de charges:

a) Charge ponctuelle q :

$$F = q.E = m.a = m.\frac{dv}{dt}$$

$$dv = \frac{q}{m}.E.dt \quad \Longrightarrow \quad v = \mu.E$$



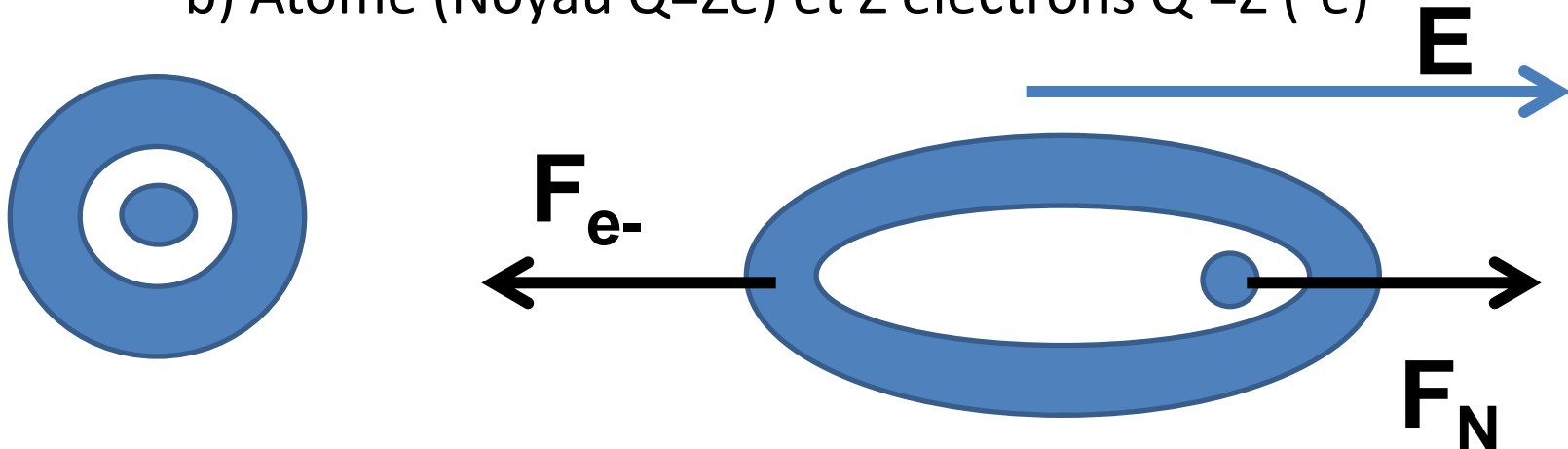
- 1) Action d'un champ électrique sur un système de charges.

a) Charge ponctuelle q :

$$F = q E = m a = m dv/dt$$

$$v = \mu E$$

b) Atome (Noyau $Q=Ze$) et Z électrons $Q'=Z (-e)$



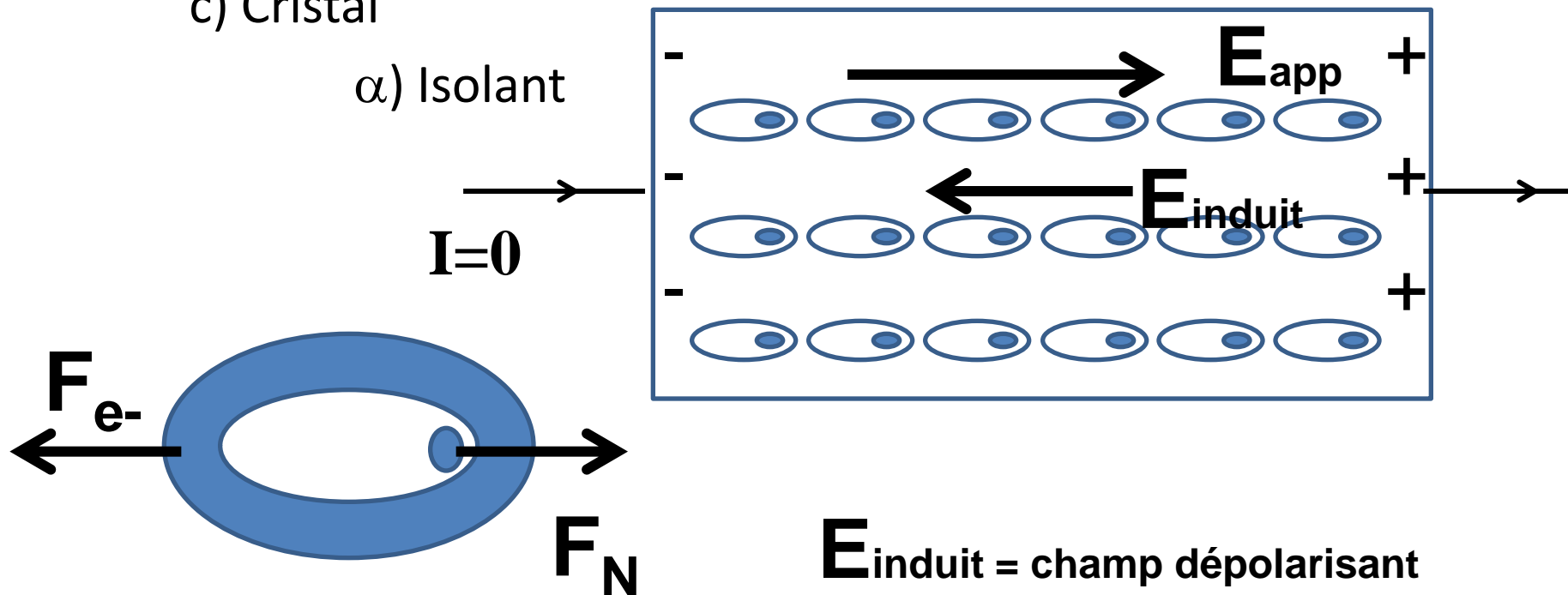
- 1) Action d'un champ électrique sur un système de charges.

a) Charge ponctuelle q : $F=q E$

b) Atome neutre (Noyau $Q=Ze$) et Z électrons $Q'=Z (-e)$

c) Cristal

α) Isolant



- 1) Action d'un champ électrique sur un système de charges.

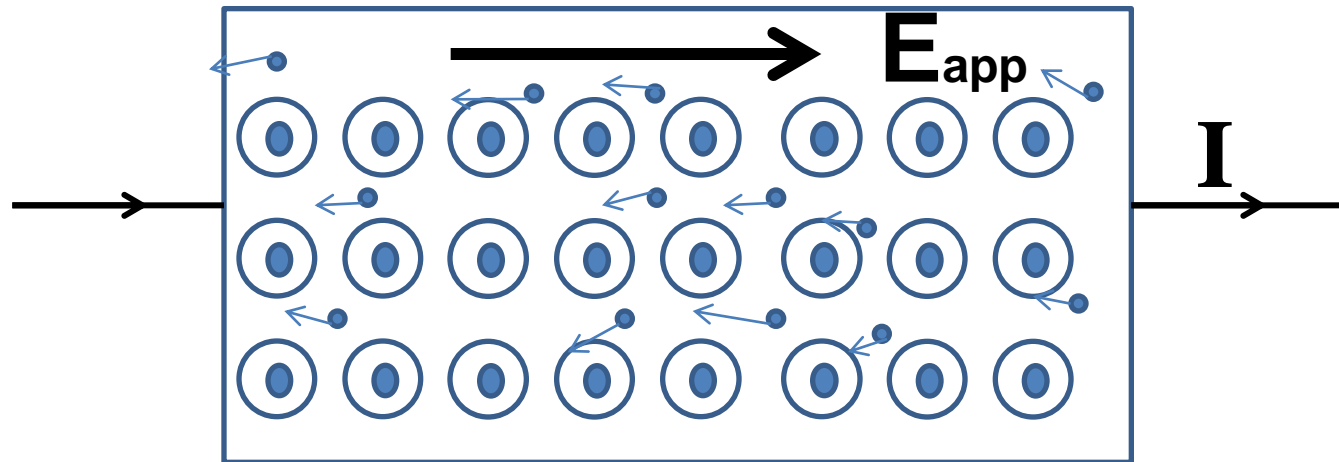
a) Charge ponctuelle q : $F=q E$

a) Atome neutre (Noyau $Q=Ze$) et Z électrons $Q'=Z (-e)$

c) Cristal

α) Isolant

β) Conducteur



II. Expression de la Conductivité électrique

- Charges liées : pas de passage de courant
- Charges “libres” (mobiles) : Passage de courant dû au déplacement des charges sous l'effet d'un champ électrique

Expression de la conductivité:

$$J = \rho v = (ne) (\mu E) = ne\mu E = \sigma E$$

$$\sigma = ne \mu \text{ (S/cm)}$$

III. La conductivité des matériaux

La **conductivité électrique** des solides est une propriété qui est due à la présence d'électrons libres se déplaçant dans le milieu et de générant ainsi un courant électrique.

L'étude des solides purs et bien cristallisés montre que les cristaux se séparent en deux grandes familles au voisinage du zéro absolu (-273 °C) :

- **les métaux conducteurs** de l'électricité, qui contiennent un grand nombre d'électrons libres,
- **les isolants**, où tous les électrons participent à des liaisons chimiques et sont donc fortement liés.

Certains isolants deviennent conducteurs à plus haute température, en particulier s'ils contiennent des impuretés, des défauts cristallins ou des défauts de stœchiométrie (écart par rapport à la composition chimique nominale) ; ce sont par définition **les semi-conducteurs**.

□ Valeurs des conductivité des matériaux

- Selon leurs conductivités, les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes que sont:

les isolants:

$$\sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$$

(diamant et polymère téflon : 10^{-14} S/cm),

les semi-conducteurs :

$$10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$$

(silicium 10^{-5} S/cm à 10^3 S/cm),

et

les conducteurs:

$$\sigma > 10^3 \text{ S/cm}$$

(argent 10^6 S/cm).

Un semi-conducteur est donc un cristal qui est isolant s'il est pur et au zéro absolu, et dont la conductivité électrique est due à l'agitation thermique, à des impuretés ou à différents types de défauts.

C'est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique est suffisamment importante sous certaines conditions.

IV. Bandes d'énergie dans les matériaux

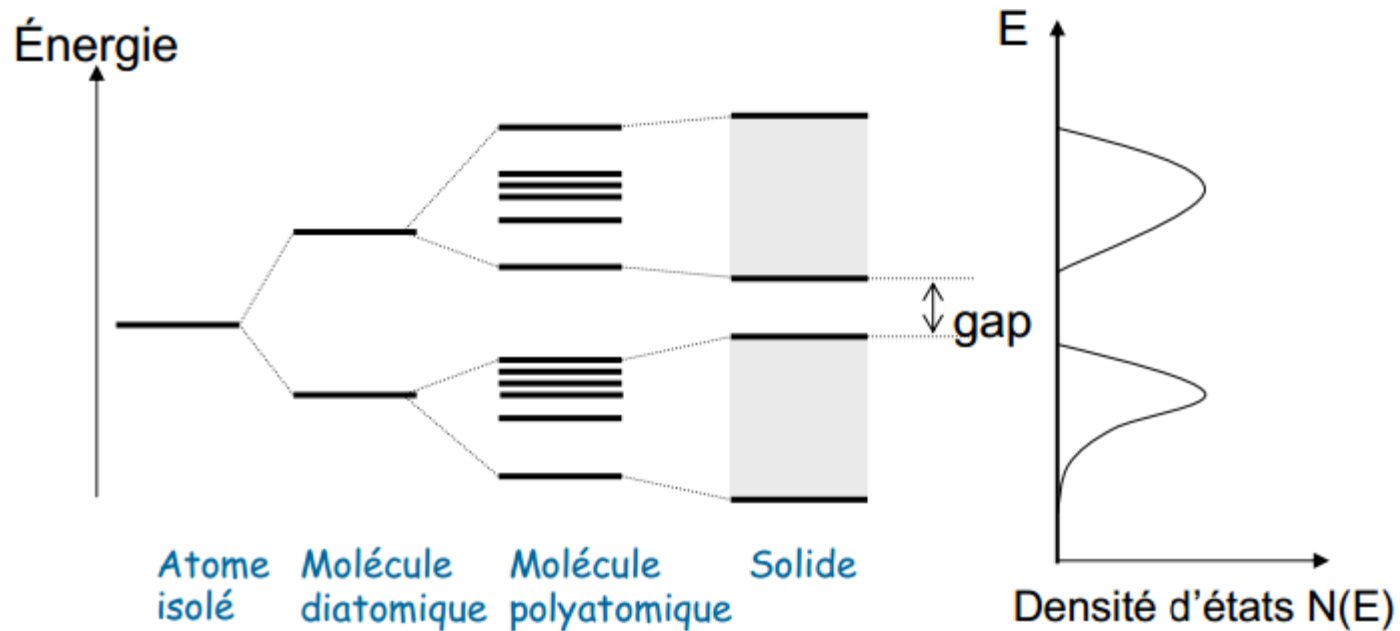
Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé, en physique quantique des solides, à l'aide de la théorie des bandes d'énergie.

□ Notions de Bandes d'énergie

Considérons un atome de silicium Si isolé,

- Les niveaux énergétiques de ses électrons sont discrets (voir le modèle de Bohr pour l'hydrogène).
- Lorsque l'on rapproche de ce dernier un atome identique → les niveaux énergétiques discrets de ses électrons se scindent en deux sous l'interaction réciproque des deux atomes.
- Plus généralement, lorsque l'on approche N atomes, les niveaux énergétiques se scindent en N niveaux.

Ces N niveaux sont très proches les uns des autres et si la valeur de N est grande, ce qui est le cas pour un cristal, ils forment une bande d'énergie continue. La notion de rapprochement des atomes est donnée par la distance inter-atomique d .

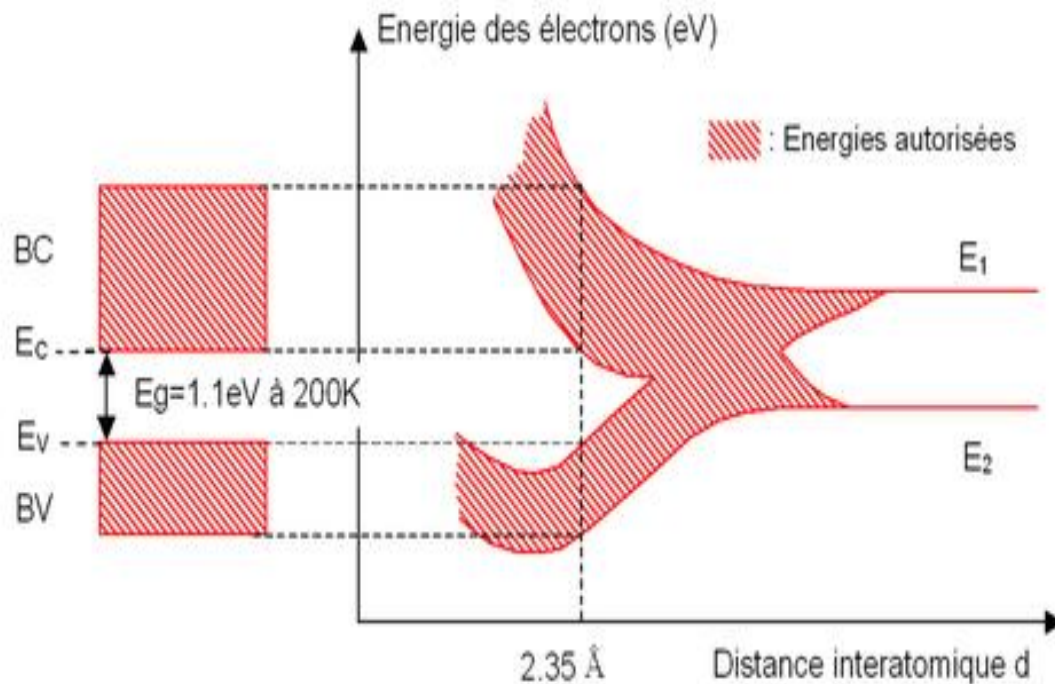


bandes d'énergie

- La distribution en énergie n'est pas uniforme
- $N(E) = 0$ zone interdite aux électrons (gap)

❑ Bandes d'énergie

Considérons des atomes de silicium arrangés aux nœuds d'un réseau périodique, mais avec une maille très grande de telle manière que les atomes puissent être considérés comme isolés. Les deux niveaux les plus énergétiques sont repérés par E_1 et E_2 . Rapprochons les atomes les uns des autres, les états énergétiques électroniques se scindent et forment deux bandes continues appelées **bande de conduction BC** et **bande de valence BV**.



□ Gap d'un semi-conducteur

Pour les électrons d'un cristal de silicium ($d_0=2,35 \text{ \AA}$), on constate qu'il existe deux bandes continues d'énergie (BC et BV) et que ces bandes sont séparées par **une bande interdite** d'énergie inaccessible aux électrons. Cette région interdite est appelée « **gap** » et **sa largeur E_g** est caractéristique du matériau.

Notons que l'énergie du bas de la bande de conduction est notée EC et que celle du haut de la bande valence est notée EV ainsi nous avons l'égalité **$E_g=EC-EV$** . Précisons que les bandes continues d'énergie BC et BV ne sont qu'une représentation des énergies accessibles par les électrons, ceci ne présage en rien de l'occupation effective de ces bandes par ces derniers.

Le modèle de « Bandes d'énergie » stipule qu'un électron dans un solide ne peut prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles que l'on nomme « bandes », plus spécifiquement *bandes permises*, qui sont séparées par une *bande d'énergie interdites* ou gap.

□ Isolant, semi-conducteur, conducteur

- ✚ Les propriétés électriques d'un matériau sont fonction des populations électroniques des différentes bandes permises. La conduction électrique résulte du déplacement des électrons à l'intérieur de chaque bande.

1^{er} cas:

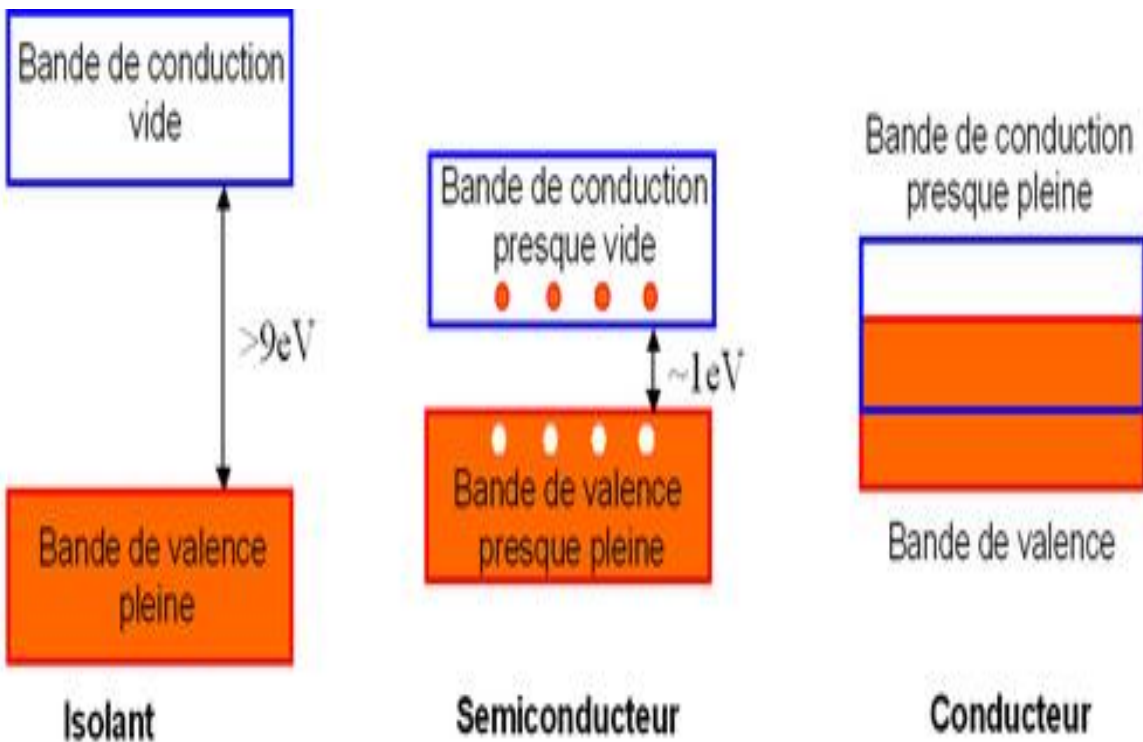
- ✚ Considérons à présent une bande d'énergie vide, il est évident de par le fait qu'elle ne contient pas d'électrons, elle ne participe pas à la formation d'un courant électrique.
- ✚ Il en est de même pour une bande pleine. En effet, un électron ne peut se déplacer que si il existe une place libre dans sa bande d'énergie. Ainsi, un matériau dont les bandes d'énergie sont vides ou pleines est un **isolant**.
- ✚ Une telle configuration est obtenue pour des énergies de gap supérieures à $\sim 9\text{eV}$, car pour de telles énergies, l'agitation thermique à 300K, ne peut pas faire passer les électrons de la bande de valence à celle de conduction par cassure des liaisons électronique.
Les bandes d'énergie sont ainsi toutes vides ou toutes pleines.

2ème cas:

la bande de conduction est vide mais le gap est plus faible. Le solide est donc isolant à température nulle, mais une élévation de température permet de faire passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction. La BC est légèrement peuplée d'électrons et la BV est légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de « places vides » pour une bande presque pleine, la conduction peut être qualifiée de « mauvaise ». La conductivité augmente avec la température : c'est la caractéristique d'un **semi-conducteur**.

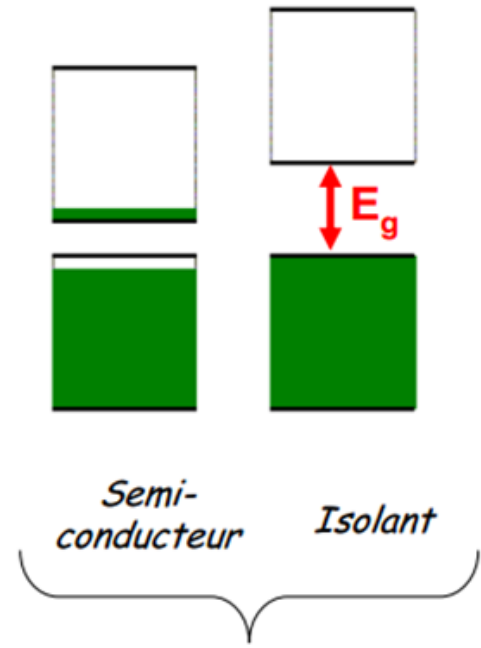
3ème cas:

l'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap. La bande de conduction est alors partiellement pleine (même aux basses températures) alors un faible champ électrique peut faire passer un électron aux niveaux d'énergies supérieurs, sans dépenser beaucoup d'énergie, le solide est alors **conducteur**. Et ainsi la conduction du matériau est « élevée ».



Représentation des bandes d'énergie

Énergie

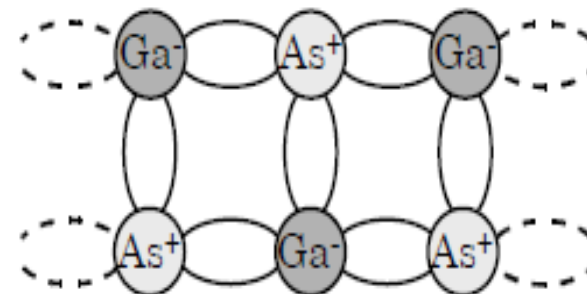
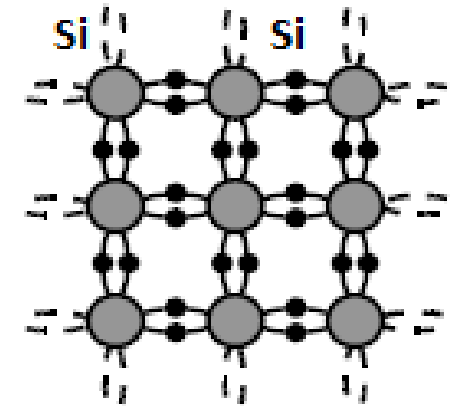


selon la taille du gap E_g

V. Types des semi-conducteurs

❑ Semi-conducteur composé et non composé

| Colonne | | Semi-conducteur |
|---------|-------------|---|
| IV | | Ge, Si |
| III-V | binaire | GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb |
| | ternaire | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$ |
| | quaternaire | $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ |
| II-VI | binaire | CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS |
| | ternaire | $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ |



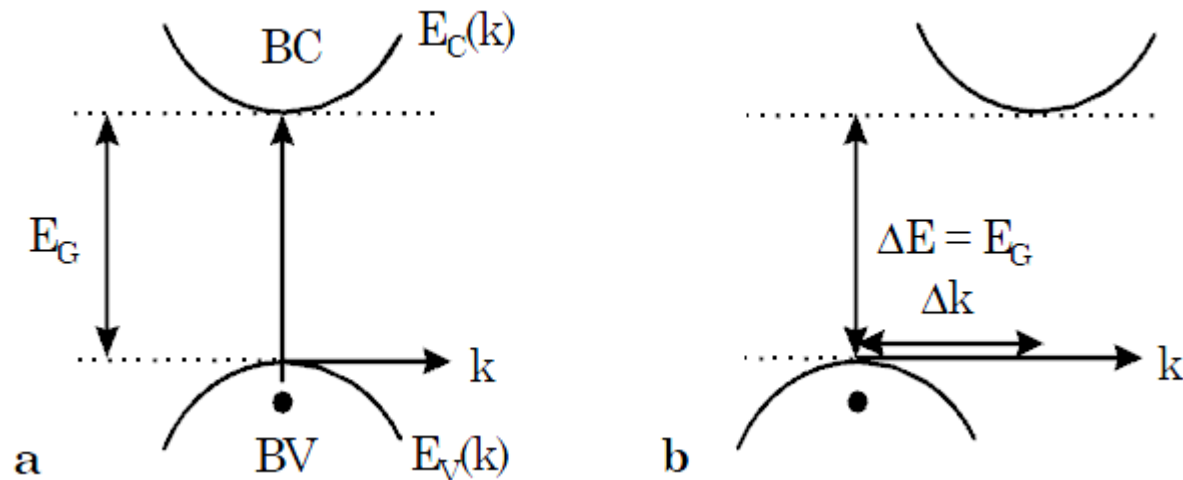
Les différentes familles des semi-conducteurs

| | | III | IV | V | VI | VII |
|----|----|-----|----|----|----|-----|
| | | B | C | N | O | F |
| I | II | Al | Si | P | S | Cl |
| Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br |
| Ag | Cd | In | Sn | Sb | Te | I |
| Au | Hg | Tl | Pb | Pb | Po | At |

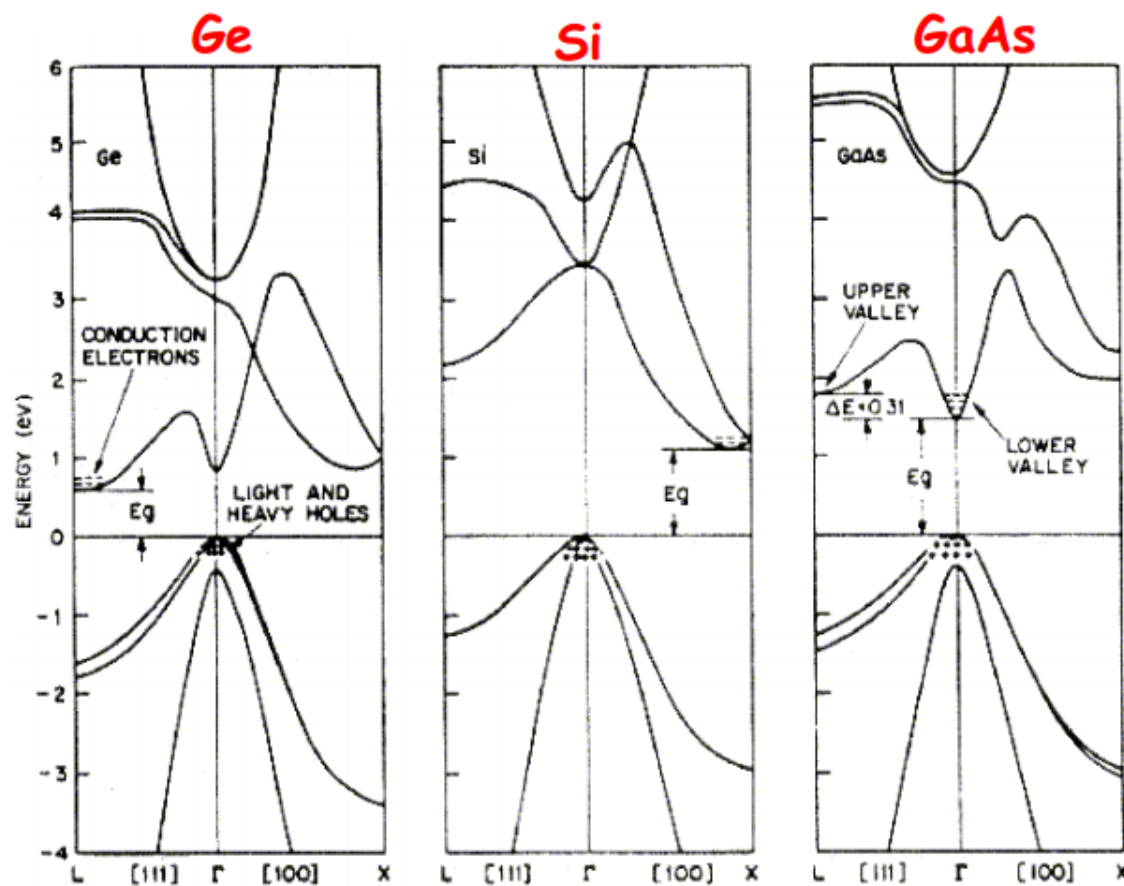


❑ Semi-conducteur à gap direct ou indirect

Les courbes $E_{c,v}(\vec{k})$ dites aussi "relations de dispersion" où E_c est le bas de la bande de conduction, E_v le haut de la bande de valence et \vec{k} le vecteur d'onde associé à un électron (quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v} = \hbar\vec{k}$) font apparaître deux types de semi-conducteur : ceux pour lesquels minimum de E_c et maximum de E_v se produisent pour la même valeur de \vec{k} , que l'on appellera SC à gap direct, et les autres appelés SC à gap indirecte.



La nature du gap joue un rôle fondamental dans l'interaction du semi-conducteur avec un rayonnement électromagnétique (en particulier lumineux), et donc dans le fonctionnement des composants utilisés en optoélectronique. On peut remarquer, pour l'instant, que dans un SC à gap direct un électron du haut de la BV qui acquière une énergie E_G passe dans la BC sans changer de quantité de mouvement ($\Delta p = \hbar \Delta k = 0$) ce qui n'est pas le cas dans un SC à gap indirect.



On rappelle aussi que lors de toute transition entre niveaux d'énergie, les lois de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement doivent s'appliquer et que la quantité de mouvement associée à un photon :

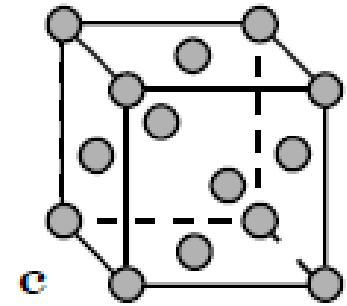
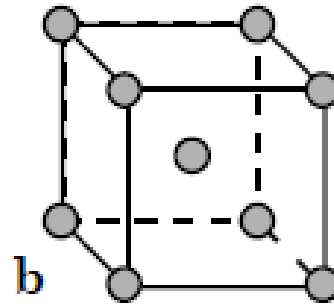
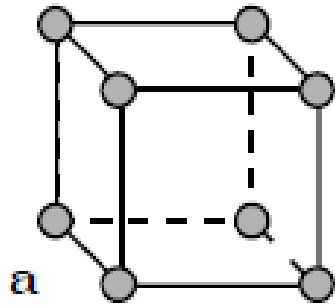
$$p_{\text{ph}} = mc = \frac{mc^2}{c} = \frac{E_{\text{ph}}}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} = \hbar k_{\text{ph}}$$

est typiquement 10^3 fois plus petite que celle correspondant aux variations Δk nécessaires dans un SC à gap indirect. Ainsi les photons ne peuvent pas y assurer seul le transfert de quantité de mouvement lors des transitions $BC \leftrightarrow BV$.

□ Structure des semi-conducteurs

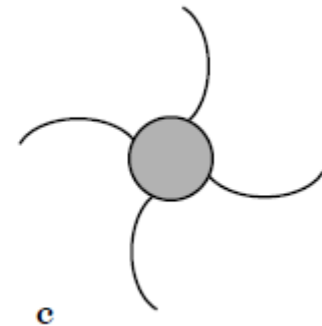
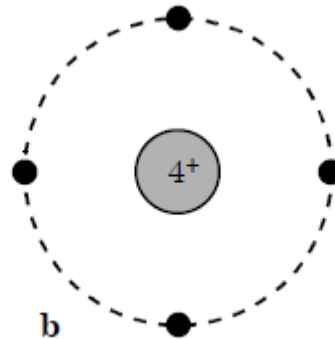
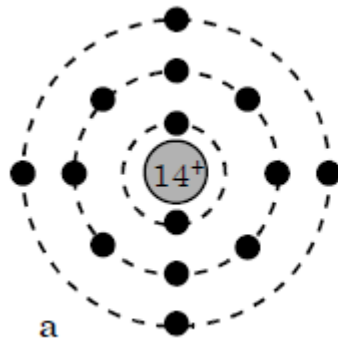
- On peut classer les matériaux généralement et en particulier les semi-conducteurs en:
 - Les matériaux cristallins: les atomes sont rangées régulièrement aux nœuds d'un réseau périodique. La maille ou motif élémentaire se répète régulièrement.
 - Les matériaux amorphes: les atomes ne sont pas ordonnés sur
- Un cristal peut être présenté à partir d'une cellule de base qui est répétée périodiquement formant ainsi le réseau cristallin.
- On peut définir sept systèmes cristallins comme le système cubique.

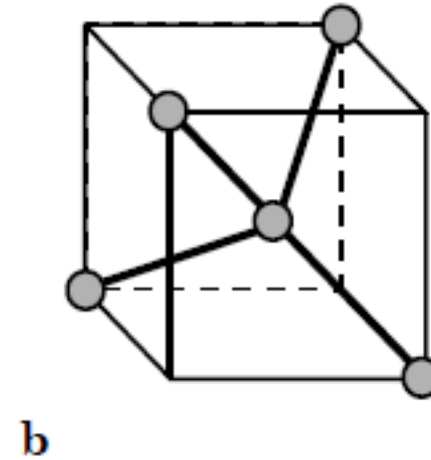
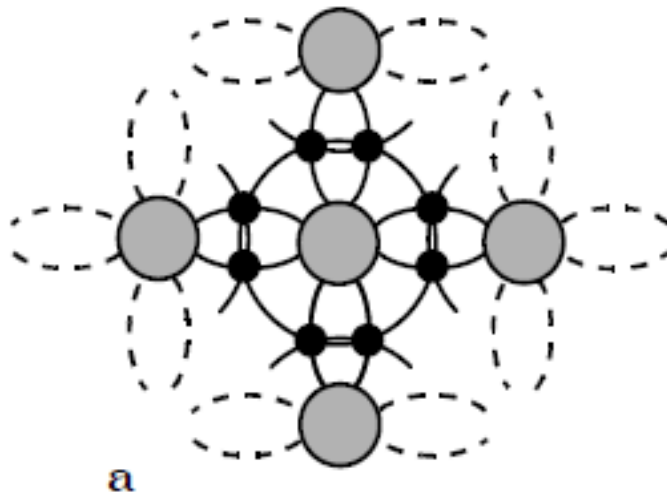
✚ La plupart des semi-conducteurs cristallisent selon le système cubique. On y distingue trois réseaux différents:



a. Cubique simple. b. Cubique centré. c. Cubique face centrée.

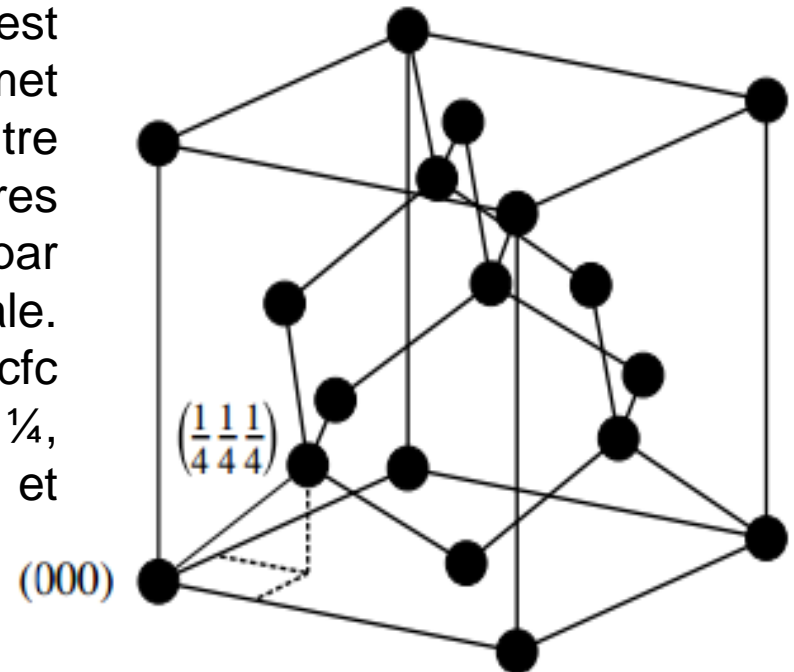
✚ Cas du cristal silicium:





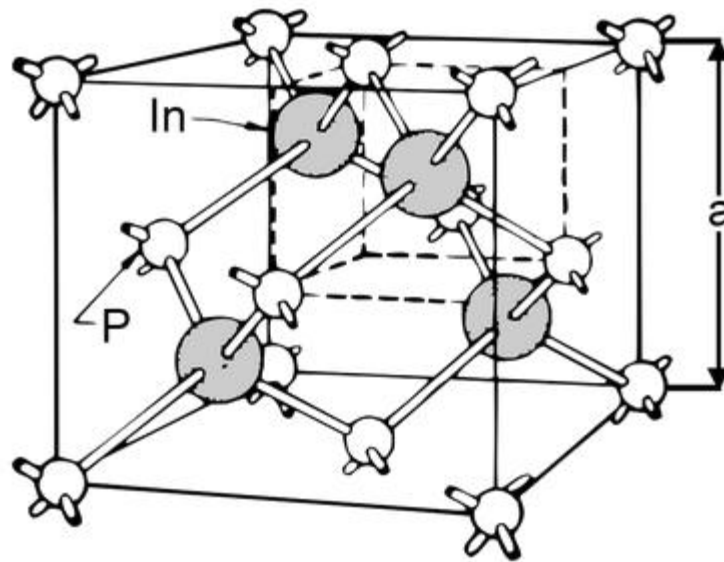
Structure diamant

Dans la structure diamant, chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de deux structures cubiques à faces centrées déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position du sommet de la seconde structure cfc par rapport à l'origine de la première est $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$. Le diamant cristallise dans cette structure, et aussi le silicium, le germanium.



Structure Zinc Blende:

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure ci-dessous. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale.



Zinc Blende
(GaAs, InP, etc.)

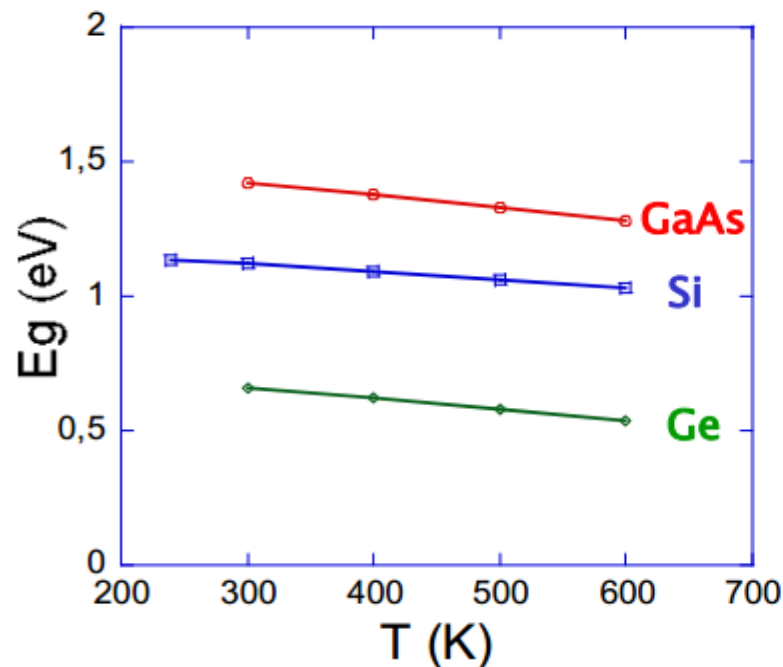
VII. Effet de la température sur le gap d'un semi-conducteur

Remarque : La largeur de bande interdite dépend aussi de la température

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Gap en eV pour quelques semi-conducteurs classiques :

| | Ge | Si | GaAs |
|---------------------|-------|-------|-------|
| $E_g(0)(\text{eV})$ | 0.744 | 1.166 | 1.519 |
| α (meV/K) | 0.477 | 0.473 | 0.541 |
| β (K) | 235 | 636 | 204 |



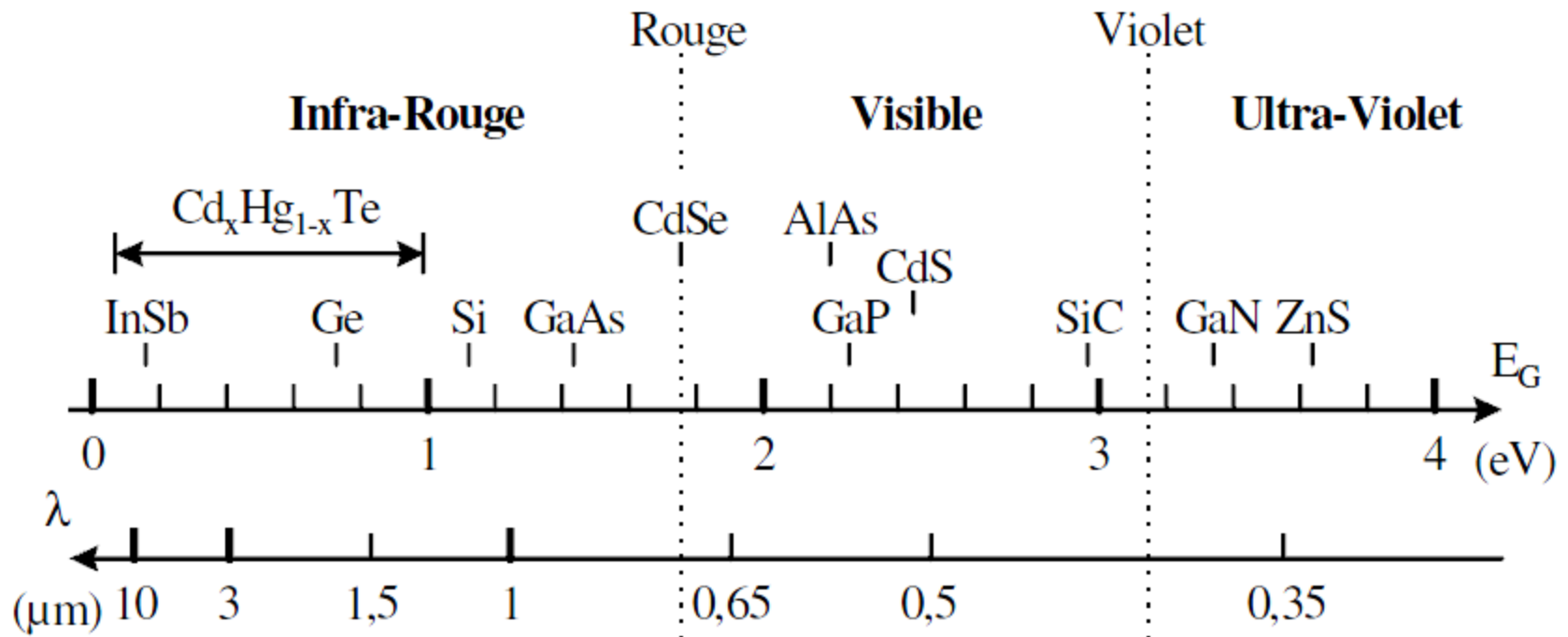
| | 300 K | 0 K |
|------|-------|------|
| C | 5.47 | 5.51 |
| Ge | 0.66 | 0.75 |
| Si | 1.12 | 1.16 |
| SiC | 3.0 | 3.1 |
| GaAs | 1.43 | 1.52 |
| GaP | 2.25 | 2.35 |
| GaSb | 0.68 | 0.81 |
| InSb | 0.17 | 0.24 |
| InAs | 0.36 | 0.42 |
| InP | 1.29 | 1.42 |

VI. Interaction semi-conducteurs-lumière

$$E_{\text{photon}} \geq E_g$$

$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} \geq E_g$$

$$h \frac{c}{E_g} \geq \lambda$$



VIII. Semi-conducteur intrinsèque et semi-conducteur dopé

1. Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si le cristal est pur. Il n'est pas pollué par des impuretés qui peuvent changer la concentration en porteurs libres.

Les électrons dans un semi-conducteur intrinsèque peuvent passer de la BV vers la BC en gagnant de l'énergie E (par exemple l'agitation thermique).

$$E \geq E_g$$

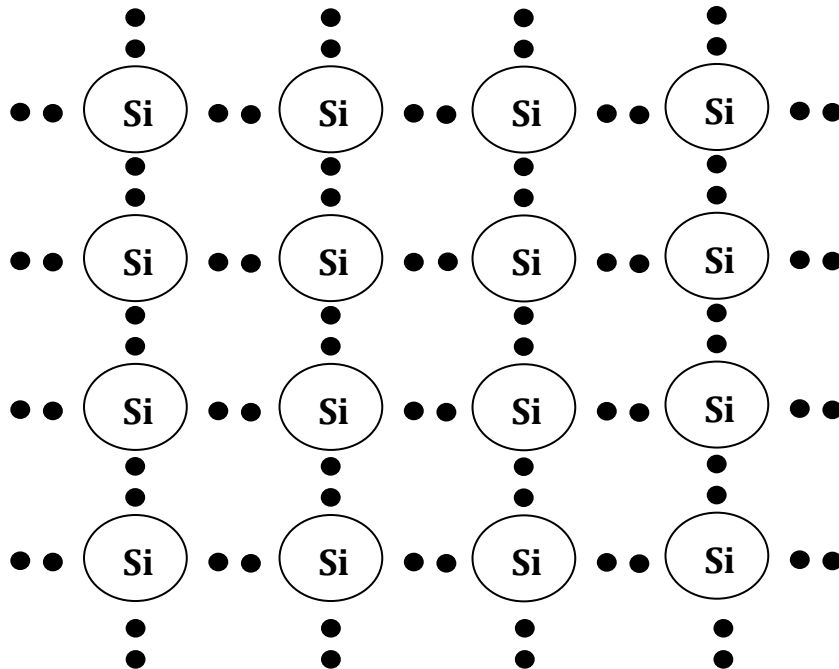
Notion de trou

- un trou d'électron (habituellement appelé tout simplement trou) est l'absence d'un électron dans la bande de valence.
- Le concept de trou est essentiellement une façon simple d'analyser le mouvement d'un grand nombre d'électrons en traitant cette absence d'électron comme une quasi-particule.
- On lui affecte une masse m_h et une charge $(+e)$ car il se déplace dans le sens opposé des électrons)

Soit n la concentration ou la densité des électrons libres (**unité: cm^{-3}**),
Soit p la concentration ou la densité des trous

Dans un semi-conducteur intrinsèque, $n=p=n_i$

Avec n_i la densité des porteurs intrinsèque



Dans le silicium à 300 K
 $n_{i(300\text{ K})} = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

**Le nombre d'atomes de silicium
dans 1 cm^3 est $N=10^{22} \text{ cm}^{-3}$**

ni la densité des porteurs intrinsèque dépend de la température et de l'énergie du gap (Cette expression sera démontrée dans le chapitre II):

$$n_i(T) = A.T^{3/2}.\exp\left(-\frac{E_g}{2k.T}\right)$$

Avec A une constante spécifique du matériau

2. Notion de « niveau de Fermi »

- Le **niveau de Fermi (E_F)** est une caractéristique propre à un système qui traduit la répartition des électrons dans ce système en fonction de la température. La notion de niveau de Fermi est utilisée en physique et en électronique, notamment dans le cadre du développement des composants semi-conducteurs.
- Il correspond au « potentiel chimique » des particules de la structure. Il est considéré comme une référence
- Concrètement, le niveau de Fermi est une fonction de la température mais il peut être considéré, en première approximation, comme une constante, laquelle équivaldrait alors au niveau de plus haute énergie occupé par les électrons du système à la température de 0 K.
- À toutes les autres températures, la répartition des électrons a une symétrie par rapport au niveau de Fermi.
- Pour un semi-conducteur intrinsèque, on parle de **niveau de Fermi intrinsèque E_{Fi}** ou E_i proche de milieu de gap.

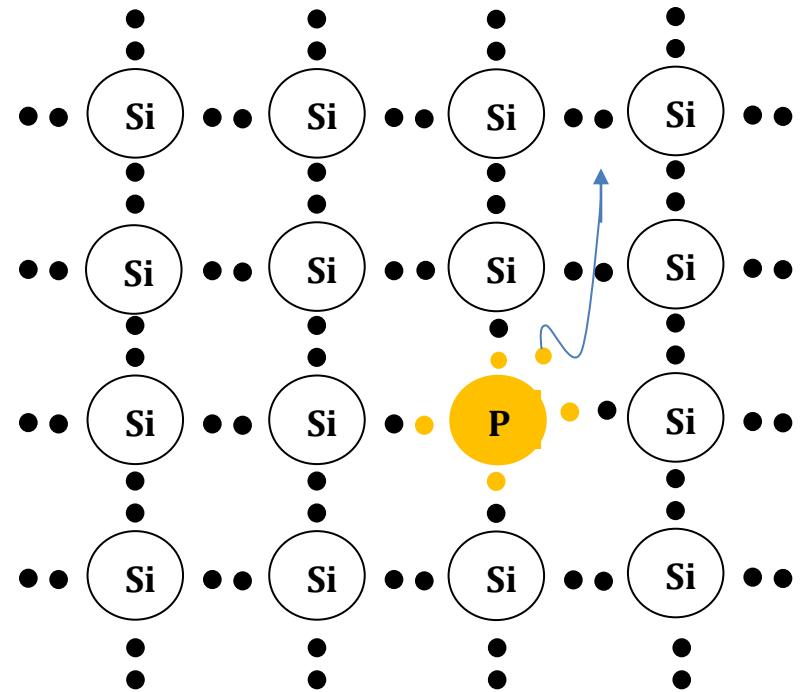
3. Semi-conducteur extrinsèque ou dopé

La conductivité des semi-conducteurs est faible à T_{amb} . Afin de l'augmenter, on doit le doper par des atomes étrangers afin de créer des porteurs libres (é ou h).

a. Dopage N:

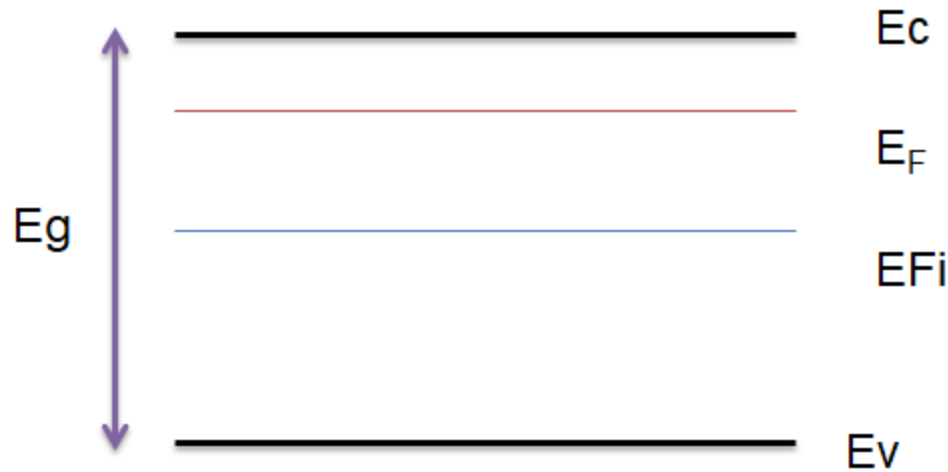
le cinquième électron, de l'atome de Phosphore qui n'a pas de niveau à occuper dans la bande de valence, se place juste en dessous de la bande de conduction. Il suffit donc pour le libérer de lui fournir une faible quantité d'énergie très inférieure au gap (énergie nécessaire pour casser une liaison de valence entre deux atomes de silicium). A une température supérieure à 40 K (-233 °C), tous les atomes d'impureté sont ionisés. Il y aura autant d'électrons libres que d'atomes d'impureté.

On note N_d la densité des atomes donneurs d'électrons.



L'énergie nécessaire au passage de l'électron dans les états de la bande de conduction est très faible. Le phosphore, qui donne un électron "libre" au solide, s'appelle un atome *donneur*. Si on remplace plusieurs atomes de silicium (un atome sur un million par exemple) par des atomes de phosphore on obtient autant d'électrons dans la bande de conduction, c'est-à-dire que si la concentration des atomes de phosphore est N_D par cm^3 , on dispose alors de N_D électrons dans la bande de conduction. Le silicium est alors *dopé* au phosphore et il est de type n (comme négatif). La lettre n indique que la conduction électrique se fait par les électrons de la bande de conduction.

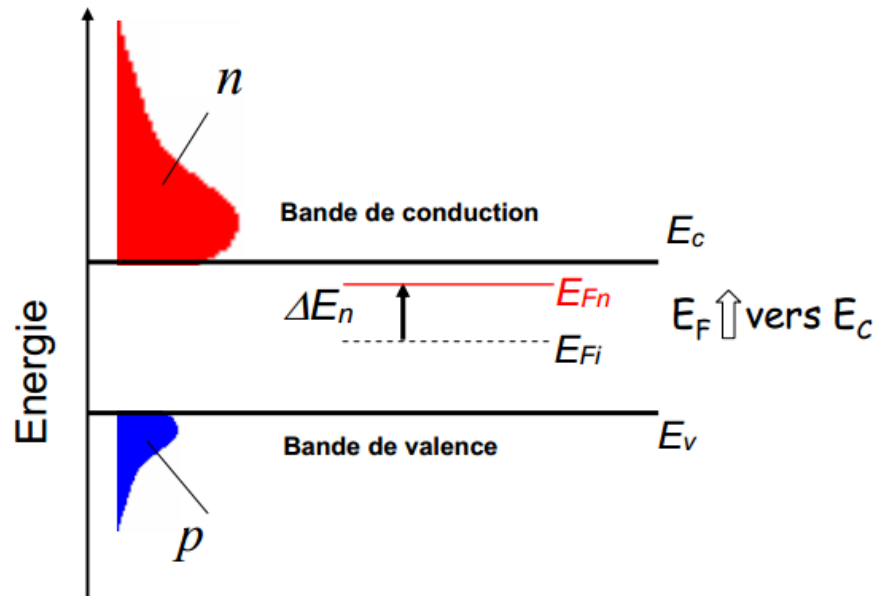
Les densités de dopage N_d varient de 10^{14} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3}
à 300 K : $n_{(300 \text{ K})} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à 10^{19} cm^{-3}



Le dopage par des atomes donneurs provoque la montée du niveau de Fermi qui se rapproche de la bande de conduction, indiquant ainsi que:

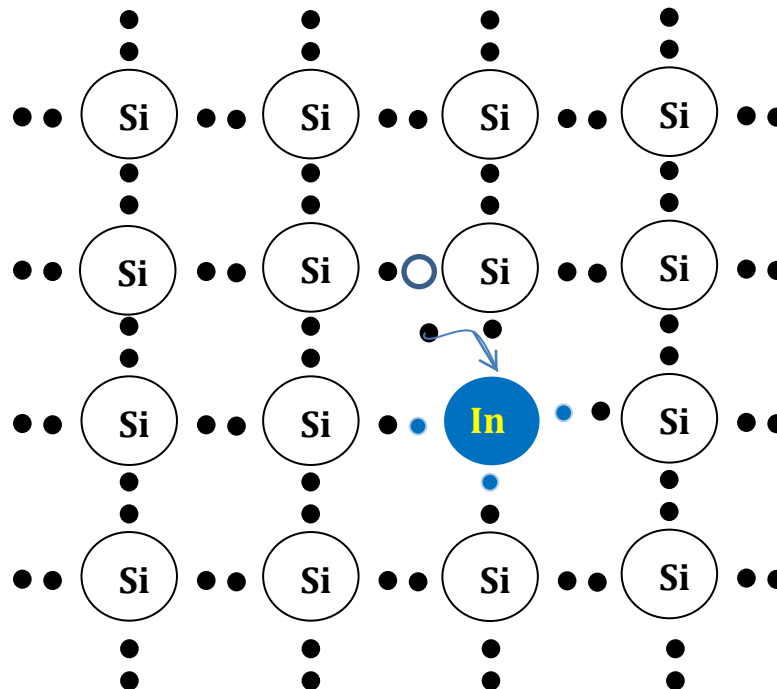
Il y a plus d'électrons dans le silicium de type n que dans le silicium intrinsèque.

Electrons = porteurs majoritaires, trous = porteurs minoritaires



b. Dopage P:

Si l'on dope le silicium avec un élément de la colonne III (l'indium ou le bore par exemple), qui ne possède que trois électrons sur sa couche extérieure, cet élément met en commun ses trois électrons périphériques, et il partage ainsi 7 électrons avec ses quatre voisins. L'absence d'un huitième électron se traduit électriquement par la présence d'un trou dans la bande de valence. Le silicium ainsi dopé est dit de *type p* (comme positif). Si N_A est la concentration d'atomes *accepteurs* (par exemple les atomes de bore), N_A est aussi la concentration des trous dans la bande de valence.



Dopage P

Dans le silicium de type p , le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence, indiquant qu'il y a moins d'électrons dans le silicium de type p que dans le silicium intrinsèque; la conduction électrique se fait dans ce cas par le déplacement des trous de la bande de valence.

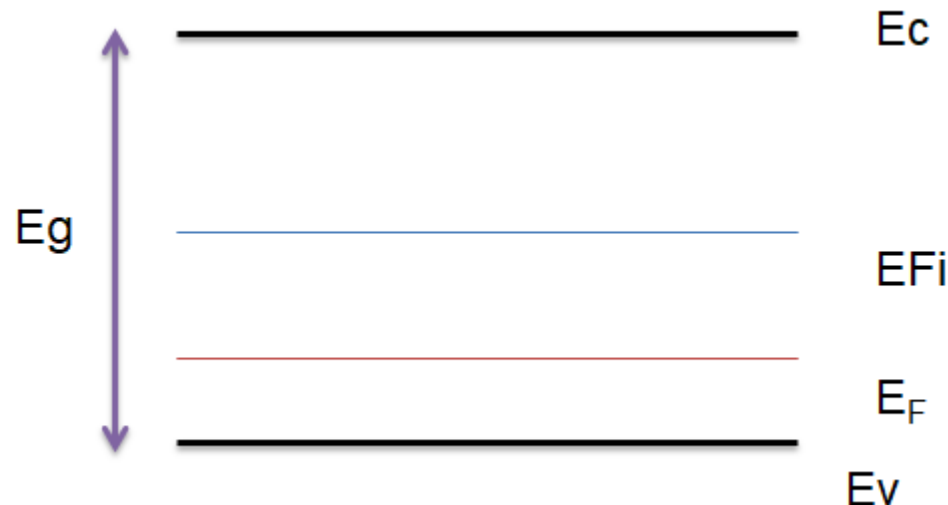
il y a plus de trous dans le silicium de type p que dans le silicium intrinsèque.

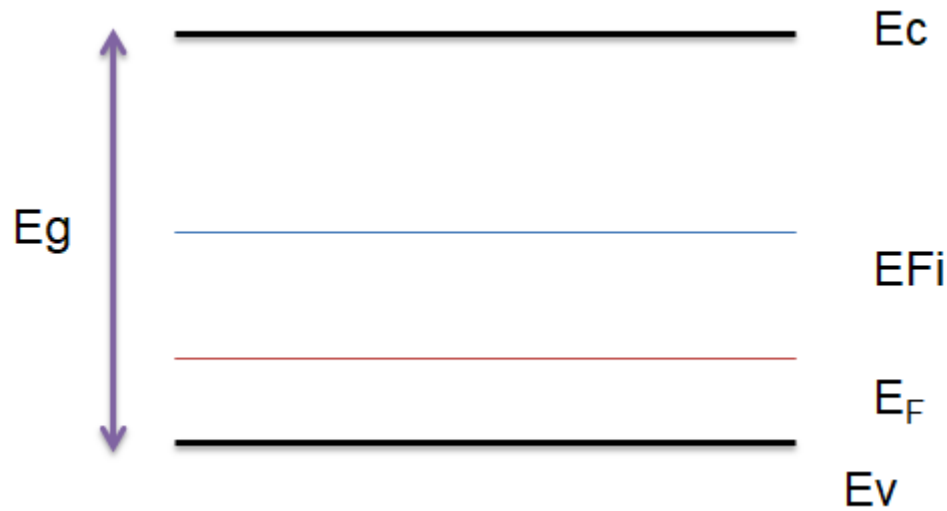
Les trous sont majoritaires

Les électrons sont minoritaires

Les densités de dopage N_A varient de 10^{14} cm^{-3} à 10^{19} cm^{-3}

à 300 K : $p_{(300 \text{ K})} = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ à 10^{19} cm^{-3}

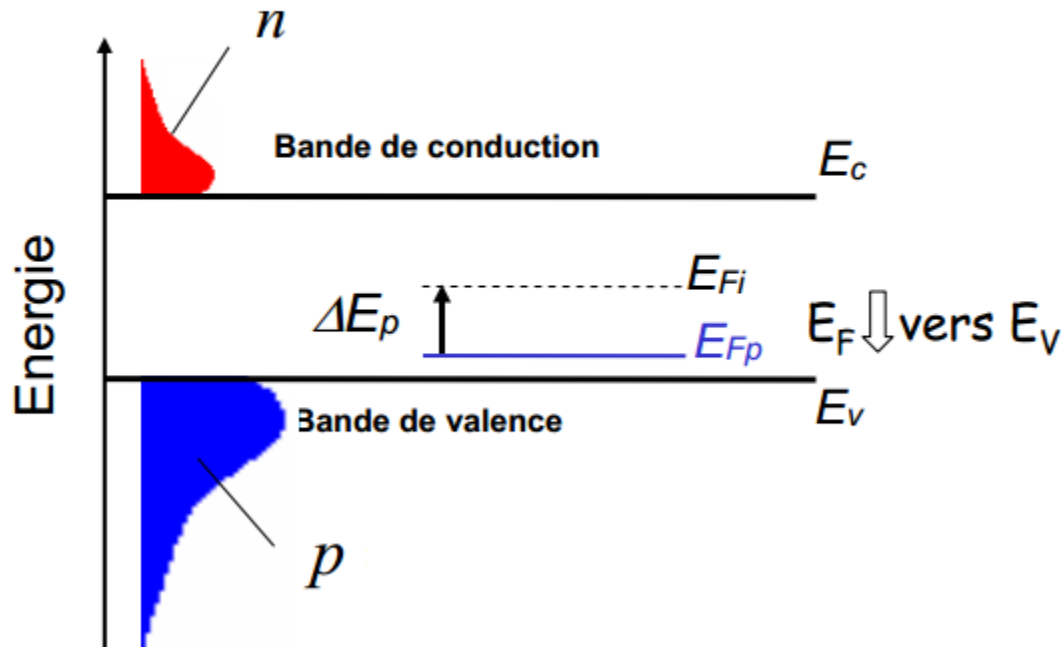




Le dopage par des atomes accepteurs provoque la descente du niveau de Fermi qui se rapproche de la bande de valence, indiquant ainsi que:

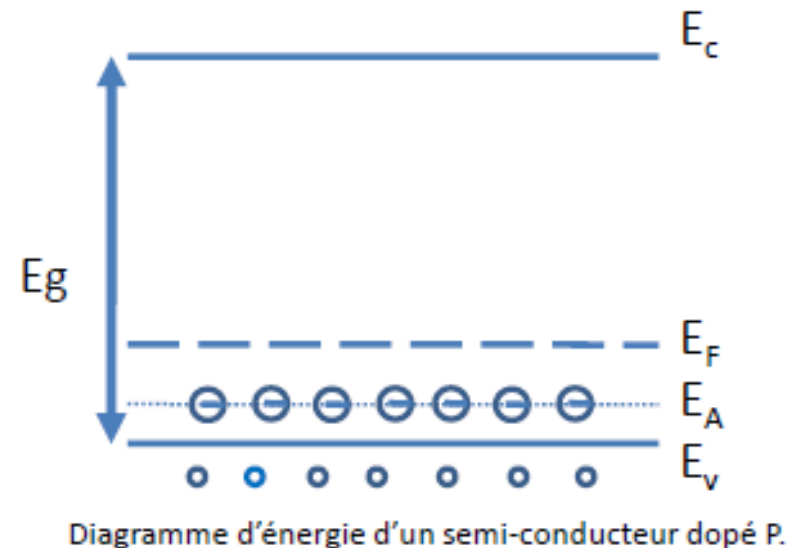
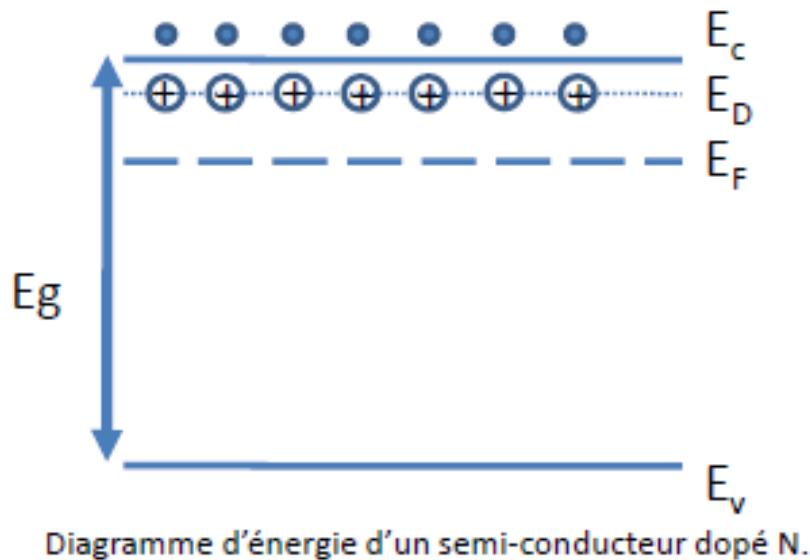
Il y a plus de trous dans le silicium de type p que dans le silicium intrinsèque.

Trous = porteurs majoritaires, électrons = porteurs minoritaires



c. Energies d'ionisation des donneurs et accepteurs peu profonds dans le silicium

Dans les semi-conducteurs dopés, les impuretés introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite.

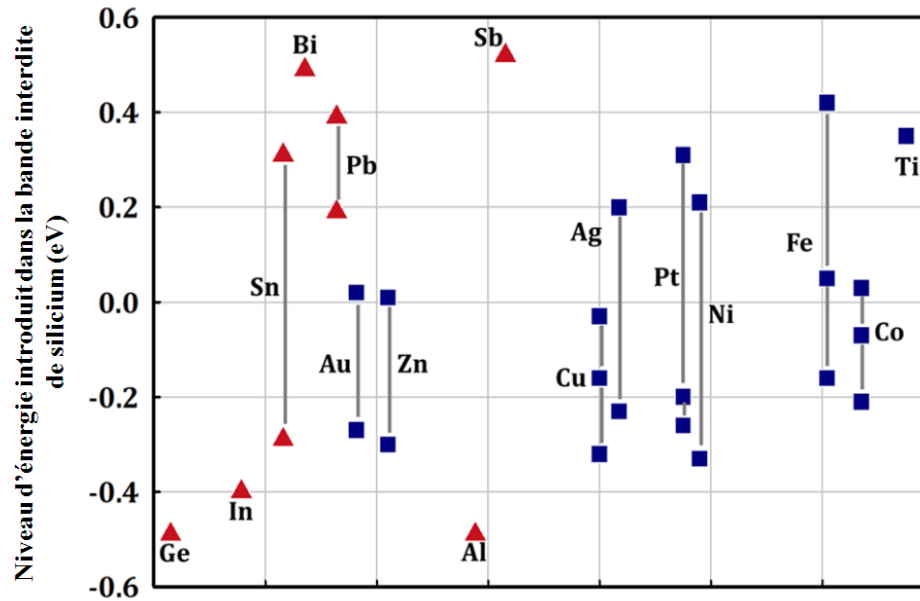


L'énergie nécessaire pour ioniser l'atome donneur (faire passer l'électron du niveau E_D vers E_c) est très faible par rapport au gap.

A 300 K, tous les impuretés sont ionisées.

De même pour les atomes accepteurs.

Energies d'ionisation des donneurs et accepteurs peu profonds dans le silicium



| | Donneurs | | | Accepteurs | | | |
|---------|----------|-------|-------|------------|-------|-------|-------|
| Elément | As | P | Sb | Al | B | Ga | In |
| Ei (eV) | 0.054 | 0.045 | 0.043 | 0.072 | 0.045 | 0.074 | 0.157 |

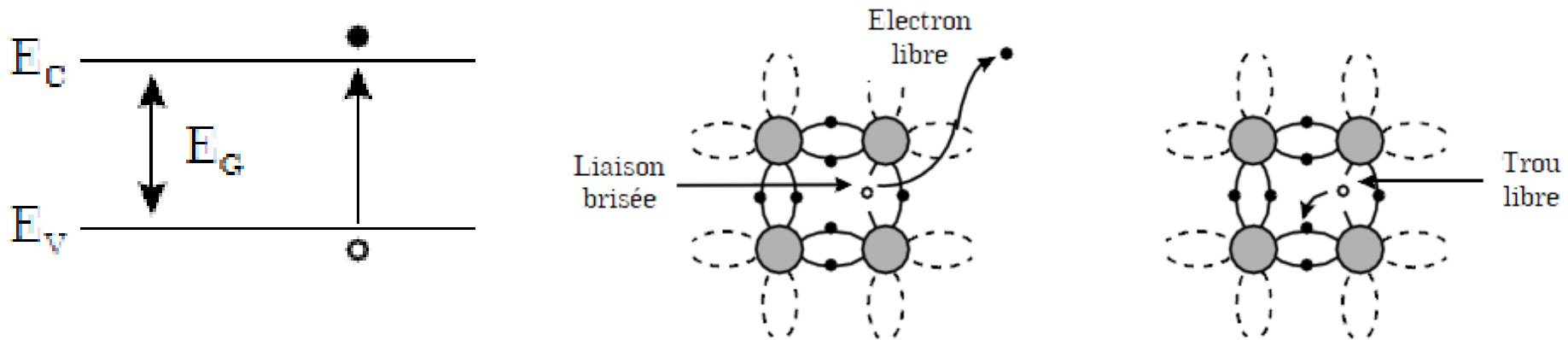
IX. Conduction par électron ou par trou

Notion de la masse effective

❑ Un électron qui passe de la BV vers la BC, devient 'libre' et peut participer à la Conduction électrique.

Il se comporte comme une **particule « quasi-libre »** dans le semi-conducteur car il y subit l'influence du réseau cristallin. On représente la particule « quasi-libre » Par une « **quasi-particule** » **libre** en lui affectant une masse « **effective** » m_e^* différente de la masse m_0 ($0.91 \cdot 10^{-30}$ Kg) de l'électron libre dans le vide.

❑ De même pour les trous: l'étude du mouvement des particules dans la BV sera simplifiée en ne considérant que le mouvement du trou auquel on affectera une masse effective m_h^*



Rupture d'une liaison covalente \longrightarrow Apparition d'un électron et d'un trou libre