

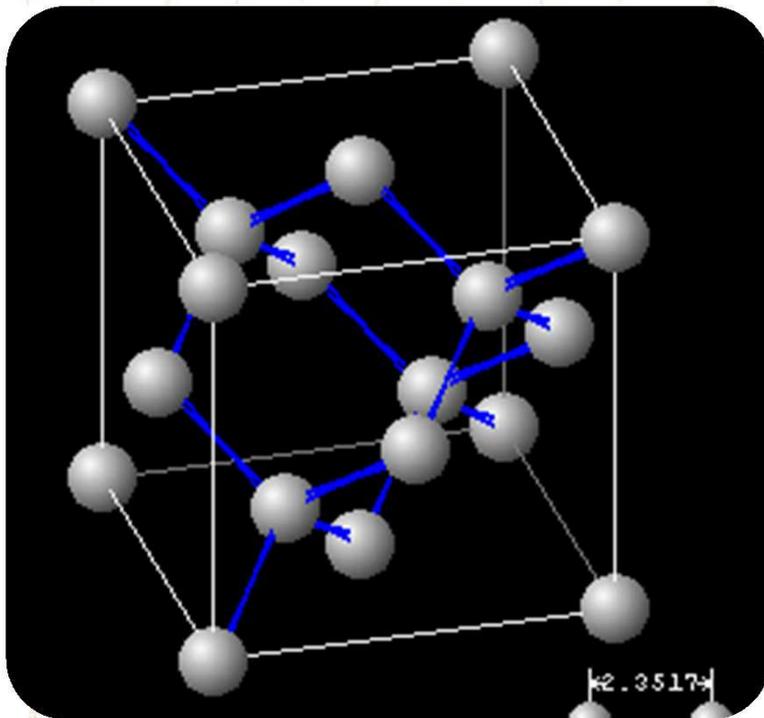
Semi-conducteurs

Chapitre 1

Dans ce chapitre, on donnera quelques notions de base sur les matériaux semi-conducteurs. On définira les semi-conducteurs intrinsèques et ceux dopés types P et N. Nous étudierons par la suite la jonction PN en polarisation directe et inverse et nous définirons sa caractéristique pour les deux modes de fonctionnement.

Semi-conducteurs : description

Un cristal semiconducteur intrinsèque est un solide dont les noyaux d'atomes sont disposés aux nœuds d'un réseau régulier. La cohésion de ces atomes est due à des liaisons de **covalence**, c'est-à-dire deux atomes voisins mettent en commun un électron chacun pour former une liaison. Les électrons qui participent à ces liaisons sont des **électrons liés**. Les électrons excédentaires, s'ils existent, sont des **électrons libres**.

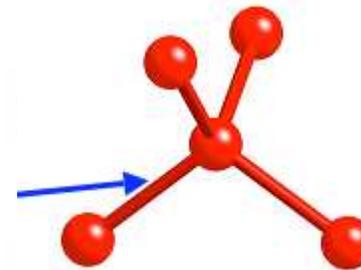


Si

Structure diamant

Chaque atome a une coordination tétraédrique et établit des liaisons de valence avec ses quatre voisins les plus proches :

coordination
tétraédrique



Les éléments des semiconducteurs

Très grande variété de matériaux "semiconducteurs", construits avec des liaisons covalentes (éléments du **groupe IV**), ou des liaisons qui deviennent de plus en plus ioniques quand on s'éloigne du groupe IV

II	III	IV	V	VI
	B	C	N	
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te

Classification périodiques

LES ÉLÉMENTS SEMICONDUCTEURS

- Le germanium (**Ge**) a été premier semiconducteur utilisé.
- 3 éléments appartenant au groupe IV : **silicium**, **germanium**, **étain gris** (α -Sn)
- Le silicium (**Si**) est devenu le matériau prédominant (98 % des composants actuels).
- L'étain gris (α -Sn) est une forme polymorphique rare de l'étain. Intéressant uniquement au point de vue fondamental.

LES SEMICONDUCTEURS COMPOSÉS

a. Un élément du **groupe III** avec un élément du **groupe V**

Exemples

- Arséniure de gallium **GaAs**
- Nitrure de gallium **GaN**
- Antimoniure du gallium **GaSb**
- Phosphure de gallium **GaP**

b. Un élément du **groupe II** avec un élément du **groupe VI** :

Exemples

CdTe, CdS, ZnSe, ZnTe, MgS

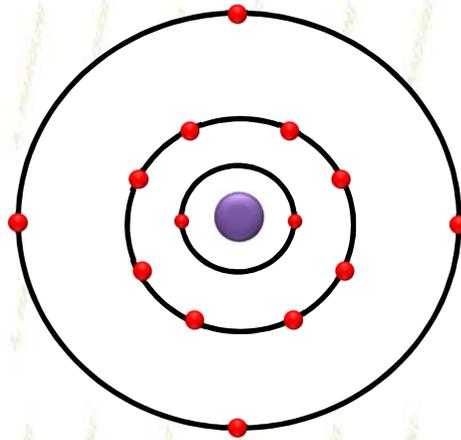
c. Un élément du **groupe I** avec un élément du **groupe VII**

Exemples

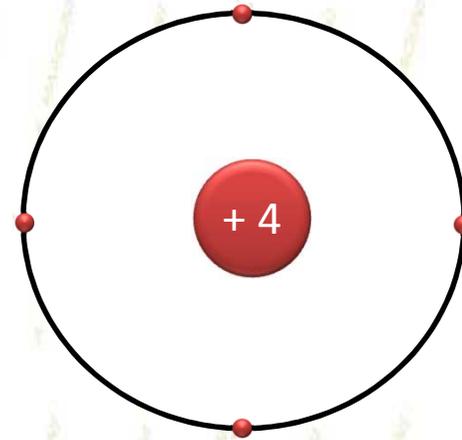
CuBr, CuI

STRUCTURE ATOMIQUE

Les semiconducteurs les plus utilisés sont le Ge et le Si. Les atomes de ces éléments possèdent 4 électrons de valence (4 électrons sur l'orbite périphérique) :

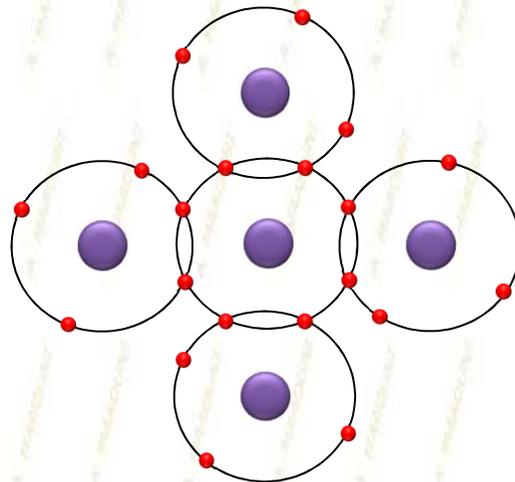


Répartitions des 14 e⁻ du Si

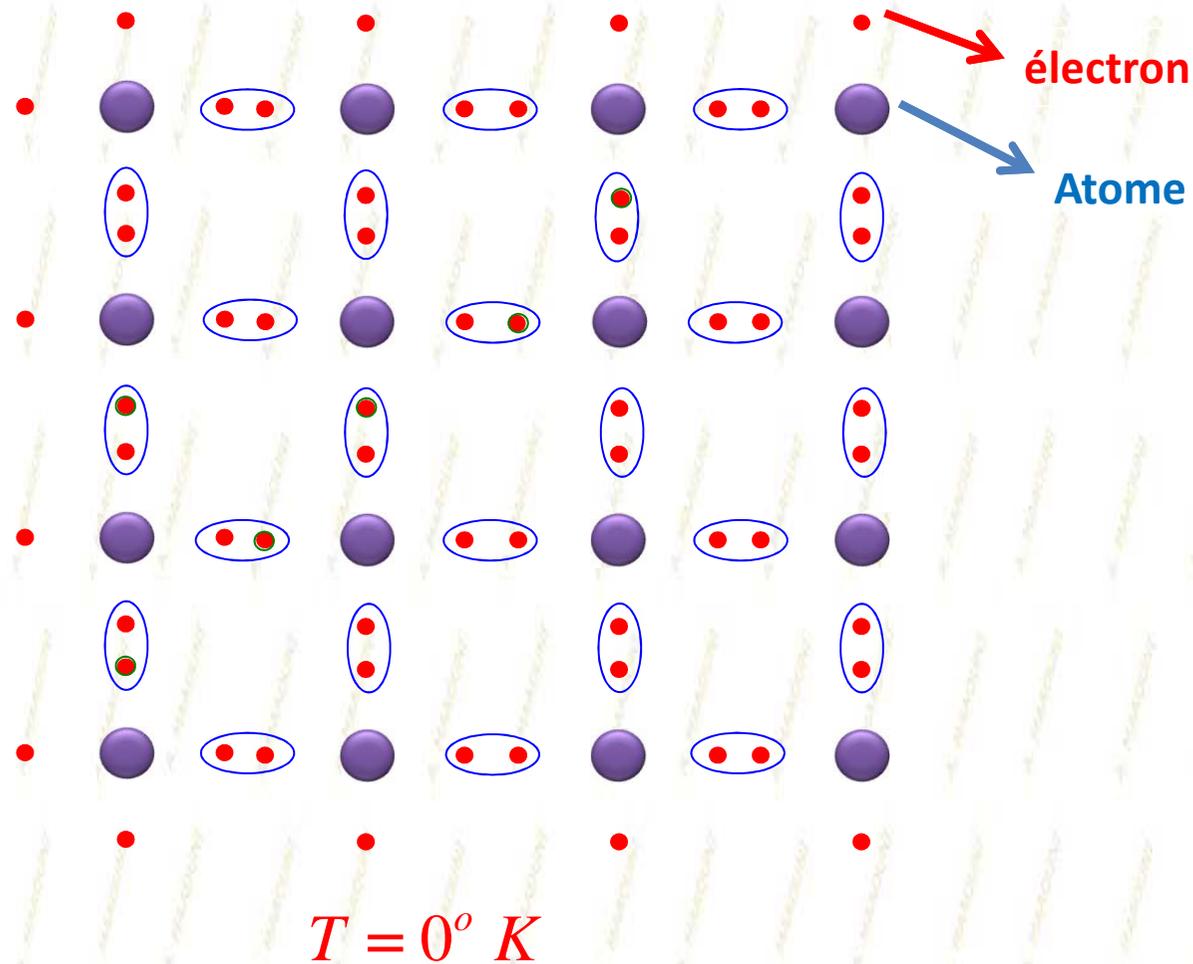


Représentation simplifiée :
couche de valence

chaque atome possède autour de lui huit électrons quatre qui lui sont propres et quatre qui proviennent de ses plus proches voisins :

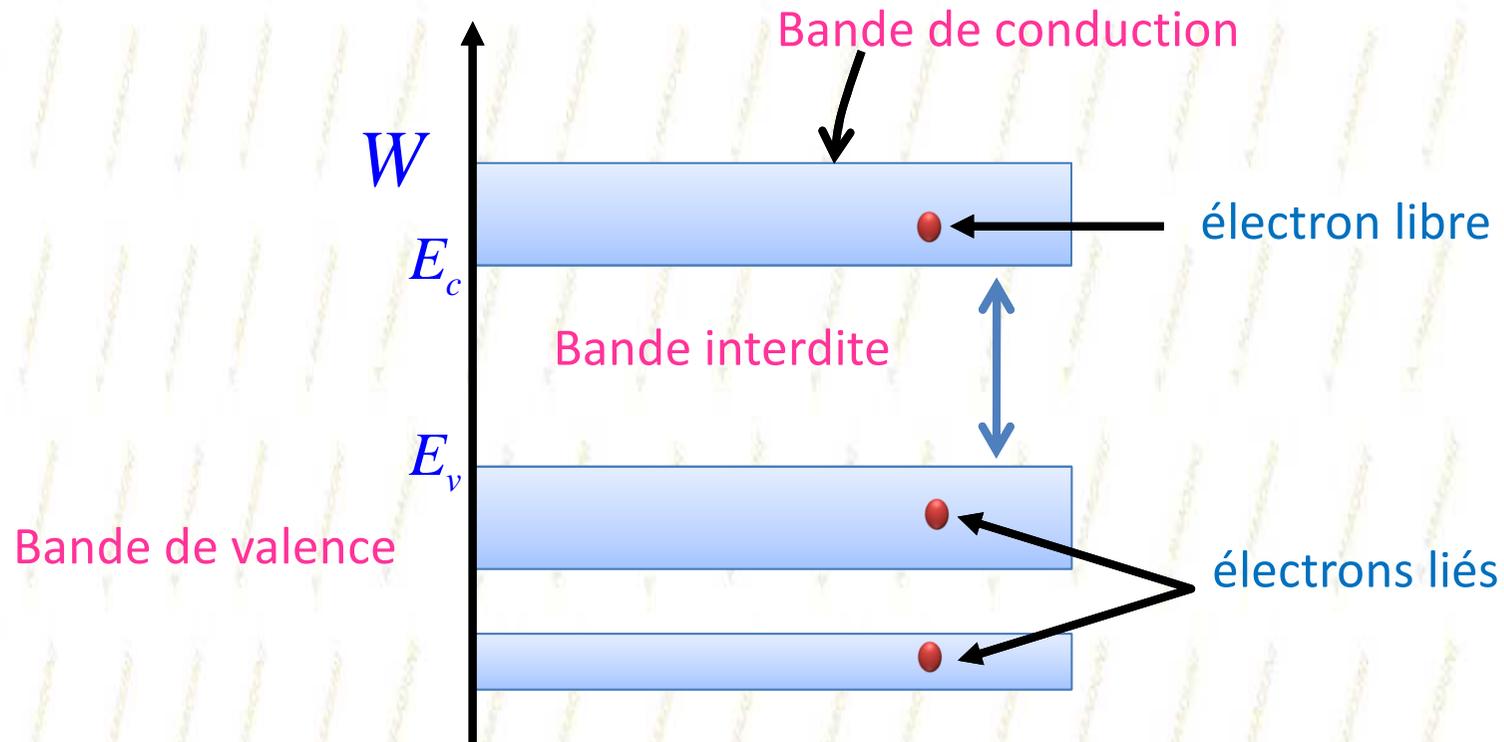


A la température de zéro absolu, la conductivité est nulle puisque tous les électrons sont utilisés dans les liaisons et il n'y a pas d'électrons libres :



Les bandes d'énergie

- Les électrons d'un solide sont répartis dans plusieurs bandes d'énergie séparées par des bandes interdites .
- Seules les bandes externes déterminent les propriétés électriques du solide.



Bande de conduction

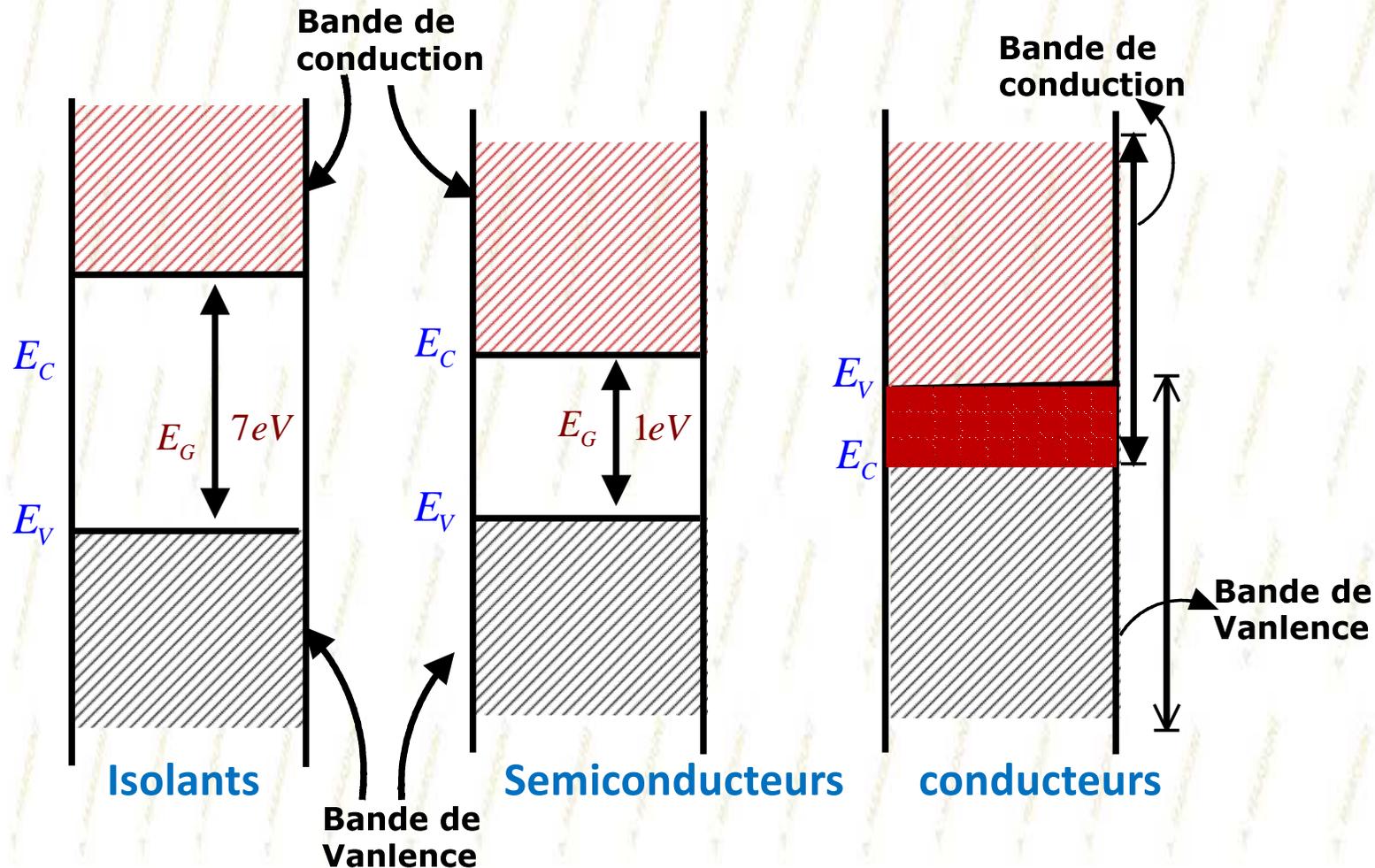
C'est la bande la plus externe. Les électrons qui s'y trouvent ont perdu toute attache avec leurs atomes ce sont des électrons libres. En effet, C'est électrons peuvent circuler librement dans tout les sens mais à l'intérieur du solide. Notons que cette bande peut être vide, c'est-à-dire il n'y a pas d'électrons libres qui l'occupent.

Bande de valence

C'est la bande qui est juste inférieur, de point de vue énergie, à la bande de conduction. Les électrons qui occupent cette bande sont des électrons liés (c'-à-d, liés à l'atome et ce sont eux qui assurent la cohésion du cristal). Ces électrons ne peuvent passer à la bande de conduction ("devenir libre") sans un apport extérieur d'énergie.

Isolants, Semi-conducteurs, conducteurs

On distingue les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs par leurs structures de bandes d'énergie :



A $0^\circ K$ tous les e- se trouvent dans la bande de valence pour les isolants et les semi conducteurs. La distance qui sépare la bande de valence et celle de conduction, appelée énergie de Gap, est très importante pour les isolants : $7eV$

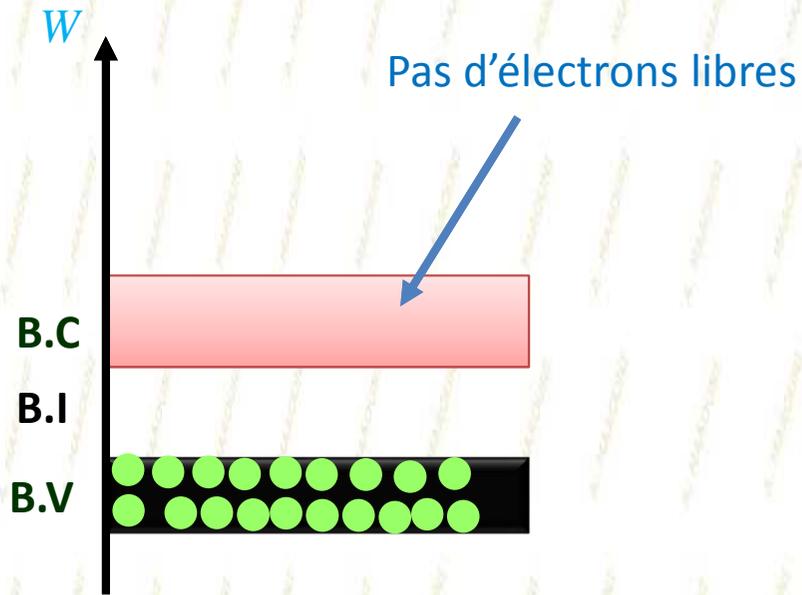
Sa valeur importante dans les isolants ne permet pas le passage des électrons à la bande de conduction. Quand la température augmente, une quantité très négligeable d'électrons peut passer à la bande de conduction, ce qui fait croître légèrement la conductivité, mais l'isolant reste non conducteur.

Les semi-conducteurs sont caractérisés par une bande interdite faible, de l'ordre de 1eV à 1.5eV. Un apport modéré de température T fait passer les e- de la bande de valence vers la bande de conduction. Plus $T \uparrow$, plus le nombre d'e- libres augmente, le semiconducteur passe donc de l'isolant au conducteur.

Dans le cas **des conducteurs** la bande de valence et la bande de conduction sont très proches ou elles se chevauchent carrément. Ainsi, un électron, quelque soit la température, peut passer à la bande de conduction, c'est-à-dire devenir un **électron libre** de circuler dans tout le métal. En général chaque atome libère au moins un électron.

Type	Semiconducteur	Energie Gap Eg(eV)
IV	C	5.3
	Si	1.1
	Ge	0.70
	SiC	2.8
III-V	GaAs	1.4
	GaP	2.3
	InAs	0.40
II-VI	CdS	2.6
	CdSe	1.7
	CdTe	1.5
	ZnS	3.6
	ZnSe	2.7

Valeurs de de l'énergie de Gap pour différents semiconducteurs



à $T = 0^{\circ} K$

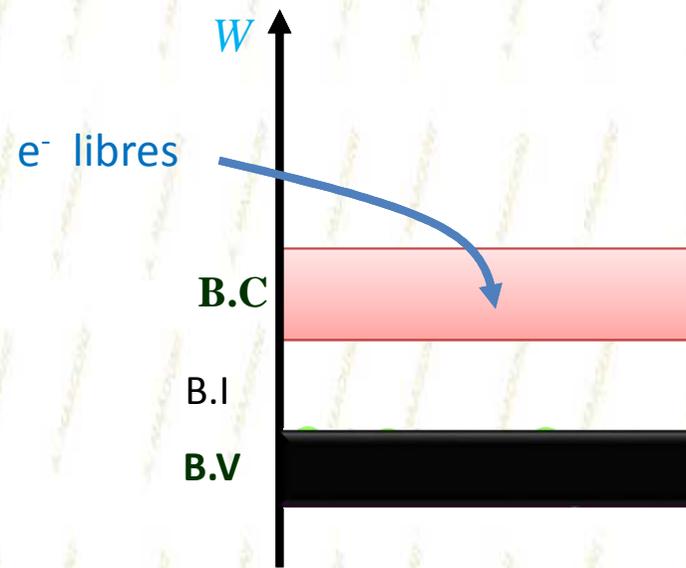
B.V pleine (tous les e^- occupent la B.V)

&

B.C vide (aucun électron libre)



Le semi-conducteur est un **isolant**



si $T \nearrow$

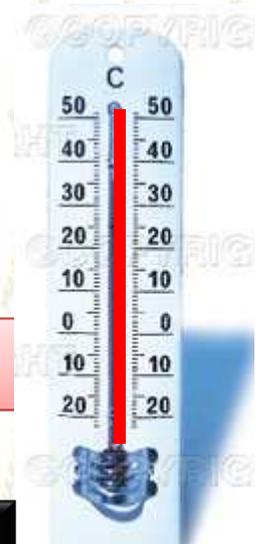
Création des e^- libres



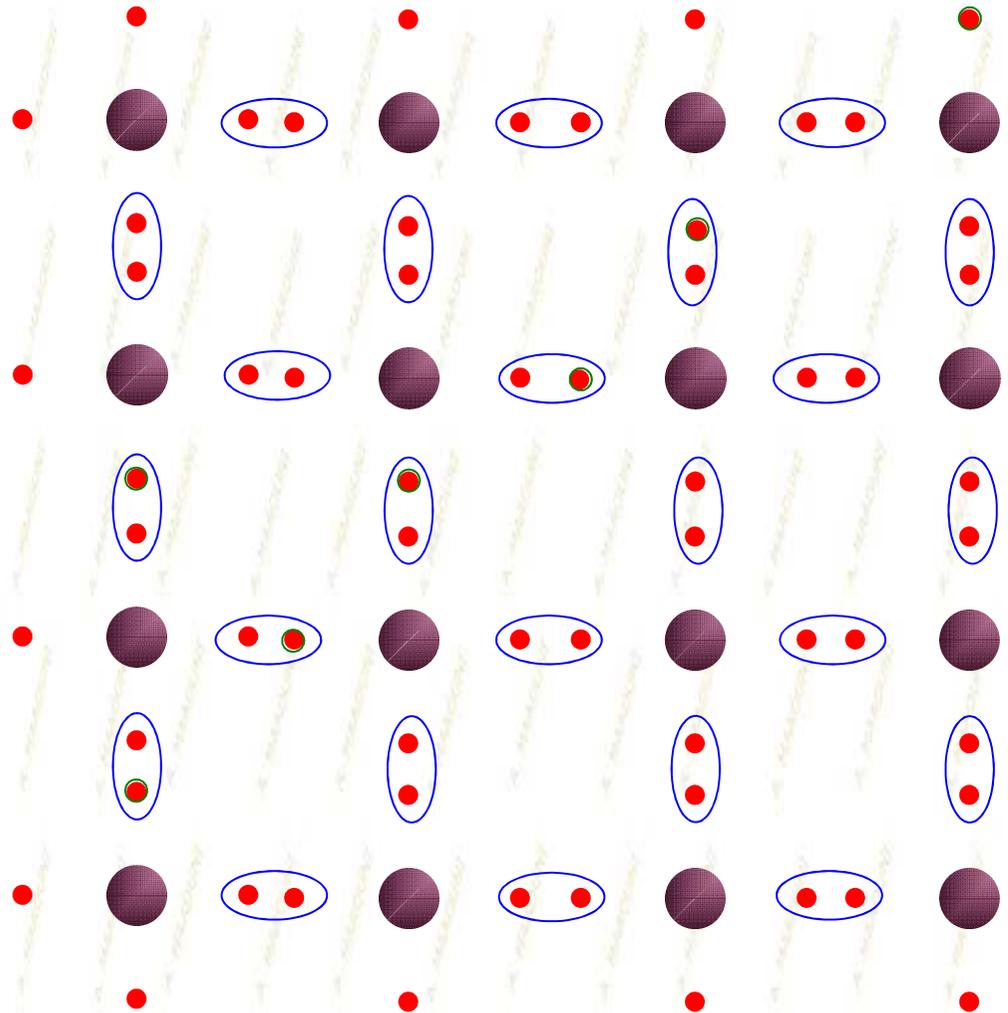
Conductivité croît et résistivité décroît



Le semi-conducteur devient **conducteur**



Mécanisme de la conduction dans les semi conducteurs : Notion de trous



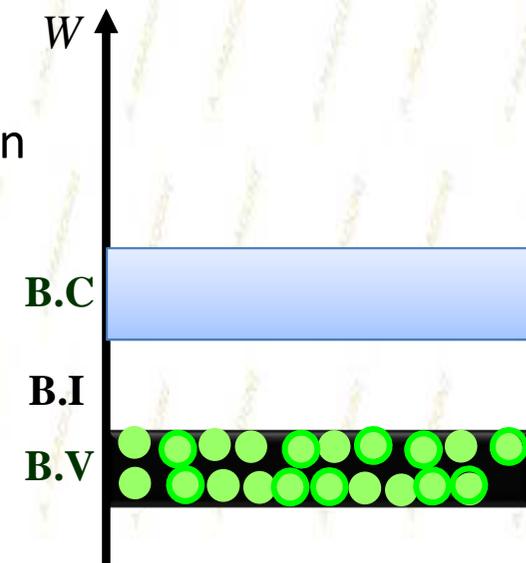
à $S_i T \neq \nabla^{\circ} K$

- Un électron d'un semiconducteur nécessite au moins l'énergie de Gap (1.1V Si, 0.7V Ge) pour être libre.
- En quittant la bande de valence pour la bande de conduction, il laisse un vide dans la liaison entre deux atomes **appelé trou**.
- La perte de l'e- entraîne l'apparition d'une charge positive (ion+) et l'existence du trou se comporte comme une charge positive qui capture un électron voisin, ce qui donne un autre trou à la place de ce dernier . Ce processus se répète indéfiniment. Il est appelé **génération-recombinaison**.

CONDUCTION DOUBLE

Deux types d'entités sont responsables de la conduction dans un semiconducteur :

- Les e- libres qui circulent au niveau de la bande de conduction
- Les e- liés qui vont de trou en trou : ce type de conduction porte le nom de conduction par trous.



Dans un semi-conducteur pur (intrinsèque), le nombre de trous est égal au nombre d'électrons et on a :

$$n = p = n_i$$

n : Densité des électrons

p : Densité des trous

n_i : Densité intrinsèque du semiconducteur

CONDUCTION DANS UN MÉTAL

Soit un barreau métallique de longueur L de section s et contenant n e-/m³

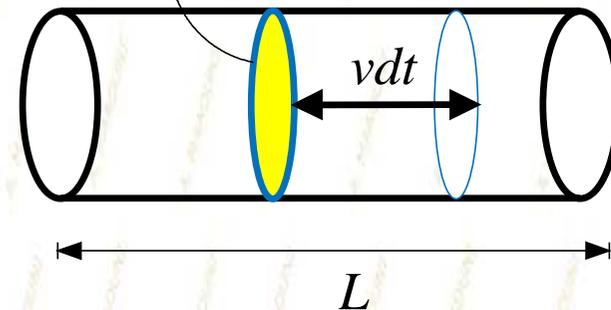
$$E = 0$$

les électrons libres se déplacent d'une façon aléatoire de sorte que le déplacement moyen de l'ensemble des e- est nul.

$$E \neq 0$$

La vitesse moyenne est proportionnelle au champ

$$v = \mu E, \quad \mu : \text{Mobilité des e- en m}^2/\text{V.S}$$



Le courant dans le conducteur est donné par :

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

dQ est la charge traversant la section S du barreau, donc celle contenue dans le cylindre de longueur $v dt$ et de section S

$$dQ = q n S v dt \rightarrow I = \frac{dQ}{dt} = q n S \underbrace{v}_{\mu E}$$

La densité de courant dans le conducteur est donc :

$$J = \frac{I}{S} = q n \underbrace{v}_{\mu E} = \sigma E \rightarrow \sigma = q n \mu$$

σ : Conductivité du métal

Pour un conducteur, $n \approx 10^{28} e^- / m^3$

CONDUCTION DANS UN SEMI CONDUCTEUR

Puisque la conduction dans un semi-conducteur est assurée par les électrons et les trous, la conductivité totale est obtenue par la sommation de la conductivité des électrons et celle des trous.

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

σ_n est la conductivité des e- et σ_p la conductivité des trous.

Désignons par n la densité des e- et p celle des trous, nous pouvons alors écrire :

$$\sigma = \underbrace{nq\mu_n}_{\sigma_n} + \underbrace{pq\mu_p}_{\sigma_p} \quad q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

μ_n La mobilité des électrons et μ_p la mobilité des trous.

DENSITÉS DES PORTEURS ÉLECTRONS ET TROUS

La physique statistique montre que la densité des électrons libres (qui se trouvent dans la bande de conduction) n s'écrit :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{F_i}}{KT}\right)$$

et la densité des trous (qui se trouve dans la bande de valence) p s'écrit :

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_{F_i} - E_v}{KT}\right)$$

N_c, N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence. Elles dépendent de la température et du semi conducteur.

Pour **Si, à 300K**

$$N_c = 2.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3} \quad N_v = 1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$$

E_c, E_v sont respectivement le niveau le plus bas de la B.C et le niveau le plus haut de la B.V.

E_{F_i} est un niveau appelé niveau de Fermi. T la température en °K et

$K=8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

Dans un semiconducteur intrinsèque ou pas, nous avons la relation suivante :

$$p n = n_i^2$$

Pour le semiconducteur intrinsèque, l'évolutions des densités d'e- et des trous En fonction de la température s'écrit :

$$p = n = n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_G}{2KT}} \quad E_G = \begin{cases} 0.72eV & , Ge \\ 1.1eV & , Si \\ 1.42eV & , AsGa \end{cases}$$

DOPAGE D'UN SEMICONDUCTEUR

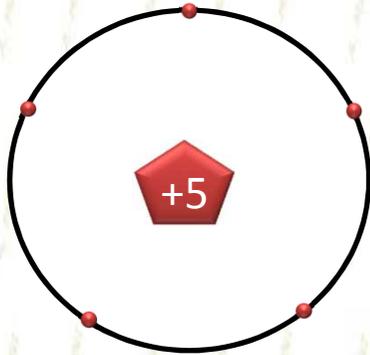
Le dopage est l'introduction d'impuretés dans un semiconducteur pur.

Le semiconducteur ainsi obtenu est appelé extrinsèque. Les dopeurs (impuretés) sont des éléments de la colonne III ou V de la table des éléments périodiques :

III (Dopeurs)	IV Semiconducteur	V (dopeurs)
Bore : B		Azote : N
Aluminium : Al	Si	Phosphore : P
Gallium : Ga	Ge	Arsenic : As
Indium : In		Antimoine : Sb

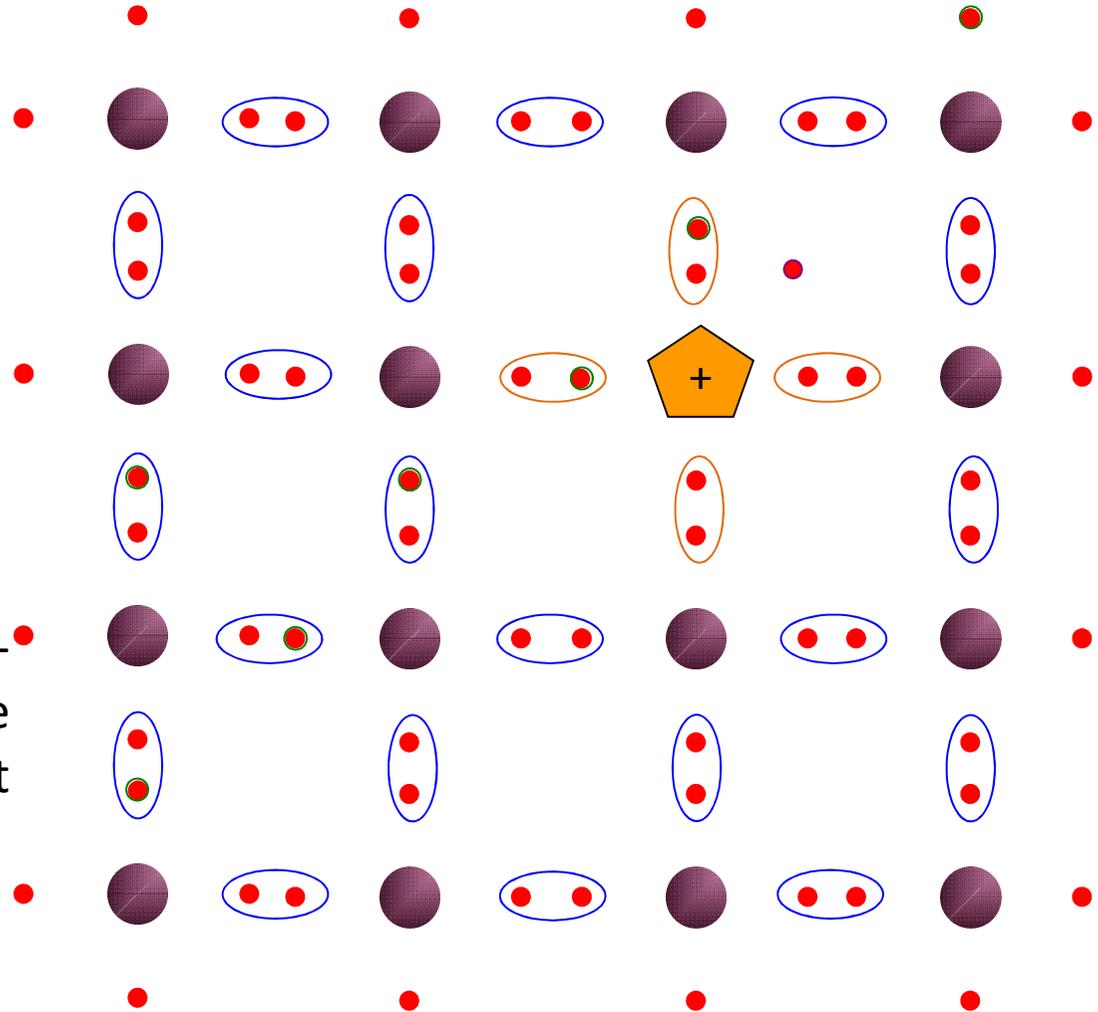
Semiconducteur type N

Un semiconducteur est du type N lorsque le dopeur est de la colonne 5.



Les quatre électrons du dopeur assurent la liaison atomique alors que le cinquième reste en excès. C'est un e- quasi-libre. Il lui faut une faible énergie de l'ordre de 0.01eV (Ge) et 0.05eV (Si) pour le rendre libre.

L'atome dopeur devient un ion +.



A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_D / m^3 la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

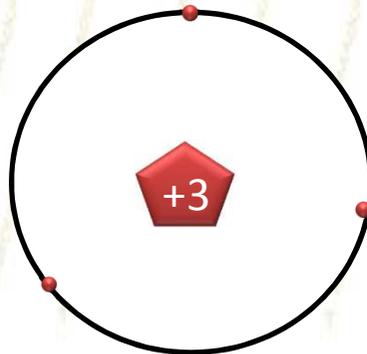
$$n_0 + N_D$$

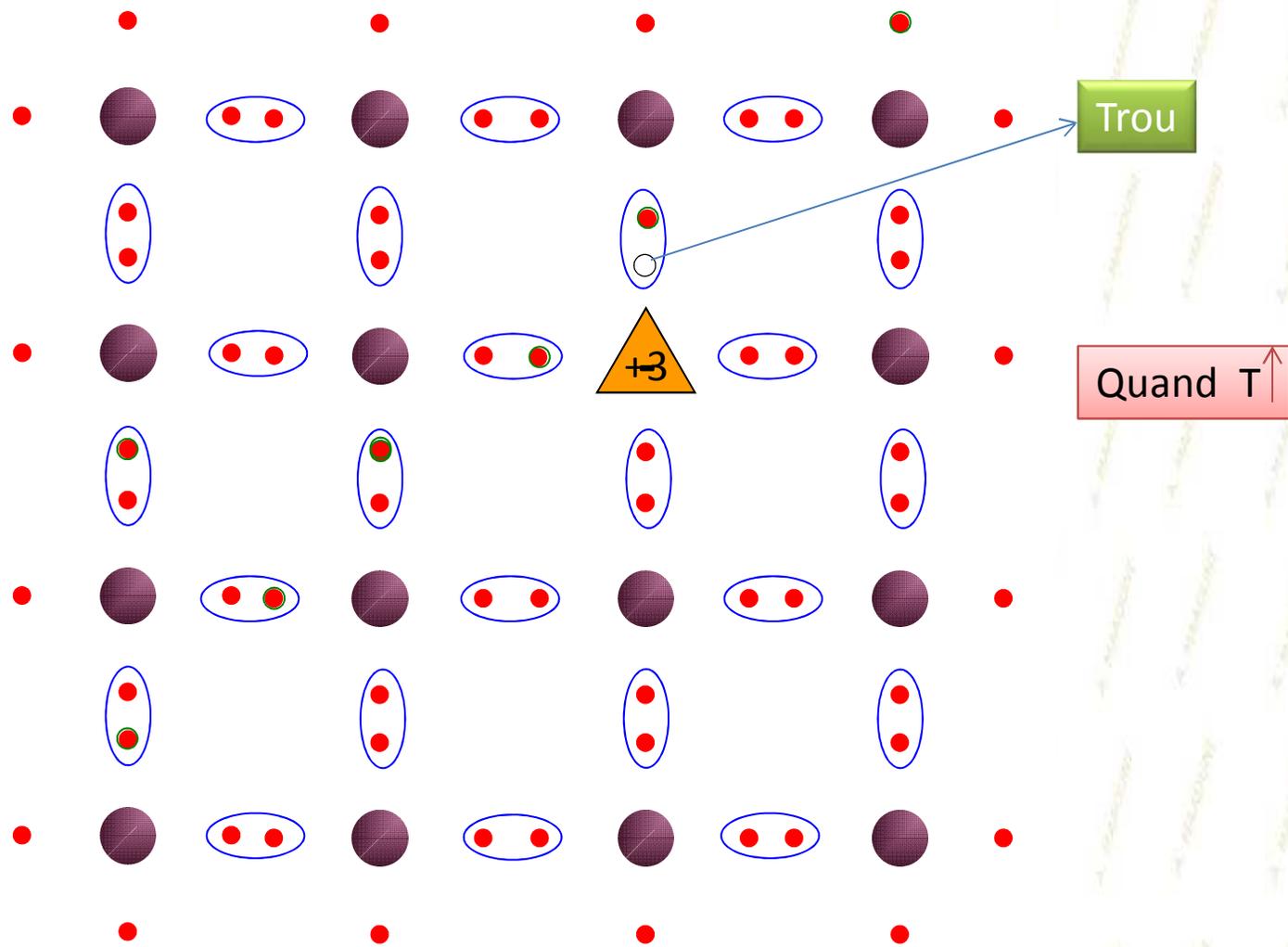
- Densité des e- générés par le processus de rupture des liaisons covalentes

$$N_D \approx 10^{14} - 10^{19} \text{ atomes / cm}^3$$

Semiconducteur type P

Un semi-conducteur est appelé type *p* lorsque le dopeur utilisé appartient aux éléments de la colonne III de la table périodique.





De la même façon que pour le semi-conducteur dopé N , la concentration en trous du semi-conducteur sera :

$$p_0 + N_A$$

- Densité des e- générés par le processus de rupture des liaisons covalentes

Densité de charges dans un semi-conducteur

Considérant un semi-conducteur où nous avons introduit une densité N_D d'atomes donneurs et une densité N_A d'atomes accepteurs. A température ambiante, toutes les impuretés sont ionisées. Le bilan des charges ou la neutralité électrique permet d'écrire :

$$n + N_A = p + N_D$$

n densité des électrons libres provenant des liaisons de covalence rompues et des électrons libérés par les donneurs

p trous libres provenant des liaisons de covalence rompues et des trous originaires des accepteurs

N_D densité des charges fixes $+q$ provenant des atomes donneurs ionisés

N_A densité des charges fixes $-q$ provenant des atomes accepteurs ionisés

A partir de la loi d'action de masse $n \cdot p = n_i^2$ et l'équation de la neutralité électrique on peut écrire :

Semiconducteur type N

- $N_A = 0$ Dopage par les donneurs
- $n \gg p$ Les e- sont les porteurs majoritaires
- La neutralité électrique permet d'écrire : $n = N_D$
- La loi d'action de masse donne la densité des trous qui sont minoritaire :

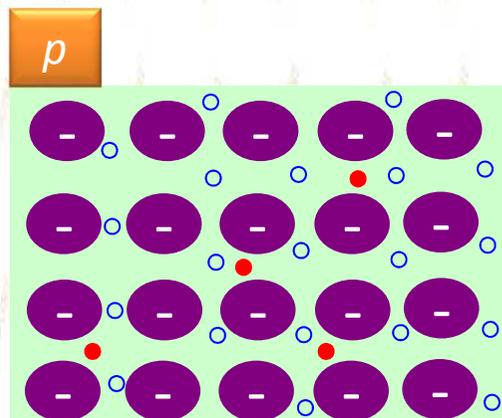
Semiconducteur type P

- $N_D = 0$ Dopage par les accepteurs
- $p \gg n$ Les trous sont les porteurs majoritaires
- La neutralité électrique permet d'écrire : $p = N_A$
- La loi d'action de masse donne la densité des électrons qui sont minoritaire :

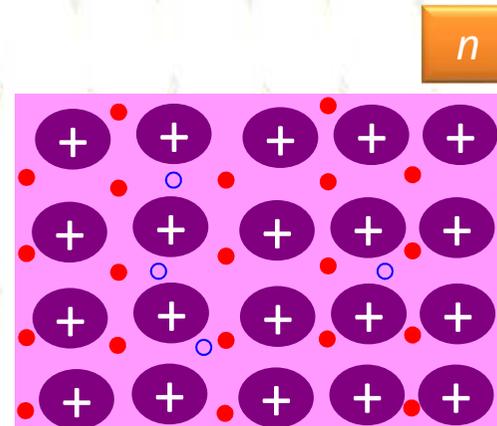
$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

La jonction PN



Trous majoritaires



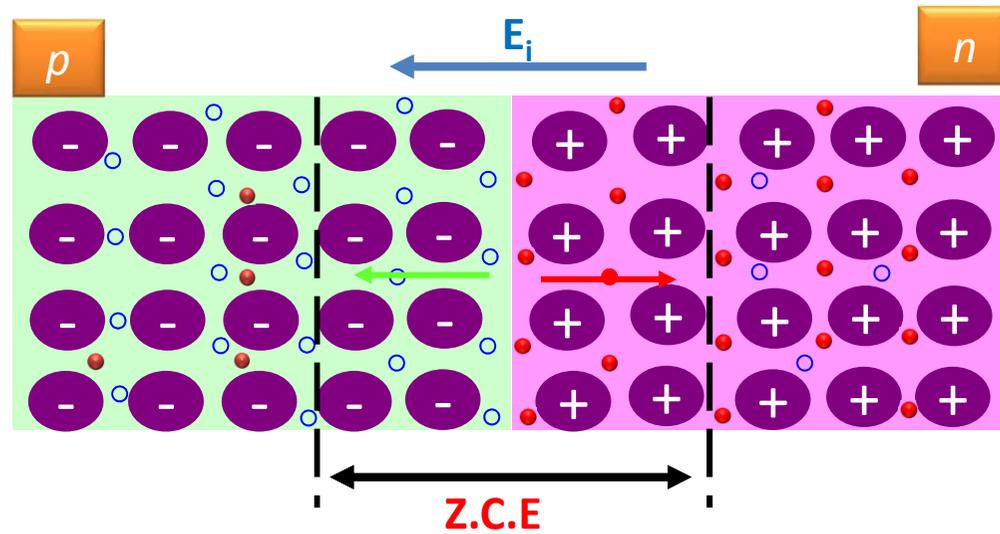
Electrons majoritaires

Ces représentations indiquent le type de porteurs majoritaire (électrons ou trous), les ions fixes provenant du dopage (par des donneurs ou des accepteurs) et les porteurs minoritaires.

Notons que chaque morceau des deux semi-conducteurs est globalement neutre car le nombre de charge positive est égal au nombre de charge positive.

La jonction **pn** est la juxtaposition des deux morceaux types **p** et **n**.

Mise en contact

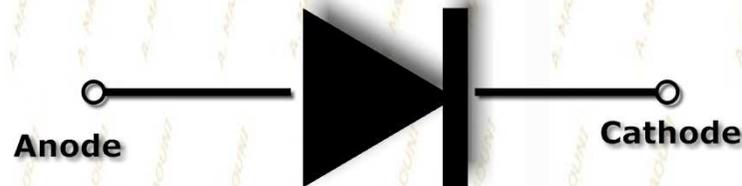


Diffusion des porteurs

Zone désertée = Z.C.E

Champ E

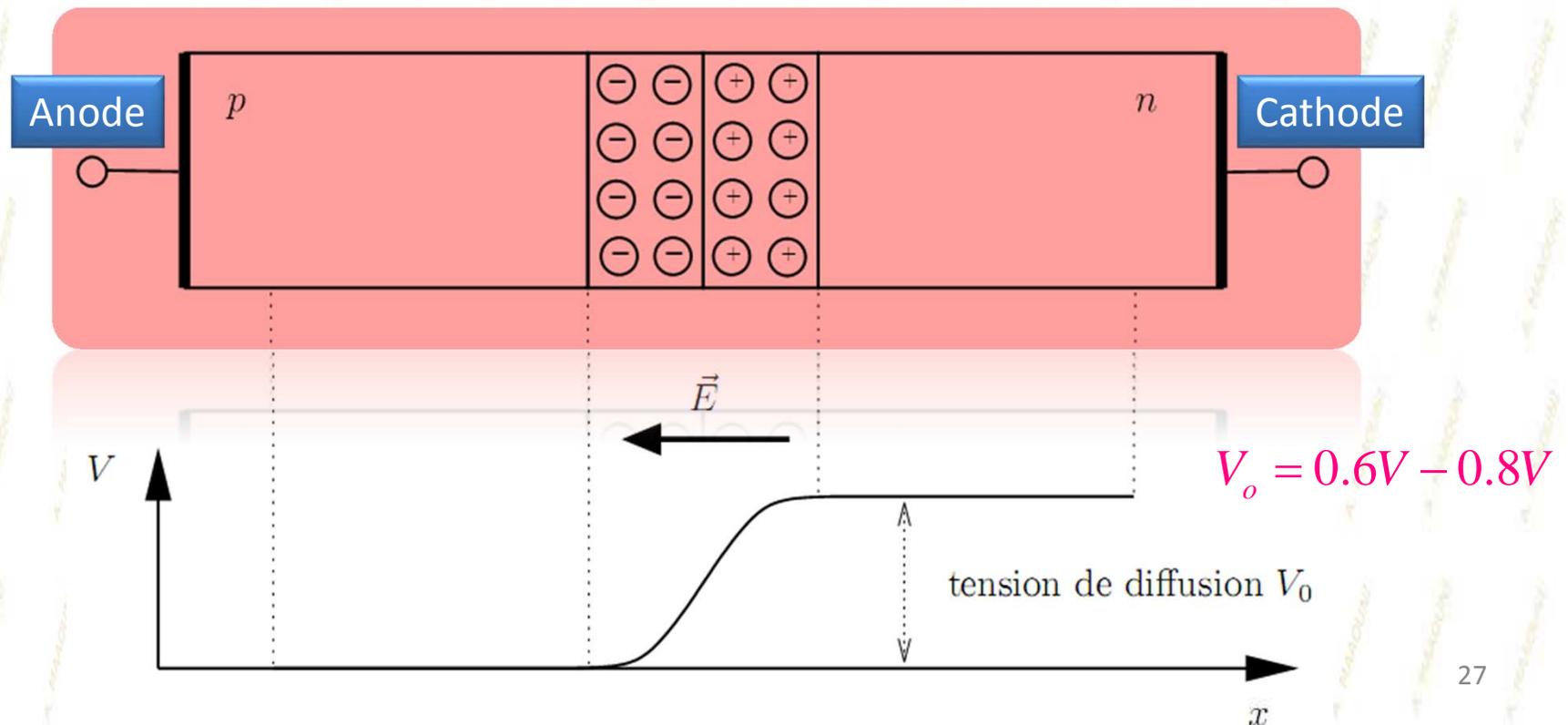
Bloque les majoritaires et favorise les minoritaires



La diffusion des e^- de n vers p vide la région près de la jonction des porteurs. De Chaque coté, il se crée des ions positifs et négatifs. Cela engendre un champ électrique interne E_i . Ce champ s'oppose au déplacement des porteurs majoritaires de part et d'autre de la jonction.

A l'équilibre, dans la région vide de porteurs, appelée Zone de Charge d'espace (**ZCE**), Le champ reste constant et la recombinaison e^- -trous cesse.

Puisque les porteurs majoritaires ne peuvent plus traverser la jonction, on dit qu'il existe une **barrière de potentiel** au niveau de celle-ci qui empêche ce passage.



eV_0 est l'énergie potentielle qui correspond à la hauteur de la barrière de potentielle que doit franchir un trous pour passer de p vers n .

La barrière de potentiel est donnée par l'expression suivant :

$$V_0 = V_T \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad V_T = 25.9mV \quad (T = 300^\circ K)$$
$$V_T = \frac{KT}{q} \quad \text{Potentiel Thermique}$$

$k = 1.3810^{23} JK^{-1}$: constante de Boltzmann

Neutralité électrique

A l'équilibre : le courant **total** i est nul pour une tension appliquée $v = 0$.

$$i = i_{diff} + i_{inv} = 0$$

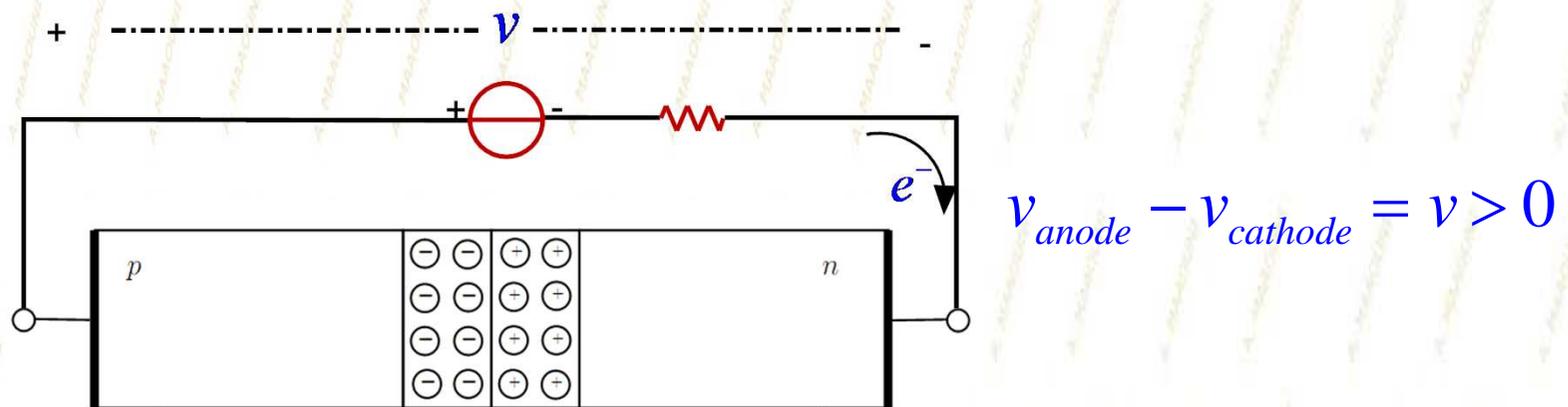
i_{diff} courant de diffusion des majoritaires à travers la jonction (courant d'e- et de trous : courant positif (de $p \rightarrow n$))

i_{inv} courant de minoritaires entraînés par le champ E_j . Ce courant porte le nom de courant de saturation inverse (courant négatif).

Le courant $i_{inv} = -I_s, I_s > 0$

- Le courant I_s dépend de la concentration des porteurs minoritaires et dépend donc fortement de la température.

Polarisation directe de la jonction pn



L'équilibre est rompu, la tension positive diminue l'intensité du champ électrique interne et par conséquent la hauteur de la barrière de potentiel qui devient :

$$E_p = e(V_e - v)$$

Un plus grand nombre de porteurs majoritaires peuvent passer outre la ZCE.

Le courant de diffusion des majoritaire dépend de v est il est donné par :

$$i_{diff}(v) = i_{diff}(0)e^{\frac{v}{V_T}} = I_s e^{\frac{v}{\eta V_T}}$$

$\eta=1,2$: Facteur de non idéalité

Le courant des minoritaire reste inchangé de sorte que

$$i_{inv}(v) \approx -I_s$$

de sorte que

$$i = i_{diff}(v) + i_{inv}(v) \approx I_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

$$I_s \approx 10^{-8} - 10^{-14} \text{ A}$$

On prendra

$$\eta = 1$$

Sauf spécification

Note :

L'apport de porteurs majoritaire diminue d'avantage la largeur de la ZCE

Polarisation en inverse de la jonction pn

La tension inverse $V_{inv} = -v < 0$ appliquée à la jonction augmente l'intensité du champ électrique interne. Le courant de diffusion des majoritaire diminue :

$$i_{diff} = I_s e^{-\frac{v}{\eta V_T}} < I_s$$

Le courant des minoritaires reste inchangé et le courant total devient :

$$i = I_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

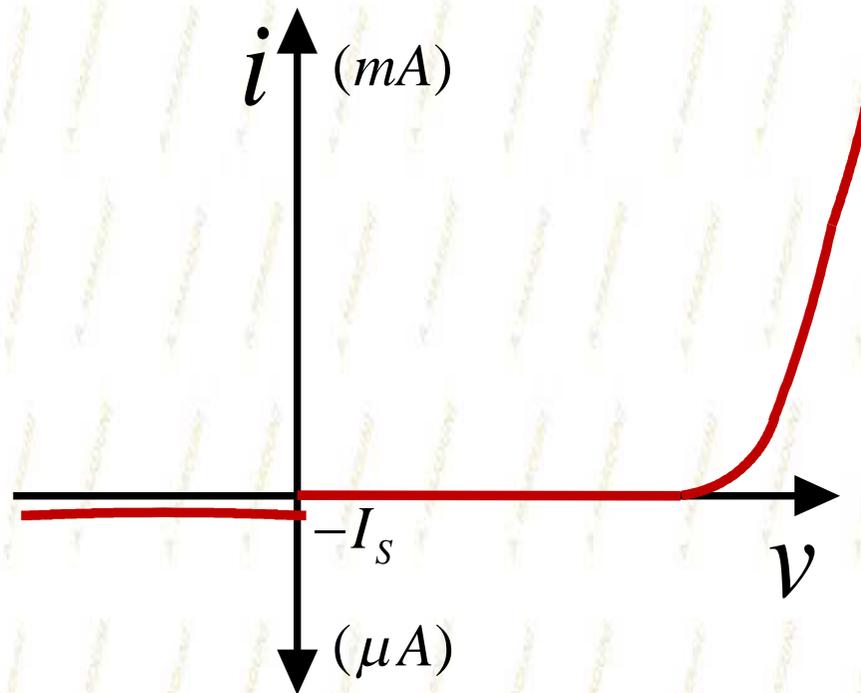
Note :

La largeur de la ZCE augmente.

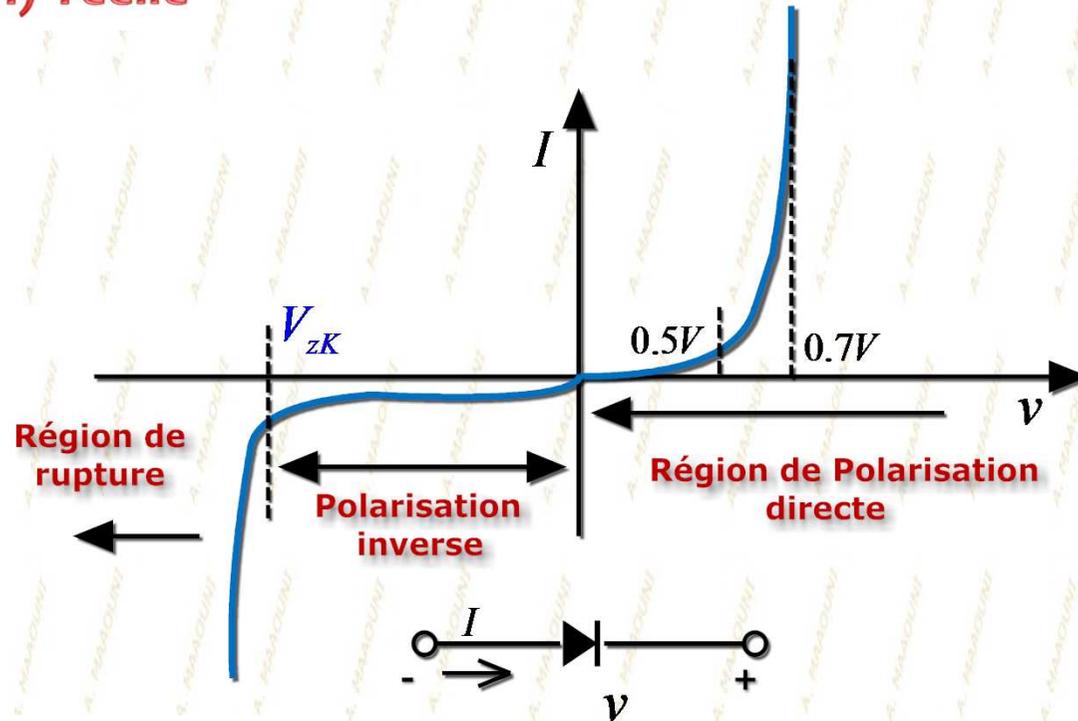
Quelque soit la tension v , ($v > 0, v < 0$) de polarisation de la jonction, on a :

idéalement :

$$i = I_s \left(e^{\frac{v}{\eta V_T}} - 1 \right)$$



Diode (jonction) réelle



Région de polarisation directe

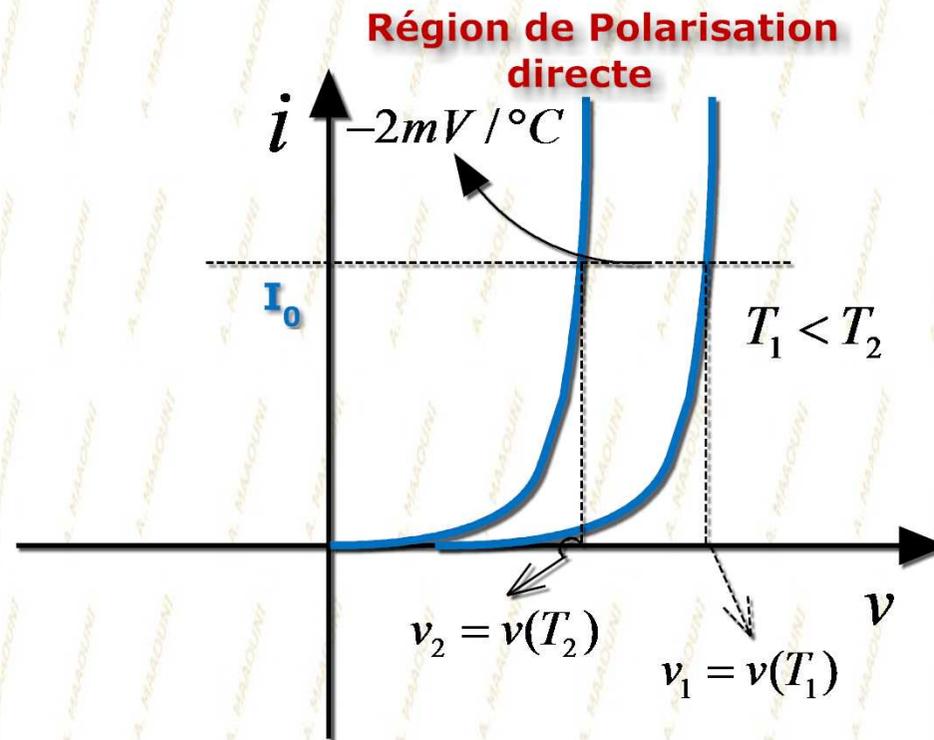
Dans cette région la tension est positive et la caractéristique $i-v$ est décrite par l'équation suivante :

$$I = I_s (e^{v/\eta V_T} - 1)$$

Le courant i étant très supérieur au courant de saturation, on peut écrire :

$$i \approx I_s e^{v/\eta V_T}, \quad v \approx \eta V_T \ln\left(\frac{i}{I_s}\right)$$

Pour un courant I_0 la tension aux bornes de la diode varie en fonction de la température :



Quand la température augmente, la tension aux bornes de la diode diminue à raison de $2mV/°C$.

Région de polarisation inverse

Quand la tension v aux bornes de la diode devient négative et inférieure en module à $5\eta V_T$,

$$e^{v/\eta V_T} \ll 1 \rightarrow i \approx -I_s$$

En fait, pour une diode réelle, le courant inverse même étant faible, reste supérieur à I_s . Typiquement de 10^{-8} à 10^{-15} A pour les composants discrets. Il est de l'ordre des nA.

Région de claquage

C'est la région correspondant à : $v < V_{zk} < 0$

Le courant augmente très rapidement alors que la tension reste sensiblement égale à V_{zk} . Cette dernière est appelée **tension Zener**. Le fonctionnement de la diode dans cette région est à la base de la régulation en tension.