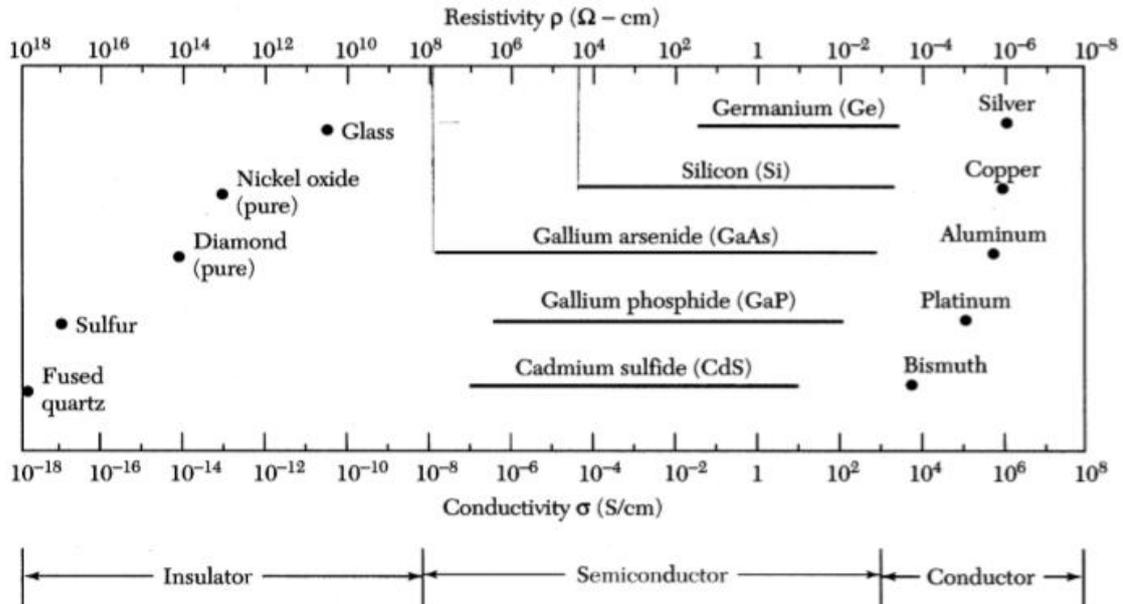


## Chapitre I : Définition des semi-conducteurs :

Les matériaux sont classés en trois catégories, conducteurs, isolants et semi-conducteurs.



### I-1-Définition par rapport à la conductivité :

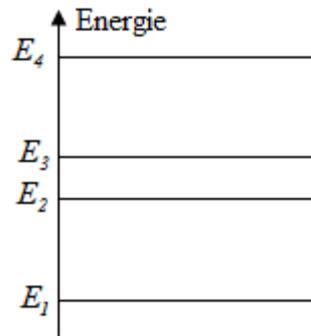
La conductivité électrique des semi-conducteurs  $\sigma$  à la température ambiante est comprise entre celle des métaux et celle des isolants  $10^{-9} < \sigma < 10^3 (\Omega^{-1}\text{m}^{-1})$

### I-2-Variation de la résistivité en fonction de la température :

La résistivité des semi-conducteurs ( $\rho$ ) à la température ambiante est comprise entre  $10^{-3}\Omega\cdot\text{m}$  et  $10^8\Omega\cdot\text{m}$ . La différence la plus caractéristique réside dans le sens de la variation de la résistivité avec la température, elle diminue quand la température augmente. En effet le nombre d'électrons libres dans un cristal de semi-conducteur est relativement faible, lorsque la température augmente les atomes du cristal libèrent plus d'électrons, les semi-conducteurs deviennent donc des bon conducteurs.

### I-3-Définition par rapport aux bandes d'énergies :

Pour mieux comprendre la définition des semi-conducteurs par rapport aux bandes d'énergies, il est nécessaire de comprendre la notion des bandes d'énergies, dans un seul atome de silicium Si isolé, les électrons occupent des niveaux énergétiques bien déterminés formés des sous niveaux comme le montre la figure1.



**Figure (I-1) :** Les niveaux énergétiques d'un atome de silicium isolé.

Pendant la formation du cristal du silicium, les atomes deviennent très proches, il y'aura des interactions, les niveaux énergétiques s'élargissent en constituant des nouveaux états discrets qui vont être doublés pour former deux bandes permises occupées par les électrons voir figure (I-2) :

Bande de valence (BV): c'est la bande inférieure, correspond à l'ensemble des niveaux d'énergies occupés par des électrons qui participent dans les liaisons covalente (les électrons de valence).

Bande de conduction (BC) : est une bande supérieure, comprenant l'ensemble des niveaux d'énergies occupés par les électrons excités arrivant de la bande de valence, qui peuvent participer aux phénomènes de conduction.

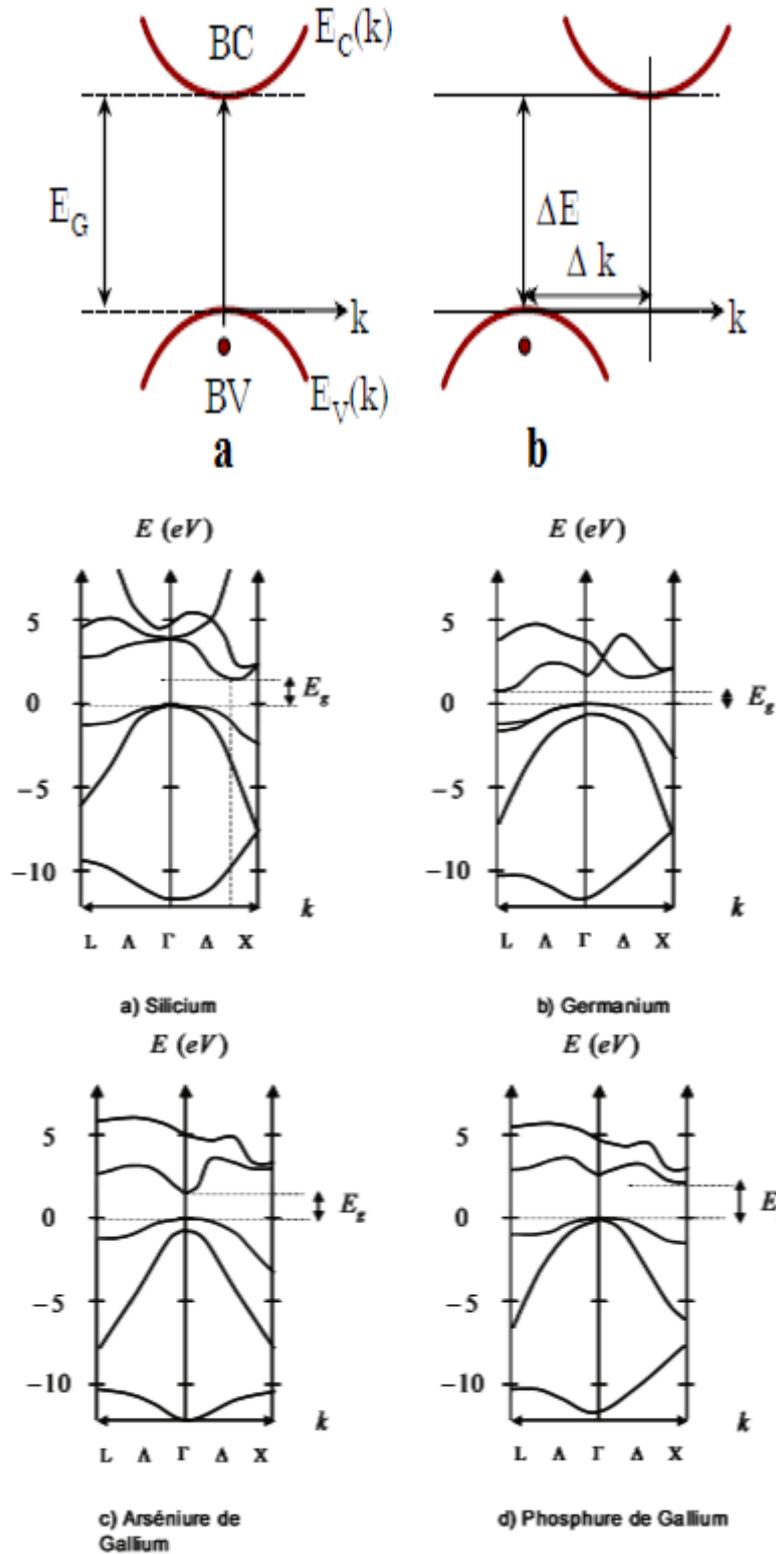
Avec :  $E_g = E_c - E_v$

$E_c$  : L'énergie de conduction.

$E_v$  ; L'énergie de valence.

**Les semi-conducteurs à gap directe :** Dans les semi-conducteurs à gap direct la transition électronique entre le maximum de la bande de valence  $E_v$  et le minimum de la bande de conduction  $E_c$  se produit dans le même vecteur d'onde  $\vec{k}$  ( $\overline{\Delta k} = 0$ ), c'est-à-dire la même quantité de mouvement  $\overline{\Delta p} = \hbar \overline{\Delta k} = 0$ .

**Les semi-conducteurs à gap indirecte :** la transition de l'électron depuis haut de la bande de valence vers le bas de la bande de conduction nécessite un changement du vecteur  $\vec{k}$  ( $\overline{\Delta k} \neq 0$ ) , donc une modification de la quantité de mouvement avec le sous réseau sous forme de vibration (phonon).



**Figure (I-2) : Structures de bandes**

**I-4-Les différentes formes des semi-conducteurs :**

Les semi-conducteurs sont classés suivant leur forme en deux catégories :

1-Les semi-conducteurs élémentaires :

Simple : Le silicium, Germanium (élément de la colonne VI).

2-Les semi-conducteurs composés :

-Alliages binaires : GaAs, InP, SiC.....

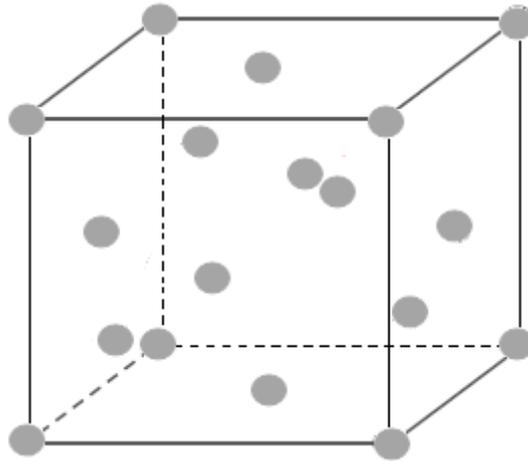
--Alliages ternaires :  $Ga_xAs_{1-x}N$ ,  $In_xGa_{1-x}As$ ,  $Ga_xAs_{1-x}P$ .....

-Alliages quaternaires :  $Ga_xAs_{1-x}Sb_yN_{1-y}$ ,  $In_xAl_{1-x}As_yN_{1-y}$ .....

-Alliages quinaires :  $Ga_xIn_{1-x}N_yAs_{1-y}Sb$ ,  $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}P$ .....

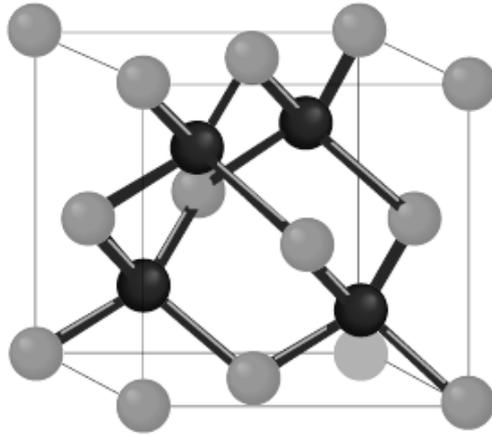
### I-5-Structures cristallines des semi-conducteurs :

Structure diamant : Le silicium, germanium et le carbone cristallisent dans la structure diamant formée de deux réseaux cubique à face centrées (cfc) enchevêtrés et décalés du quart de la diagonal. Dans le cas d'un réseau de silicium, la maille élémentaire contient deux atomes de Si, occupent les positions  $(0,0,0)$  et  $(1/4,1/4,1/4)$ .



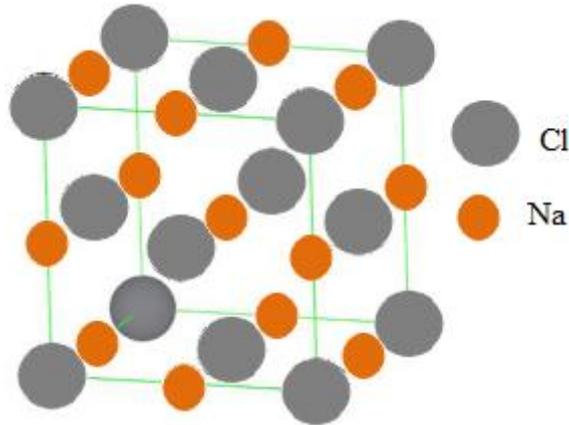
**Figure (I-3) :** La structure du diamant.

Structure Zinc blende : Cette structure dérivée de la structure diamant avec deux atomes différents, formée de deux réseaux cubiques à faces centrées (cfc), l'un est Zn et l'autre est S séparés par un vecteur  $(1/4,1/4,1/4)$  de la diagonale principale.



**Figure (I-4) : Structure zinc blende**

Structure NaCl : La structure NaCl appartient au groupe d'espace  $Fm\bar{3}m$  ( $n^{\circ}225$ ), elle est formée de deux sous réseaux de types cubique à faces centrées est décalé de  $1/2$  l'arrête, les atomes du chlorure occupent les sommets et les centres des faces du cube, les atomes du sodium occupent les milieux des arrêts et le centre du cube.



**Figure (1-5) : Structure NaCl.**

### I-6-Statistique de Fermi-Dirac :

$$P_n(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/k_B T}} \quad (I-1)$$

$E_F$  : Le niveau de l'énergie de Fermi.

$k_B$  : La constante de Boltzmann.

### I-7-Semi-conducteur intrinsèque :

C'est un matériau idéalement pur, constitué d'un seul élément chimique. Dans ce type de semi-conducteur le nombre d'électrons  $n$  dans la bande de conduction est égal au nombre de trous  $p$  dans la bande de valence égale à la concentration intrinsèque  $n_i = n = p$ .

Les semi-conducteurs intrinsèques les plus connus sont le germanium et le silicium, le plus utilisé étant ce dernier est un atome tétravalent : Il possède 4 électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline.

#### I-7-1-Semi-conducteurs non excités :

Dans un semi-conducteur non-excité comme le cas du cristal de silicium (Si) à  $T = 0\text{ K}$  les électrons de valence sont fortement liés aux atomes et sont mis en commun avec les électrons de valence des atomes voisins par des liaisons de covalence. Aucun électron libre n'apparaît à la surface et par conséquent pas de courant électrique.

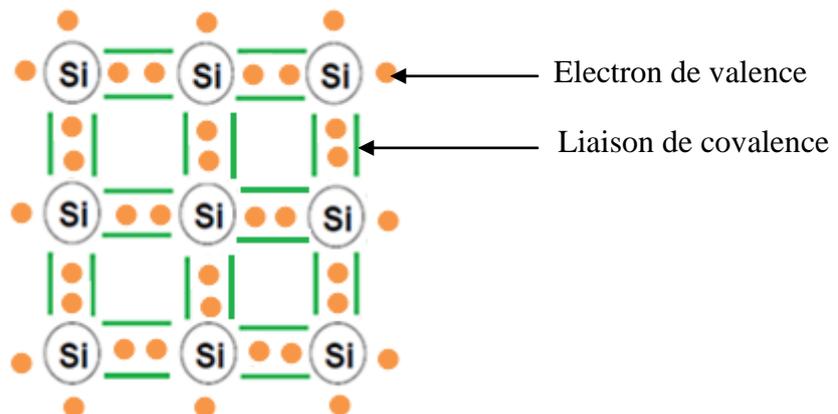


Figure : (I-6) : Semi-conducteur non excité (exp : Silicium à  $T = 0\text{ K}$ ).

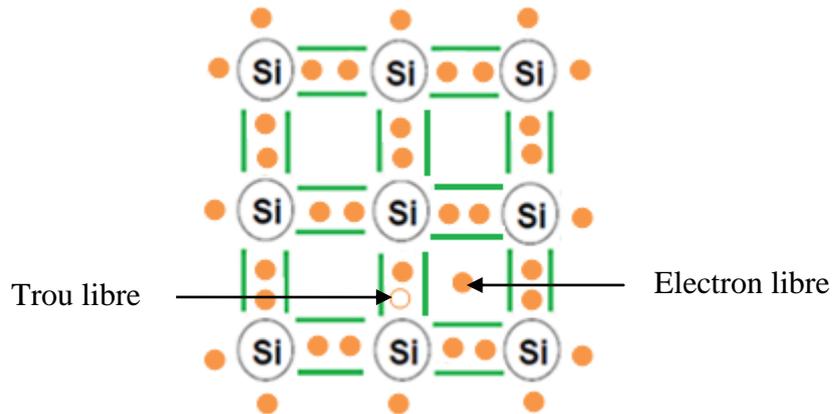
#### I-7-2-Ionisation thermique : génération d'une paire électrons-trous :

: Sous l'action d'une agitation thermique (élévation de la température), des électrons peuvent quitter leurs atomes d'origine et devenir des électrons libres. L'électron devenu libre a brisé un lien covalent et a laissé une place vacante. On donne à cette place vacante le nom de trou libre (manque d'électron).

A chaque rupture d'un lien covalent, il se crée simultanément un électron libre et un trou libre. On dit qu'il y a : génération d'une paire électron-trou.

Au cours de son déplacement dans le cristal, l'électron libre peut tomber dans la zone d'attraction d'un atome ayant un lien incomplet et prendre la place laissée vacante. L'électron

libre redeviendra un électron lié et le trou qu'il occupe disparaîtra. Cette disparition d'une paire électron-trou s'appelle une recombinaison.



**Figure (I-7) :** Cristal de silicium à  $T > 0K$

### I-7-3-La concentration des porteurs :

a) La concentration en électrons notée  $n$  par unité de volume exprimé en  $\text{cm}^{-3}$  dans la bande de conduction est donnée par la relation :

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) \quad \text{avec} \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

D'où :

$N_c$  : La densité effective d'état d'électrons dans la bande de conduction :

$k_B$  : La constante de Boltzmann

$E_c$  : L'énergie de conduction en (eV).

$E_F$  : L'énergie de Fermi.

$h$  : La constante de Planck.

$m_n^*$  : La masse effective d'électrons.

b) La concentration en trous  $p$  dans la bande de valence s'exprime par la formule :

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right) \quad \text{avec} \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2}$$

$N_v$  : La densité effective d'état des trous dans la bande de valence.

$E_v$  : L'énergie de la bande de Valence

$m_p^*$  : La masse effective des trous.

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

On exprime le niveau de Fermi intrinsèque  $E_i$  pour un semi-conducteur intrinsèque qui est obtenu à partir des équations des concentrations des électrons et des trous en écrivant :

$$E_F = E_i$$

$$n = p \Rightarrow N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_B T}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_B T}\right)$$

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} - \frac{1}{2} k_B T \ln\left(\frac{N_c}{N_v}\right)$$

#### I-7-4-La loi d'action de masse :

Le produit du nombre d'électrons  $n$  dans la bande de conduction par le nombre des trous  $p$  dans la bande de valence, nous donne une expression indépendante de la position du niveau de Fermi, cette loi appelée la loi d'action de masse.

$$n_i^2 = n.p = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{k_B T}\right)$$

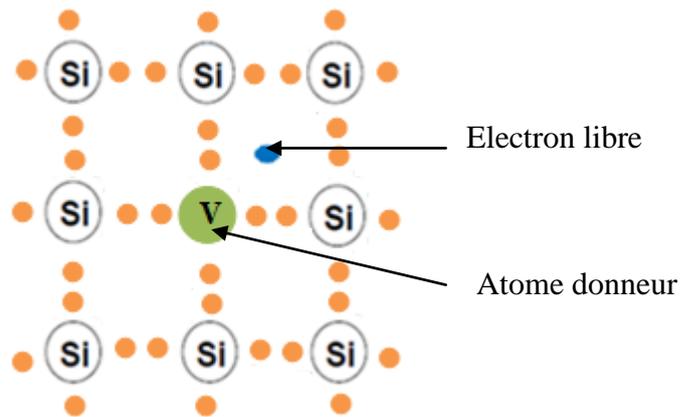
$$\Rightarrow n_i^2 = N_c N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

#### I-8-Semi-conducteurs extrinsèques : type N et P (Concentration des porteurs - diagramme énergétique):

Un semi-conducteur extrinsèque est obtenu en ajoutant de faibles quantités d'atomes astucieusement choisies que l'on appelle impuretés dopantes dans un semi-conducteur intrinsèque. Le but de ce procédé est de modifier d'une façon considérable la concentration des porteurs de charge.

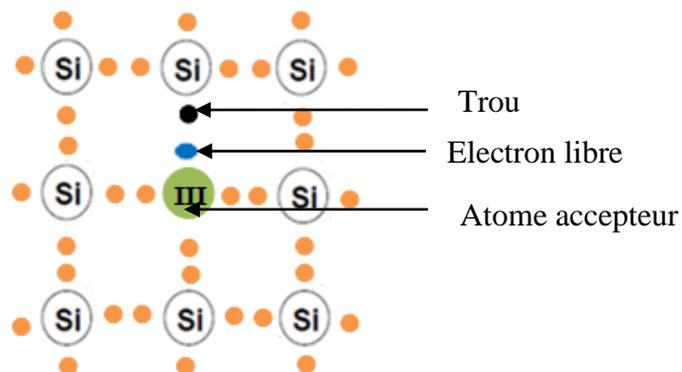
On obtient un semi-conducteur de type N, en ajoutant au cristal de silicium un élément de la 5ème colonne du tableau périodique (par exemple : Le phosphore (P) ou de l'arsenic(As)) ces derniers possèdent 5 électrons de valences, 4 parmi 5 électrons ont mis en commun avec les électrons de valence des autres atomes voisins de silicium pour réaliser des liaisons de covalence, le cinquième électron inutilisé est très faiblement lié à l'atome de phosphore. À des températures supérieures à 0 K, le 5ème électron qui est faiblement lié à l'atome dopant devient libre, il quitte son orbital et circule dans le cristal donc il se retrouve

libre dans la bande de conduction. L'atome dopant qui a fourni un électron libre est appelé donneur et il devient un ion positif.



**Figure (I-8):** silicium dopé avec un atome donneur (SC type N).

Pour obtenir un semi-conducteur de type P , en injectant dans le cristal de silicium le bore ,l'indium ou le galium ( élément de colonne III) qui possèdent 3 électrons périphériques dans leurs couches externes, il lui manque un électron pour réaliser une liaison covalente avec les quatre électrons des atomes voisins de silicium, dès que l'énergie thermique sera suffisante, un électron de valence d'un atome voisin va quitter son orbite pour remplacer l'électron manquant dans l'atomes dopant créant dans ce cas un trou dans la bande de valence du silicium et l'atome dopant qui a capter un électron est appelé atome accepteur, il perd sa neutralité pour devenir un ion négatif.



**Figure (I- 9):** silicium dopé avec un atome accepteur (SC type P).

Dans un semi-conducteur type N les électrons sont les porteurs majoritaires, leur concentration est égale à la concentration des donneurs, les trous présentent les porteurs minoritaires, les concentrations des électrons et des trous sont respectivement  $n_n$  et  $p_n$  dans un semi conducteur de type N sont:

$$n_n = N_D$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Pour un Semi-conducteur de type P : les trous sont porteurs majoritaires et les électrons sont les minoritaires, leurs concentrations sont respectivement :  $p_p$  et  $n_p$ .

$$p_p = N_A$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$N_D$  et  $N_A$  : présentent le concentrations des atomes donneurs et accepteurs respectivement.

Les concentrations  $N_D$  et  $N_A$  sont exprimées par les expressions suivantes:

$$N_D = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_{FN}}{kT}\right)$$

$$N_A = N_v \exp\left(-\frac{E_{FP} - E_v}{kT}\right)$$

$$E_{FN} = E_c - kT \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right) = E_i + kT \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

$$E_{FP} = E_v + kT \ln\left(\frac{N_v}{N_A}\right) = E_i - kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

On remarque que pour chaque type de semi-conducteur le niveau de Fermi est proche de la bande des porteurs majoritaires que le dopage est important.

### I-9-Dopage successifs du semi-conducteur :

Le semi-conducteur peut subir deux types de dopage successif par injection d'atomes accepteurs et d'atomes donneurs.

$$\text{Si } N_D > N_A \text{ on aura : } n_n = \frac{1}{2} \left[ (N_D - N_A) + \left( (N_D - N_A)^2 + 4n_i^2 \right)^{1/2} \right]$$

$$\text{Si } N_A > N_D : p_p = \frac{1}{2} \left[ (N_A - N_D) + \left( (N_A - N_D)^2 + 4n_i^2 \right)^{1/2} \right]$$

## I-10-Mécanisme du transport de charges :

### I-10-1-La conduction :

L'existence d'un champ électrique dans un semi-conducteur induit la conduction des charges simultanément, les trous se déplacent dans le même sens que le champ électrique tandis que les électrons dans la direction opposée.

Pour chaque type de charges on a :

$$J_n = -qnv_n = qn\mu_n E$$

$$J_p = qp v_p = qp\mu_p E$$

La conductivité totale d'un semi-conducteur  $\sigma$  est la somme de la conductivité des électrons  $\sigma_n$  et des trous  $\sigma_p$ .

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

Puisque  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , la résistivité d'un matériau s'exprime par :

$$\rho = \frac{1}{q(n\mu_n + p\mu_p)}$$

le semi-conducteur est intrinsèque, la conductivité devient intrinsèque:

$$\sigma_{in} = qn_i(\mu_n + \mu_p)$$

### I-10-2-La densité de courant de dérive :

$$J_{dér_{total}} = J_{dér_n} + J_{dér_p} = (qn\mu_n + qp\mu_p)E$$

$$\Rightarrow J_{dér_{total}} = (\sigma_n + \sigma_p)E = \sigma E$$

### I-10-3-Diffusion :

Dans semi-conducteur, le phénomène de diffusion est lié à l'existence d'un gradient de concentration, les électrons vont diffuser de la région où leur concentration est la plus grande vers la région où leur concentration est la plus faible.

### I-10-4-La densité de courant de diffusion :

Le courant de diffusion c'est un courant crée par le déplacement des électrons et des trous sous l'action d'un gradient de concentration. Nous exprimons le flux des électrons et des trous comme suit :

$$\phi_n(x) = -D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$\phi_p(x) = -D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

$D_n$  et  $D_p$  : Les coefficients de diffusion des électrons et des trous respectivement.

densité de courant total de diffusion créée par les électrons et les trous :

$$J_{dif_{total}} = J_{dif_n} + J_{dif_p} = q \left( D_n \frac{dn(x)}{dx} - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right)$$

La densité de courant totale des électrons et des trous :

$$J_{total_n} = J_{dérin} + J_{dif_n} = q \left( n\mu_n E + D_n \frac{dn(x)}{dx} \right)$$

$$J_{total_p} = J_{dérp} + J_{dif_p} = q \left( p\mu_p E - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right)$$

### I-11-Relation d'Einstein:

On considère un semi-conducteur à l'équilibre thermodynamique et isolé (le niveau de Fermi reste constant) de concentration variable suivant la direction  $x$  (n'est pas homogène) donnée par l'expression suivante :

$$n(x) = N_c \exp \left( -\frac{E_c(x) - E_F}{k_B T} \right)$$

La relation d'Einstein déduite

$$\frac{k_B T}{q} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$$

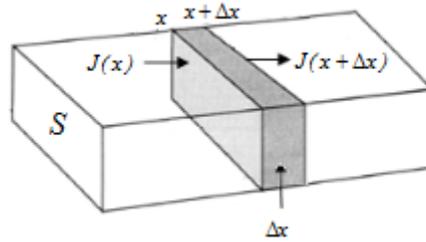
A partir de cette relation on peut exprimer la densité de courant total des électrons et des trous par les expressions suivantes :

$$J_{total_n} = q\mu_n \left( nE + \frac{k_B T}{q} \frac{dn(x)}{dx} \right) = qD_n \left( \frac{q}{k_B T} nE + \frac{dn(x)}{dx} \right)$$

$$J_{total_p} = q\mu_p \left( pE - \frac{k_B T}{q} \frac{dp(x)}{dx} \right) = qD_p \left( \frac{q}{k_B T} pE - \frac{dp(x)}{dx} \right)$$

### I-12-L'équation de continuité :

L'équation de continuité traduit la variation de la concentration des électrons et des trous en fonction du temps dans un élément de volume d'épaisseur  $\Delta x$  et de section  $S$ .



**Figure (1-10) :** Géométrie décrivant l'équation de continuité

$g_p$  : Le taux de génération des trous.

$r_p$  : Le taux de recombinaison des trous.

l'équation de continuité pour les trous :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p(x)}{\partial x} + g_p - r_p$$

L'équation de continuité pour les électrons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + g_n - r_n$$

En remplaçant  $J_n$  et  $J_p$  par leurs formules nous obtenons :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + g_n - r_n$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + g_p - r_p$$

### I-13-Mécanisme de génération recombinaison :

Quand on expose un semi-conducteur à une excitation extérieure ou bien une augmentation soudaine de la température, un électron quittant la bande de valence y laisse derrière lui un trou en créant une paire électron-trou, ce processus est appelé génération d'une paire électron-trou.

$g_{th}$  : Le taux de génération thermique provoquée par l'agitation thermique,  $g_{th} = \alpha np$ .

$\alpha$  : Coefficient de proportionnalité.

$g$ : Le taux de génération due aux excitations extérieurs.

$g'$  : Le taux de génération.

$$g' = g_{th} + g$$

$r'$  : Le taux de recombinaison.

$r$  : Le taux de recombinaison directe.

$$r = r' - g_{th}$$

La variation de la concentration de charges résultantes du phénomène de la génération et recombinaison ( $\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ ) :

$$\left(\frac{dn}{dt}\right) = g' - r' = g_{th} + g - r'$$

À l'équilibre on a :

$$\left(\frac{dn}{dt}\right) = 0 \Rightarrow g_{th} + g - r' = 0$$

$$\Rightarrow g = r' - g_{th} = r$$

$$\Rightarrow r = \alpha(n'p' - np)$$

#### I-14-Durée de vie des porteurs :

La durée de vie des porteurs est le temps moyen que prend une concentration donnée de porteurs minoritaires pour revenir à un état d'équilibre après deux collisions.

➤ Présence d'excitations extérieures :

$$\tau_n = \frac{I}{\alpha(n + p + \delta n)} \quad \text{et} \quad \tau_p = \frac{I}{\alpha(n + p + \delta p)}$$

$\tau_n$  et  $\tau_p$  sont Les durées de vie des électrons et trous en présence d'excitations extérieurs.

➤ Si le semi-conducteur est type N : La durée de vie des trous minoritaires  $\tau_p$  est :

$$\tau_p = \frac{I}{\alpha n} = \frac{I}{\alpha N_D}$$

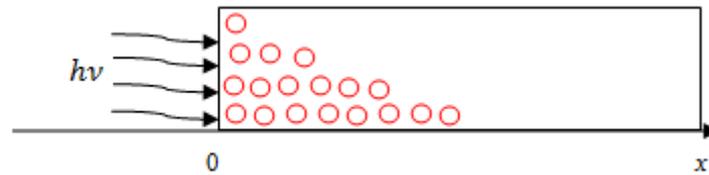
➤ Si le semi conducteur est de type P :  $p'$ La durée de vie des électrons minoritaires :

$$\tau_n = \frac{I}{\alpha p} = \frac{I}{\alpha N_A}$$

#### I-15-La longueur de diffusion :

La longueur de diffusion des charges correspond à la distance moyenne parcourue par ces charges entre l'instant où ils sont générés et celui où ils se recombinent.

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + g_p - r_p$$



**Figure (I-11) :** Eclairement d'un semi-conducteur

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\delta p}{D_p \tau_p} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 p}{dx^2} - \frac{\delta p}{L_p^2} = 0$$

On remarque que la dimension du terme  $D_p \tau_p$  est en  $\text{cm}^2$  Avec  $L_p^2 = D_p \tau_p$

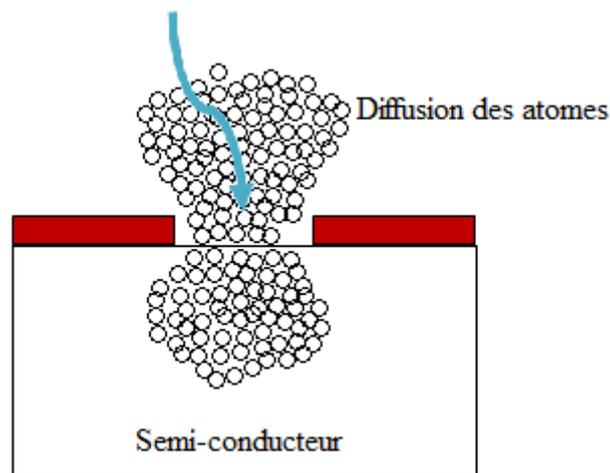
$$\Rightarrow L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$L_p$  : La longueur de diffusion des trous, la longueur de diffusion des électrons  $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ .

## Chapitre II : Techniques de dopage :

### II-1- La diffusion thermique :

Elle consiste à chauffer le matériau dans un four en quartz à une température de l'ordre de  $1000^{\circ}C$ . La diffusion mis en jeu dans le cristal à partir de la région voisine de la surface dépend de la présence des défauts soient : des lacunes ou dislocations, du gradient de concentration, la nature du dopant ainsi que la température.



**Figure (II-1):** La diffusion thermique

La deuxième loi de Fick permet d'écrire la variation de la concentration en fonction du temps :

$$\frac{dC(x)}{dt} = -\frac{d\Phi(x)}{dx} = -\frac{d}{dx}\left(-D\frac{dC(x)}{dx}\right) = D\frac{d^2C(x)}{dx^2}$$

Cette loi admet une solution analytique en décrivant la distribution des impuretés en profondeur, ce qui nous ramène à deux étapes de diffusion :

a) étape d'une source de diffusion constante (étape Pré-dépôt) : La concentration des impuretés  $C_s$  est constante à la surface du semi-conducteur. La solution de la loi de Fick est donnée par :

$$C(x, t_1) = C_s \left( 1 - \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4D_1 t_1}} \right) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{\sqrt{4D_1 t_1}}$$

$C_s$  : La concentration des impuretés à la surface.

$D_1$  : Le coefficient de diffusion à la température de dépôt.

$t_1$  : Temps de dépôt

b) étape d'une source de diffusion limitée (Redistribution): Dans ce cas la quantité d'impureté initiale déposée à la surface sous forme limitée va graduellement pénétrer à l'intérieur du semi-conducteur, la concentration en surface décroît pendant le processus de diffusion. Le profile de concentration suit une loi Gaussienne à l'intérieur du semi-conducteurs dopée est :

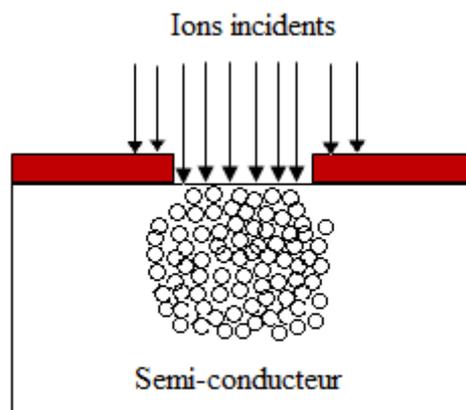
$$C(x, t_1, t_2) = \frac{2C_s}{\pi} \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2 t_2}\right)$$

$D_2$  : Le coefficient de diffusion à la température de redistribution.

$t_2$  : Temps de redistribution.

### II-1-Implantation ionique :

Cette technique permet d'implanter une dose d'impureté dans un semi-conducteur sous forme d'ions par bombardement, ces ions incidents sont accélérés par un champ électrique d'énergie assez suffisante comprise entre 3 KeV et 600 KeV vont pénétrer dans le semi-conducteur et cèdent une partie de leur énergie lors des interactions avec les atomes du matériau dopée d'où leur trajectoire s'arrête à distance moyenne  $R_p$  appelée longueur de pénétration peut aller de 100Å à 1nm, avec un écart type longitudinal  $\Delta R_p$  et un écart type transversal  $\Delta R_{II}$  perpendiculaire à la direction d'implantation.



**Figure (II-2) : Implantation ionique**

Le profile de la concentration des ions implantés s'écrit sous une forme Gaussienne :

$$C(x) = C_{max} \exp \left[ - \left( \frac{x - R_p}{\sqrt{2} \Delta R_p} \right)^2 \right]$$

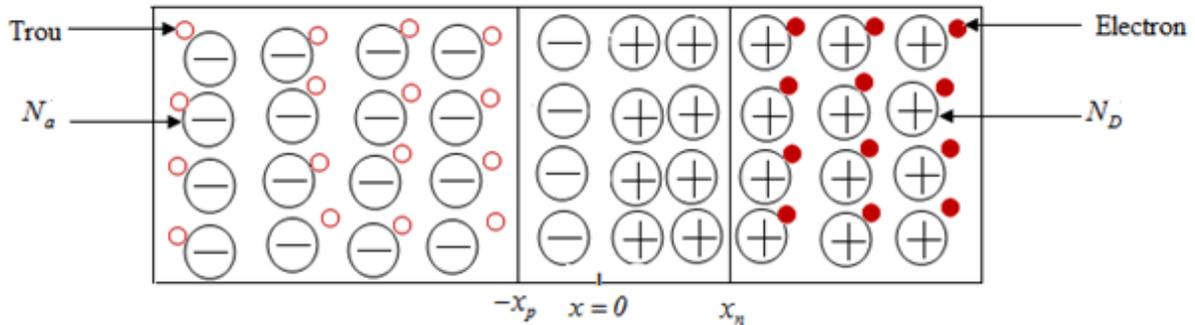
La concentration des ions est maximal à  $x = x_p$  avec :

$$C_{max} = C(x = x_p) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi\Delta R_p^2}} = \frac{0.4\phi}{\Delta R_p}$$

$\phi$  : La dose implantée.

### Chapitre III : La jonction PN :

**III-1-Définition :** La jonction PN est la juxtaposition d'une région dopée type N avec une région dopée de type P du même semi-conducteur.

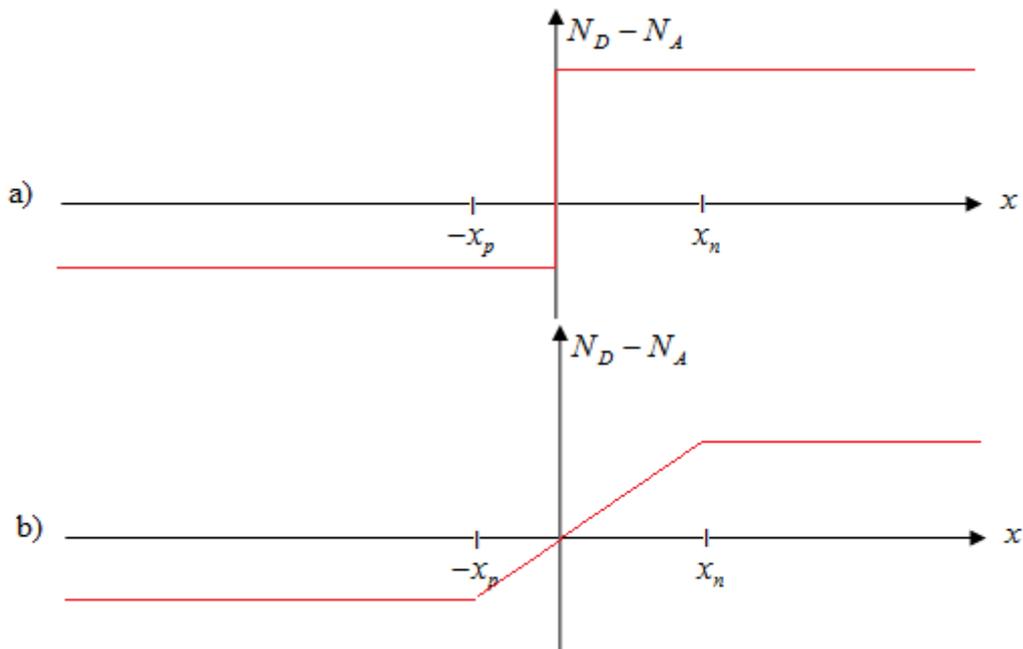


**Figure (III-1) :** La jonction PN

### III-2-Les différents types de jonctions :

**Jonction PN abrupte :** Le passage de  $N_D - N_A$  de la région P à la région N s'effectue d'une manière brutale en  $x = 0$ .

**Jonction PN graduelle :** le passage de  $N_D - N_A$  de la région P à la région N est graduel s'effectue selon une loi linéaire entre  $x_p$  et  $x_n$ .



**Figure (III-2) :** Types de jonction PN. a) abrupte. b) graduelle.

### III-3-La jonction PN à l'équilibre :

#### III-3-1-Description du phénomène :

Lorsque l'équilibre sera établi, dans la région de contact dépeuplée de porteurs, appelée zone de transition, le champ reste constant et la recombinaison électrons-trous s'arrête, 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.

L'expression de la densité de charge d'espace est :

$$\rho(x) = q(N_D - N_A + p - n) \quad (\text{III-1})$$

La densité de charge d'espace est variable dans chaque région, dans la zone de transition la densité de charge est composée des donneurs  $N_D$  dans le côté N et d'accepteurs  $N_A$  dans le côté P par contre elle est nulle ailleurs, l'évolution de la densité de charge s'écrit :

$$x < -x_p \text{ et } x > x_n \Rightarrow \rho(x) = 0$$

$$-x_p < x < 0 \Rightarrow \rho(x) = -qN_A$$

$$0 < x < x_n \Rightarrow \rho(x) = qN_D$$

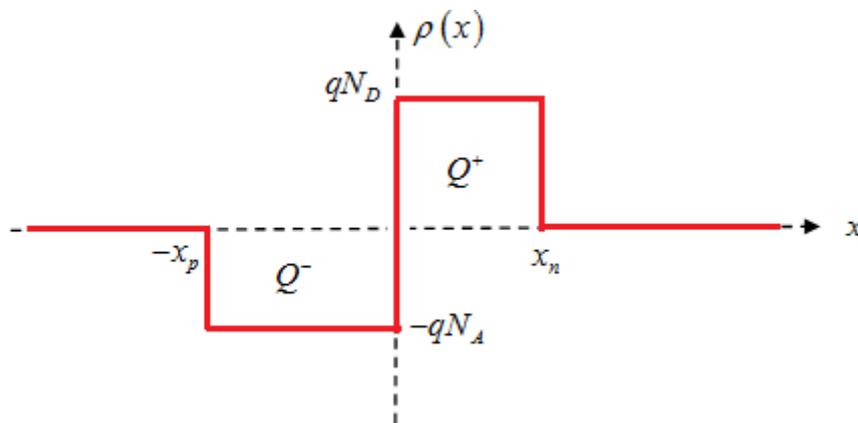
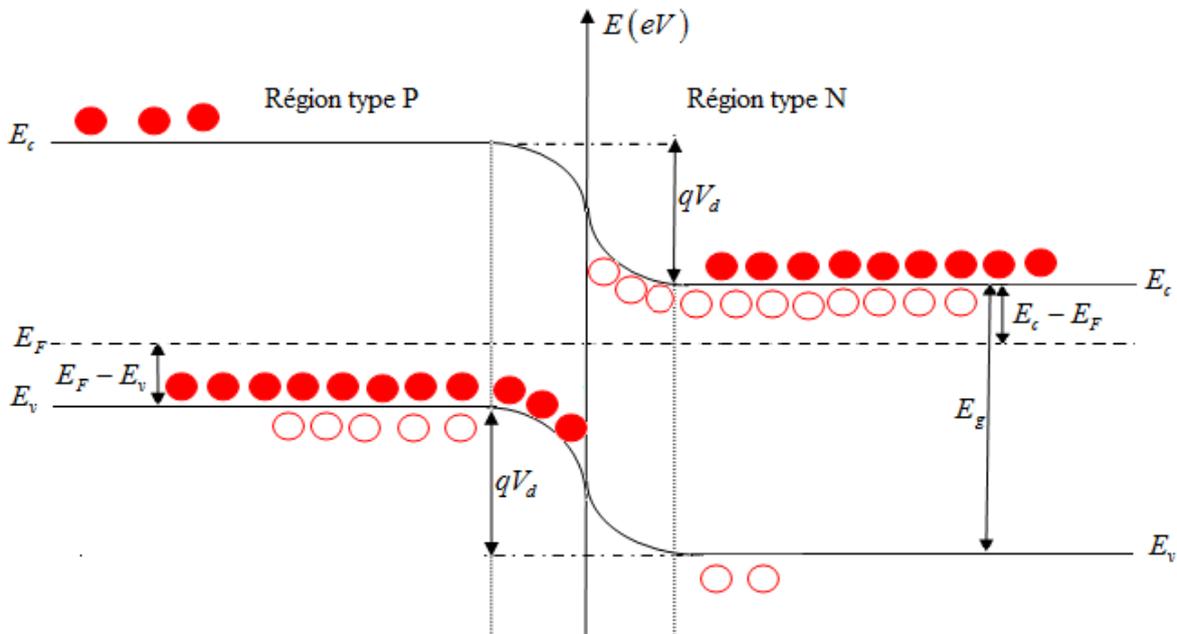


Figure (III-3) : Variation de la densité de charge.

### III-3-2-Diagramme des bandes d'énergies:



**Figure (III-4) :** Diagramme de bande d'énergie de la jonction PN à l'équilibre.

### III-3-3-La concentration des porteurs à l'équilibre :

Zone N :

$$n_n = N_D ; \quad p_n = n_i^2 / N_D$$

Zone P :

$$p_p = N_A , \quad n_p = n_i^2 / N_A$$

### III-3-4- Calcul du potentiel de diffusion :

Le potentiel de diffusion est déduit de la différence de potentiel qui apparue entre la région N et la région P de la jonction.

Quand la jonction PN est à l'équilibre thermodynamique, aucun courant ne circule à l'intérieure :

$$J_{total_p} = q\mu_p \left( pE - \frac{kT}{q} \frac{dp(x)}{dx} \right) = 0$$

$$\Rightarrow V_d = V_n - V_p = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

### III-3-5- Calcul du champ électrique $E_N(x)$ et $E_P(x)$ :

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} = \frac{q(N_D + N_A + p - n)}{\varepsilon}$$

a) région:  $-\infty < x < -x_p : E(x) = 0$

b) région :  $-x_p < x < 0$  :

$$\Rightarrow \frac{dE_P(x)}{dx} = -\frac{qN_A}{\varepsilon}$$

$$\Rightarrow E_P(x) = -\frac{qN_A}{\varepsilon}x - \frac{qN_A}{\varepsilon}x_p = -\frac{qN_A}{\varepsilon}(x + x_p)$$

c) région :  $0 < x < x_n$  :

$$\Rightarrow \frac{dE_N(x)}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon}$$

$$\Rightarrow E_N(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_n)$$

d) région :  $x_n < x < +\infty : E(x) = 0$

### III-3-6- Calcul du potentiel électrique $V_N(x)$ et $V_P(x)$ :

a) région:

$$-\infty < x < -x_p : E(x) = 0 \Rightarrow V(x) = V_p$$

$$\text{région : } -x_p < x < 0 : V_P(x) = \int -E_P(x) dx$$

$$\Rightarrow V_P(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon}(x + x_p)^2 + V_p$$

$$\text{région } 0 < x < x_n : V_N(x) = \int -E_N(x) dx = -\frac{qN_D}{\varepsilon} \int (x - x_n) dx$$

$$\Rightarrow V_N(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + V_n$$

### III-3-7-Epaisseur de la zone de transition :

L'épaisseur de la zone de transition  $x$  présente la somme des extensions  $x_n$  de la zone N et  $x_p$  de la zone P :

Avec :

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} V_d}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} V_d}$$

L'expression de l'épaisseur de la zone de transition :

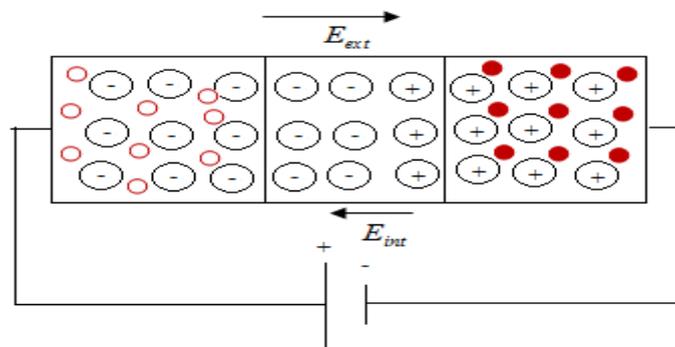
$$x = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_D + N_A}{N_A N_D} V_d}$$

### III-4-Jonction PN polarisée:

Une jonction PN est dite polarisée si on applique une différence de potentiel entre une de ces deux extrémités, soit la région N soit la région P.

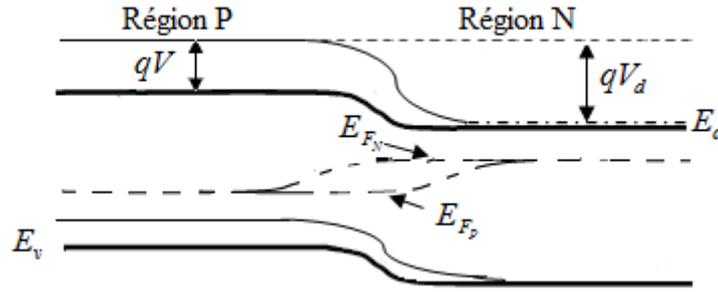
#### III-4-1- Jonction PN polarisée en directe ou en inverse:

On dit qu'une jonction PN est polarisée en directe lorsqu'une tension positive  $V$  est appliquée sur la région P. La différence de potentiel entre les régions n et p au niveau de la jonction, devient  $V_d = V_n - V_p$  à ce qui entraîne une diminution de la barrière de potentiel qui devient  $q(V_d - V)$



**Figure (III-5) :** Jonction PN polarisée en directe.

### III-4-2-Diagramme des bandes d'énergie :



**Figure (III-6) :** diagramme des bandes d'énergie d'une jonction PN polarisée en directe.

### III-4-3-Concentration des porteurs (hors équilibre) :

1) Concentration des porteurs minoritaires aux extrémités de la zone de transition :

Les concentrations des trous et des électrons minoritaires aux points  $x = -x_p$  et  $x = x_n$  respectivement sont :

$$n'_p = n_p \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right)$$

$$p'_n = p_n \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right)$$

2) La concentration des porteurs de charge dans les régions neutres

$$p'_n(x) = \frac{p_n}{\text{sh}\left[\frac{M_n}{L_p}\right]} \left[ e^{qV/k_B T} - 1 \right] \text{sh}\left[\frac{z_c - x}{L_p}\right] + p_n$$

$$n'_p(x) = \frac{n_p}{\text{sh}\left[\frac{M_p}{L_n}\right]} \left[ e^{qV/k_B T} - 1 \right] \text{sh}\left[\frac{x + z'_c}{L_n}\right] + n_p$$

### III-4-5-La densité de courant :

La densité de courant total qui traverse la jonction est due essentiellement au courant de diffusion des électrons et des trous minoritaires :

$$J_{tot} = J_n(x) + J_p(x)$$

$$\Rightarrow J_n(x) = \frac{qD_n n_i^2}{N_A L_n} \frac{1}{\text{th}\left[\frac{M_p}{L_n}\right]} \left[ e^{qV/k_B T} - 1 \right]$$

$$\Rightarrow J_p(x) = \frac{qD_p n_i^2}{N_D L_p} \frac{1}{\text{th}\left[\frac{M_n}{L_p}\right]} \left[ e^{qV/k_B T} - 1 \right]$$

La densité de courant total :

$$J_{tot}(x) = J_n(x) + J_p(x) = qn_i^2 \left[ \frac{D_n}{N_A L_n \text{th}\left(\frac{M_p}{L_n}\right)} + \frac{D_p}{N_D L_p \text{th}\left(\frac{M_n}{L_p}\right)} \right] \left[ e^{qV/k_B T} - 1 \right]$$

### III-5-Caractéristique I-V d'une jonction PN polarisée :

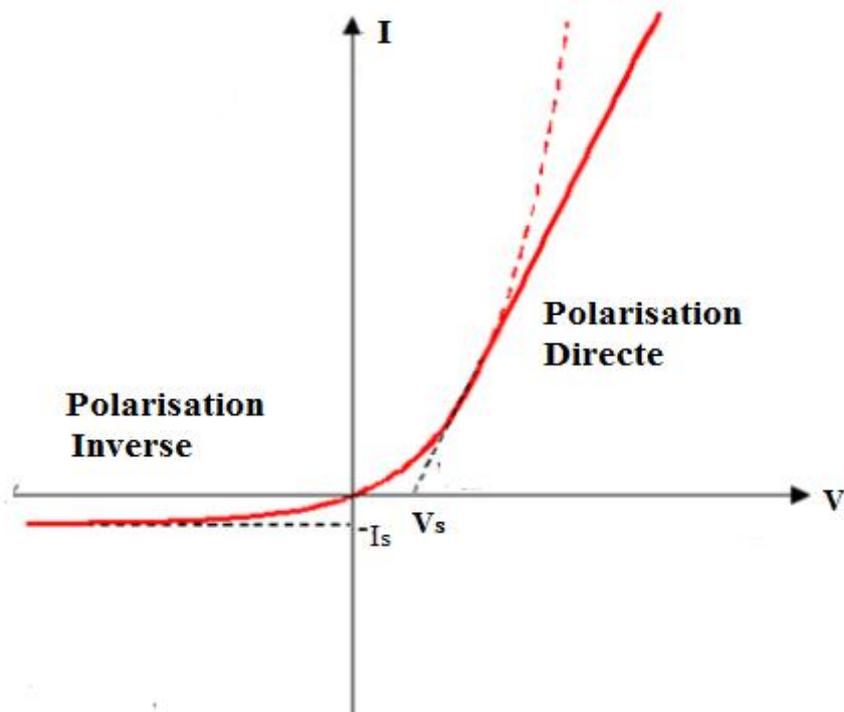
La caractéristique d'une jonction PN est une relation qui existe entre l'intensité du courant traversant la jonction PN et la tension V aux bornes de celle-ci, cette relation  $I = f(V)$ .

Dans Jonction PN polarisée en directe, la variation du courant en fonction de la tension est tout d'abord exponentielle positif, puis tend à devenir linéaire.

L'intersection du prolongement de la zone linéaire de la caractéristique avec l'axe des tensions nous donne la tension du seuil  $V_s$ , c'est la tension à partir du quelle la diode commence à conduire.

La caractéristique directe peut être assimilée à une droite s'écrie :

$$V = V_s + r_D I_d \tag{III-48}$$



**Figure (III-7) :** Caractéristique I-V d'une jonction PN polarisée

### III-6-Calcul des capacités (de transition, de diffusion ou de stockage) :

La jonction PN se comporte comme un condensateur lorsque la tension appliquée varie en fonction du temps.

Capacité de diffusion : Une jonction PN est polarisée en directe avec une faible tension alternatif se comporte comme une capacité de diffusion, elle traduit le retard de déphasage entre la tension de polarisation et le courant, elle est à l'origine de la mobilité élevée des électrons et des trous.

$$C_d = \frac{q^2}{2k_B T} (p_n L_p + n_p L_n) e^{qV/k_B T} \quad (\text{III-54})$$

Capacité de transition : Le model du composant d'une jonction PN est polarisée en inverse correspondant à une capacité de transition, la zone de transition qui contient des ions  $N_A^-$  et  $N_D^+$  est considérée comme un diélectrique et les régions N et P comme des électrodes.

$$C_d = A \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2}} \sqrt{V_d + V_{inv}} = \frac{\epsilon A}{x_{V(inv)}} \quad (\text{III-55})$$

A : la surface de la jonction.

$x_{V(inv)}$  : L'épaisseur de la zone de transition.

### **III-7-Jonction fortement polarisée en inverse :**

#### **III-7-1-Effet Zener :**

L'effet Zener se produit que dans les jonctions très dopées ; lorsque le champ électrique devient très intense dans la zone de transition N excitant directement un électron lié de la bande de valence vers la bande de conduction donc un grand nombre de paires électrons trous se libèrent, il y aura une augmentation de la concentration des porteurs libres, cela engendre une augmentation rapide du courant inverse des porteurs minoritaires et la tension reste presque constante.

#### **III-7-2-Effet d'Avalanche :**

Lorsque le champ électrique est très élevé (autour de  $1,5 \cdot 10^5$  V/cm), les porteurs subissent une accélération par ce champ acquiert assez d'énergie pour provoquer la rupture des liaisons covalentes entre les atomes et arracher les électrons de valence donc création d'une paire électron-trou, ces paires créées sont discriminées par le champ électrique, qui vont à leurs tours créer d'autres paires et ainsi de suite, donc un courant très important se génère.

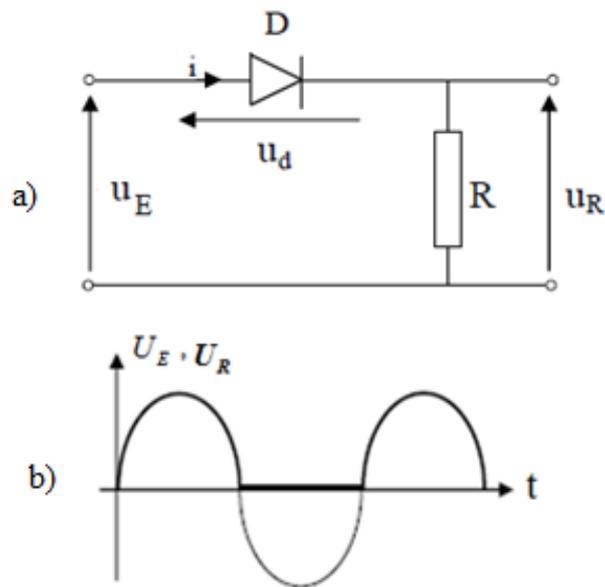
## Chapitre IV : Quelques applications de la jonction PN :

### IV-1-1-Redressement :

a) Redressement simple alternance : On utilise une seule alternance de ce signal sinusoïdal pour générer une tension continue (supprimer les alternances négatives).

Pendant l'alternance positive :  $U_E > 0$ , la diode est passante.

Pendant l'alternance négative :  $U_E < 0$ , la diode est donc bloquée.



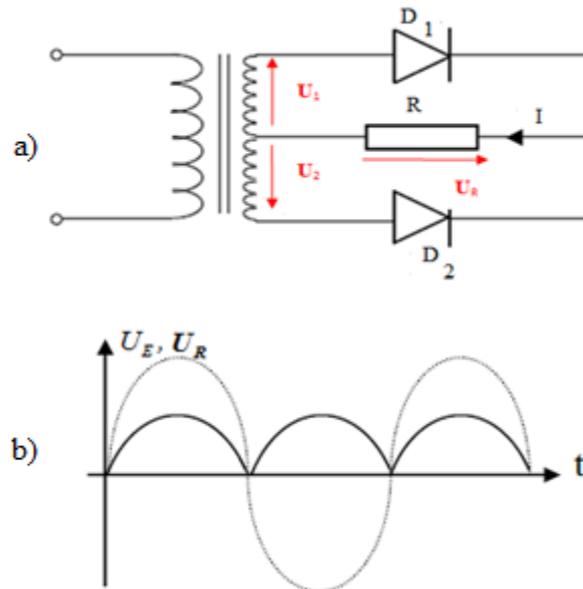
**Figure (IV-1) :** Redressement simple alternance.

a) Redresseur. b) les graphes des tensions  $U_E$  et  $U_R$ .

b) Redressement double alternance :

Pendant l'alternance positive de  $U_E$  :  $U_1 > 0 \Rightarrow D_1$  conduit,  $U_2 < 0 \Rightarrow D_2$  bloquée.

Pendant l'alternance négative de  $U_E$  :  $U_2$  est positive,  $U_2 > 0 \Rightarrow D_2$  conduit,  $U_1 < 0 \Rightarrow D_1$  bloquée.

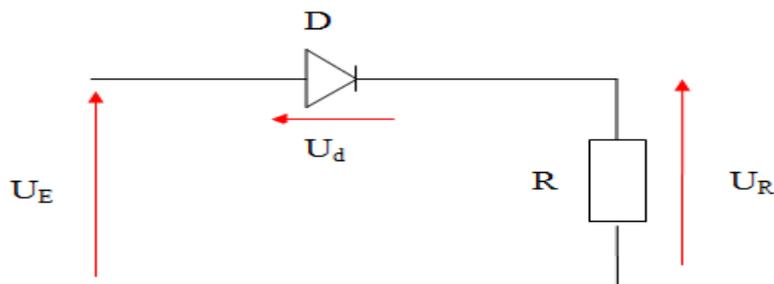


**Figure (IV-2) :** Redressement double alternance.

a) Circuit redresseur. b) Les graphes des tensions  $U_E$  et  $U_R$ .

#### IV-1-2-Commutation :

On appelle commutation le passage d'une jonction PN d'une polarisation directe à une polarisation inverse c'est-à-dire d'un état passant à un état bloquée brusquement, il se produit un courant inverse très important au début qui ensuite décroît vers la valeur soit 10% du courant de saturation de l'état initial.



**Figure (IV-3) :** Circuit électrique commutateur

## IV-2- Autres type de jonctions :

### IV-2-1-Les cellules solaires :

Les cellules solaires fonctionnent sans polarisation, par conversion photonique de l'énergie solaire en énergie électrique, sous l'éclairement la caractéristique I-V de la jonction est négative ce qui permet à la jonction de fournir l'énergie. La cellule solaire est caractérisée par son rendement de conversion énergétique.

### IV-2-2-Diode Schottky :

La diode Schottky est constituée d'un contact d'une fine couche métallique et un semi conducteur, les électrons sont les porteurs majoritaires dans les deux matériaux (le nombre des trous est négligeables), cette particularité est la caractéristique de la diode, la faible capacité de la diode permet de l'utiliser dans les applications à très hautes fréquence. (De l'ordre de 20Ghz).

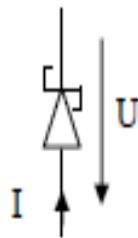


Figure (IV-4) : Diode Schottky

### IV-3-3-Les photodiodes :

Une photodiode polarisée en inverse sert à convertir des signaux lumineux en signaux électriques donc elle fournit un courant inverse. Ses applications principales concernent son utilisation comme capteur de lumière : conversion d'un signal optique fourni par une fibre optique par exemple, en signal électrique ; récepteur des télécommandes infrarouges.

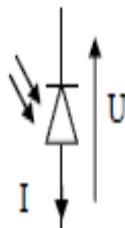


Figure (IV-5) : Photodiode

#### IV-3-4-Les diodes électroluminescentes:

La diode électroluminescente est une jonction polarisée en directe, elle convertit le courant électrique en rayonnement lumineux. Sous l'effet de la différence de tension appliquée, les porteurs majoritaires traversent la zone de transition et deviennent minoritaires, les électrons et les trous se recombinent, ils perdent de l'énergie et donne naissance à des photons sous forme radiative d'où l'émission de la lumière (ce rayonnement peut avoir différentes couleur rouge, orange, jaune, vert ou bleu).

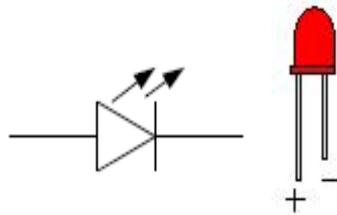


Figure (IV-6) : Diode électroluminescentes

#### IV-3-5-Les diodes lasers :

Ce sont des hétérojonctions tout simplement des empilements entre deux semi-conducteurs différents. Leurs principe de fonctionnement est similaire aux diodes LED.

La diode laser est constituée d'une jonction PN à base de matériaux semi-conducteurs à gap directe avec une région active qui sert à confiner les électrons injectés pour augmenter leur densité par une forte polarisation en directe de la diode, ils se recombinent avec les trous par émission de photons sous forme de rayonnement cohérent.

#### IV-3-6-Introduction aux transistors :

Le transistor est constitué de trois régions du même semi-conducteur différemment dopées, on distingue deux types de transistors bipolaires :

Transistor NPN : La couche au milieu dopée de type P.

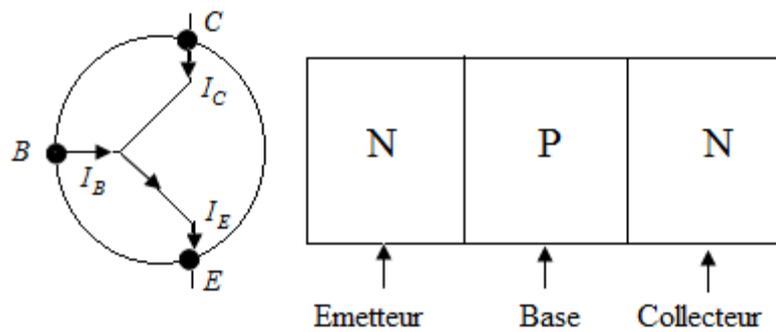
Transistor PNP : La couche au milieu dopée de type N.

-La couche au milieu est appelée la base, elle est mince et faiblement dopée (la concentration des porteurs majoritaires est assez faible).

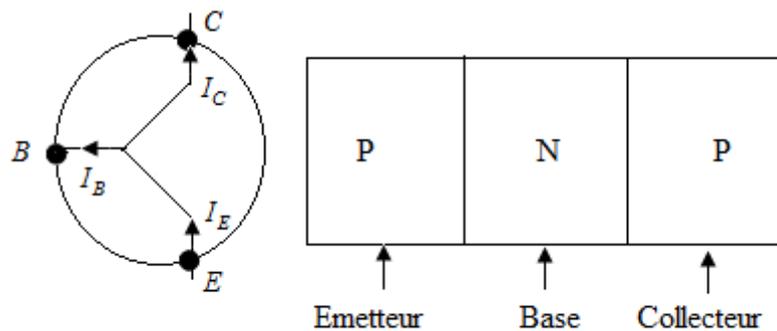
Les deux couches extérieures forment :

-L'émetteur : fortement dopé, son rôle consiste à injecter des porteurs dans la base.

-Le collecteur : faiblement dopée, il recueille les porteurs.



**Figure (IV-7) :** Transistor NPN.



**Figure (IV-8) :** Transistor PNP

Principe de fonctionnement d'un Transistor NPN :

On peut ressembler un transistor NPN à deux jonction PN (jonction base émetteur et jonction base collecteur).

La jonction base émetteur est polarisée en directe, la zone de transition qu'il disparaît du fait de la diffusion des électrons majoritaires de l'émetteur (région N) vers la base (région P) et la diffusion des trous majoritaires de la base vers l'émetteur, un courant direct circule de la base vers l'émetteur, on l'appelle courant de base  $I_B$ , donc la jonction est conductrice.

La jonction base collecteur est polarisée en inverse, les injections des porteurs dues à cette polarisation sont très faibles, le champ électrique dans la zone de transition est très élevé et la zone de transition devient très large, aucun courant ne circule.

A partir d'un très faible courant de base, on constate un fort courant circulant entre le collecteur et l'émetteur ce qu'on appelle effet transistor. Ce phénomène se produit aux conditions suivantes :

-L'émetteur doit être beaucoup plus dopée que la base qui est très mince.

-La jonction émetteur-base est polarisée en directe et la jonction collecteur base est polarisée en inverse.

Relation entre les courants :

La jonction base-émetteur est polarisée en directe :

$$I_E = I_S \left( e^{V_{BE}/k_B T} - 1 \right) \quad (\text{IV-1})$$

La jonction collecteur-base est polarisée en inverse.

$$\text{Le courant au niveau du collecteur : } I_C = \alpha I_E + I_{CB_0} \quad (\text{IV-2})$$

$I_{CB_0}$  : Le courant inverse équivalent au courant de saturation.

$\alpha$  : L'efficacité d'injection ( $\alpha \approx 0.98$ )

On sait que :

$$I_E = I_B + I_C \quad (\text{IV-3})$$

$$\Rightarrow I_C = \alpha (I_B + I_C) + I_{CB_0}$$

$$\Rightarrow I_C (1 - \alpha) = \alpha I_B + I_{CB_0}$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (I_B + I_{CB_0})$$

$$\text{On pose : } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \Rightarrow \beta + 1 = \frac{\alpha}{1 - \alpha} + 1$$

$$\Rightarrow \beta + 1 = \frac{1}{1 - \alpha}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CB_0} \quad (\text{IV-4})$$

## REFERENCES

- [1] H. Mathieu, H. Fanet, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, cours et exercices corrigés. 6<sup>e</sup> édition Dunod (2009).
- [2] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons (1981).
- [3] U.K. Mishra, J.SINGH. Semiconductors devices physics and design, Springer (2008).
- [4] D. A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices Basic Principles, 4<sup>th</sup> Edition, Mc Graw-Hill (2012).711.
- [5] P. Vanden Bosschelle, Technologie des semi-conducteurs et des circuits intégrés, Mc Graw Hill (1986).
- [6] O. Bonnaud, Composants à semi-conducteurs : de la physique du solide aux transistors, Ellipses (2006).
- [7] C. Kittel, Physique de l'état solide, 5<sup>e</sup> Edition, Dunot (1983).
- [8] O. Bonnaud, Physique des Solides, des Semi-conducteurs et Dispositifs. Université de Rennes 1, Institut d'électronique et de télécommunications de rennes, Juin 2003,
- [9] A. Chovet, P. Masson. Physique des semi-conducteurs, première année (2004-2005), Département microélectronique et télécommunications, Ecole polytechnique universitaire de Marseille.
- [10] Dr A.H. Souici, Cours de physique des semi-conducteurs, Université de Bejaïa.
- [11] L. Montes, Cours technique de dopage, montes.phelma.grenoble-inp.fr › mems › Cours › Diffusion\_ implantation.
- [12] Le dopage localisé, [http://www.eea.univ-montp2.fr/IMG/pdf/FME346\\_techno\\_f\\_dopage\\_ex.pdf](http://www.eea.univ-montp2.fr/IMG/pdf/FME346_techno_f_dopage_ex.pdf).