

# Chapitre 3

## ELEMENTS DE LA PHYSIQUE DES SEMI CONDUCTEURS

**La physique des semi-conducteurs repose sur la théorie atomique de Bohr.**

### **3.1 Théorie atomique de Bohr**

**L'atome est constitué d'un noyau, chargé positivement, autour duquel gravitent des électrons.**

**Le noyau est composé de 2 types de particules : les protons et les neutrons.**

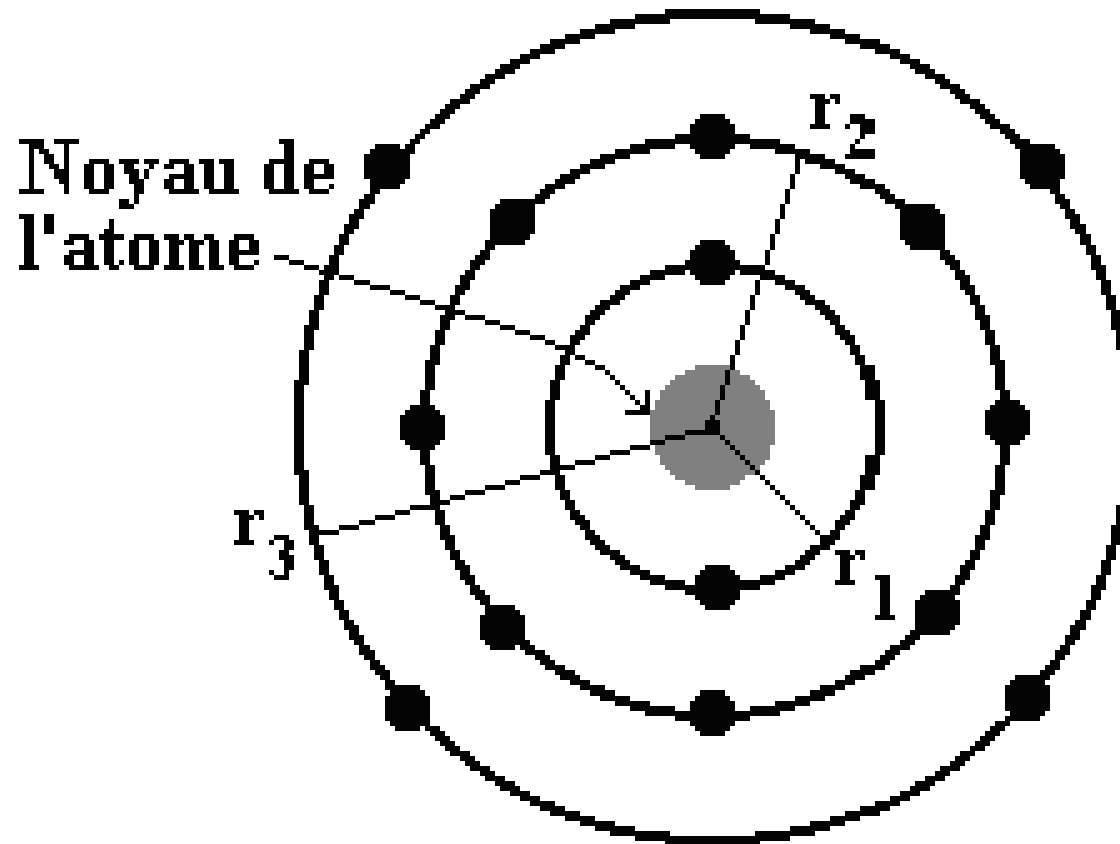
## **3.1 Théorie atomique de Bohr: (suite)**

- le proton est chargé positivement,**
- l'électron est chargé négativement.**

**Le neutron ne porte pas de charge.**

## □ Représentation à 2 dimensions:

**Exemple:** Atome de Silicium (Si),  $Z=14$



**Fig.1 Représentation de l'atome de Si**

On distingue :

- les électrons internes: occupent les couches internes et sont très fortement liés au noyau,
- les électrons de valence: occupent la couche périphérique et sont peu liés au noyau.

En raison de ces 4 électrons de valence, l'atome de Si est dit **tétravalent**.

## **□ Représentation à l'aide des niveaux d'énergie:**

**Dans un atome:**

- les électrons se répartissent en couches,**
- à chaque couche correspond une énergie,**
- pour passer d'une couche à l'autre,**

**l'électron doit recevoir de l'énergie au moins égale à la différence d'énergie entre les deux couches.**

□ Représentation à l'aide des niveaux d'énergie: (suite)

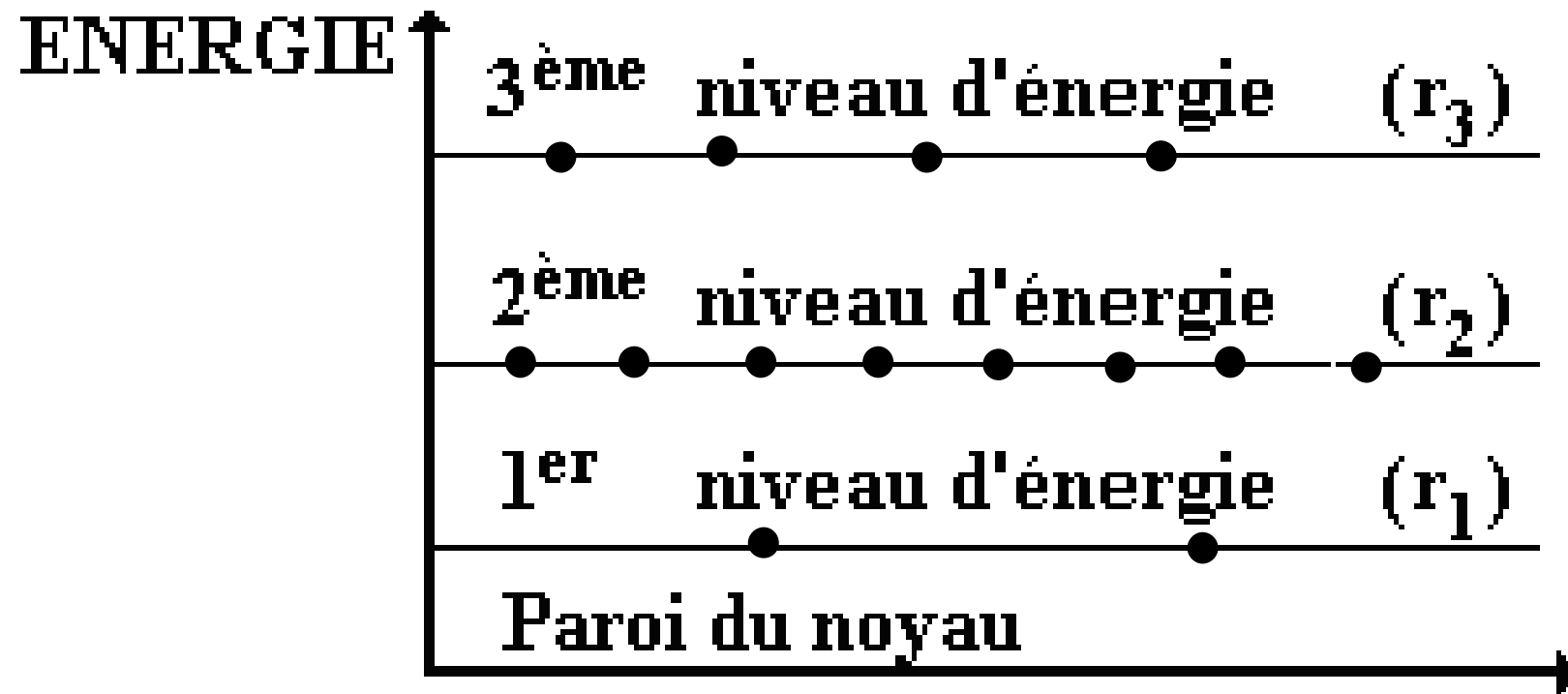


Fig.2 Niveaux d'énergie de l'atome de Si

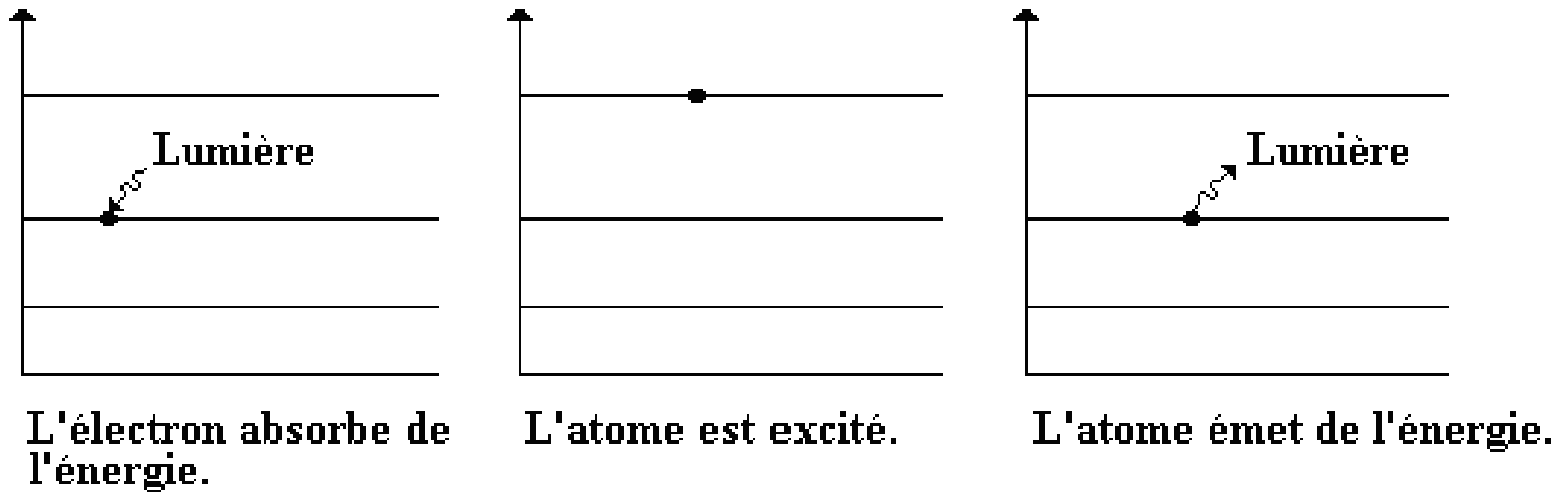
## **b. Excitation d'un atome**

Lorsqu'un électron reçoit de l'énergie externe (chaleur, lumière, rayonnement quelconque), il passe à un niveau d'énergie plus élevé.

L'atome est à l'état d'excitation.



## b. Excitation d'un atome: (suite)



**Fig.3 Excitation d'un atome**

## **b. Excitation d'un atome (suite)**

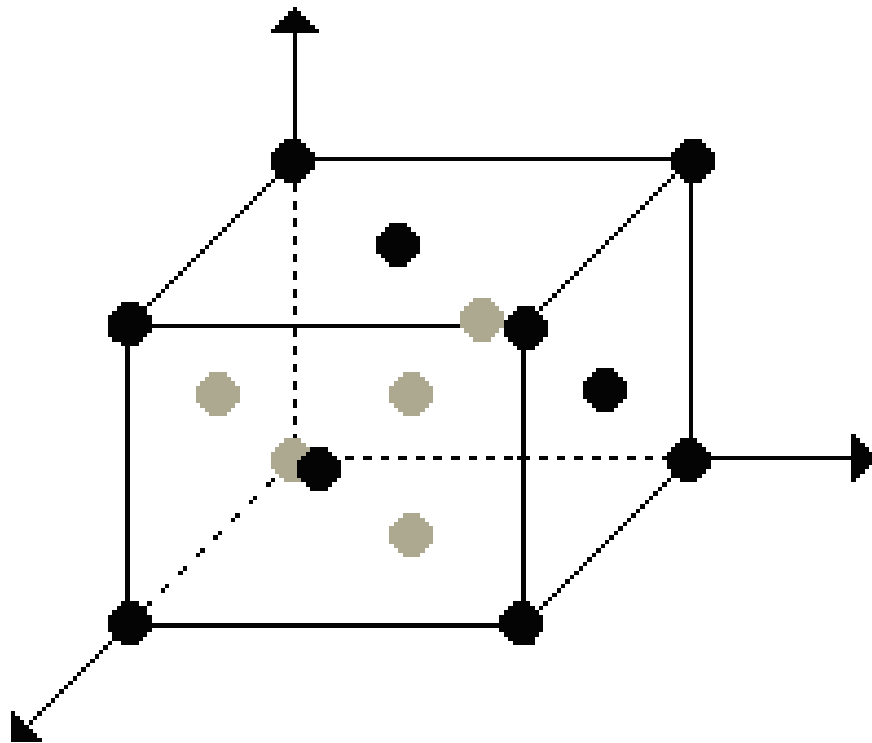
**L'état d'excitation ne dure pas longtemps,  
car l'électron retombe bientôt à son niveau  
d'énergie original, en rendant l'énergie  
acquise sous forme de chaleur, lumière ou  
autre rayonnement.**

## **3.2 Cristaux:**

**Les semi-conducteurs existent sous forme de cristaux.**

**Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes répartis dans l'espace de façon régulière et triplement périodique.**

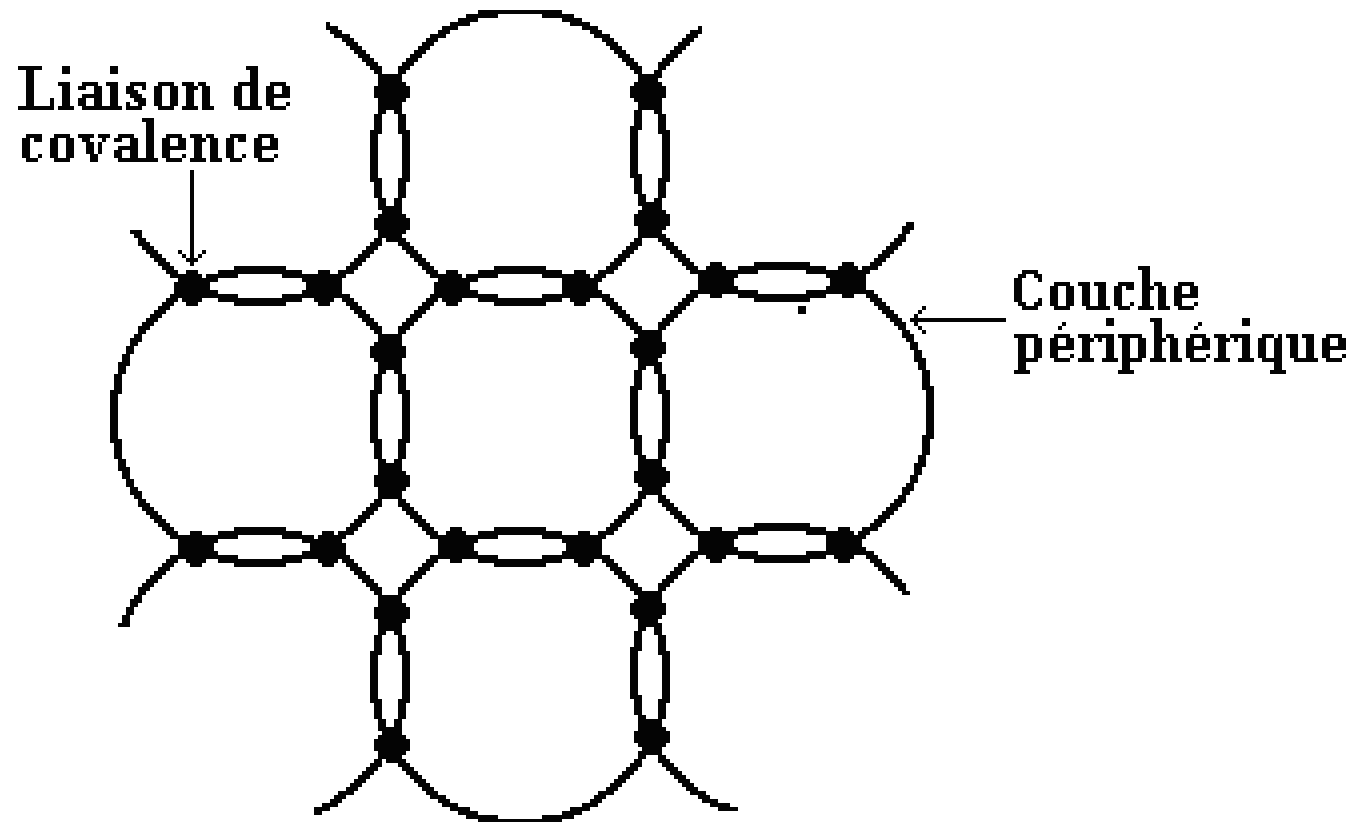
## Exemple: Cristal de Si



Les atomes de Si se trouvent aux sommets, aux centres des faces et au centre du cube.

**Fig.4 Structure du cristal de Si**

a. Liaisons covalentes: forces qui maintiennent les atomes dans un cristal.

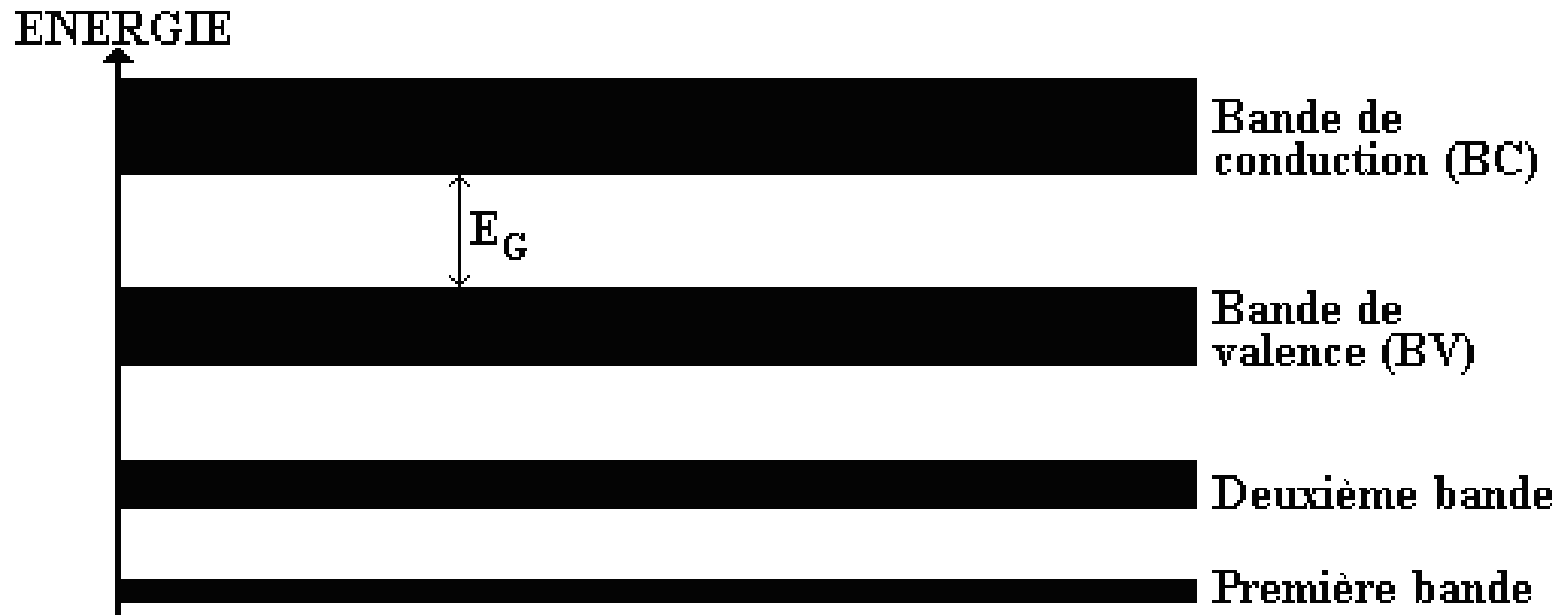


## **b. Bandes d'énergie:**

Dans un cristal, les électrons correspondant à une orbite ont des niveaux d'énergie légèrement différents.

Ces niveaux d'énergie forment une bande d'énergie.

A chaque orbite correspond une bande d'énergie.



**Bandes d'énergie du cristal de Si**

La dernière bande s'appelle bande de conduction (BC).

L'avant-dernière s'appelle bande de valence (BV).

Ces bandes sont séparées par une bande dite interdite de hauteur  $E_G$ .

$E_G$  s'appelle énergie de gap.



La valeur de  $E_G$  détermine la plus ou moins bonne conductivité du matériau :  
**plus le gap est faible plus le matériau est conducteur.**

$E_G$  permet donc de distinguer les matériaux conducteurs, isolants et semi-conducteurs:

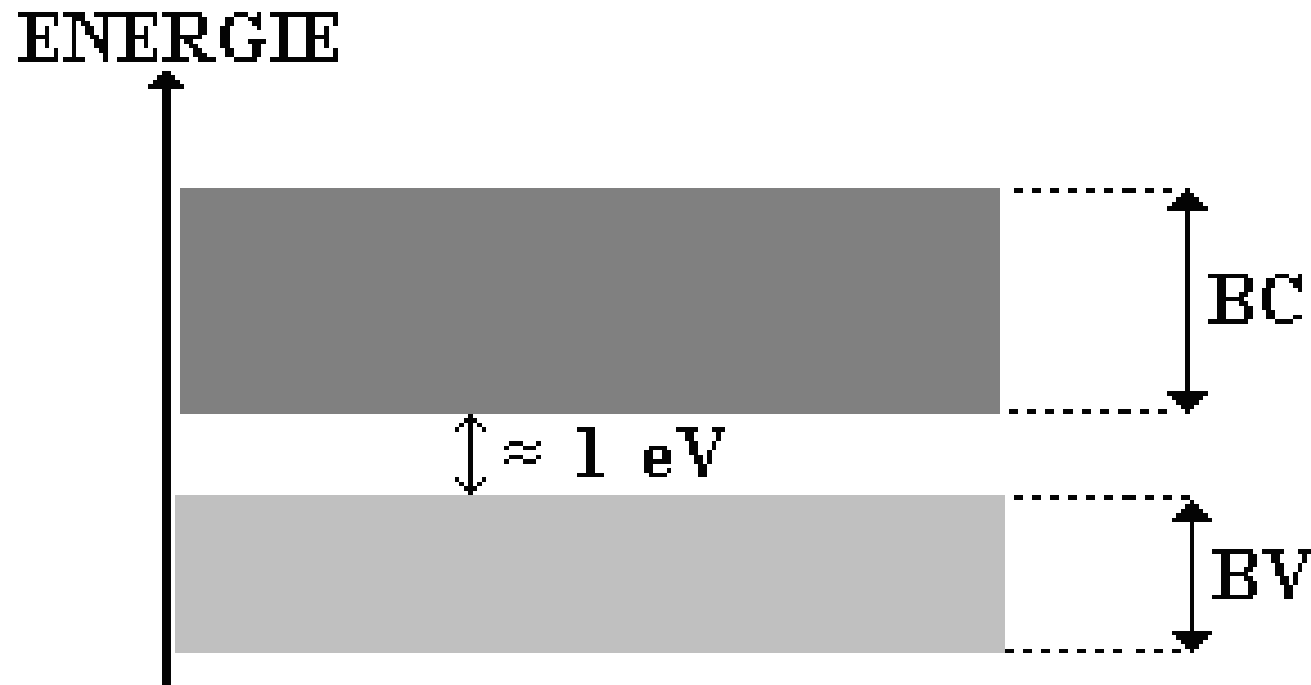
$$E_G(\text{conducteurs}) < E_G(\text{SC}) < E_G(\text{isolants})$$

### **e. Semi-conducteurs:**

**Ils sont des isolants possédant une faible énergie de gap ( $\approx 1\text{eV}$ ).**

**Ils sont des isolants à  $0^\circ\text{K}$ , mais deviennent progressivement conducteurs lorsque la température augmente ou par apport d'énergie externe (lumière, chauffage, ...).**

## e. Semi-conducteurs: (suite)



**Exemples:**  $E_G = 0,7\text{eV}$  pour le Ge

$E_G = 1,1\text{eV}$  pour le Si

## **f. Électrons libres:**

**Les électrons de la BC sont si éloignés du noyau que l'attraction de celui-ci exercée sur ces électrons est presque négligeable.**

**On les appelle électrons libres.**

### g. Trous:

Quand un électron quitte la BV, il laisse un vide qui se manifeste par une absence d'une charge négative.

Cette absence est interprétée comme la présence d'une charge positive, appelée "trou".

Un électron libre est un électron de la BC.

Un trou porte une charge positive égale à celle d'un électron, il représente une orbite disponible.

## Ionisation thermique:

L'atome qui a **perdu un électron** n'est plus électriquement neutre. Il devient un **ion positif**.

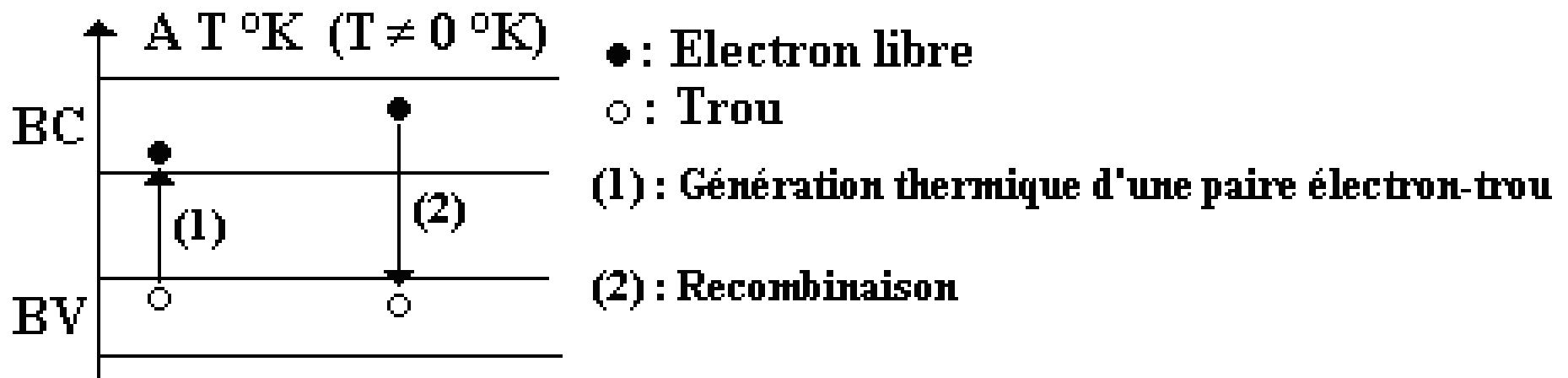
Ce phénomène s'appelle **ionisation thermique**.

Un électron libre peut retomber dans la BV et en rencontrant un trou, ils disparaissent tous les deux.

Ce phénomène s'appelle recombinaison,

Il est accompagnée d'une restitution d'énergie.





**Lorsqu'un électron de valence rencontre un trou, le trou se déplace dans le sens opposé de celui de l'électron.**

## i. Conductivité des semi-conducteurs:

La conductivité des semi-conducteurs est due aux **électrons libres** et aux **trous**, c.à.d aux **charges mobiles**.

A **0°K** la BC est vide d'électrons libres et la BV est vide de trous: **le Si se comporte comme un isolant**.

**A une température  $T^{\circ}\text{K}$  ( $\neq 0^{\circ}\text{K}$ ), il y a des électrons libres dans la BC et des trous dans la BV.**

**Plus la température augmente, plus il y a des charges mobiles, plus le matériau est conducteur.**

A la **température normale** ( $300^{\circ}\text{K}$ ), le  
Si n'a pas assez de porteurs de charge  
libres pour être un bon conducteur. Il  
n'est ni un bon conducteur, ni un bon  
isolant. On l'appelle **semi-conducteur**.

### k. Dopage:

Dans un **semi-conducteur pur**, la concentration en électrons libres  $n$  et en trous  $p$  sont égales à la concentration intrinsèque  $n_i$  :

$$n = p = n_i = A T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2KT}\right)$$

**A : constante du matériau,**

**$E_G$ : Énergie de gap (eV),**

**K: Cte de Boltzamn =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ ,**

**T : température absolue en  $^\circ\text{Kelvin}$ .**

**à  $T=300^\circ\text{K}$  :  $n_i(\text{Si}) = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ,**

**$n_i(\text{Ge}) = 2,5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,**

**Un semi-conducteur pur s'appelle **semi-conducteur intrinsèque**.**

Pour accroître le nombre d'électrons libres ou de trous, on ajoute au cristal des **impuretés atomiques**.

Ce phénomène s'appelle **dopage du semi-conducteur**.

Le semi-conducteur s'appelle dans ce cas **semi-conducteur extrinsèque**.

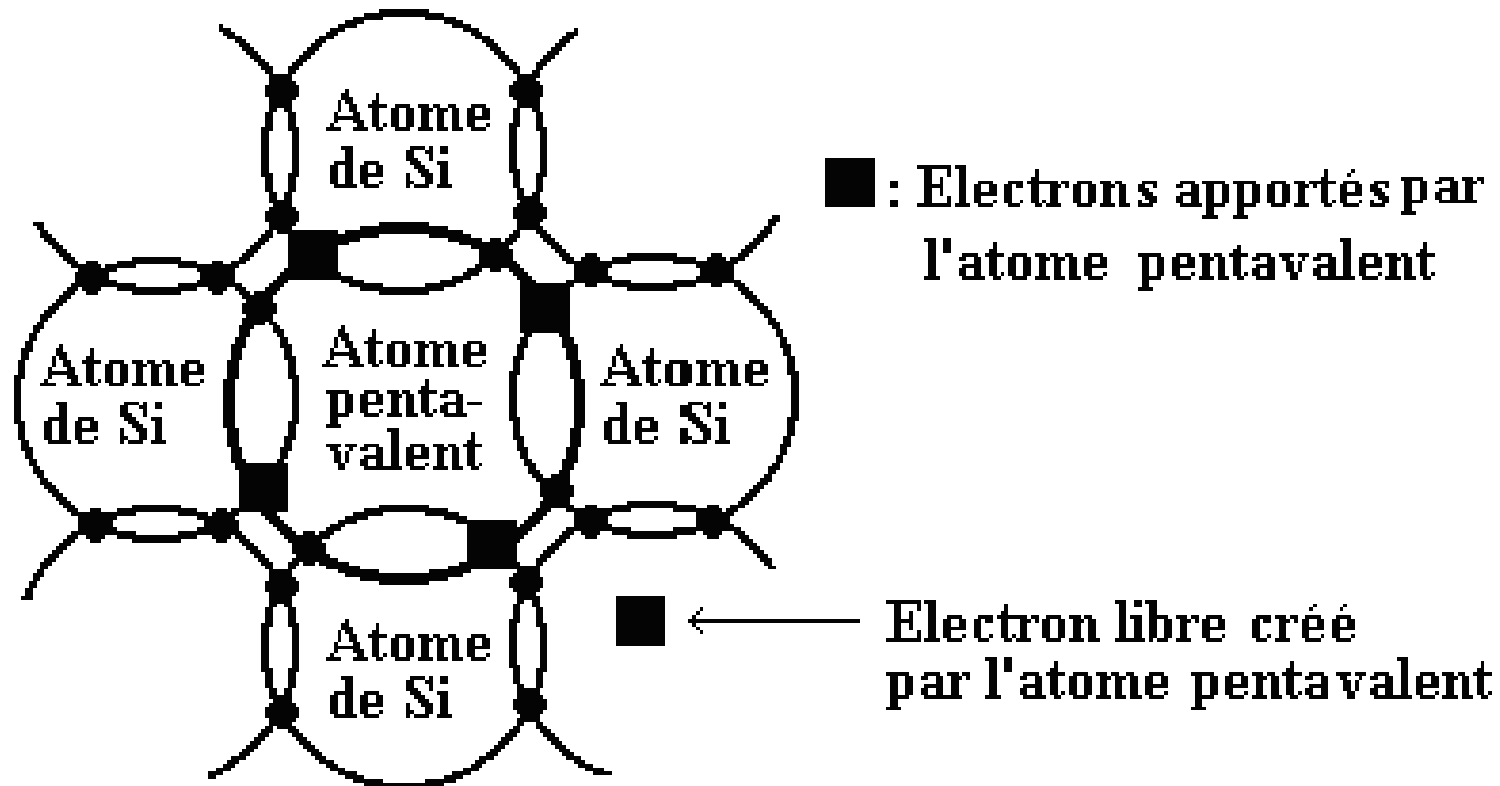
**Suivant la nature des impuretés atomiques, on distingue deux types de semi-conducteurs:**

- ❑ Semi-conducteurs de type N**
- ❑ Semi-conducteurs de type P**



a. Semi-conducteurs de type N:

Pour accroître le nombre d'électrons libres dans le Si, on lui ajoute des atomes pentavalents (5 électrons de valence).



**Le nombre d'électrons libres est égal  
au nombre d'atomes pentavalents.**

**Un tel semi-conducteur s'appelle de  
type N**

**Les atomes pentavalents s'appellent  
aussi donneurs.**

**Exemples de donneurs: Arsenic,  
antimoine, phosphore.**

A cause de l'**énergie thermique**, il y a toujours création des **paires électron libre-trou**, mais leur nombre est beaucoup plus petit que celui des électrons libres créés par dopage.

**Remarque:** Le nombre de trous diminue lorsqu'on dope un semi-conducteur avec des donneurs car le nombre de recombinaisons augmente.

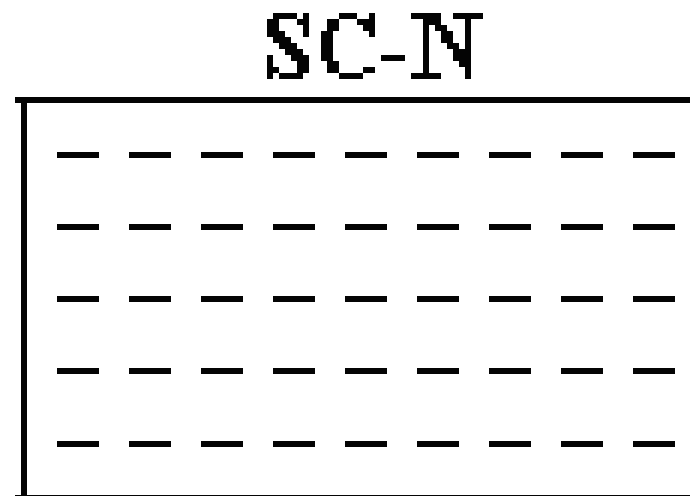
Dans un **semi-conducteur de type N**,

- les **trous** sont les porteurs

minoritaires,

- les électrons libres sont les porteurs

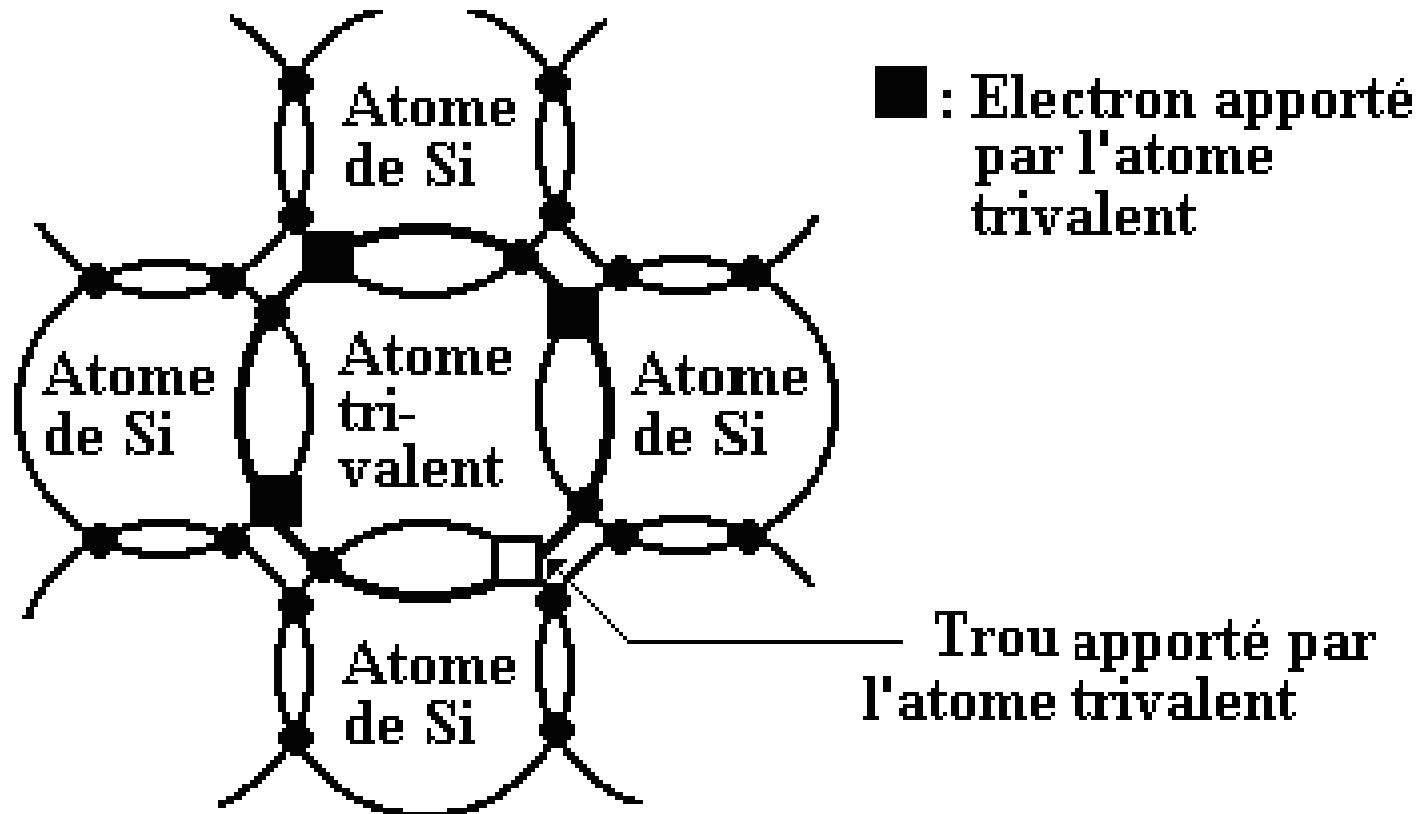
majoritaires.



**Symbole d'un semi-conducteur de type N**

## b. Semi-conducteurs de type P:

On peut accroître le **nombre de trous** dans le Si en le dopant avec des **atomes trivalents (3 électrons de valence)**.



**Le nombre de trous est égal à celui d'atomes trivalents.**

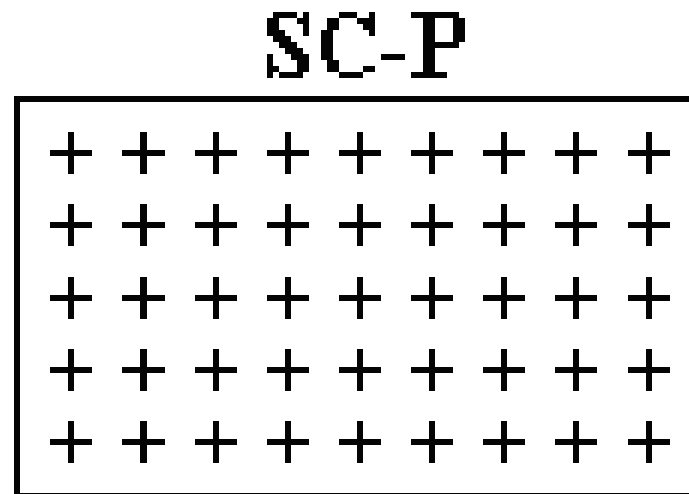
**Les atomes trivalents s'appellent aussi accepteurs.**

**Exemples d'accepteurs: Bore, gallium, aluminium, indium.**

Dans un **semi-conducteur de type P**,

- les **électrons libres** sont les porteurs minoritaires,

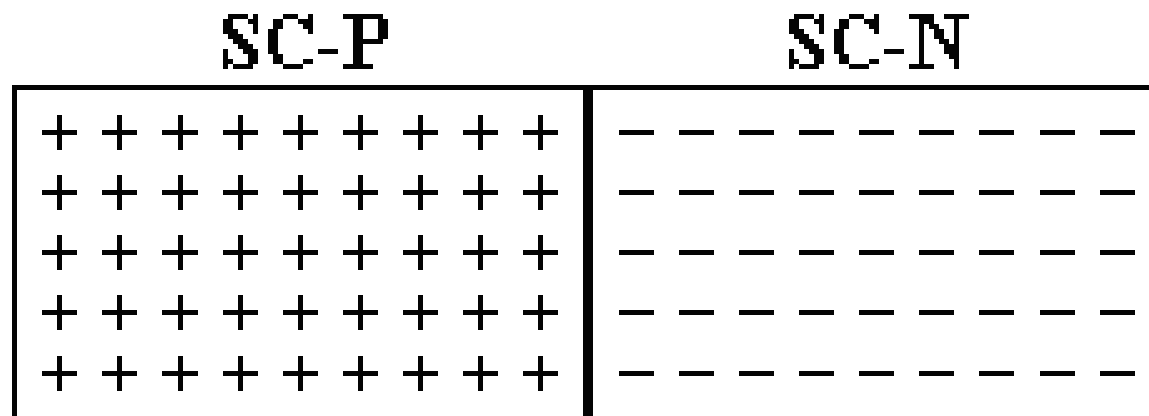
- les **trous** sont les porteurs majoritaires.



**Symbole d'un semi-conducteur de type P**<sub>40</sub>



### 3.3 Jonction PN:



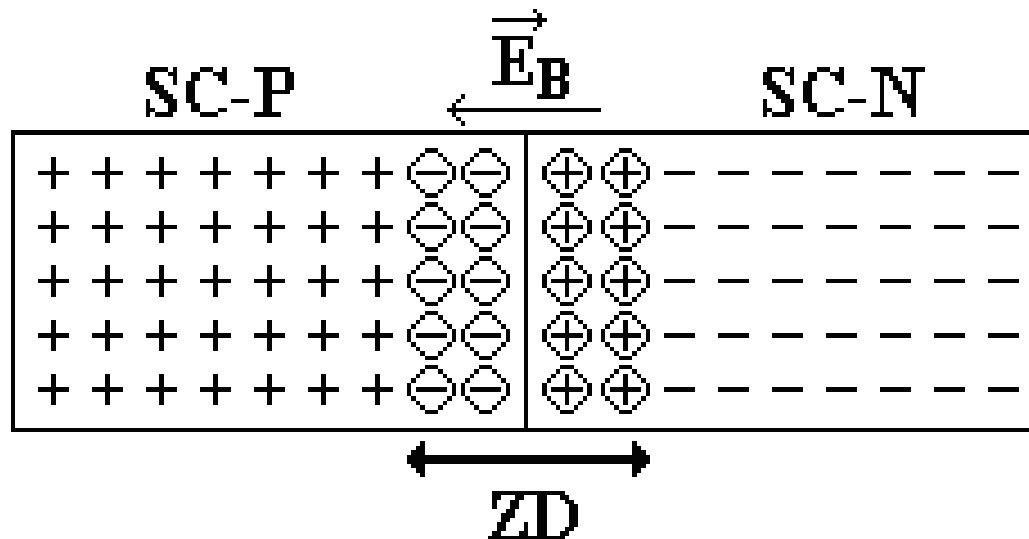
**La jonction est l'endroit où se rencontrent les deux semi-conducteurs de type P et N.**

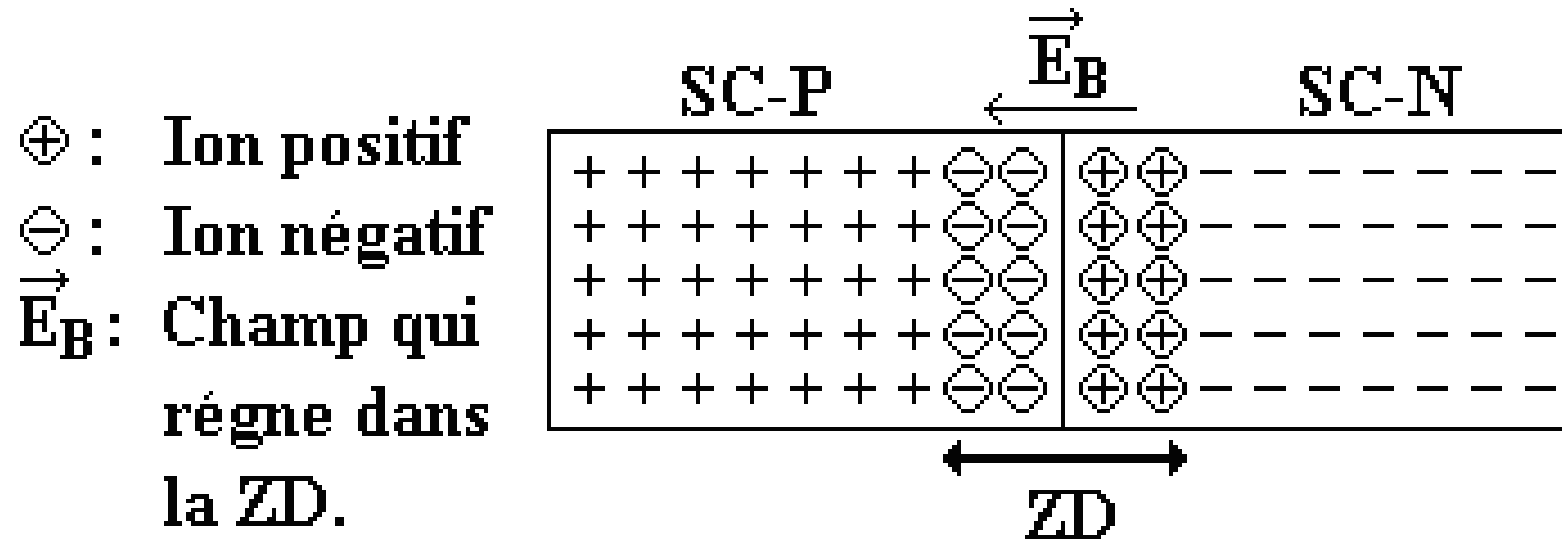
### 3.3.1 Jonction non polarisée:

Une jonction est dite non polarisée, si aucune tension extérieure n'est appliquée à ses bornes.

#### a. Zone de déplétion:

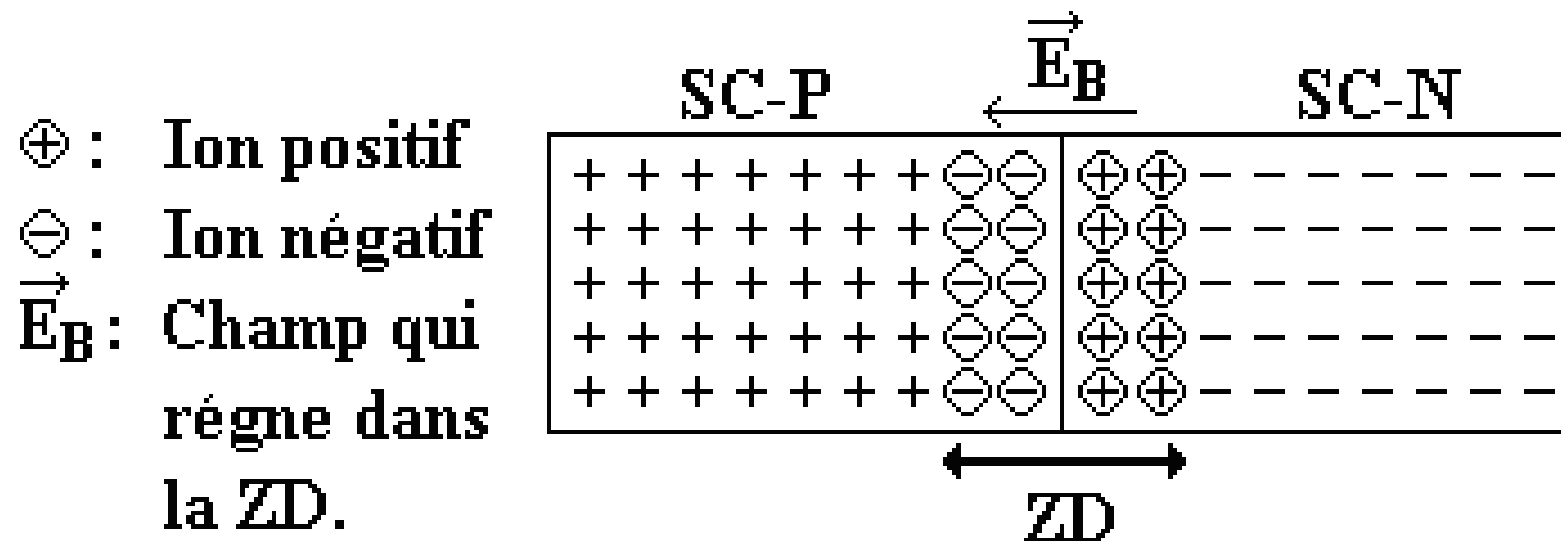
$\oplus$  : Ion positif  
 $\ominus$  : Ion négatif  
 $\vec{E}_B$  : Champ qui régne dans la ZD.





Les atomes ionisés sont des **charges fixes**.

La région voisine de la jonction, ne contient presque pas de charges mobiles, on l'appelle **zone de déplétion** (ZD).



Le champ électrique  $\vec{E}_B$  est nul à l'extérieur de la ZD, non nul à l'intérieur de celle-ci, de direction horizontale et dirigé de N vers P.

## **b. Barrière de potentiel:**

Le champ  $\vec{E}_B$  crée une ddp entre les extrémités de la jonction.

Cette ddp s'appelle **barrière de potentiel** ( $U_B$ ).

Pour qu'un électron traverse la zone de déplétion, il lui faut vaincre cette barrière de potentiel  $U_B$ .

**$U_B$  dépend de la température et de la nature du semi-conducteur:**

**A 25 °C (et à l'état d'équilibre):**

$$U_B \approx 0,7 \text{ V pour le Si}$$

$$U_B \approx 0,3 \text{ V pour le Ge}$$

**A 25°C,  $U_B$  diminue de 2,5 mV pour chaque augmentation de la température de 1°C:**

$$\Delta U_B = -0,0025 \Delta T \quad (\text{à } 25^\circ\text{C})$$

#### d. Bilan des courants:

Un courant est un déplacement de charges.

##### ➤ Courant de diffusion:

En l'absence du champ électrique, les électrons libres dans la région N tendent à diffuser dans la région P, les trous dans la région P tendent à diffuser dans la région N. Ces deux déplacements créent un courant de diffusion P vers N ( $I_{dp} + I_{dn}$ ). <sup>47</sup>

➤ Courant de saturation inverse:

Les porteurs minoritaires créés dans la ZD par l'agitation thermique (Trous dans N, électrons libres dans P) diffusent sous l'action du **champ interne  $\vec{E}_B$**  qui **favorise leur passage dans la région opposée à leur région d'origine.**

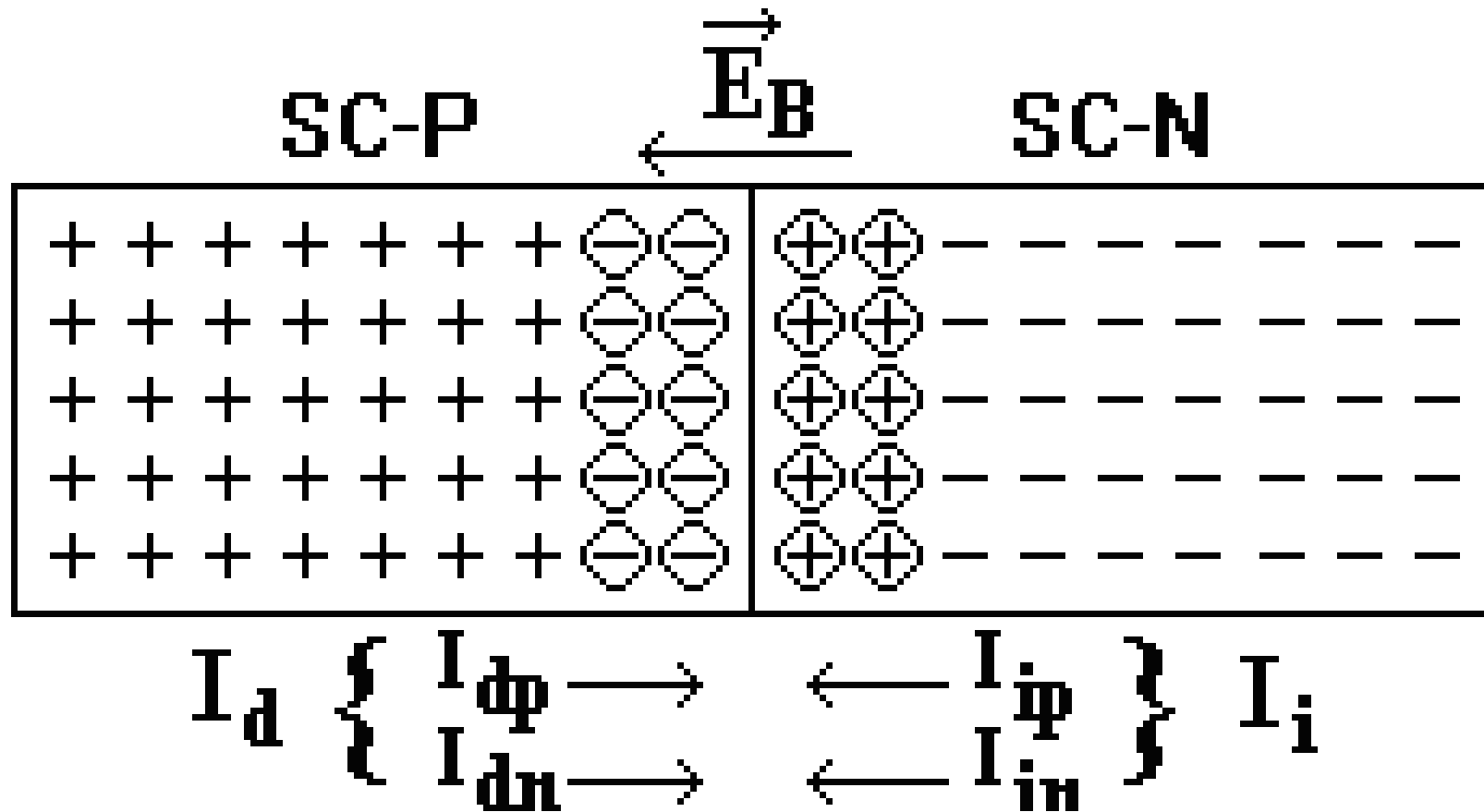


Il y a donc apparition de **2 courants inverses**:  $I_{ip}$  et  $I_{in}$  dirigés de la région N vers la région P, **pour lesquels la barrière est sans influence.**

La somme de ces deux courants est le **courant inverse** qui dépend essentiellement de la température.

A l'équilibre thermodynamique, le courant total traversant la jonction est nul:

Le courant de diffusion dû aux porteurs majoritaires ( $I_{dp} + I_{dn}$ ) est annulé par le courant de conduction dû aux porteurs minoritaires ( $I_{ip} + I_{in}$ ).



Courants dans une **jonction PN non polarisée**

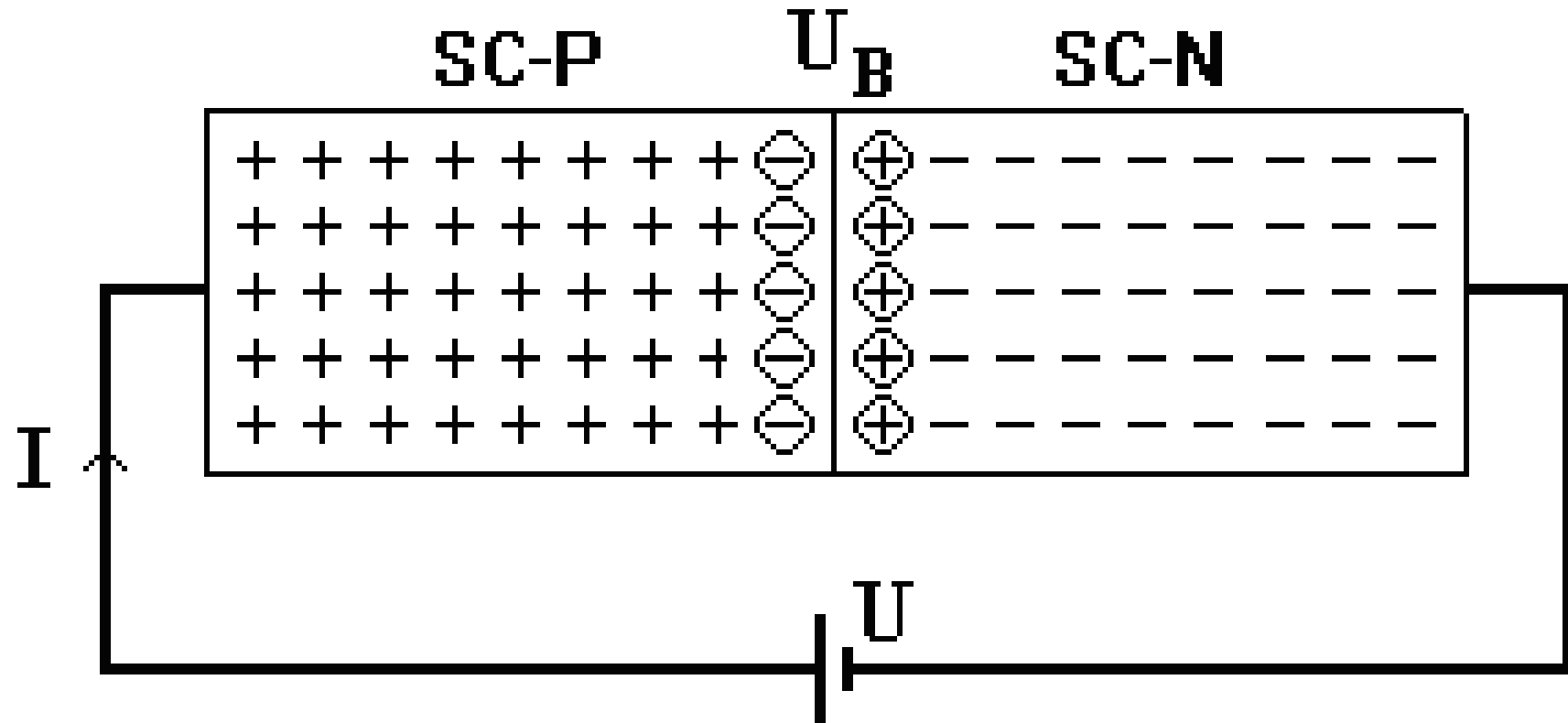
### 3.3.2 Jonction polarisée:

Par l'intermédiaire d'une source de tension continue, nous appliquons une ddp ( $V_P - V_N$ ) à la jonction :

$V_P - V_N > 0$  : Polarisation directe

$V_P - V_N < 0$  : Polarisation inverse

### 3.3.2.1 Polarisation directe:



La tension  $U$  diminue la largeur de la zone de déplétion.

- Si  $U < U_B$ : La ZD est assez large pour empêcher le passage du courant.

- Si  $U > U_B$ : La ZD devient très mince.

Les porteurs majoritaires peuvent diffuser et donnent naissance à un courant direct important, orienté de P vers N.

## Expression du courant direct:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

**$I_S$ : Courant de saturation =  $AT^3 e^{-\frac{E_G}{KT}}$**

**A: Constante dépendante du semi-conducteur**

**$E_G$ : Énergie de gap**

**U: ddp appliquée**

**$U_T = \frac{KT}{e}$  : Tension thermodynamique**

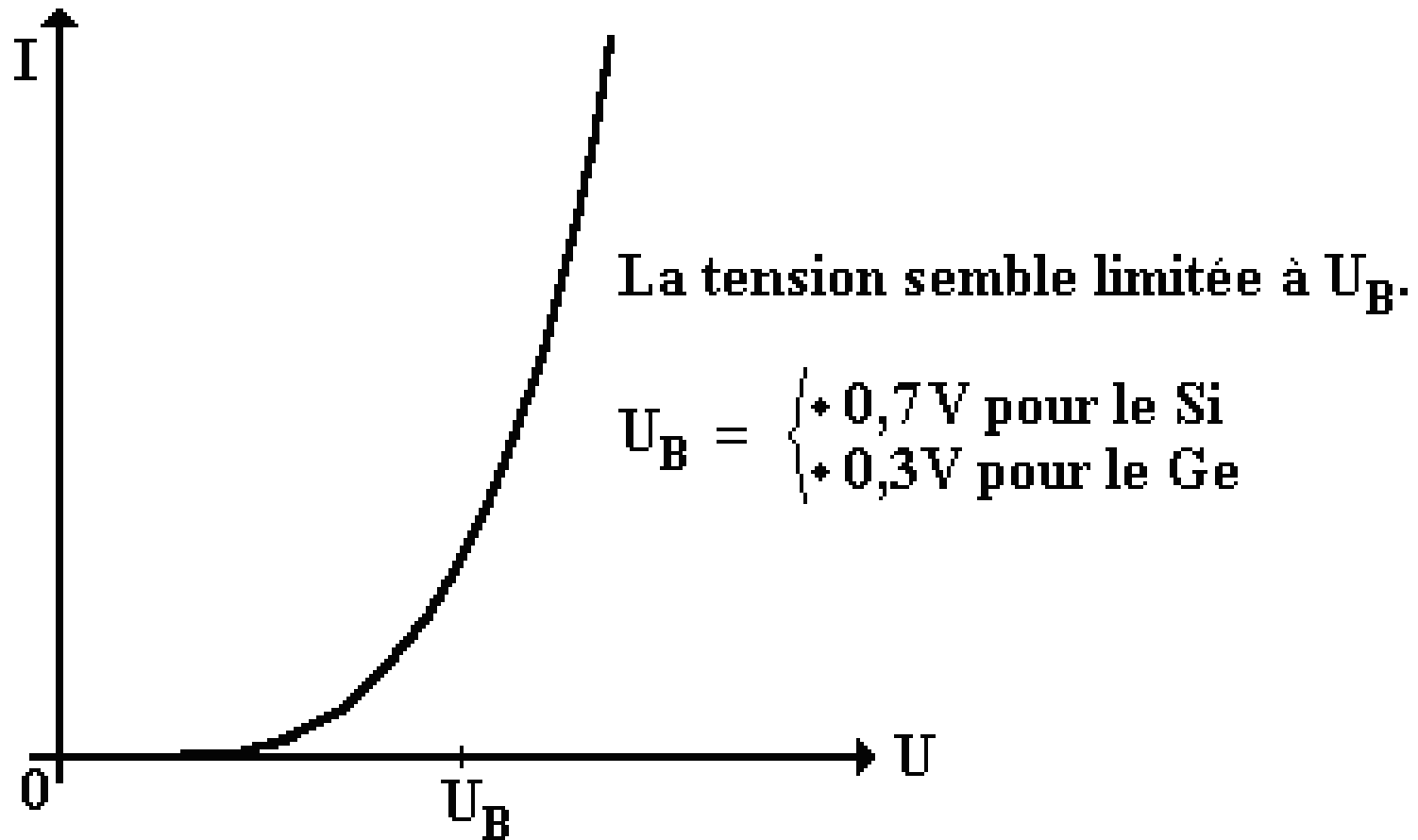
**k: Cte de Boltzman =  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J degré<sup>-1</sup>**

## **b. Caractéristique d'une jonction PN:**

**On appelle caractéristique d'un dipôle quelconque la courbe  $I = f(U)$  qui donne le courant traversant le dipôle en fonction de la tension existant à ses bornes.**



# Caractéristique de la jonction PN:



### c. Résistance dynamique d'une jonction: $r_B$

C'est la résistance de la ZD.

Elle dépend de la nature du SC, de la  $t^\circ$  et de  $U$  (ou de  $I$  ).

$$r_B = \left. \frac{\partial U}{\partial I} \right|_{T=C^{te}} = \frac{U_T}{I_D} = \frac{KT}{e I_D}$$

**A  $T=300^\circ\text{K}$ :**

$$\frac{KT}{e} = 26\text{mV}, \quad r_B = \frac{26\text{mV}}{I_D} = \frac{26}{I_D (\text{en mA})} \quad 58$$

#### **d. Résistance extrinsèque: $r_{\text{ext}}$**

**C'est la résistance des régions P et N.**

**Elle dépend du dopage, des dimensions des régions P et N, de la nature du SC, de U et de la  $t^\circ$ .**

**La résistance totale de la jonction est :**

$$r_{\text{jonction}} = r_B + r_{\text{ext}} \approx r_B$$

### **e. Capacité de diffusion: $C_d$**

Pendant la durée de vie des porteurs minoritaires, les électrons libres et les trous restent accumulés près de la jonction. A chaque instant, il y a donc des charges accumulées de part et d'autre de la jonction. Ces charges accumulées correspondent aux charges des armatures d'un condensateur (**effet capacitif**).

L'accumulation des charges est équivalente à une capacité, dite capacité de diffusion

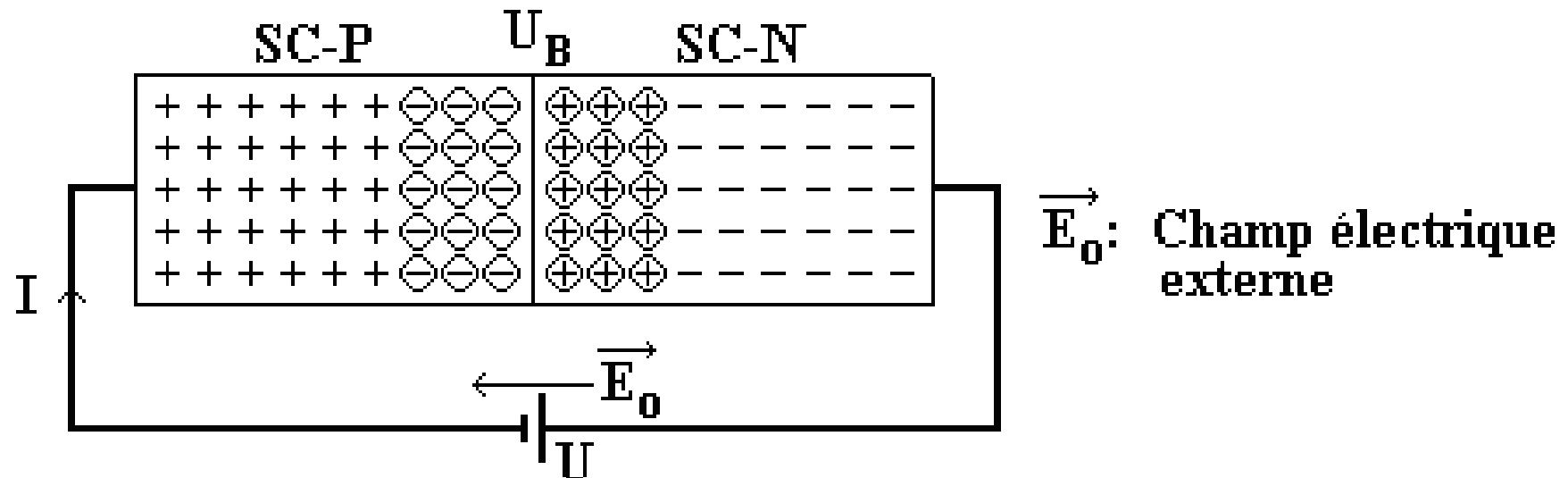
$C_d$ .

$$C_d = \frac{eI_D}{KT} \cdot \tau = \frac{\tau}{r_B}$$

$C_d$  est proportionnelle à la durée de vie  $\tau$  des porteurs minoritaires et au courant direct  $I_D$ .

Elle joue un rôle important en HF.

### 3.3.2.2 Jonction polarisée en inverse:



#### a. Influence sur la zone de déplétion:

Le champ  $E_0$  a le même sens que le champ  $E_B$ . Sous l'influence de  $E_0$ , les porteurs majoritaires se déplacent vers les extrémités du cristal.

**La zone de déplétion s'élargit.**

## **b. Courants:**

### **➤ Courant des porteurs majoritaires:**

Il y a un courant de porteurs majoritaires lors de l'élargissement de la ZD. Ce courant **transitoire** s'annule, lorsque cette zone cesse de s'élargir.

Il dure quelques nanosecondes.

## ➤ Courant des porteurs minoritaires:

Les **porteurs minoritaires**, **créés** dans la ZD **par l'agitation thermique**, sont entraînés de cette zone par le champ  $E_B$ .

Il existe donc un courant **permanent**  $I_R$  des porteurs minoritaires à travers le cristal.

Ce courant s'appelle **courant inverse**.

$I_R$  est de quelques nanoampères (pour le Si).



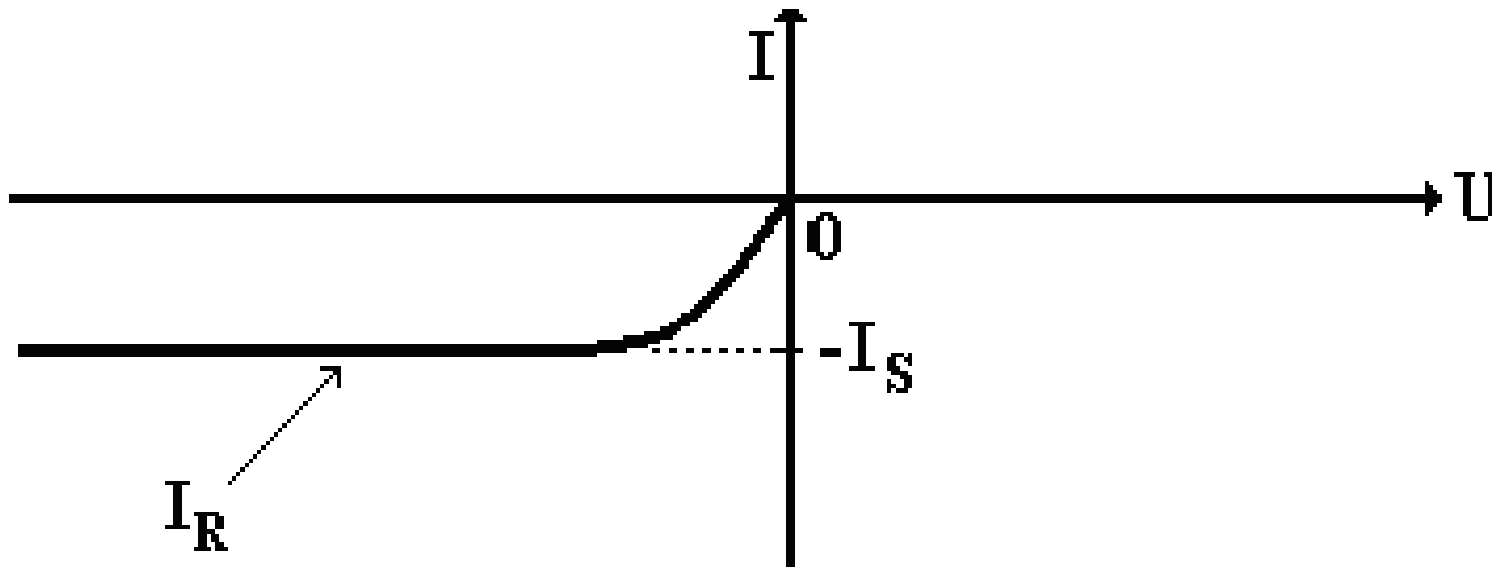
Ce courant ne dépend presque pas de la tension inverse appliquée à la jonction.

Il dépend essentiellement de la température et de la nature du semi- conducteur.

Expression du courant inverse:

$$I_R = I_S \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

Le courant inverse prend rapidement, dès que ( $U < -0,1V$ ), une valeur quasi-constante ( $-I_s$ ) appelée **courant de saturation**.



### c. Tension de rupture:

Lorsqu'on augmente la tension inverse appliquée à la jonction, on constate qu'à partir d'une certaine valeur  $U_{BV}$ , le courant augmente brusquement.

$U_{BV}$  s'appelle tension de rupture.

Ce phénomène est dû à **2 effets**:

## - Effet d'avalanche:

Dans la ZD, les électrons minoritaires (d'origine thermique) sont poussés vers la région N par  $E_0$ .

Plus la tension inverse est grande, plus ces électrons acquièrent une énergie cinétique **considérable**. Ces électrons entrent en choc avec des électrons de valence, qu'ils délogent. Le courant croît extrêmement vite et la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus.

## **- Effet Zener:**

**Quand la jonction est fortement dopée, la ZD est plus étroite. Le champ électrique  $E_0$  est intense et capable donc d'arracher des électrons de la BV. Les porteurs de charges ainsi libérés sont assez nombreux pour que le courant augmente brutalement et pour que la tension aux bornes de la diode ne varie pratiquement plus.**

## Remarques:

### 1. Les deux effets dépendent de $U_{BV}$ :

- L'effet d'avalanche est dominant pour les jonctions dont  $U_{BV} > 6V$ .
- L'effet Zener est dominant pour les jonctions dont  $U_{BV} < 5V$ .
- Dans les jonctions dont  $U_{BV}$  est comprise entre 5V et 6V les deux effets sont présents.

## 2. $U_{BV}$ dépend de la température:

- ✓  $U_{BV}$  due à l'effet d'avalanche possède un coefficient de température positif:  $U_{BV}$  augmente, lorsque la température augmente.
- ✓  $U_{BV}$  due à l'effet Zener possède un coefficient de température négatif:  $U_{BV}$  diminue, lorsque la température augmente.

**3.** L'existence des effets d'avalanche et de Zener **limite la tension inverse applicable** à une jonction que l'on veut utiliser normalement.



#### **d. Résistance inverse:**

$$R_R \approx U_R / I_R$$

**Elle représente la résistance de la ZD.**

**$R_R$  dépend de la température et de la nature du semi-conducteur.**

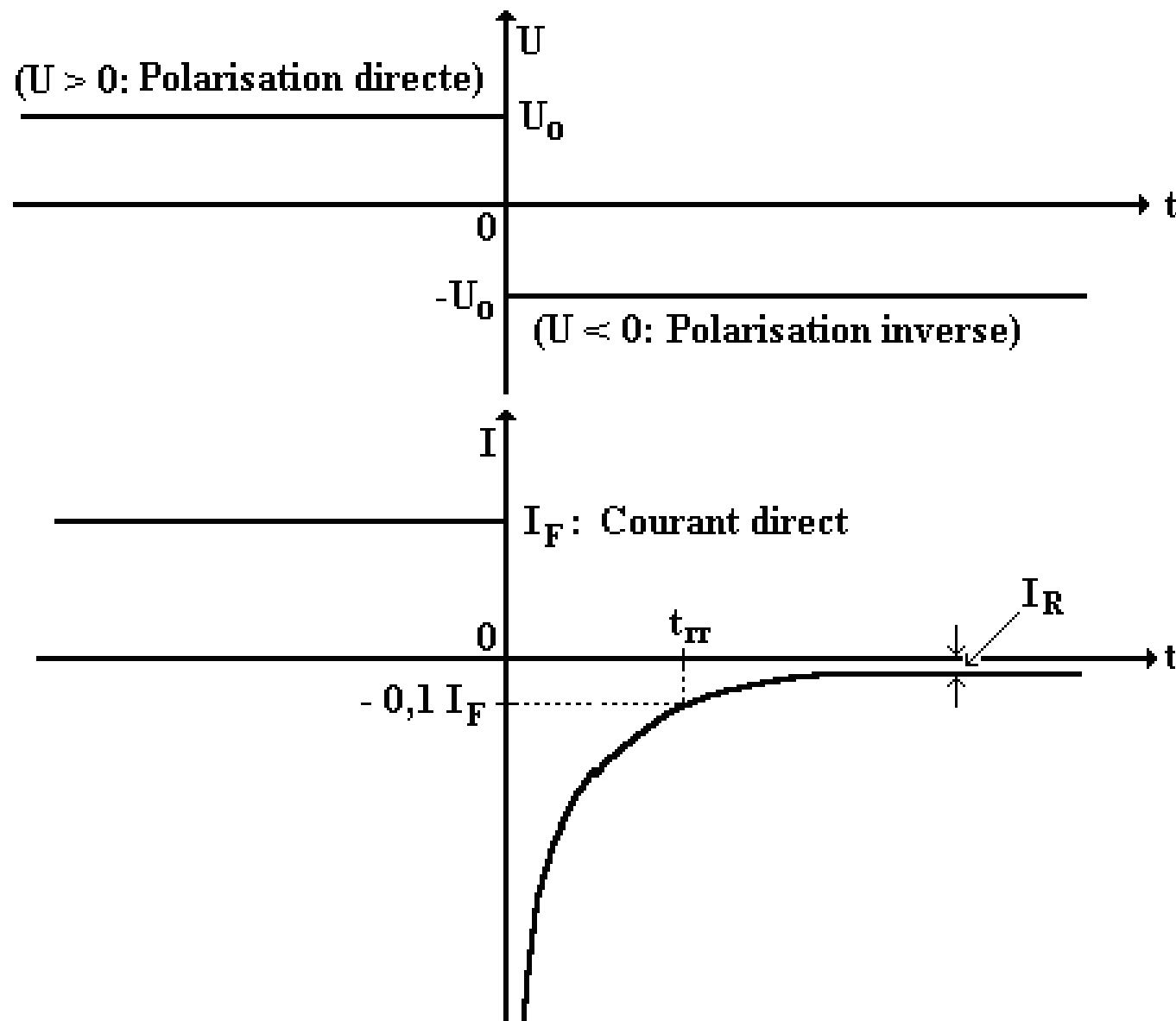
**$R_R$  diminue lorsque la température augmente.**

### e. Capacité de transition: $C_t$

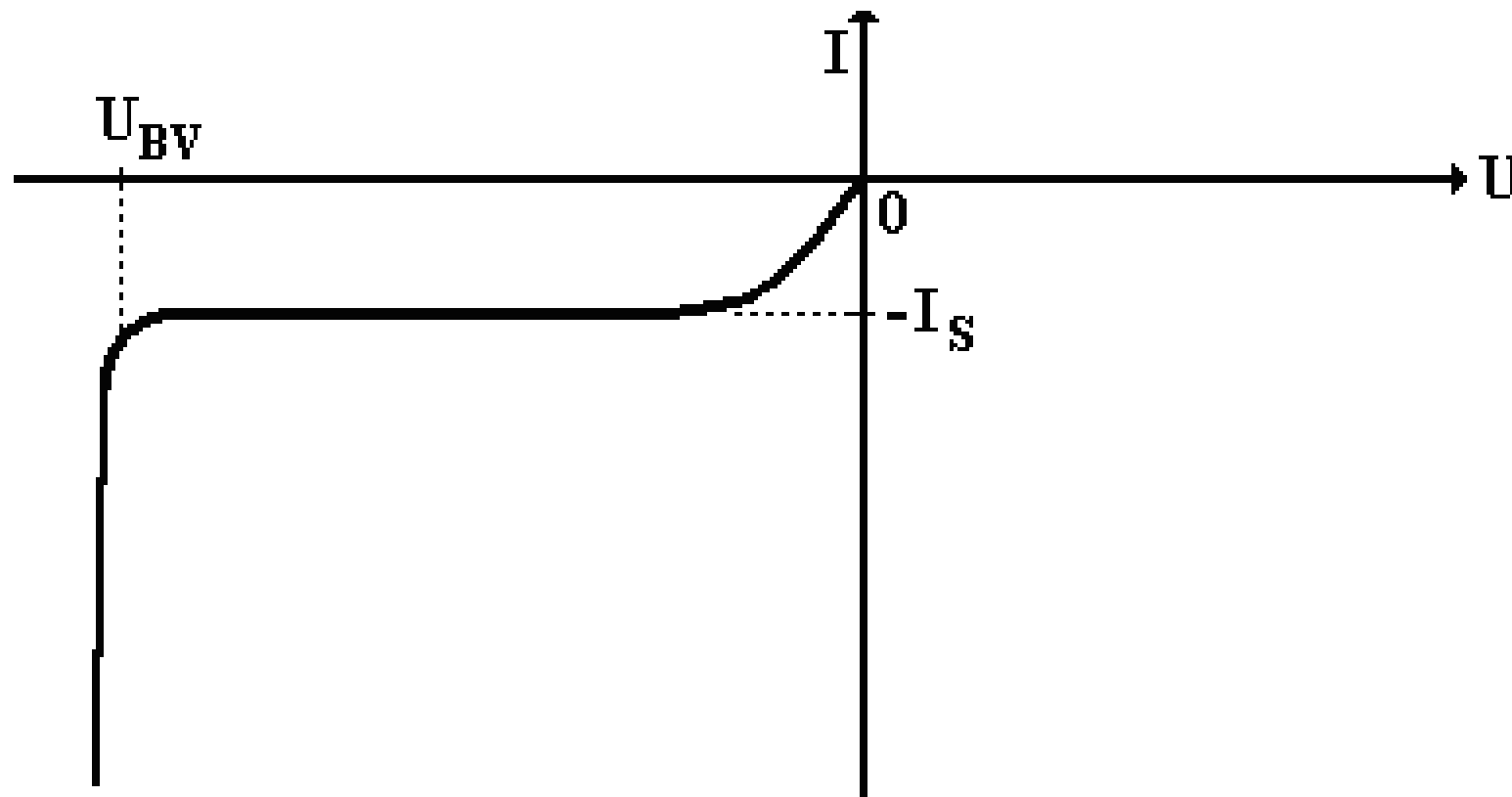
Lorsque la jonction PN est polarisée en inverse, la ZD s'élargit.

Elle se comporte comme un condensateur dont la ZD est le diélectrique et les régions P et N sont les électrodes. La capacité correspondante s'appelle capacité de transition  $C_t$ , qui diminue, lorsque la tension inverse augmente.

## f. Temps de rétablissement inverse (direct ):

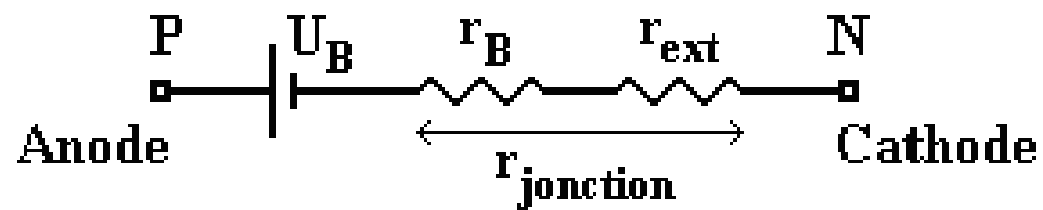


## g. Caractéristique inverse:



### 3.3.3 Schémas électriques d'une jonction:

#### a- Pour le courant continu:

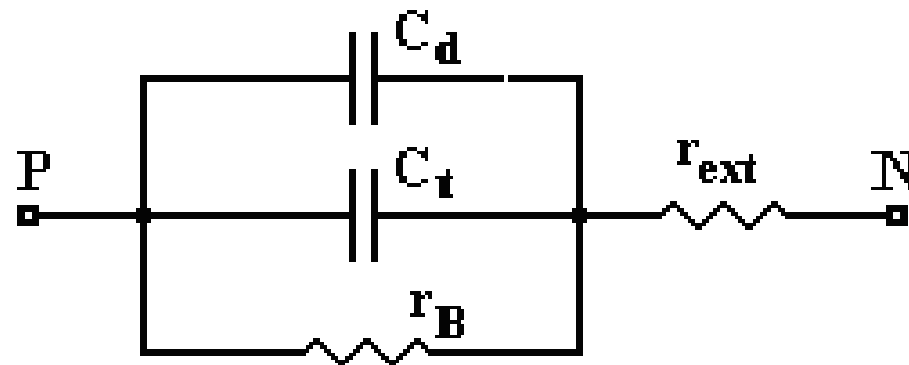


$r_{ext}$  : Résistance extrinsèque

$r_B$  : Résistance dynamique

$U_B$  : Barrière de potentiel

## **b- Pour le courant alternatif:**



$C_d$  : Capacité de diffusion  
 $C_t$  : Capacité de transition  
 $r_{ext}$  : Résistance extrinsèque  
 $r_B$  : Résistance dynamique

Schéma équivalent d'une jonction PN en continu

$C_d$  et  $C_t$  sont prépondérantes

respectivement en polarisation directe et en polarisation inverse.