

# Lois Physiques

---

## Chapitre 11 Les semi-conducteurs

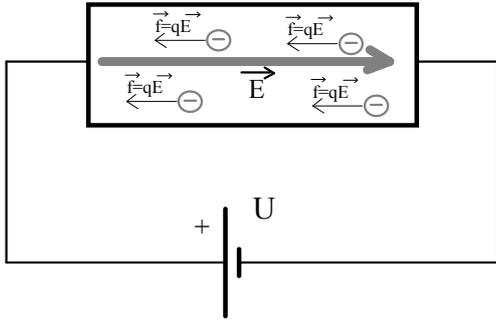
---

**G. MALEJACQ**

# 1- La conduction dans les solides.

## 1.1 Le mécanisme de la conduction.

Pour justifier le sens de déplacement des porteurs de charges dans un matériau, voyons le schéma suivant :



$\vec{E}$  : Champ électrique dû à la tension U

$\ominus$  : Electron libre  
(porteur d'une charge négative :  $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

⇒ Appliquer une source de tension aux bornes d'un élément revient à y établir un champ électrique  $\vec{E}$  dirigé dans le sens des potentiels décroissants (du "+" vers le "-").

⇒ Le champ  $\vec{E}$  crée une force  $\vec{f} = q \vec{E}$  sur tous les porteurs de charges qui sont donc sollicités à quitter leur atome pour se déplacer dans la direction de cette force.

Bilan : Les électrons se déplacent du "-" vers le "+" du générateur.

La quantité de courant dépend du nombre d'électrons mis en mouvement donc du module de  $\vec{E}$ .

*Rappel : Un courant de 1 Ampère est dû à un déplacement de charge de 1 Coulomb par seconde.*

## 1.2 La résistivité des matériaux.

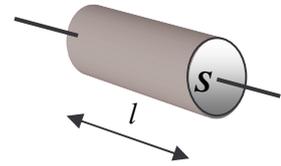
Pour caractériser un matériau sur sa capacité à laisser passer le courant on utilise la résistivité notée  $\rho$ , elle s'exprime en Ohm.mètre ( $\Omega.m$ ).

Métal	Résistivité $\rho$ ( $\Omega.m$ )	Métal	Résistivité $\rho$ ( $\Omega.m$ )
Aluminium	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Laiton	$7 \cdot 10^{-8}$
Argent	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Mercure	$9,6 \cdot 10^{-7}$
Cuivre recuit	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Mica	$10^{15}$
Diamant	$10^{12}$	Or	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Etain	$1,8 \cdot 10^{-7}$	Plomb	$2,1 \cdot 10^{-8}$
Fer	$10 \cdot 10^{-8}$	Platine	$9,4 \cdot 10^{-8}$
Germanium	$46 \cdot 10^{-8}$	Silicium	$2,4 \cdot 10^3$

### 1.3 Résistance d'un conducteur.

La résistance est l'élément physique qui s'exprime en ohm. La formule qui permet de calculer la résistance d'un conducteur de longueur  $l$  et de section  $S$  est la suivante :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{avec } R : \text{résistance } (\Omega) \quad \rho : \text{résistivité } (\Omega.m) \quad l : \text{longueur } (m) \quad S : \text{surface } (m^2)$$



### 1.4 Classification en conducteurs isolants et Semi-conducteurs.

On distingue plusieurs types de matériaux en fonction de leur résistivité  $\rho$  :

#### a) Les conducteurs $\rho < 10^{-6} \Omega.m$

Les conducteurs ont la propriété de permettre un passage facile du courant électrique. Cette propriété est due au fait que les électrons de la dernière couche de l'atome se libèrent très facilement et peuvent ainsi circuler dans le réseau de l'élément.

#### b) Les isolants $\rho > 10^3 \Omega.m$

Tous les électrons sont fortement liés aux atomes du réseau constituant l'élément. L'énergie nécessaire pour les libérer est très élevée en particulier devant l'énergie thermique ou électrostatique qu'on peut fournir en élevant la température ou en appliquant un champ électrique. Leur mobilité est nulle.

#### c) Les semi-conducteurs

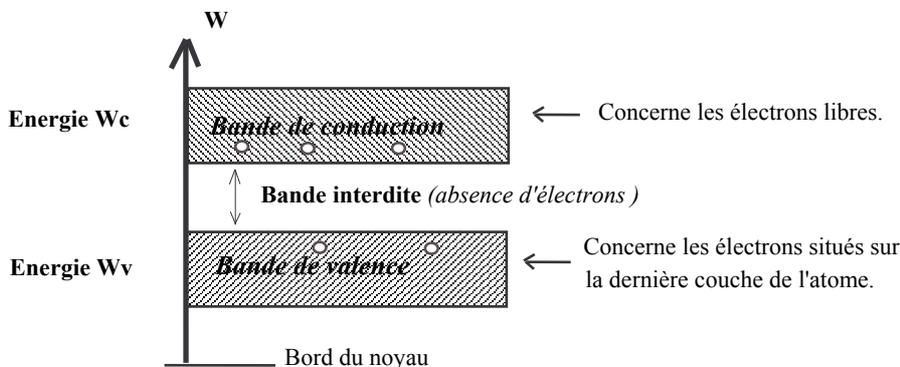
Ils ont une résistivité intermédiaire entre les conducteurs et les isolants, d'où leur nom.

## 2- Bande d'énergie et conduction.

### 2.1 Représentation des niveaux d'énergie.

La faculté d'un corps à propager des charges électriques est conditionnée par l'énergie nécessaire pour libérer des électrons de l'atome. Cette énergie s'exprime en électronvolt ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ ).

La figure suivante représente les niveaux possibles d'énergie que peuvent prendre un électron. Un électron peut posséder une énergie  $W_c$ , il est alors libre et participe à l'existence du courant. Il peut aussi être caractérisé par une énergie  $W_v$  qui est celle des électrons n'ayant pas encore quittés la structure de l'atome.



On appelle **énergie de libération** l'énergie  $W_i$  nécessaire pour libérer un électron de son atome.

$$W_i = |W_v - W_c| \quad \text{correspond ainsi à la largeur de la bande interdite.}$$

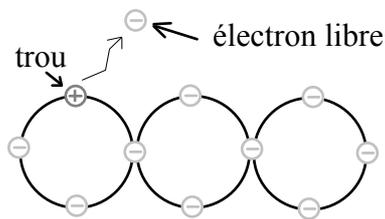
En fonction de la largeur de la bande interdite, donc en fonction de l'énergie de libération, on retrouve les trois catégories d'éléments :

- ⇒ Les conducteurs où  $W_i = 0$ .
- ⇒ Les isolants où  $W_i > 5\text{eV}$ . Seul un champ électrique intense peut libérer des électrons.
- ⇒ Les semi-conducteurs où  $W_i \approx 1\text{eV}$ .

### 3- Les semi-conducteurs purs.

#### 3.1 Particularité.

Lorsqu'un électron est libéré, il laisse sur son atome un "trou" qui, on l'admettra, à la faculté de se déplacer. On découvre ainsi un nouveau porteur de charge : le trou chargé positivement.

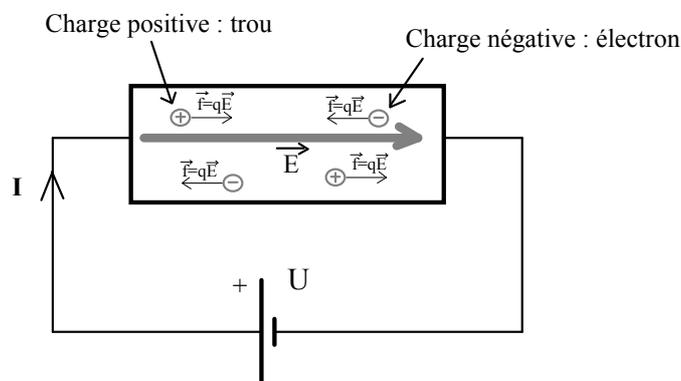


La concentration de ces deux porteurs, on parle de **paires électrons-trous**, dépend directement de la température à laquelle est soumise le semi-conducteur.

#### 3.2 Conduction.

Lorsqu'un semi-conducteur pur est polarisé le courant électrique existant est la conséquence d'un double déplacement :

- ⇒ Les trous dans le sens du champ.
- ⇒ Les électrons dans le sens inverse du champ.



## 4- Les semi-conducteurs dopés.

### 4.1 Le dopage.

En injectant quelques impuretés dans un semi-conducteur pur (on parle ainsi de dopage) on peut augmenter considérablement la concentration d'un type de porteur. On est donc capable de privilégier dans un élément une conduction due au déplacement d'électrons ou bien de trous.

On distingue ainsi :

- ⇒ Les semi-conducteurs de **type N** où il y aura une majorité d'électrons.
- ⇒ Les semi-conducteurs de **type P** où les trous seront en majorité.

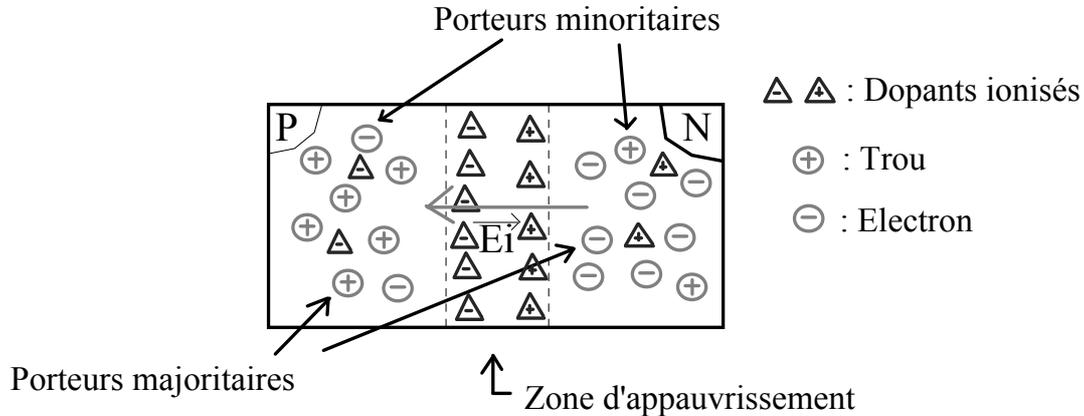
Un dopage classique augmente de  $10^6$  fois la concentration d'un type de porteur par rapport à un autre. Dans un semi-conducteur de type N il y aura donc  $10^6$  fois plus d'électrons libres que de trous et inversement pour un dopage de type P.

## 5- La jonction PN.

### 5.1 Constitution.

La jonction PN est une région de très faible épaisseur où le dopage du semi-conducteur passe d'un type P à un type N. Nous avons présenté dans le chapitre 7 la diode qui est justement conçue par cette juxtaposition de deux zones de dopage différent.

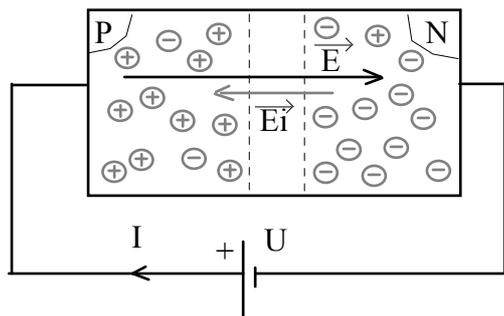
La figure ci-dessous rappelle les constituants d'une jonction PN:



Un champ électrique interne  $\vec{E}_i$  dirigé de N vers P est créé du fait de la présence des dopants ionisés. Ainsi, tous les porteurs de charges se retrouvent expulsés aux extrémités de l'élément ce qui va engendrer une zone dépourvue de porteurs au niveau de la jonction. Cette zone est appelée zone d'appauvrissement ou zone de déplétion.

## 5.2 La jonction PN polarisée en directe ( $V_{PN} > 0$ ).

Attitude des porteurs majoritaires

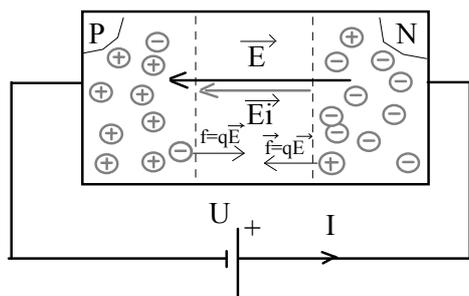


$\vec{E}$  : Champ électrique dû à la tension U

$\vec{E}_i$  : Champ électrique dû à la zone d'appauvrissement

Dès que  $|\vec{E}| > |\vec{E}_i|$  les électrons peuvent circuler de N vers P et les trous de P vers N. Le courant I est essentiellement dû au déplacement des porteurs majoritaires de chaque région traversant la jonction. Ce courant est appelé courant de diffusion  $I_d$ .

## 5.3 La jonction PN polarisée inverse ( $V_{PN} < 0$ ).



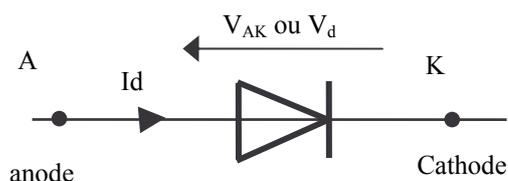
$\vec{E}$  : Champ électrique dû à la tension U

$\vec{E}_i$  : Champ électrique dû à la zone d'appauvrissement

Le champ électrique  $\vec{E}$  renforce le champ  $\vec{E}_i$ , la zone d'appauvrissement s'élargie. Seuls les porteurs minoritaires (les électrons de la zone P et les trous de la zone N) peuvent franchir la jonction. Ce courant, qui est très faible, est appelé courant de saturation  $I_s$ . Notons qu'il augmente très sensiblement en fonction de la température.

## 5.4 Application de la jonction PN : La diode

Une diode est un composant ne permettant la circulation du courant que dans un seul sens (l'équivalent d'une valve en pneumatique). Elle est obtenue en définissant dans un semi-conducteur deux zones de dopage, l'une de type N et l'autre de type P



Une diode est un composant qui peut être **passante**

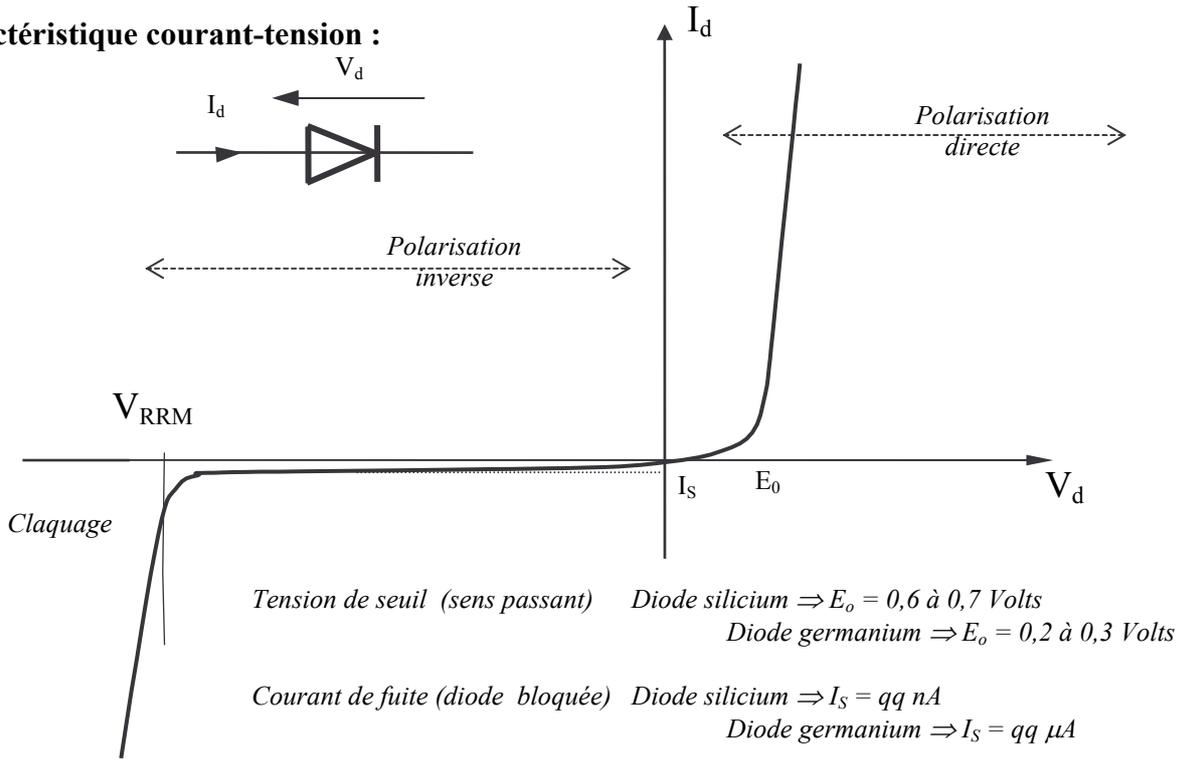
La diode devient passante si la tension  $V_d$  est positive et si le courant  $I_d$  est positif.

Dans ce cas, la tension  $V_d$  est à peu près égale à la tension de seuil et le courant traversant dépend uniquement du montage qui l'entoure.

Ou être **bloquée**

La diode se bloque si la tension  $V_d$  est négative (ou nulle). Le courant la traversant est extrêmement faible (on le néglige très souvent). La tension à ses bornes est alors négative, sa valeur dépend des éléments du montage.

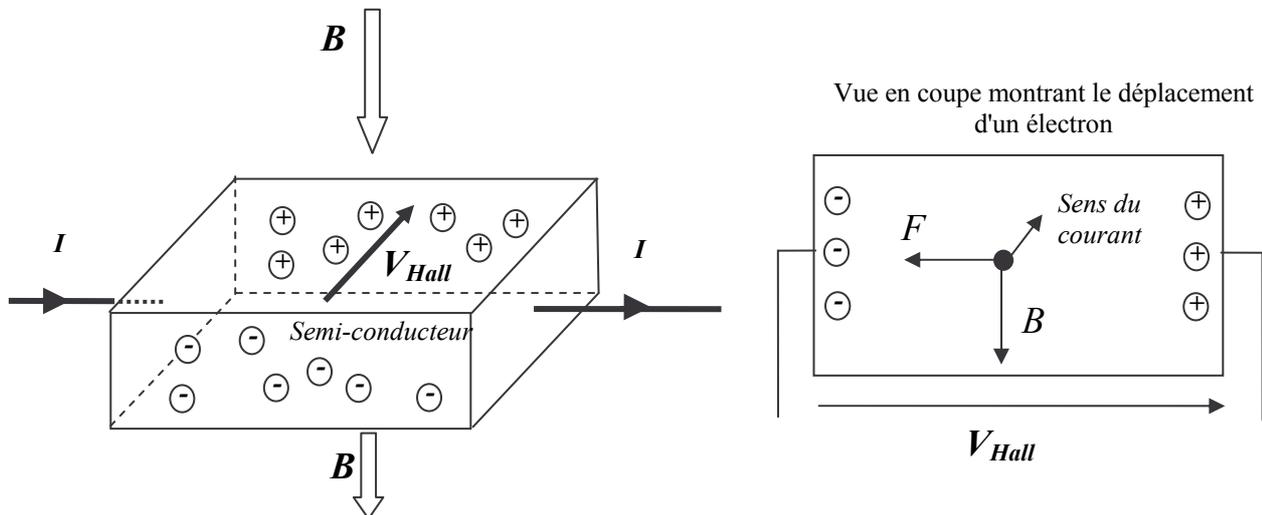
**Caractéristique courant-tension :**



## 6- Présentation de l'effet HALL

### 6.1 Description.

Lorsqu'un courant traverse un élément semi-conducteur (ou conducteur), et si un champ magnétique d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, les porteur de charge sont déplacés sur la périphérie de l'élément. Une tension, appelée tension Hall, proportionnelle au champ magnétique et au courant apparaît sur cette périphérie.



### 6.2 Analyse physique.

On sait qu'un champ magnétique agit sur les charges en mouvement. Le courant qui traverse le matériau est produit par des charges qui se déplacent avec une vitesse moyenne que l'on notera  $v$ . Ces charges sont soumises à une force  $\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$  (où  $q$  correspond à la charge élémentaire d'un porteur de charge). Il en découle une concentration de charges sur les côtés du matériaux. Cette distribution de charge donne naissance à la tension Hall  $V_H$  ainsi qu'à un champ électrique  $E_H$ .

### 6.3 Application

Les capteurs à Effet Hall permettent de mesurer :

- Les champs magnétiques (Teslamètres)
- L'intensité des courants électriques : Capteurs de courant à Effet Hall.