

## LA CONDUCTIVITE DANS LES CONDUCTEURS ET SEMI CONDUCTEURS

### Doc 1 : Etude expérimentale de l'évolution de la conductivité des solides avec la température :

Une étude expérimentale permet de distinguer les différences entre deux types de solides : les corps conducteurs et les corps semi-conducteurs.

Quand on mesure la résistance  $R$  d'un fil de longueur  $l$ , de diamètre  $d$ , placé dans une étuve sèche dont la température varie, on peut en déduire l'évolution de la résistivité du solide constituant le fil :

$$R = \frac{\rho l}{S} \text{ soit } \rho = \frac{RS}{l}$$

La manipulation a donné les résultats suivants :

	$l$	$d$	R à 20°C	$\rho$ à 20°C	$\rho$ à 60°C
Cuivre (conducteur)	50 m	0.2 mm	27,6 $\Omega$	$1,73 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$	$1,97 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Germanium (semi conducteur)	2 cm	3 mm	1700 $\Omega$	0,60 $\Omega \cdot m$	0,10 $\Omega \cdot m$

Les courbes d'évolution de la résistivité en fonction de la température sont les suivantes (Fig 1 et 2) :

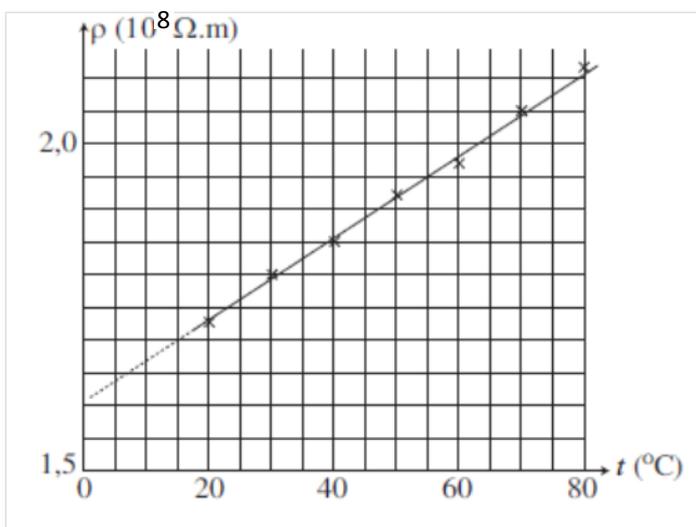


Fig 1 résistivité d'un conducteur métallique (Cu) en fonction de la température

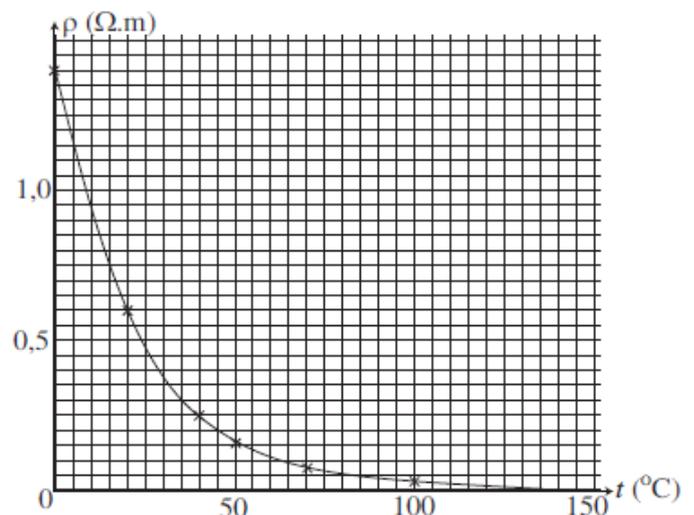


Fig 2 résistivité d'un semi conducteur (Ge) en fonction de la température

Pour un métal, la résistivité croît linéairement (dans l'intervalle d'étude de 20 à 80  $^{\circ}C$ ) avec  $t$ , alors que pour un semi-conducteur, elle décroît fortement quand la température augmente. Une modélisation de la courbe pour le semi conducteur donne une évolution linéaire de  $\ln(\rho)$  en fonction de  $1/T$  (Fig 3).

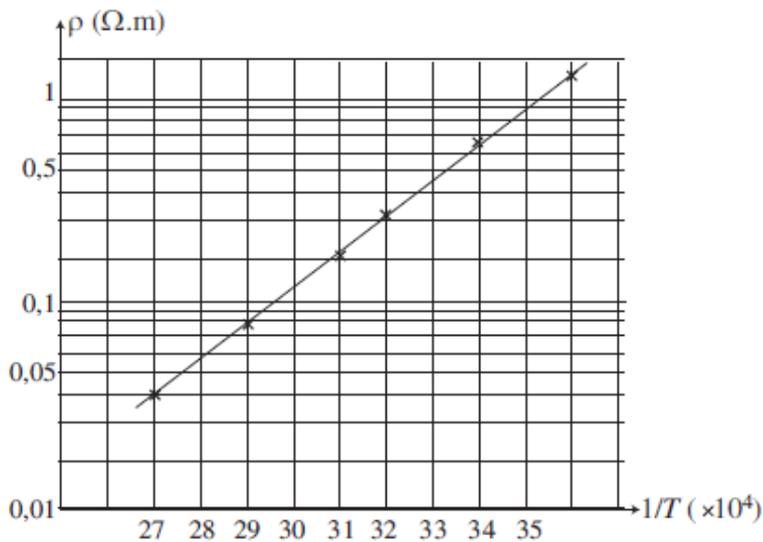


Fig 3 modèle linéaire  $\ln \rho = c+b/T$  pour un semi conducteur

Les corps conducteurs sont les métaux et leurs alliages.

- Métaux purs :

Leur résistivité est très faible ( $10^{-8}$  à  $10^{-6}$  Ω.m) et croît en fonction de la température.

- Alliages :

Leur résistivité est nettement plus forte que celles des métaux qui les constituent et augmente en fonction de la température, mais moins que celle des métaux.

Résistivités à 20°C ( $10^{-8}$  Ω · m)

Métal	$\rho$	Alliage	$\rho$
Argent	1,6	Laitons	5 – 10
Cuivre	1,7	Maillechort	30
Aluminium	2,8	Manganine	40
Tungstène	5,6	Constantan	50
Fer	9,6	Ferronickel	80
Platine	10	Nichrome	110
Mercure	95		

Semi conducteurs :

Ce sont des corps comme le germanium, le silicium (éléments du groupe IV de la classification périodique) et les corps composés des éléments des groupes III et V (antimoniure d'indium par exemple).

Leur résistivité est comprise entre  $10^{-5}$  et  $10^5$  Ω.m et décroît fortement quand la température augmente.

## Doc 2 : Structure de bande des solides :

Les liaisons assurant la cohérence d'un solide constitué d'un seul élément chimique sont des liaisons de covalence ou des liaisons métalliques. Ces deux types de liaisons correspondent aux deux catégories principales de solides : les isolants et les conducteurs.

Dans un isolant, tous les électrons des couches atomiques externes sont liés. Dans un métal, certains électrons sont libres d'évoluer dans le réseau, assurant ainsi la conduction électrique.

L'énergie des électrons d'un atome est quantifiée. Dans un solide, les interactions entre les atomes font que les niveaux d'énergie se rassemblent et forment des bandes d'énergie : la différence entre les niveaux est si faible que l'on peut considérer que l'énergie évolue de façon continue. Mais, entre différentes bandes d'énergie existe un large domaine d'énergies interdites appelé *gap* (saut en anglais).

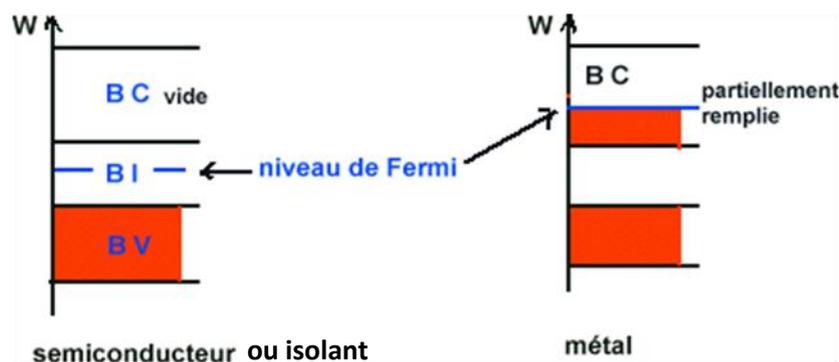


Fig 4 position du niveau de Fermi à  $T = 0\text{ K}$  dans le diagramme de bandes

La répartition des électrons sur les niveaux d'énergie satisfait au principe d'exclusion de Pauli et suit une loi de répartition statistique. A basse température (proche de 0 K), seuls les niveaux d'énergie inférieure à une certaine valeur  $\epsilon_f$  appelée énergie de Fermi sont occupés. La distinction entre isolant et conducteur n'est finalement liée qu'à la position du niveau de Fermi dans le diagramme énergétique des bandes (cf. Fig 4).

Le semi conducteur ne se distingue de l'isolant que par la largeur réduite de sa bande interdite :

	Ge	Si	GaAs	Diamant	Silice
$\epsilon_g$ (eV)	0,67	1,14	1,43	5,4	10

Dans un métal, l'influence de la température sur la répartition des électrons reste faible, alors qu'elle est spectaculaire pour un semi conducteur : d'isolant parfait à 0K il devient conducteur à température ambiante. L'énergie nécessaire pour franchir le gap est fournie par l'agitation thermique. L'énergie d'agitation thermique étant de quelques dizaines de meV, à température ambiante, les propriétés semi conductrices ne sont observées que pour des matériaux dont la largeur de bande interdite est faible (autour de 1 eV). Pour de plus grandes largeurs de bande interdite (plusieurs eV) le matériau reste isolant à température ambiante.

Pour les métaux, l'agitation thermique désordonnée va contrarier le déplacement d'ensemble des électrons sous l'effet du champ électrique appliqué, donc la résistivité croît en conséquence.

### Doc 3 : les porteurs de charge électrique et leur déplacement

La conduction est assurée dans les métaux par les électrons, porteurs dotés d'une charge négative :

$$q_e = -e = -1,6.10^{-19}C$$

Dans les semi conducteurs existent d'autres porteurs de charges, appelées « trous », dotés d'une charge positive :

$$q_{\text{trou}} = +e = 1,6.10^{-19}C$$

On note  $n$  la densité d'électrons (nombre d'électrons de conduction par unité de volume) et  $p$  la densité de trous.

En l'absence de champ électrique, les porteurs de charge sont animés de mouvements désordonnés d'autant plus rapides que la température est élevée, donnant lieu à des chocs. Entre deux chocs successifs, le mouvement est rectiligne, à vitesse constante. Le déplacement moyen des porteurs est nul.

Dans un champ électrique, les porteurs sont soumis à une force  $\vec{F} = q\vec{E}$ , donc les porteurs ont un déplacement d'ensemble se superposant à l'agitation thermique désordonnée.

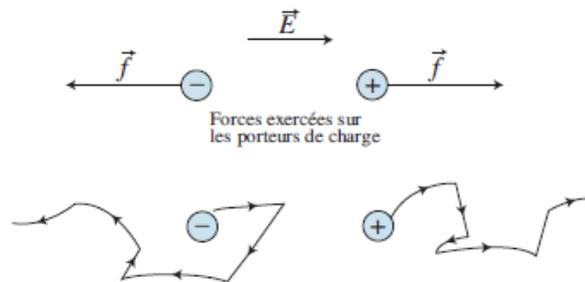


Fig 5 – Déplacement des porteurs dans un champ électrique : aux mouvements d'agitation thermique se superpose un mouvement de translation dans le sens du champ (porteur +) ou dans le sens inverse (porteurs -).

La vitesse moyenne de déplacement des porteurs est proportionnelle au champ électrique :  $\vec{v} = \mu\vec{E}$ , où  $\mu$  est la mobilité des porteurs de charge :

$\mu_p > 0$  pour un trou,  $\mu_n < 0$  pour un électron et  $\mu_p < -\mu_n$ .

Dans le cuivre : -  $\mu_n = 3,2.10^{-3} m^2.V^{-1}.s^{-1}$

Dans le germanium : -  $\mu_n = 0,39 m^2.V^{-1}.s^{-1}$  et  $\mu_p = 0,19 m^2.V^{-1}.s^{-1}$

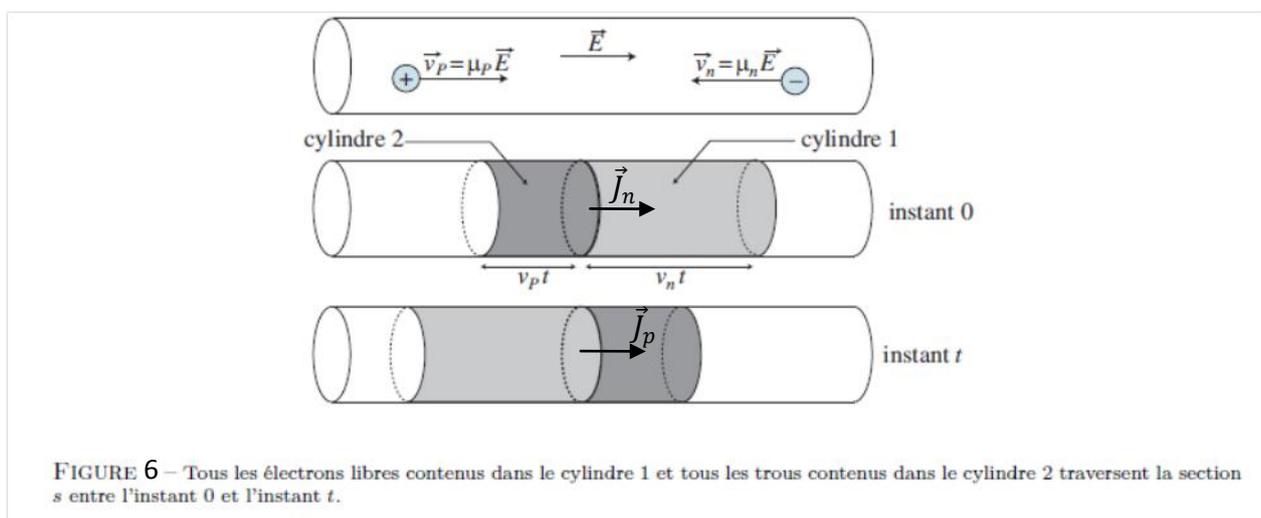


FIGURE 6 – Tous les électrons libres contenus dans le cylindre 1 et tous les trous contenus dans le cylindre 2 traversent la section  $s$  entre l'instant 0 et l'instant  $t$ .

Le courant électrique résultant est la somme des courants des deux types de porteurs de charge :

$$\vec{J} = \vec{J}_n + \vec{J}_p = n(-e)\vec{v}_n + pe\vec{v}_p = \gamma\vec{E} = \frac{\vec{E}}{\rho}, \text{ où } \gamma = e(-n\mu_n + p\mu_p).$$

$\gamma$  est la conductivité de l'échantillon,  $\rho$  sa résistivité.

*Applications numériques :*

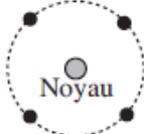
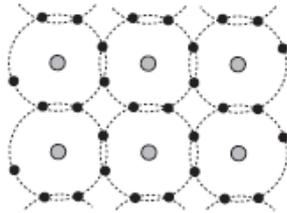
<p><b>CUIVRE</b></p> <p><math>n \dots\dots\dots 11.10^{28} \text{ m}^{-3}</math></p> <p><math>p \dots\dots\dots 0</math></p> <p><math>\mu_n \dots\dots\dots 3,2.10^{-3} \text{ S.I.}</math></p> <p><math>\rho \dots\dots\dots 1,75.10^{-8} \Omega \cdot \text{m}</math></p>	<p><b>GERMANIUM</b> à <math>T = 300 \text{ K}</math></p> <p><math>n \dots\dots\dots 2,4.10^{19} \text{ m}^{-3}</math></p> <p><math>p \dots\dots\dots 2,4.10^{19} \text{ m}^{-3}</math></p> <p><math>\mu_n \dots\dots\dots 0,39 \text{ S.I.}</math></p> <p><math>\mu_p \dots\dots\dots 0,19 \text{ S.I.}</math></p> <p><math>\rho \dots\dots\dots 0,45 \Omega \cdot \text{m}</math></p>
---	--

**Doc 4 : les semi-conducteurs**

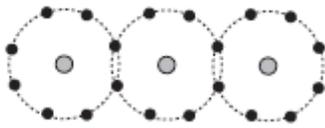
**A. Le semi conducteur pur ou intrinsèque : (Ge, Si)**

A l'état solide, ils sont cristallisés, nous supposons sans impuretés (en pratique, le taux d'impuretés est de  $10^{-10}$ , soit un atome de corps étranger pour  $10^{10}$  atomes de semi conducteur).

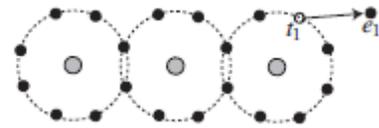
Les 4 électrons périphériques par atome sont mis en commun avec les atomes voisins, créant des liaisons de covalence :

	
<p>L'atome de silicium comporte un noyau et 14 électrons, dont 4 sur la dernière couche; l'atome de germanium comporte un noyau et 32 électrons dont 4 sur la dernière couche.</p>	<p>Dans le cristal de silicium ou de germanium, les atomes mettent en commun leurs électrons périphériques de telle façon que la couche périphérique comporte 8 électrons.</p>

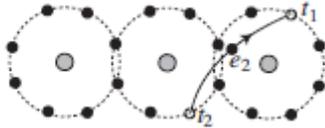
A priori, aucune conduction n'est possible, les électrons périphériques étant engagés dans les liaisons. C'est ce qui se passe à basse température. Mais l'agitation thermique peut « libérer » un électron (voir les cinq étapes du document ci-dessous) qui participe ainsi à la conduction. Son départ a laissé une lacune, appelée « trou » que l'on peut considérer comme un porteur positif participant à la conduction.



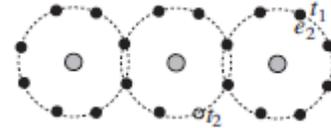
1- Tous les électrons sont liés, la conduction est nulle



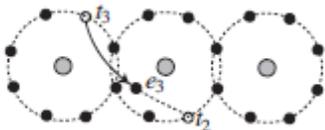
2- Un électron ( $e_1$ ) s'échappe, laissant un trou ( $t_1$ ); il y a création d'une *paire électron-trou*.



3- Un électron ( $e_2$ ) s'échappe, laissant un trou ( $t_2$ ).



4- L'électron  $e_2$  neutralise le trou  $t_1$  et prend la place libérée par  $e_1$ .



5- Un électron ( $e_3$ ) s'échappe, laissant un trou ( $t_3$ ); dans la phase suivante, il va venir neutraliser  $t_2$ .

Comme on le voit, les électrons ont tendance naturelle à neutraliser les trous : il y a **recombinaison**. On parvient à un état d'équilibre où, en un temps donné, le nombre de recombinaisons est égal au nombre de créations. Pour ces porteurs intrinsèques, il y a égalité des densités des électrons et des trous puisque pour un électron créé un trou est créé :  $n_i = p_i$  (i pour intrinsèque).

T = 300 K : germanium  $n_i = p_i = 2,4 \cdot 10^{19}$

silicium  $n_i = p_i = 1,4 \cdot 10^{16}$

## B. Le semi conducteur dopé ou extrinsèque :

Dans un semi conducteur dopé sont introduites des impuretés bien choisies qui vont modifier considérablement les propriétés de conduction du matériau. On utilise deux types d'impuretés :

- des atomes pentavalents (5 électrons périphériques), comme le phosphore, l'arsenic, l'antimoine, le bismuth (colonne V de la classification périodique) qui conduisent à un semi conducteur dopé de type N.

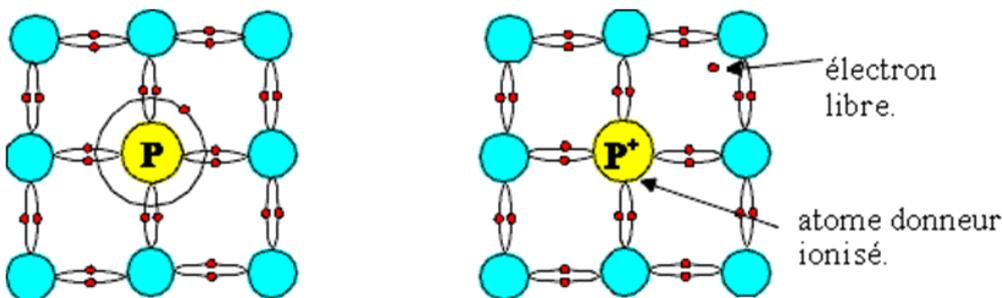


Fig 7 dopage N

La substitution d'un atome de silicium par un atome de phosphore entraîne l'existence d'un électron en excès pour assurer la liaison avec les atomes voisins. Un faible apport d'énergie fourni par

l'agitation thermique permet à cet électron faiblement lié de participer à la conduction. L'atome de phosphore est donc un donneur d'électrons ; il est alors ionisé  $P^+$ .

- des atomes trivalents (3 électrons périphériques), comme le bore, l'aluminium, le gallium, l'indium (colonne III de la classification périodique) qui conduisent à un semi conducteur dopé de type P.

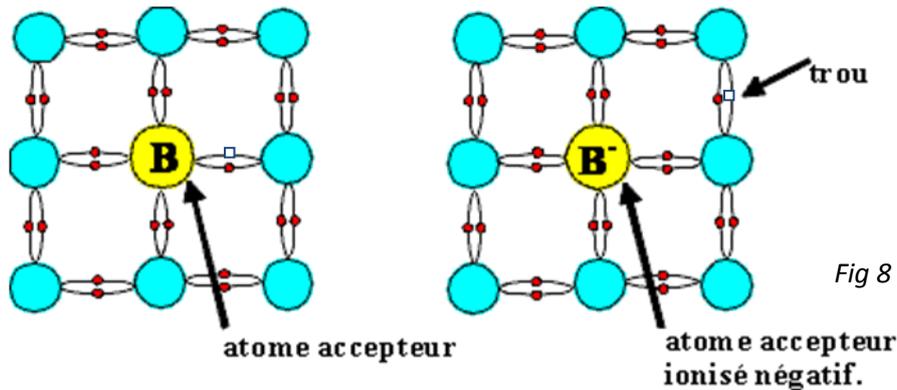


Fig 8 dopage P

La substitution d'un atome de silicium par un atome de bore conduit à un manque d'électron pour assurer la liaison avec les atomes voisins : c'est le petit carré représenté à droite de l'atome de bore sur la figure de gauche. Un faible apport d'énergie, fourni par l'agitation thermique, permet à ce manque d'être comblé par un électron de valence du silicium, ce qui crée un trou. L'atome de bore est alors ionisé  $B^-$  ; c'est un accepteur d'électrons. On retrouve alors le trou – susceptible de se déplacer encore – en haut et à droite de la figure de droite.

L'activité intrinsèque des semi conducteurs (création de paires électron/trou) subsiste, mais devant l'apport extérieur d'électrons libres ou de trous (suivant le dopage) le nombre de recombinaisons augmente.

Pour une même température, le produit (densité d'électrons libres)  $\times$  (densité de trous) reste constant, égal à sa valeur intrinsèque, soit pour le germanium à 300 K :  $n_1 \times p_1 = (2,4 \cdot 10^{13})^2 \approx 5,8 \cdot 10^{26} \text{ cm}^{-6}$

Un cristal de germanium dopé N comprend :

des atomes de germanium .....	$10^{22} \text{ atomes/cm}^3$
des ions positifs, atomes donneurs ayant perdu un électron .....	$N_D = 10^{16} \text{ atomes/cm}^3$
des électrons cédés par les atomes donneurs .....	$n_N \approx N_D = 10^{16} \text{ électrons/cm}^3$
des électrons provenant de l'activité intrinsèque du germanium.....	$n_1 = 2,4 \cdot 10^{13} \text{ électrons /cm}^3$
des trous provenant de l'activité intrinsèque du germanium.....	$p_N = \frac{p_1 \cdot n_1}{n_N} = 5,8 \cdot 10^{10} \text{ trous /cm}^3$

Les électrons, de concentration à peu près égale à  $N_D$ , sont les porteurs majoritaires. Les trous, de concentration  $p_N \ll n_N$  sont les porteurs minoritaires.

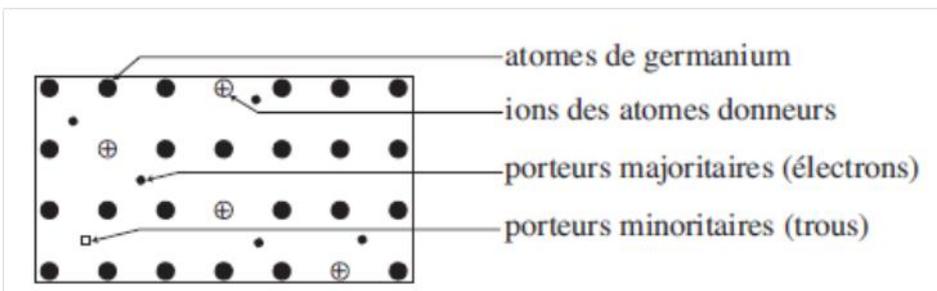


Fig 9 –Constituants d'un semi conducteur dopé N

Un cristal de germanium dopé P comprend :

des atomes de germanium .....	$10^{22}$ atomes/cm <sup>3</sup>
des ions négatifs, atomes accepteurs ayant fixé un électron .....	$N_A = 10^{16}$ atomes/cm <sup>3</sup>
des trous provenant des atomes accepteurs .....	$p_P \approx N_A = 10^{16}$ trous /cm <sup>3</sup>
des trous provenant de l'activité intrinsèque du germanium.....	$p_i = 2,4 \cdot 10^{13}$ trous /cm <sup>3</sup>
des électrons provenant de l'activité intrinsèque du Ge.....	$n_P = \frac{p_i \cdot n_i}{p_P} = 5,8 \cdot 10^{10}$ élec./cm <sup>3</sup>

Les trous, de concentration à peu près égale à  $N_A$ , sont les porteurs majoritaires. Les électrons, de concentration  $p_N \ll n_N$  sont les porteurs minoritaires.

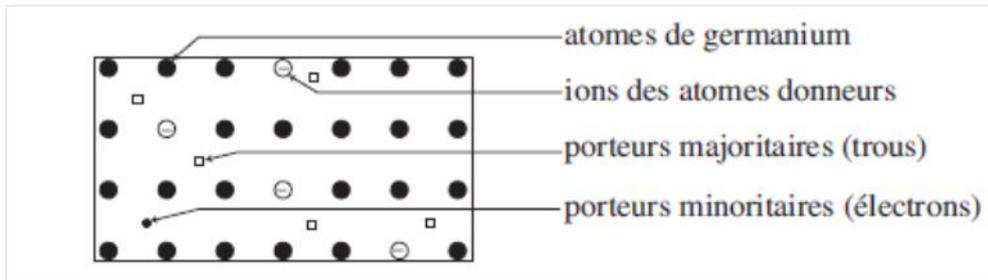


Fig 10 – Constituants d'un semi conducteur dopé P

### C. La jonction P-N

#### 1) Jonction non polarisée :

Elle est réalisée en dopant différemment deux parties d'un matériau semi conducteur : l'un de type N contient un excès d'électrons, l'autre de type P contient un excès de trous.

La forte inhomogénéité de la densité des porteurs de charge entraîne une double diffusion : les trous, majoritaires dans P diffusent dans N et les électrons, majoritaires dans N diffusent dans P.

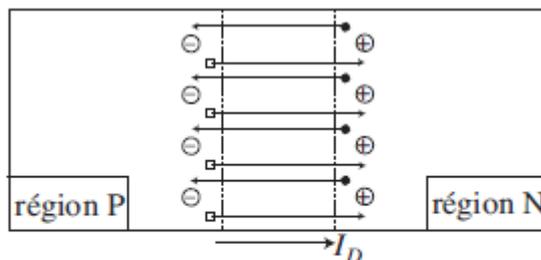


FIGURE 11 – Courant de diffusion des porteurs majoritaires.

$I_D$  courant de diffusion total correspond au bilan de ces deux migrations et est orienté de P vers N. Arrivés dans la région opposée, ils se retrouvent minoritaires et se recombinent : dans la zone de transition, il n'y a plus de porteurs de charge. Suite à la migration des porteurs, les ions négatifs dans la zone P et les ions positifs dans la zone N n'ont plus leur charge « neutralisée », donc subsistent, face à face, les charges des ions négatifs ayant perdu leur trou (zone P) et celles des ions positifs ayant perdu leur électron (zone N).

Ces charges entraînent l'apparition d'un champ interne qui contrarie le mouvement des porteurs de charge majoritaires :

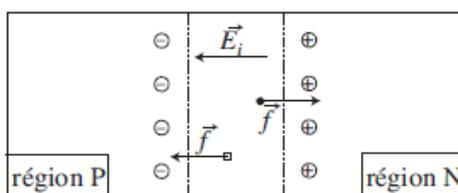


FIGURE 12 - La double couche d'ions positifs et d'ions négatifs crée un champ interne  $\vec{E}_i$  s'opposant au déplacement des porteurs majoritaires

On arrive donc à un équilibre, la zone de transition ayant une largeur et un champ interne tels que seuls les porteurs ayant une énergie suffisante peuvent franchir cette « barrière » et entretenir le courant de diffusion.

Le champ interne favorise par contre le passage des porteurs minoritaires (les trous dans P et les électrons dans N). Il se crée donc un courant de porteurs minoritaires dirigé de N vers P. Il est appelé courant de saturation, noté  $I_s$  et ne dépend que de l'activité intrinsèque du germanium, donc de la température.

Pour une jonction non polarisée  $I = I_D - I_s = 0$ .

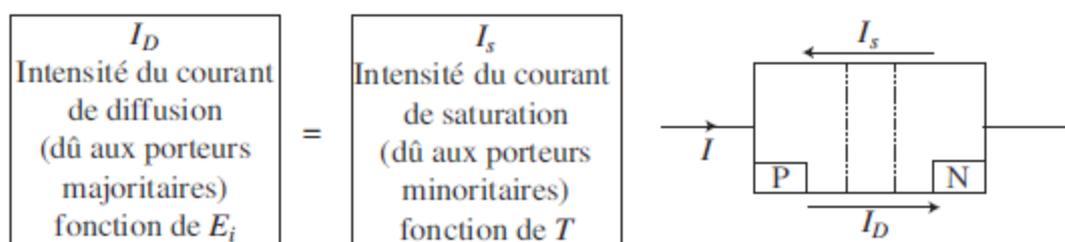
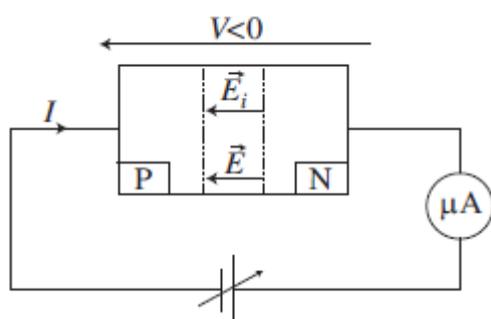


FIGURE 13 - Le courant total  $I = I_D - I_s$  est nul.

## 2) Jonction polarisée : résultats expérimentaux

- **Polarisation en inverse :**

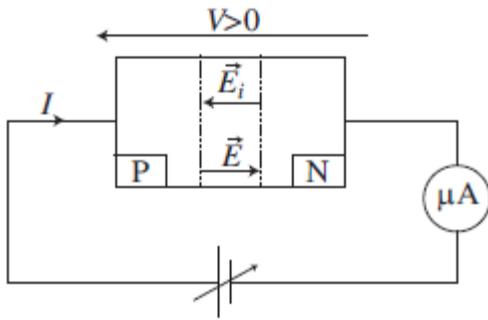


On relie la région P au pôle - de la source d'alimentation, la région N au pôle +.

Une ddp de valeur  $V = -2V$  étant appliquée, on note la circulation d'un courant  $I = -1\mu A$ . Si on fait varier  $V$  de  $-0,5 V$  à  $-10 V$ , la valeur de  $I$  reste sensiblement constante.

Pour une valeur donnée de  $V$  ( $-2 V$  par exemple), on chauffe légèrement la jonction en la prenant entre deux doigts : l'intensité du courant inverse croît très rapidement et se stabilise autour de la valeur  $-5 \mu A$ .

• **Polarisation directe :**



La région P est maintenant reliée au pôle + de la source, la région N au pôle -. On relève :

V(V)	1	2	3
I(mA)	10	32	60

• **Loi de conduction :**

On démontre que l'intensité du courant qui traverse la jonction varie selon la loi :

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \text{ avec } \begin{cases} I_s = f(T) \\ e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \\ T \text{ température absolue en K} \end{cases}$$

En polarisation inverse ( $V < 0$ ) le terme exponentiel est rapidement négligeable et  $I = -I_s$ .

En polarisation directe ( $V > 0$ ) le terme exponentiel est rapidement prépondérant devant 1

et  $I = I_D = I_s \exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$ .

La figure ci-dessous montre l'allure de la caractéristique  $I = f(V)$  pour de faibles valeurs de  $V$  et deux températures  $T_1$  et  $T_2$  :

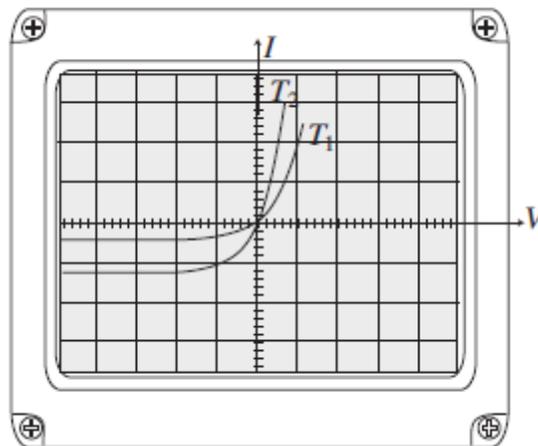


Fig 14 Tracé de caractéristiques d'une jonction P-N

3) **Exemple d'application de la jonction P-N : effet photoélectrique**

Si on éclaire un semi conducteur avec des photons d'énergie supérieure au gap, on crée des paires électrons-trous et par conséquent on augmente la densité de porteurs.

Pour une jonction P-N, les électrons et les trous créés dans la zone intermédiaire sont soumis au champ électrique interne qui déplace les premiers vers la région N et les seconds vers la région P. Ces déplacements augmentent le courant inverse qui devient  $I_s + I_{ph}$ . Le courant photovoltaïque  $I_{ph}$  est proportionnel au nombre  $N$  de paires électrons-trous créés par seconde ( $I_{ph} = -Ne$ ) et donc sensiblement au flux lumineux  $\Phi$  éclairant la jonction : c'est l'effet photovoltaïque.

L'équation de la caractéristique est :

$$I = I_s \exp\left(\frac{U}{U_0}\right) - (I_s + I_{ph})$$

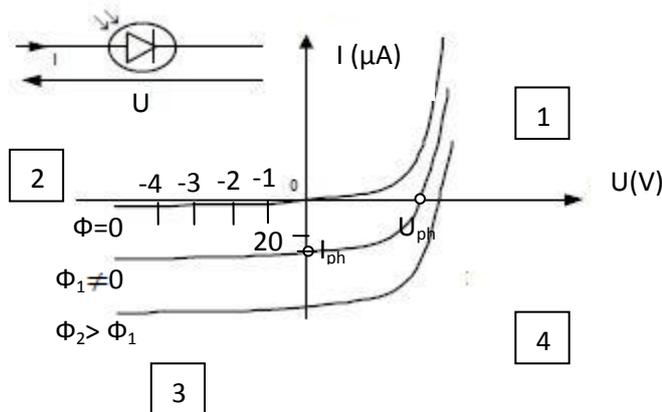
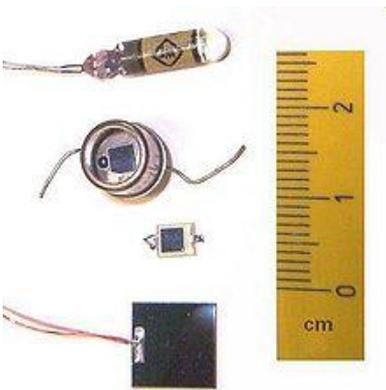


Fig 15 : Evolution de la caractéristique de la jonction P-N en présence de flux lumineux

Cet effet est mis à profit dans :

- les photodiodes : quadrant 3 de la caractéristique.



C'est une diode à jonction travaillant en polarisation inverse, donc :

$$I \approx -(I_s + I_{ph}) \approx -I_{ph} \text{ si } I_s \ll I_{ph}$$

On réalise ainsi une source de courant commandée par un flux lumineux.

Fig 16 : photodiodes

- les cellules photovoltaïques ou photopiles : quadrant 4 de la caractéristique



Ce générateur convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique. En circuit ouvert ( $I = 0$ ), on lit sur la caractéristique qu'une tension  $U_{ph}$  apparaît aux bornes de la jonction :

$$I_s \exp\left(\frac{U_{ph}}{U_0}\right) - (I_s + I_{ph}) = 0 \text{ si } U_{ph} = U_0 \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0}\right)$$

Pour une jonction au silicium,  $U_{ph} \approx 0,6 \text{ V}$ .

Le rendement de la conversion  $\eta_g = -UI/\Phi$  atteint 0,22 et 0,28 respectivement pour des photopiles au silicium et à l'arséniure de gallium. Avec du silicium polycristallin ou amorphe, l'efficacité est comprise entre 0,10 et 0,15.

Fig 17 : cellules photovoltaïques