



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

Chapitre2
Application – Physique des Semi-conducteurs

Pr Khechoubi El Mostafa

Année universitaire 2024/2025



INTRODUCTION

Concentration des porteurs de charge : électrons et trous

Comportement en fonction de Température

Dégénérescence dans un Semi conducteur

Semi conducteur intrinsèque

Semi conducteur extrinsèque

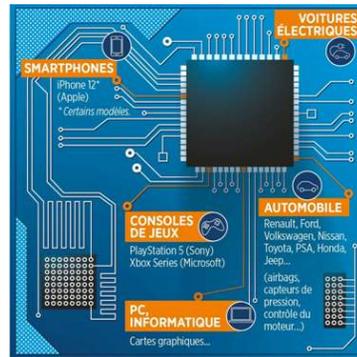
Chapitre 6 : Propriétés électriques, magnétiques, supraconductivité

Les cristaux semi-conducteurs ont connu ces dernières années un développement considérable.

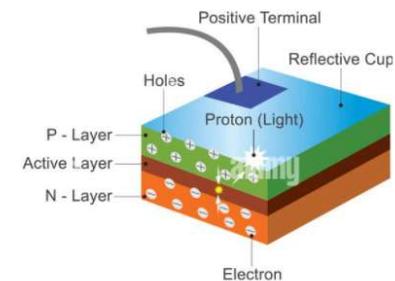
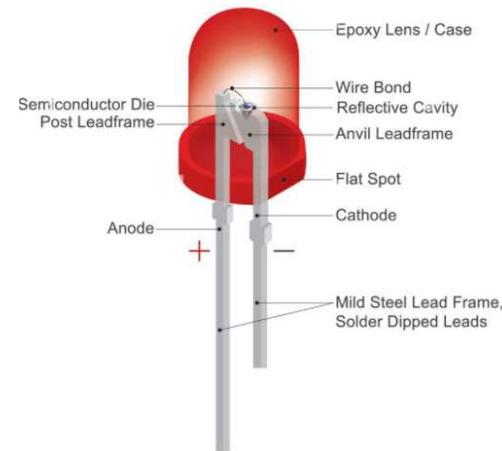
De nombreux dispositifs sont aujourd'hui basés sur les propriétés de ces matériaux.

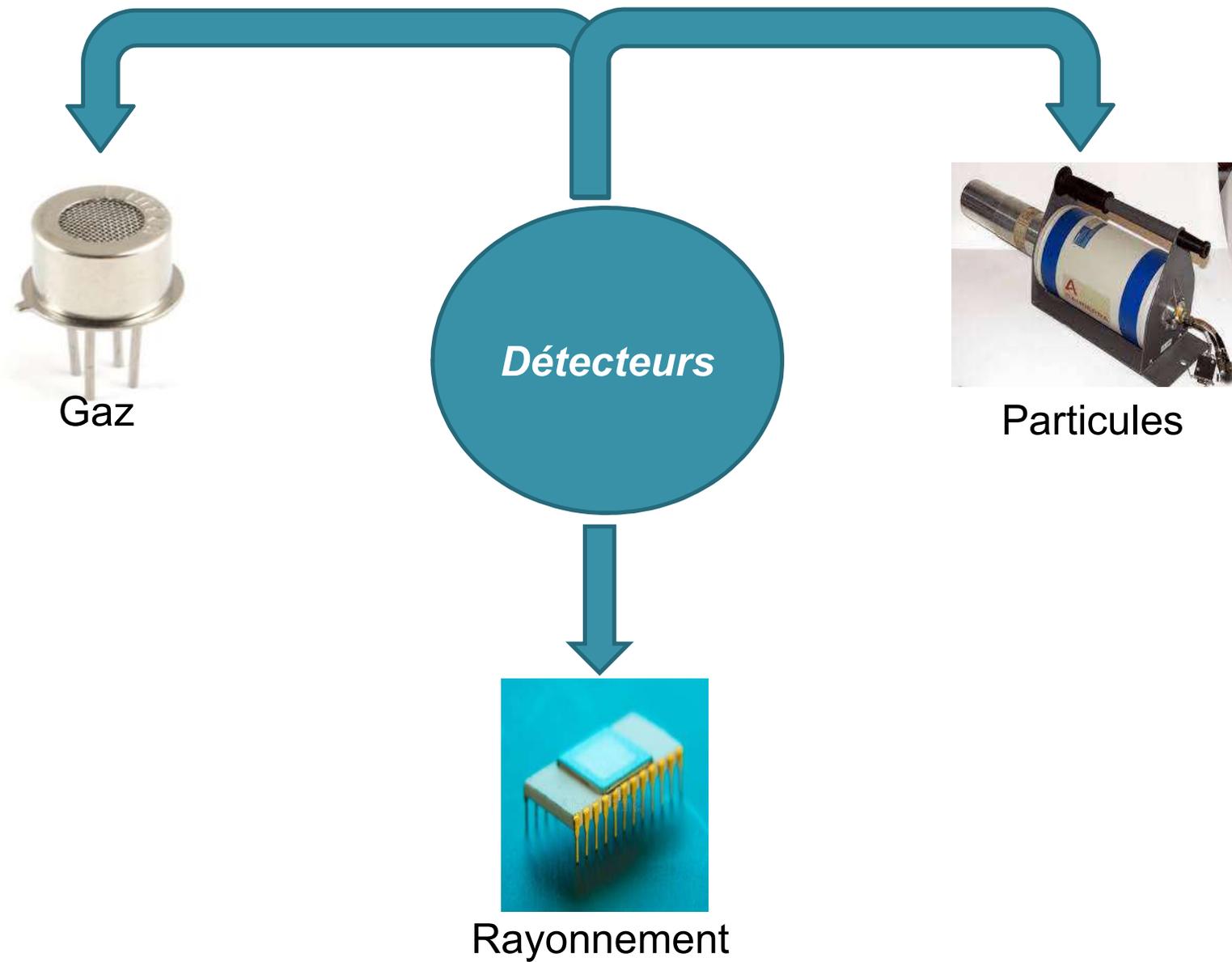
On peut citer par exemple les transistors, les détecteurs, les cellules photo-électriques, . . . Pour chaque type d'application, on peut utiliser différents types de semi-conducteurs.

Transistors
Circuits intégrés



Diode à semi conducteur

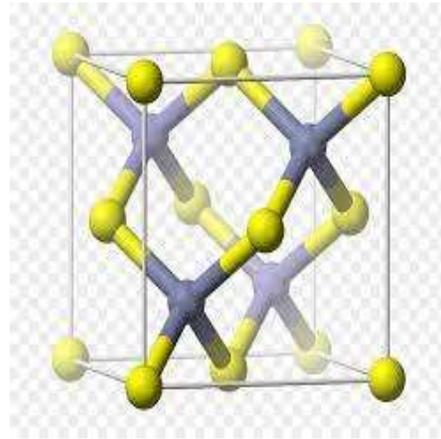




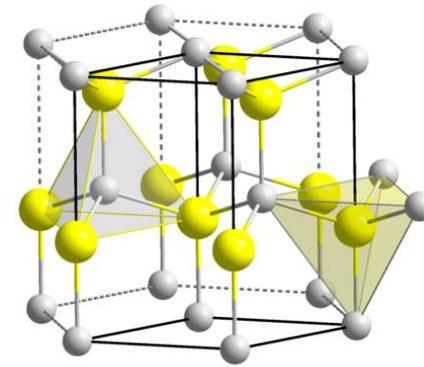
Le silicium, Si, est le plus répandu, mais il existe d'autres matériaux comme le germanium, Ge

Il y a également des alliages comme l'arséniure de gallium, AsGa, le sulfure de zinc (ZnS), le tellure de cadmium (CdTe)

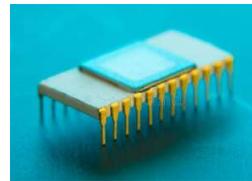
Matériaux luminescents



Sphalérite



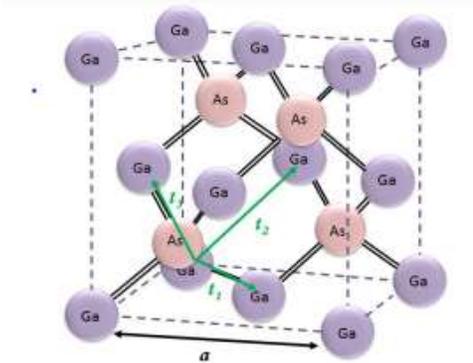
Wurtzite



Rayonnement

Ils sont utilisés comme luminophores dans de nombreuses applications : Tube cathodique, écrans à rayons X, produits phosphorescents, etc..

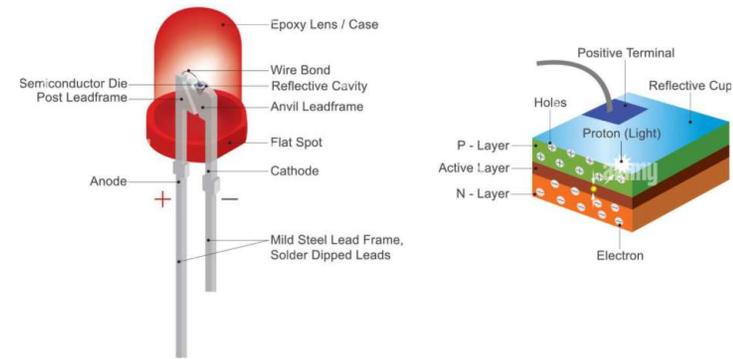
Applications optoélectroniques



Structure Zinc Blende

Développement de nouveaux matériaux et dispositifs optoélectroniques

Diode à semi conducteur



Application Photovoltaïque



Les cellules au CdTe : minces, rentables. ***Mais toxiques ?***

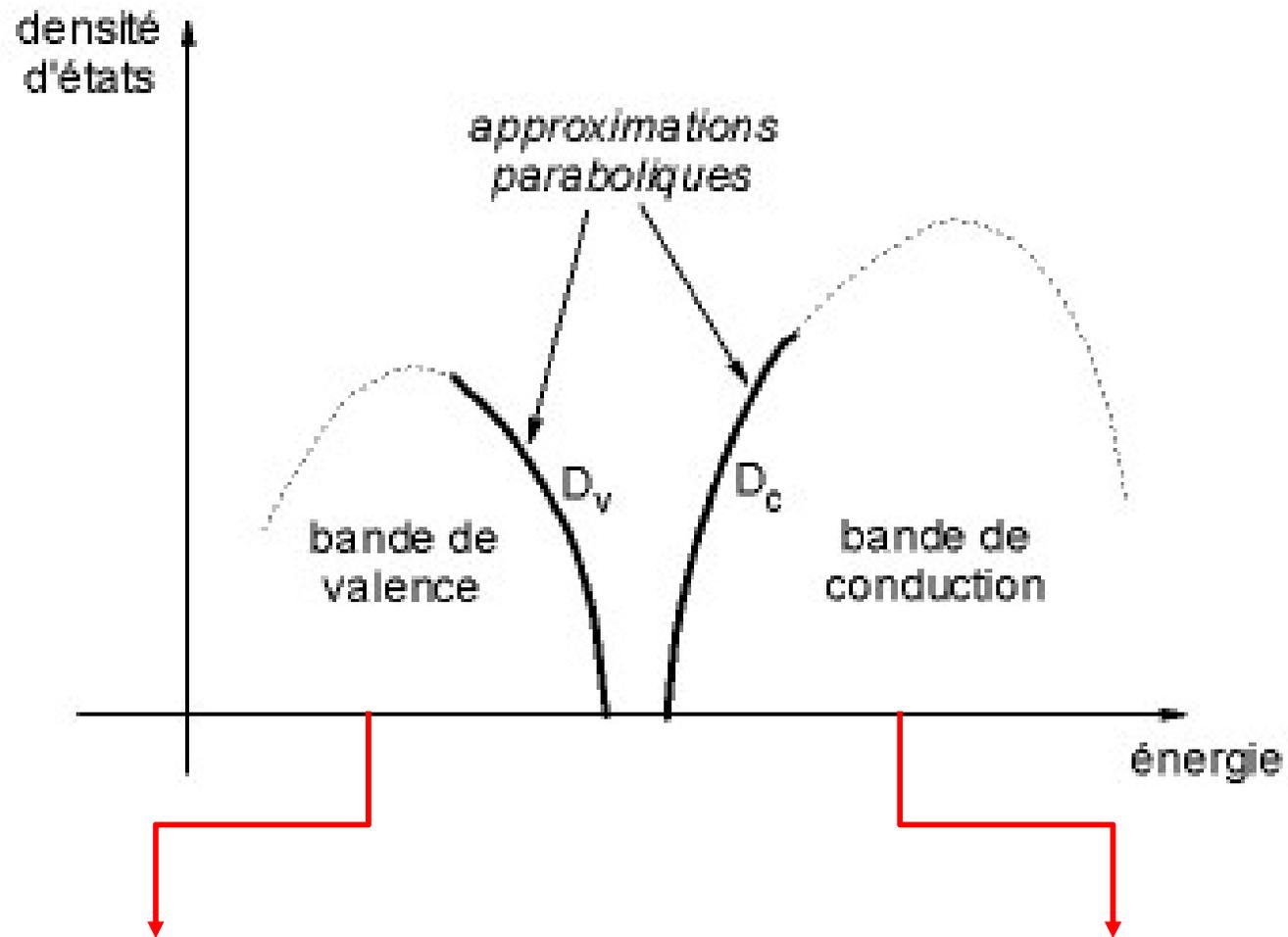
Concentration des porteurs de charge : électrons et trous

Le modèle des électrons « *presque libres* » reste toujours valable, pour la densité d'états proche de la bande interdite à condition de :

Remplacer la masse des électrons par la masse effective

Faire apparaître le niveau d'énergie minimale E_c de la bande de conduction

Faire apparaître le niveau d'énergie maximale E_v de la bande de valence



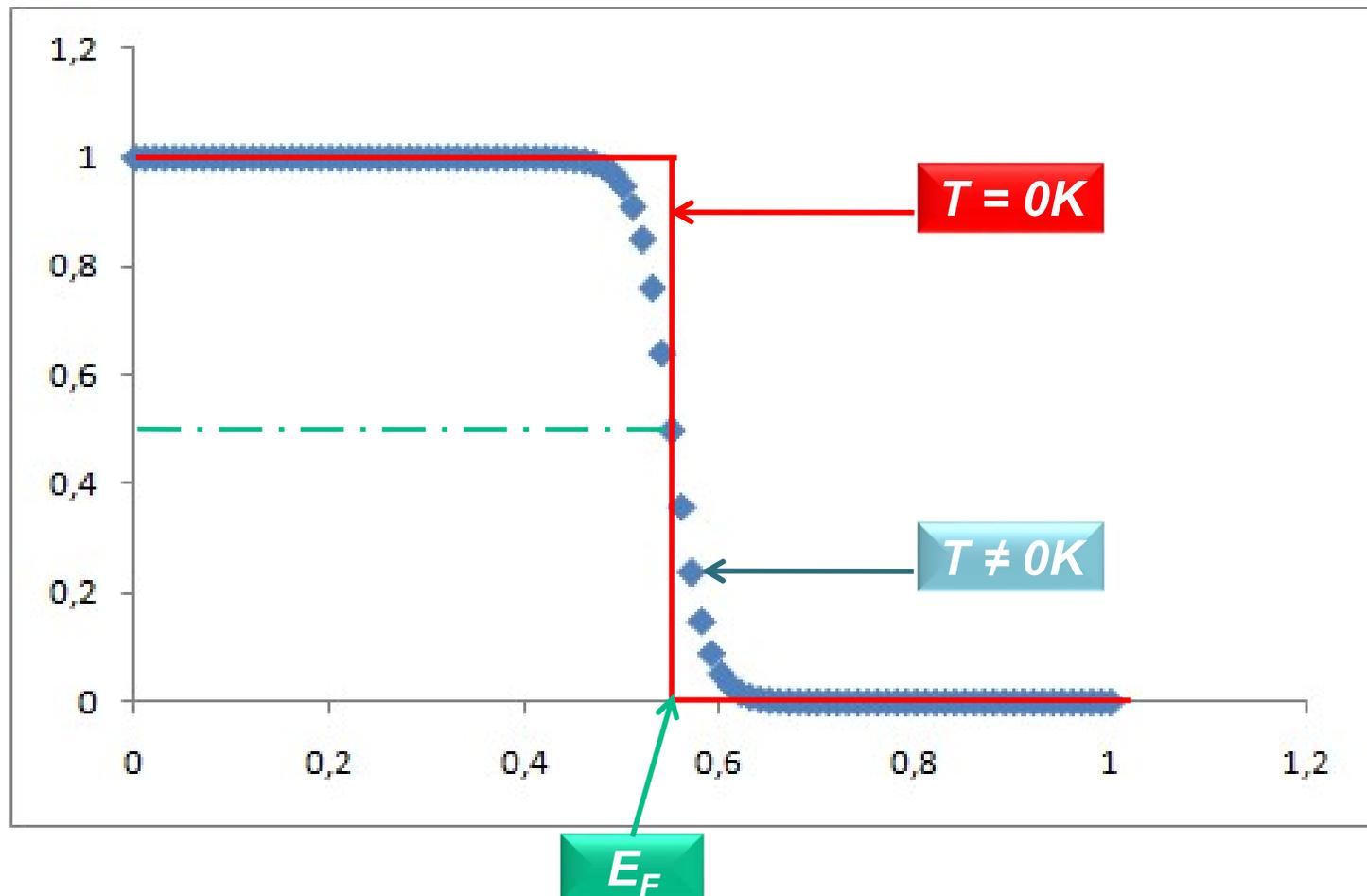
$$D_v(E) = \frac{V}{4\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$$

$$D_c(E) = \frac{V}{4\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

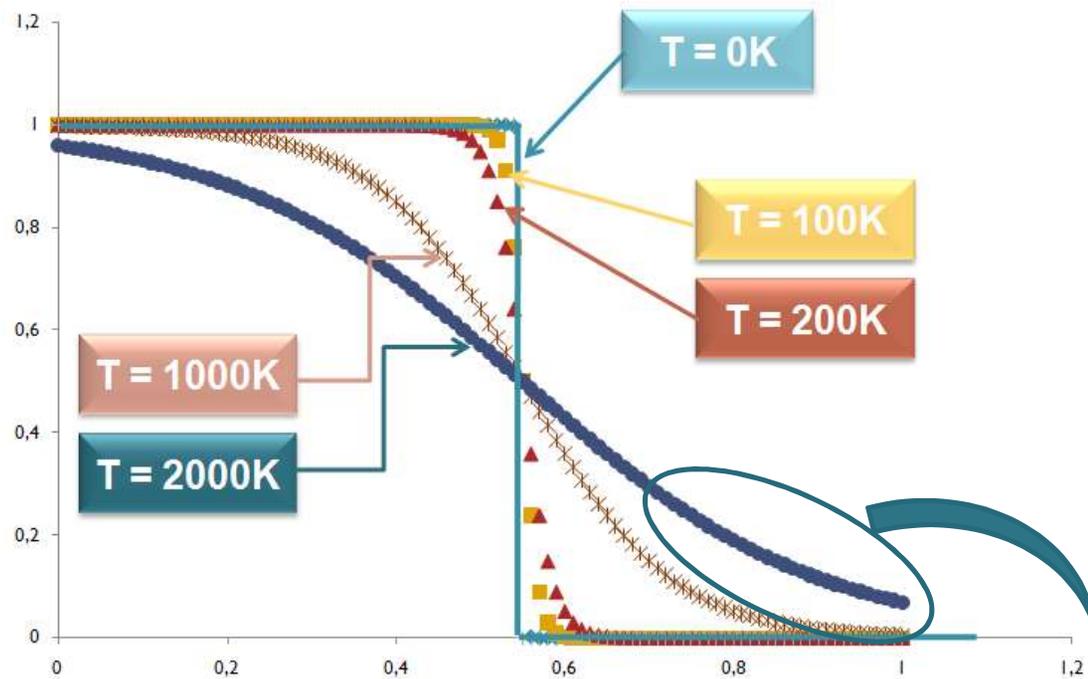
Comportement en fonction de T

La probabilité pour qu'a un niveau d'énergie E soit occupé par un électron à la température T est donnée par la fonction de Fermi-Dirac :

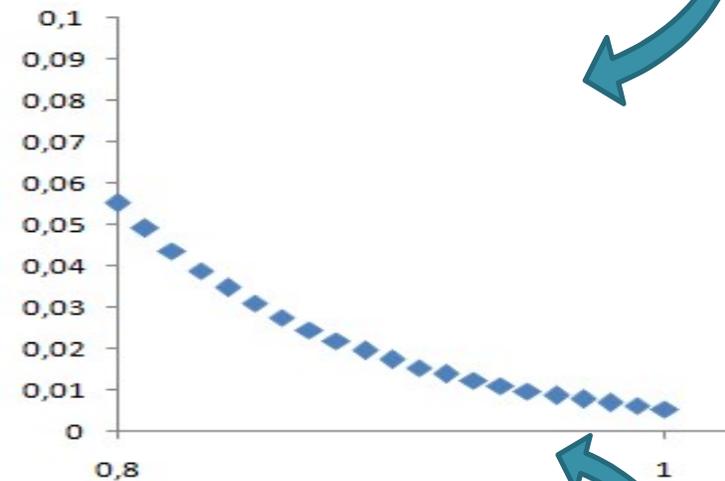
$$f_D(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$



Le comportement de le **FD** change en fonction de la température



Lorsque, à une température considérée, le niveau énergétique est largement supérieur au niveau de Fermi à **0K**, typiquement lorsque : $\frac{E - E_F}{k_B T} > 3$



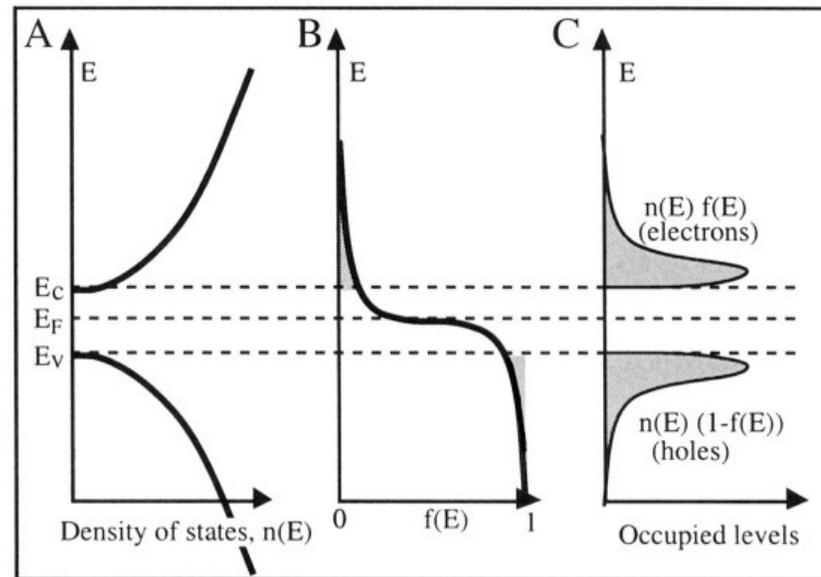
La distribution statistique de Fermi-Dirac peut être simplifiée de la façon suivante

$$f_D(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} = f_{MB}(E)$$

$$N = 2 \int_{E_C}^{+\infty} D_C(E) \cdot f_D(E) \cdot dE$$

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E - E_C)^{1/2} e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} dE$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$



$$P = 2 \int_{-\infty}^{E_V} D_V(E) \cdot (1 - f_D(E)) dE$$

$$p = \int_{-\infty}^{E_V} \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_t}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_V - E)^{1/2} e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} dE$$

$$p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

Pour calculer ces expressions on utilise les approximations intégrales de type :

$$I(\alpha) = \int_0^{\infty} \frac{x^{\alpha}}{e^x + 1} \quad I(1/2) = 0,678$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$

$$p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

On définit les deux coefficients n_C et n_V tels que

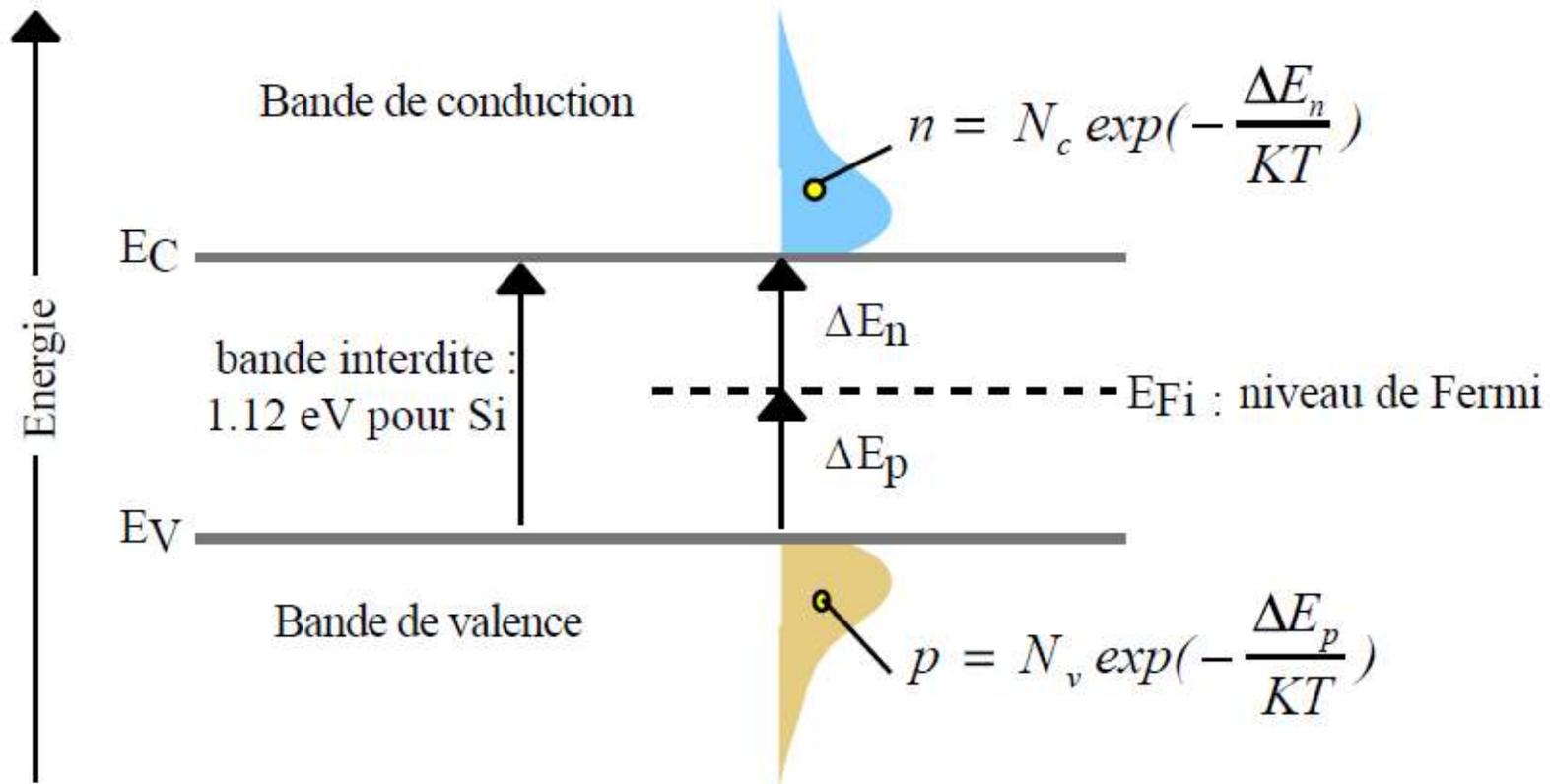
$$n_C = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$n_V = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

$$n \cdot p = n_C \cdot n_V \cdot e^{-\frac{E_C - E_V}{k_B T}} = n_C \cdot n_V \cdot e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

Cette équation est la **loi d'action de masse** appliquée à la réaction formant des électrons dans la bande de conduction (concentration n) et des trous dans la bande de valence (concentration p).

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$



$$p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

On peut définir une représentation simplifiée d'un SC par ses niveaux d'énergies E_V et E_C

Dans cette représentation :

Electrons et trous sont situés à proximité de ses niveaux d'énergies

Cette représentation est valable que le SC soit pur ou non

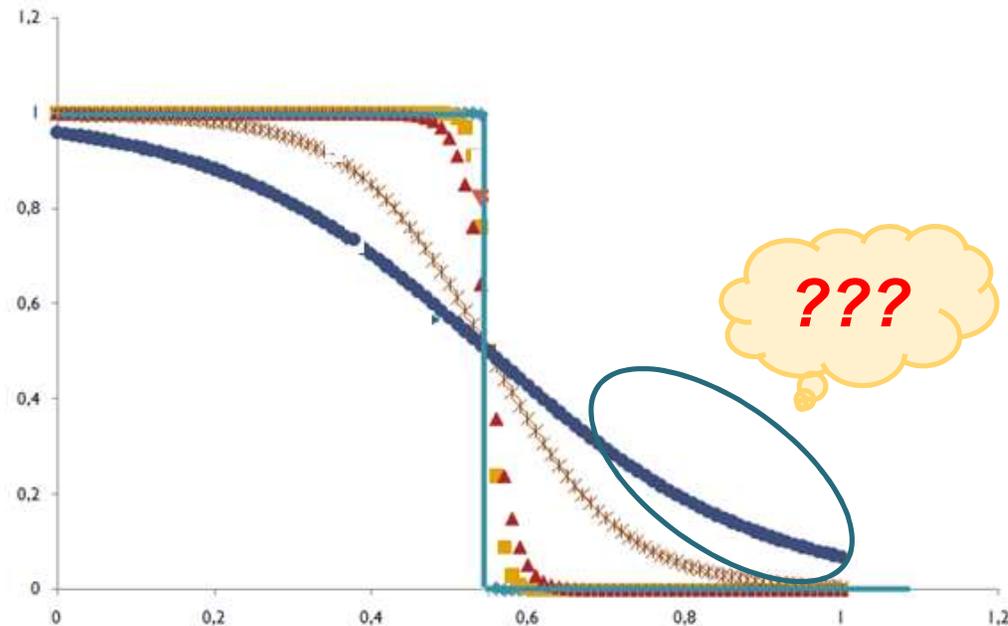
La seule condition à vérifier

$$\frac{E - E_F}{k_B T} > 3$$

Dégénérescence dans un Semi conducteur

Semi conducteur dégénéré

On dit qu'un semi conducteur est dégénéré lorsque le niveau de Fermi est situé dans une bande permise, bande de valence ou bande de conduction.



En régime dégénéré on ne peut plus approximer la distribution de Fermi Dirac par une distribution de Maxwell Boltzmann

Les densités des porteurs libres sont données par les expressions

$$n = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_C}^{+\infty} (E - E_C)^{1/2} \cdot f_D(E) \cdot dE \quad P = 2 \int_{-\infty}^{E_V} D_V(E) \cdot (1 - f_D(E)) dE$$

Pour calculer cette expression on utilise les approximations intégrales de type :

$$I(\alpha) = \int_0^{\infty} \frac{x^\alpha}{e^x + 1} \quad I(1/2) = 0,678$$

Semi conducteur non dégénéré

Dans le cas contraire, qui correspond au fonctionnement de la majorité des composants

Le niveau de Fermi est situé dans la bande interdite

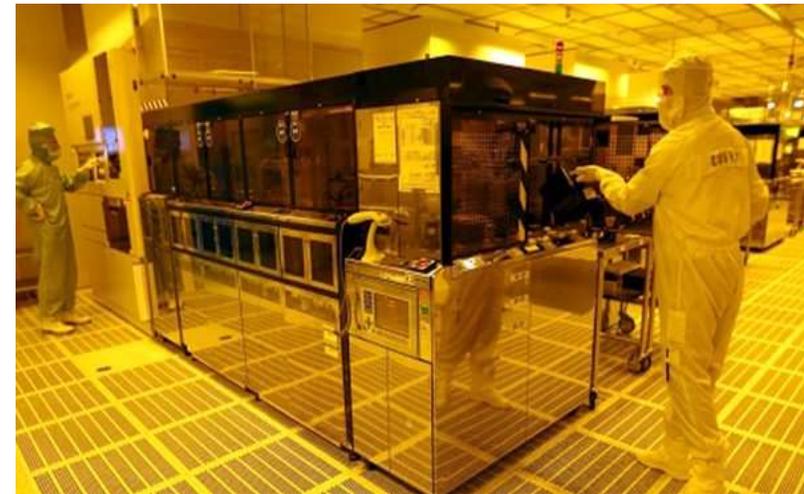
Semi conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur pur

Aucun défaut physique



Aucune impureté dans le réseau



Chambres blanches

Concentration intrinsèque

Chaque électron de la BC est relié à un trou de la BV

$$n = p = n_i \quad n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_C \cdot n_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

n_i : concentration intrinsèque

A température ambiante

	Si	Ge	GaAs	InP
n_i (cm^{-3})	10^{10}	$2 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^7$

Position du niveau de Fermi intrinsèque

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}} \quad p = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

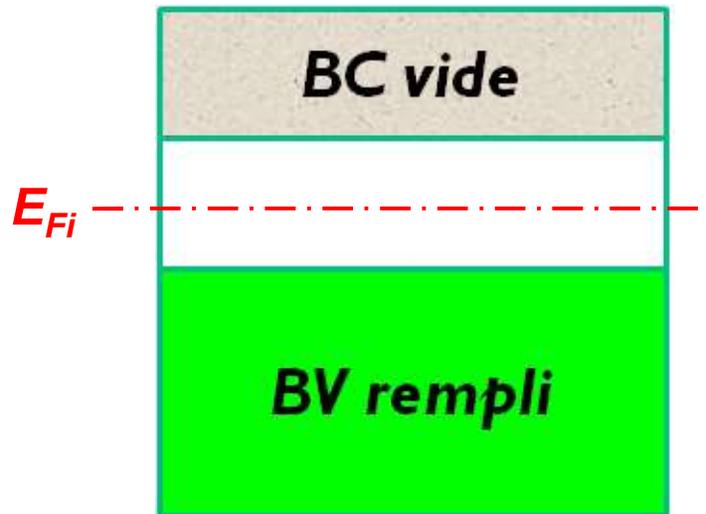
$$m_e^{3/2} e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}} = m_t^{3/2} e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$e^{2\frac{E_F}{k_B T}} = \left(\frac{m_t}{m_e} \right)^{3/2} e^{\frac{E_V + E_C}{k_B T}}$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_V + E_C) + \frac{3}{4}k_B T \ln \left(\frac{m_t}{m_e} \right)$$

$$E_{F_i} = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4}k_B T \cdot \ln\left(\frac{m_t}{m_e}\right)$$

A T=0K

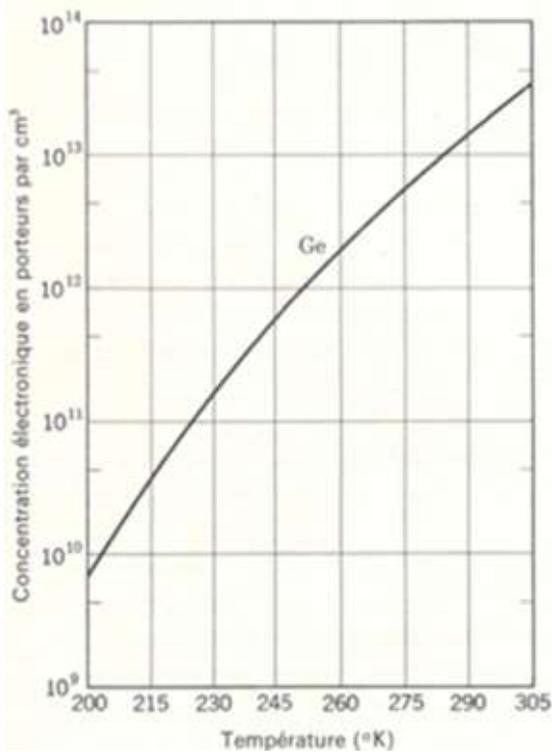


A T≠0K

Le rapport des masses effectives est de l'ordre de 1 dans les Semi conducteurs à gap indirect et de l'ordre de 10 dans les semi conducteurs à gap direct.

$$E_{F_i} \approx \frac{1}{2}(E_C + E_V)$$

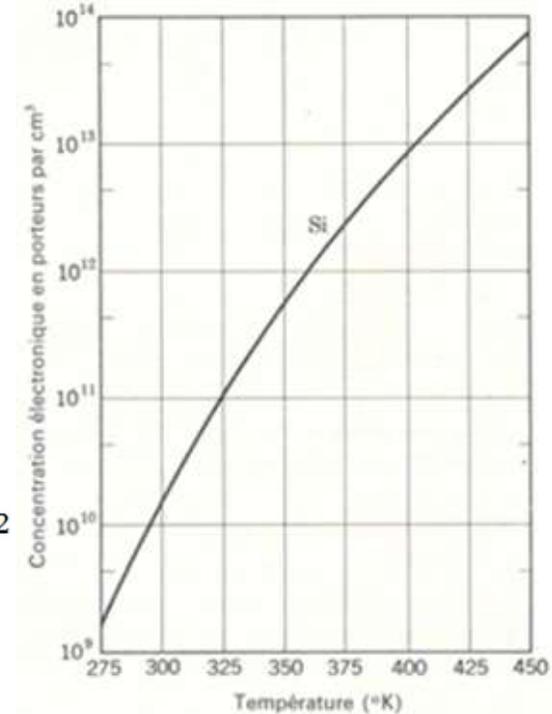
Il en résulte que le niveau de Fermi d'un semi conducteur intrinsèque est toujours très voisin du milieu du gap à la température ambiante



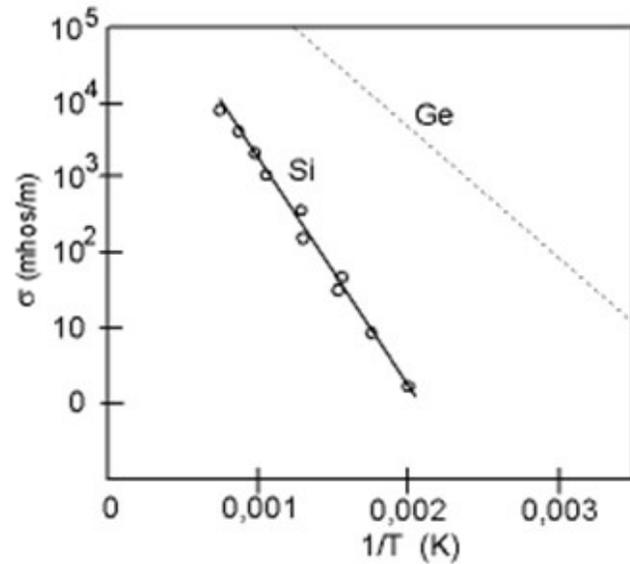
$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{n_C \cdot n_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

Le terme exponentielle est prédominant sur le terme puissance

$$n_C = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} \quad n_V = 2 \left(\frac{m_t k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$



$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$



Propriétés de conduction

La mobilité dans un conducteur est donnée par la relation : $\vec{v} = -\frac{e\tau}{m}\vec{E} = \mu_n\vec{E}$

$$\text{Soit : } \mu = \frac{v}{E}$$

La conductivité est définie par la relation : $\sigma = ne\mu$

De la même manière on définit la mobilité des trous

La mobilité est positive dans les deux cas

La conductivité électrique dans un matériau semi conducteur est due à la mobilité des porteurs de charge

Cette conductivité électrique est la contribution des deux porteurs de charge

$$\sigma = ne\mu_{\bar{e}} + pe\mu_t$$

Concentration des électrons

Concentration des trous

$$v = v_l = \frac{eE\tau}{m}$$

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$$

Mobilité et temps de relaxation

$$\mu_{\bar{e}} = \frac{e\tau_{\bar{e}}}{m_e}$$

$$\mu_t = \frac{e\tau_t}{m_t}$$

***Mobilité des porteurs à la température ambiante
(cm²/V.s)***

Cristal	Electrons	Trous
Si	1300	500
Ge	4500	3500
GaAs	8800	400
GaSb	4000	1400

***La Mobilité dans le cuivre métallique à la température ambiante
Est de l'ordre de 35 cm²/V.s***

Semi conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur « **extrinsèque** » est un semi-conducteur pour lequel, à l'équilibre thermodynamique, la concentration en électrons **n** est différente de la concentration en trous **p**

Cette différence est obtenue le plus souvent en introduisant dans le matériau de manière intentionnelle une faible concentration d'impuretés de nature contrôlée

Cet ajout est appelé « *dopage* »

Ce dopage a une influence considérable sur les propriétés des semi-conducteurs

Par exemple, l'ajout de un atome de bore pour **10^5** atomes de silicium augmente la conductivité du silicium d'un facteur **10^3** à température ambiante



Dans un semi-conducteur composé comme AsGa, une déficience stœchiométrique de l'un des constituants agira comme une impureté. On parle alors de semi-conducteur déficitaire

Les éléments chimiques choisis comme dopant présentent une valence différente de celle du semi-conducteur

Ils se positionnent dans son réseau en site substitutionnel, c'est-à-dire en remplacement de certains atomes

Si après le dopage

la concentration en électrons est supérieure à celle des trous, on qualifiera le semi-conducteur de **type N**

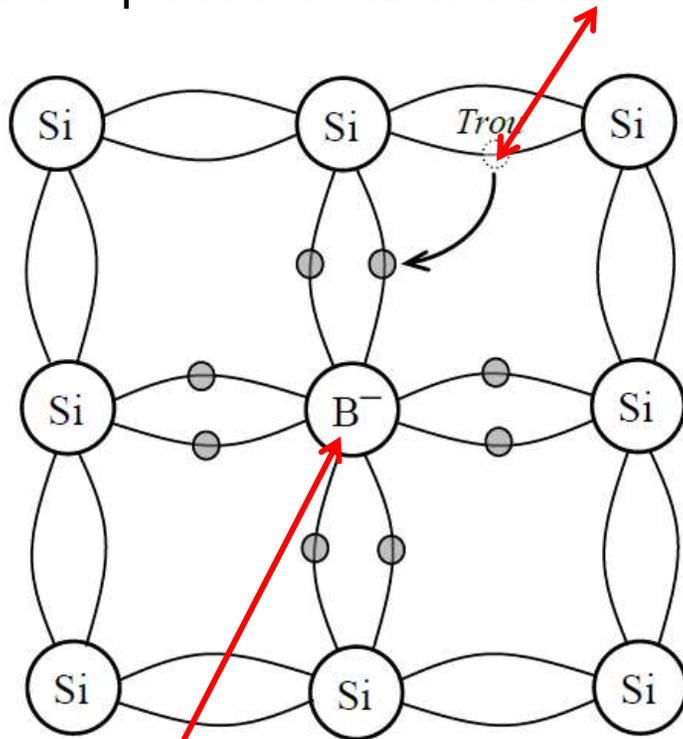
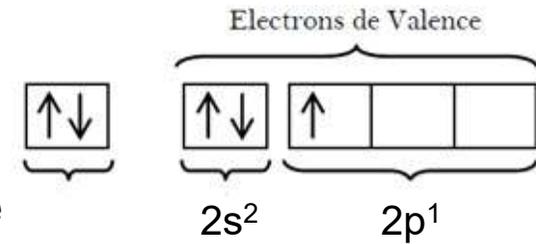
la concentration en trous est supérieure à celle des électrons, on qualifiera le semi-conducteur de **type P**

Semi conducteur de type P

Le dopage d'un semi-conducteur, le silicium par exemple, par des atomes de Bore : 3 électrons dans la couche externe

permet, à température ambiante :

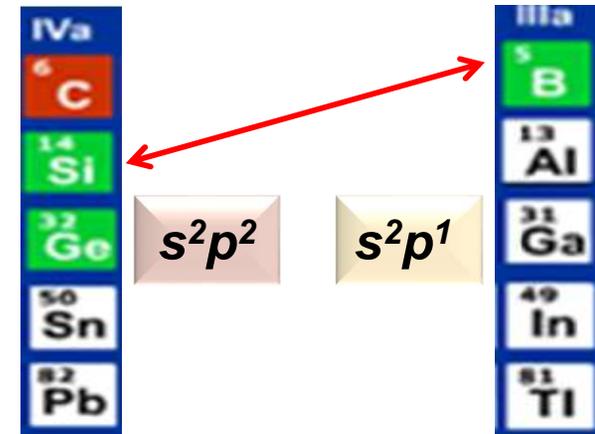
d'une part la création d'un trou dans la bande de valence



d'autre part l'apparition d'une charge négative excédentaire autour de l'atome de Bore

L'atome de Bore est considéré dans ce cas comme **un élément accepteur** d'électrons. le Semi-conducteur dopé par des atomes trivalents est de type P

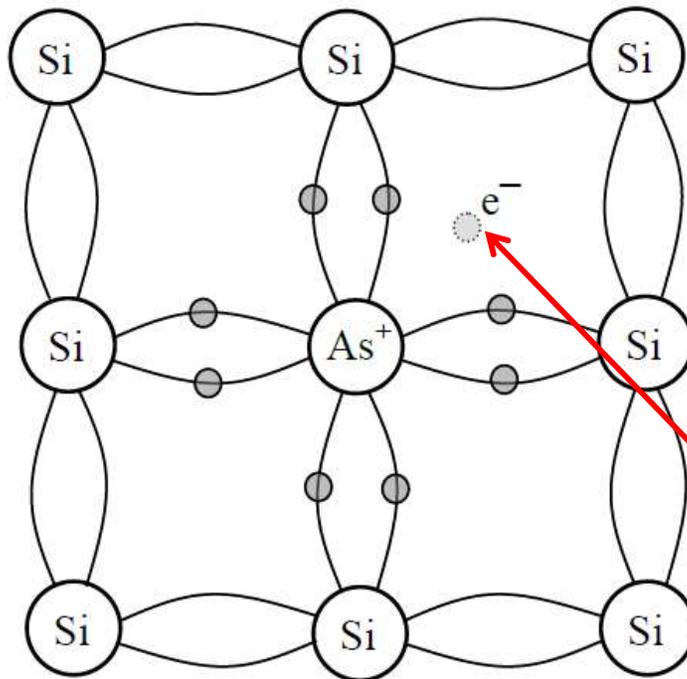
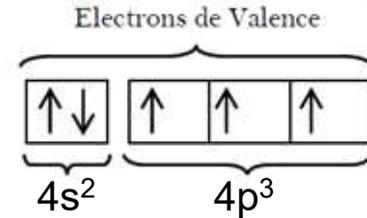
Dopage par un élément de type III



Introduction d'une faible concentration N_a d'atomes accepteurs

Semi conducteur de type N

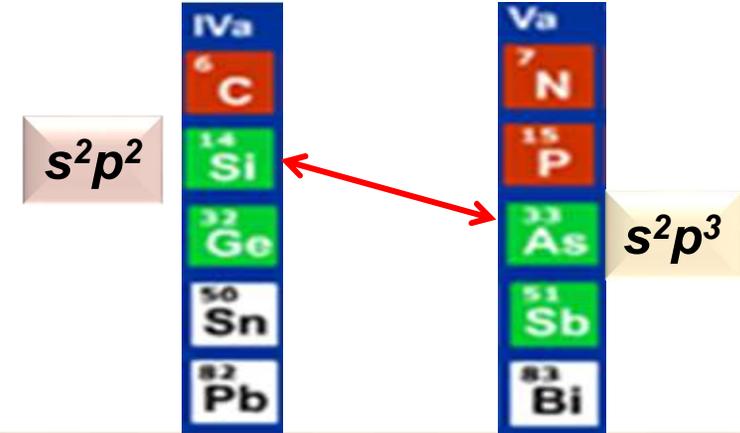
Dans ce cas, les impuretés sont les atomes pentavalents de la colonne V. Les éléments le plus utilisé dans ce type de dopage sont l'arsenic (As) et le phosphore (P) : 5 électrons dans la couche externe.



Dans le réseau cristallin, l'atome d'As est entouré de 9 électrons

8 électrons d'entre eux saturent les orbitales liantes

Dopage par un élément de type V



Introduction d'une faible concentration n_d d'atomes donneurs

L'électron restant occupe une orbitale délocalisée dans le champ positif de l'ion As^+

Periodic Table of Elements

1	IA	1	H	IIA	2	He	0																													
2	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
3	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	57	La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	89	Ac	104	Rf	105	Ha	106	107	108	109	110																					

* Lanthanide Series
+ Actinide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Pu	Pg	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Concentration des porteurs de charge

Considérons un semi conducteur contenant une concentration N_d de donneurs et une concentration N_a d'accepteurs

Soit N_a^- le nombre d'accepteurs ionisés, c'est-à-dire ayant accepté un électron supplémentaire

Soit N_d^+ le nombre de donneurs ionisés, c'est-à-dire ayant accepté un électron supplémentaire

Le matériau étant neutre, l'ensemble des charges positives est égal à l'ensemble des charges négatives

L'équation de neutralité électrique du matériau s'écrit

$$n + N_a^- = p + N_d^+$$

Etudions tout d'abord le système à la température ambiante. En raison du fait que l'énergie thermique kT est du même ordre de grandeur que les énergies de liaison de l'électron sur le donneur et du trou sur l'accepteur

tous les donneurs et accepteurs sont ionisés

L'équation de neutralité électrique se réduit donc à : $n + N_a = p + N_d$

lors de la cristallogenèse, le semi conducteur est toujours contaminé par des impuretés

La condition : $N_a = N_d = 0$ n'est jamais réalisée

En d'autres termes le semi conducteur intrinsèque n'existe pas

Il existe en fait trois types de semi conducteur

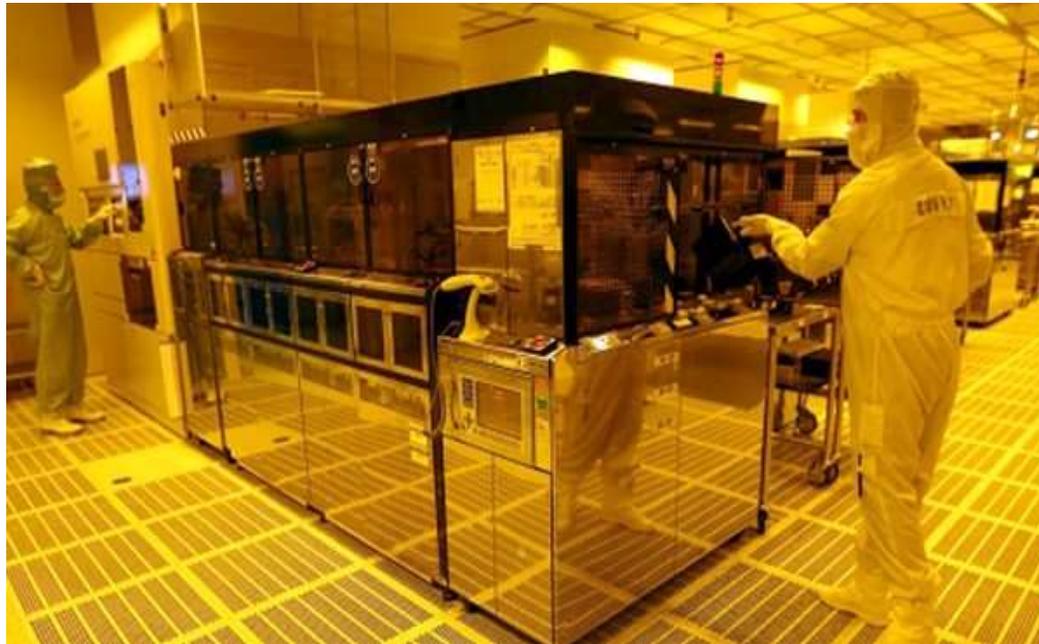
Semi conducteur compensé - Semi-Isolant

Semi conducteur de type **N**

Semi conducteur de type **P**

Semi conducteur compensé - Semi-Isolant

Il existe toujours dans un semi conducteur des impuretés incontrôlées que l'on appelle impuretés résiduelles



Pour compenser ces impuretés, on dope le semi conducteur de manière à se rapprocher le plus possible de la condition :

$$N_a = N_d$$

Niveau de Fermi

Supposons que cette condition soit réalisée : $N_a = N_d$

L'équation de neutralité électrique s'écrit alors : $n + N_a = p + N_d$

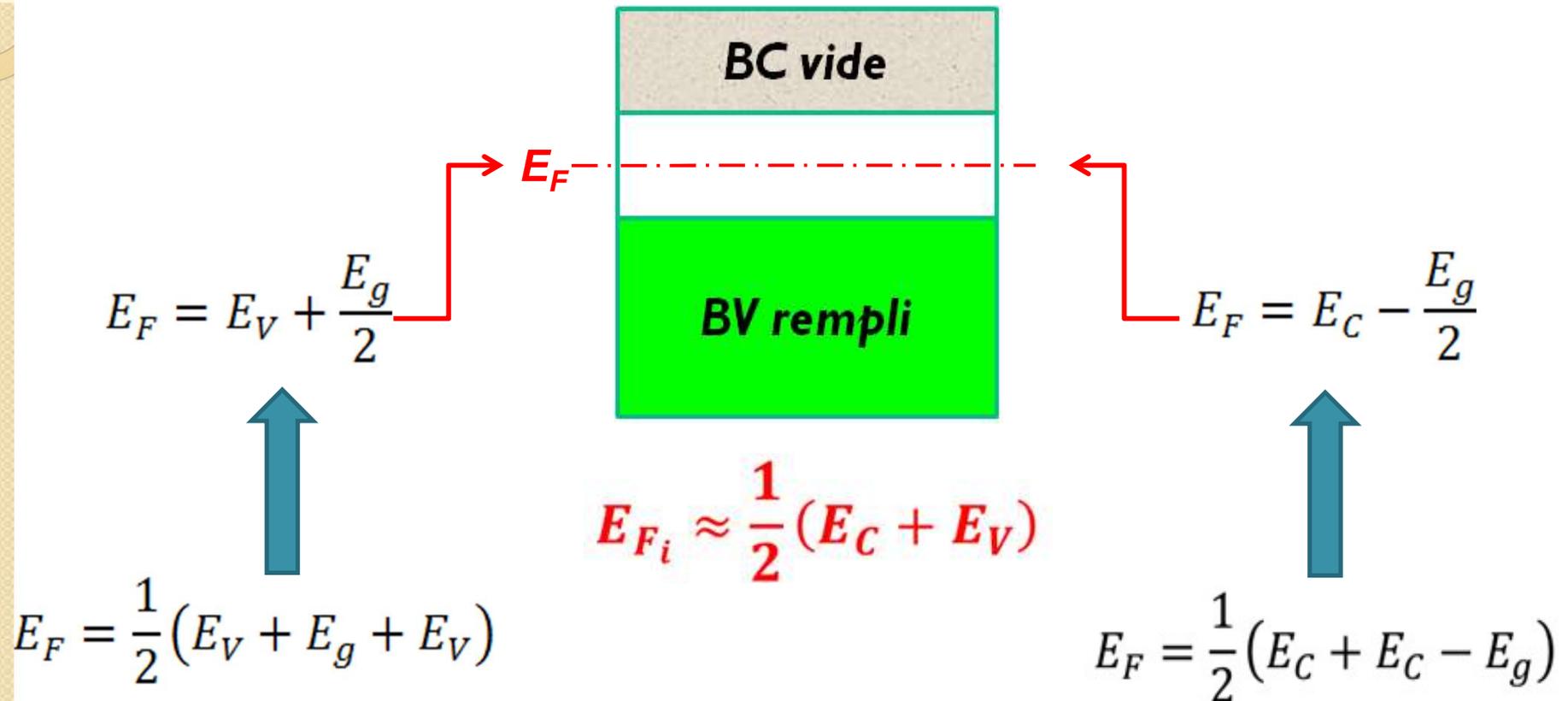
s'écrit alors : $n = p$  $n = p = n_i$

Le semi conducteur est alors considéré comme s'il était intrinsèque

La conductivité électrique est plus proche de l'isolant que du conducteur

On l'appelle alors semi-isolant

Le niveau de Fermi, est donc situé, comme pour un semi conducteur intrinsèque, au voisinage du milieu de la bande interdite



Dans la pratique on choisit l'origine des énergies de telle sorte que

$$E_V = 0 \text{ eV}$$

Semi conducteur N

Dans un semi-conducteur de type **N**, la concentration en donneurs N_d est supérieure à celle d'accepteurs N_a

Les électrons dans ce cas sont appelés les porteurs majoritaires et les trous sont des porteurs minoritaires

$$N_d > N_a$$

$$n > p$$

$$n + N_a = p + N_d$$

$$n \cdot p = n_i^2$$

$$n \cdot (N_d - N_a) = n^2 - n \cdot p$$

$$n^2 - n \cdot (N_d - N_a) - n_i^2 = 0$$

$$n^2 - n.(N_d - N_a) - n_i^2 = 0$$

Solutions de l'équation

Positive

Négative

$$x_1 = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\} \quad x_2 = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) - \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\}$$

Concentration des électrons

Concentration des Trous

$$n = \frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) + \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\} \quad p = -\frac{1}{2} \left\{ (N_d - N_a) - \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} \right\}$$

En pratique les concentrations N_d et N_a sont très élevées (supérieures à n_i)

$$n \approx (N_d - N_a)$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{(N_d - N_a)}$$

Semi conducteur **P**

Dans un semi-conducteur de type **P**, la concentration en accepteurs N_a est supérieure à celle donneurs N_d

Les trous dans ce cas sont appelés les porteurs majoritaires et les électrons sont des porteurs minoritaires

$$N_a > N_d \quad p > n$$

De la même manière que précédemment on trouve

$$p \approx (N_a - N_d) \quad n \approx \frac{n_i^2}{(N_a - N_d)}$$

Niveaux de Fermi

La concentration des porteurs de charge dans un semi conducteur est donnée par les relations suivantes :

Semi conducteur **N**

$$n = (N_d - N_a) = n_C \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{F_n}}{k_B T}\right)}$$



$$E_{F_n} = E_C - k_B T \cdot \ln\left(\frac{n_C}{N_d - N_a}\right)$$

Semi conducteur **P**

$$p = (N_a - N_d) = n_V \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{F_p}}{k_B T}\right)}$$

$$E_{F_p} = E_V + k_B T \cdot \ln\left(\frac{n_V}{N_a - N_d}\right)$$

Dans chaque type de semi conducteur, le niveau de Fermi se rapproche d'autant plus de la bande de porteurs majoritaires que le dopage est important

La position du niveau de Fermi dans le gap se détermine à partir de la condition de neutralité du matériau

$$n_d = n = n_c e^{\frac{E_F - E_C}{k_B T}}$$

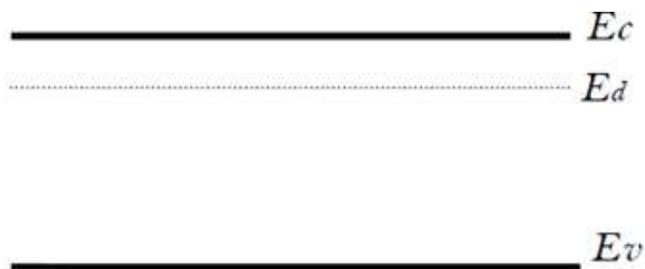
$$n_a = p = n_v e^{\frac{E_V - E_F}{k_B T}}$$

$$E_{F_n} = E_C - k_B T \ln\left(\frac{n_c}{n_d}\right)$$

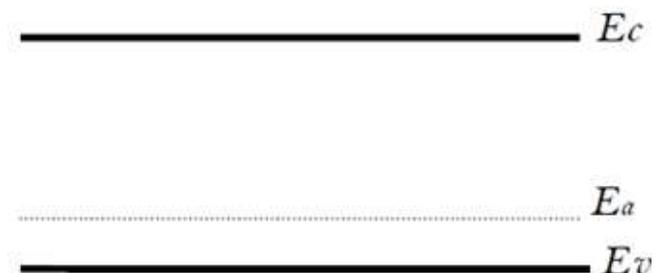
$$E_{F_p} = E_V + k_B T \ln\left(\frac{n_v}{n_a}\right)$$

Le niveau de Fermi est d'autant plus proche du niveau E_C que le dopage est important

Le niveau de Fermi est d'autant plus proche du niveau E_V que le dopage est important



$$\frac{n_c}{n_d} \ll 1$$



$$\frac{n_v}{n_a} \ll 1$$

Dans les deux cas, il est nécessaire de définir la position du niveau de Fermi (E_{Fn} ou E_{Fp}) par rapport au niveau de Fermi intrinsèque : E_{Fi}

Dans un semi conducteur intrinsèque

$$n = p = n_i = n_C \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}\right)} = n_V \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$

$$n_C = n_i e^{\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}}$$

$$n_V = n_i e^{-\frac{E_V - E_{Fi}}{k_B T}}$$

Dans un semi conducteur extrinsèque

$$n = n_C \cdot e^{-\left(\frac{E_C - E_{Fn}}{k_B T}\right)}$$

$$p = n_V \cdot e^{\left(\frac{E_V - E_{Fp}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{n}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{p}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{k_B T}\right)}$$

On définit le paramètre : Φ_{F_i} tel que

$$e \cdot \Phi_{F_i} = E_F - E_{F_i}$$

$$\frac{n}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_i}}{k_B T}\right)}$$

$$\frac{p}{n_i} = e^{\left(\frac{E_{F_i} - E_{F_p}}{k_B T}\right)}$$

Différence entre les niveaux de Fermi des Semi conducteurs dopés et intrinsèque

$$n = n_i \cdot e^{\frac{e\Phi_{F_i}}{k_B T}}$$

$$p = n_i \cdot e^{-\frac{e\Phi_{F_i}}{k_B T}}$$

$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln\left(\frac{n}{n_i}\right)$$

$$e\Phi_{F_i} = -k_B T \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$$


$$e\Phi_{F_i} > 0 \quad \longrightarrow \quad n > n_i \quad \& \quad p < n_i$$

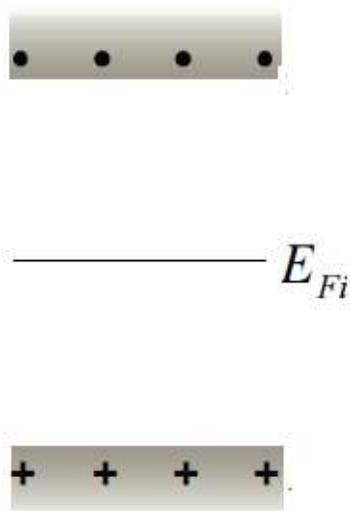
SC de type **N**

$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln \left(\frac{N_d - N_a}{n_i} \right)$$

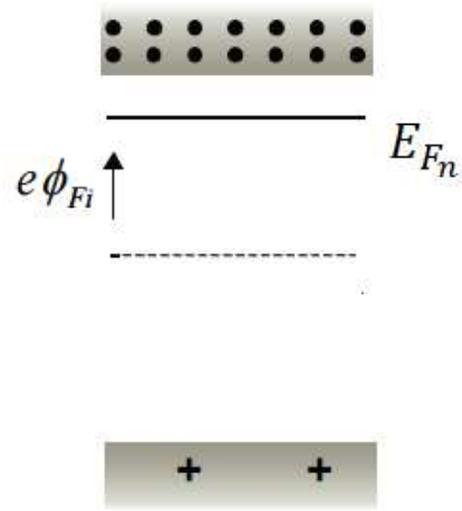
$$e\Phi_{F_i} < 0 \quad \longrightarrow \quad p > n_i \quad \& \quad n < n_i$$

SC de type **P**

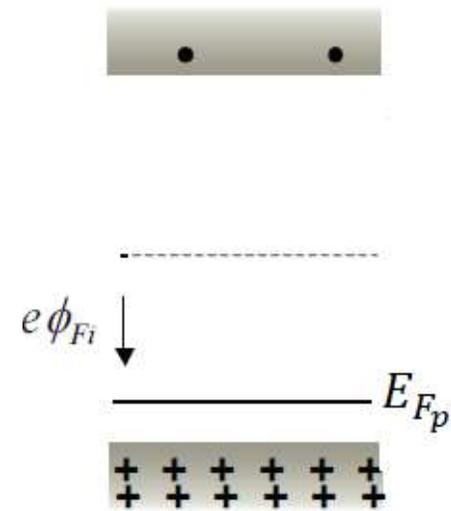
$$e\Phi_{F_i} = k_B T \ln \left(\frac{N_a - N_d}{n_i} \right)$$



Intrinsèque



Type N



Type P

Position du niveau de Fermi dans les différents types de Semi conducteur