



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Pr Khechoubi El Mostafa

Année universitaire 2023/2024



INTRODUCTION

Chapitre1 : Rappel Théorie des bandes – Propriétés des Semi-conducteur

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Chapitre3 : Vibration des Phonons

Chapitre4 : Défauts dans les cristaux

Chapitre5 : Propriétés optiques des matériaux

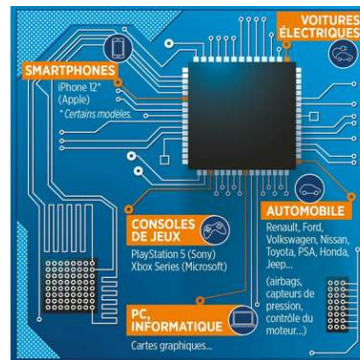
Chapitre6 : Propriétés électriques, magnétiques, supraconductivité

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

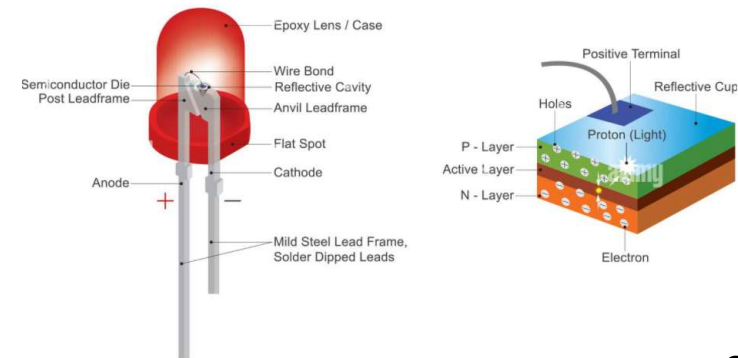
De nombreux dispositifs sont aujourd'hui basés sur les propriétés de ces matériaux.

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

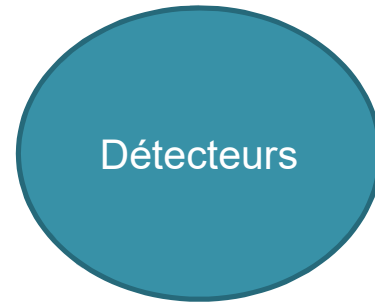




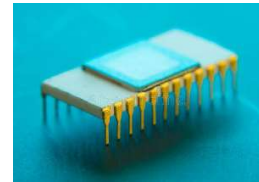
Gaz



Particules



Détecteurs



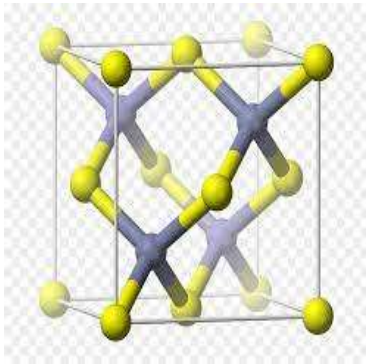
Rayonnement



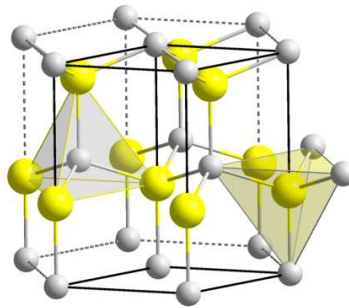
Le silicium, Si, est le plus répandu, mais il existe d'autres matériaux comme le germanium, Ge

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

Matériaux luminescents



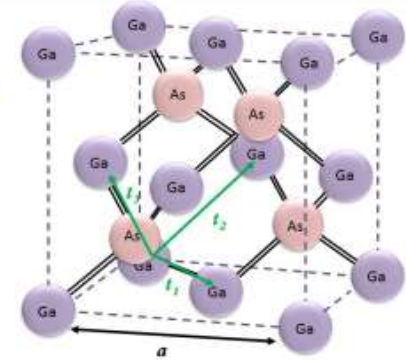
Sphalérite



Wurtzite

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

Applications optoélectroniques



Structure Zinc Blende

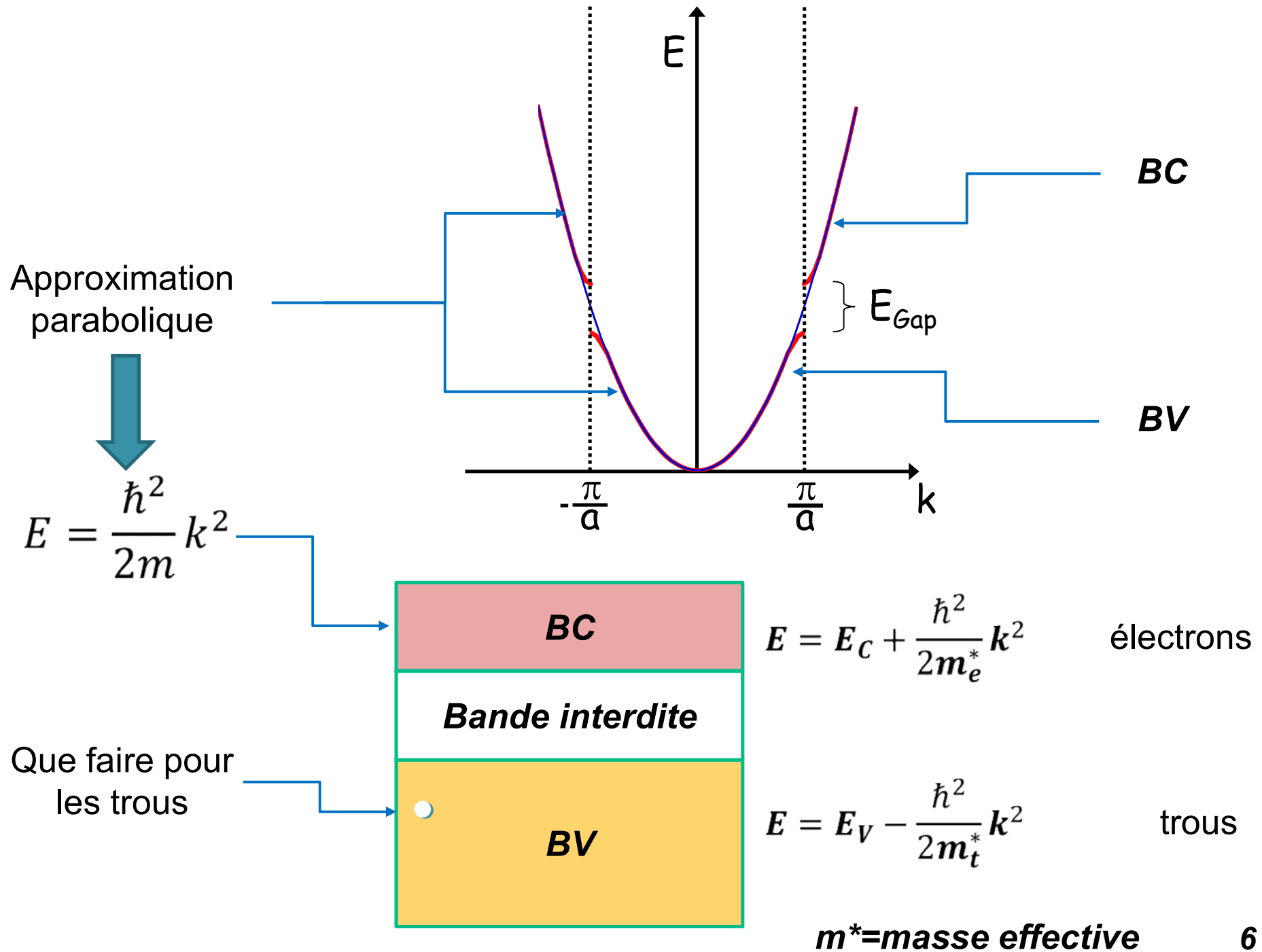
Développement de nouveaux matériaux et dispositifs optoélectroniques

Application Photovoltaïque



Les cellules au CdTe : minces, rentables
Mais toxiques ?

Notion de masse effective



Soumis à un champs extérieur, les électrons et les trous sont accélérés.

Sous l'effet du potentiel périodique dans lequel ils baignent, ils auront une accélération différente de celle obtenue dans le vide.

L'électron est décrit par un paquet d'ondes

Sa vitesse correspond à la vitesse de groupe du paquet d'ondes

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

Son énergie $E = \hbar\omega$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}$$



Son accélération :

$$\gamma = \frac{dv_g}{dt}$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}$$

$$\gamma = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2E}{dk dt}$$

$$\gamma = \frac{1}{\hbar} \frac{d^2E}{dk^2} \frac{dk}{dt}$$

La quantité de mouvement d'un électron étant donnée sous la forme

$$p = \hbar k$$

$$\frac{dp}{dt} = \hbar \frac{dk}{dt} = F$$

$$\gamma = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2E}{dk^2} F$$

$$\gamma = \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2}$$

$$F = m \cdot \gamma \qquad \frac{F}{\gamma} = m = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}}$$

On ne peut plus parler de masse tout court mais plutôt de « masse effective »

En généralisant à **3d**

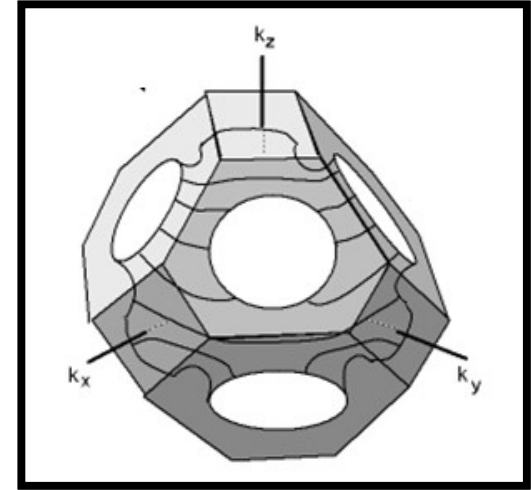
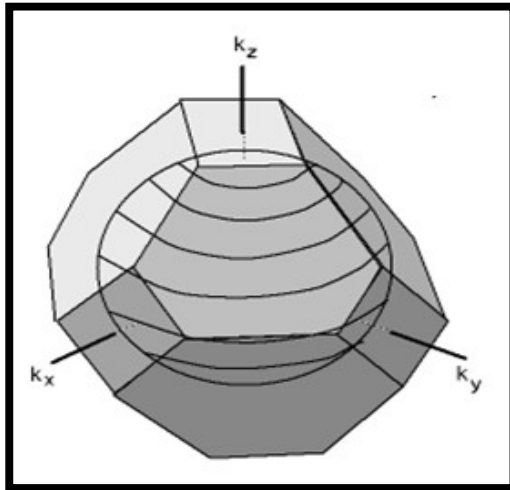
Le résultat précédent peut être décrit dans le cas d'une surface d'égale énergie anisotrope dans l'espace réciproque des vecteurs d'onde

La masse effective devient un tenseur d'éléments

$$m_{ij} = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2 E}{dk_i dk_j}}$$

En pratique on adopte une valeur moyenne de la masse effective qui tient compte

de l'anisotropie des surfaces d'égale énergie



Des bandes auxquelles appartiennent les porteurs de charges

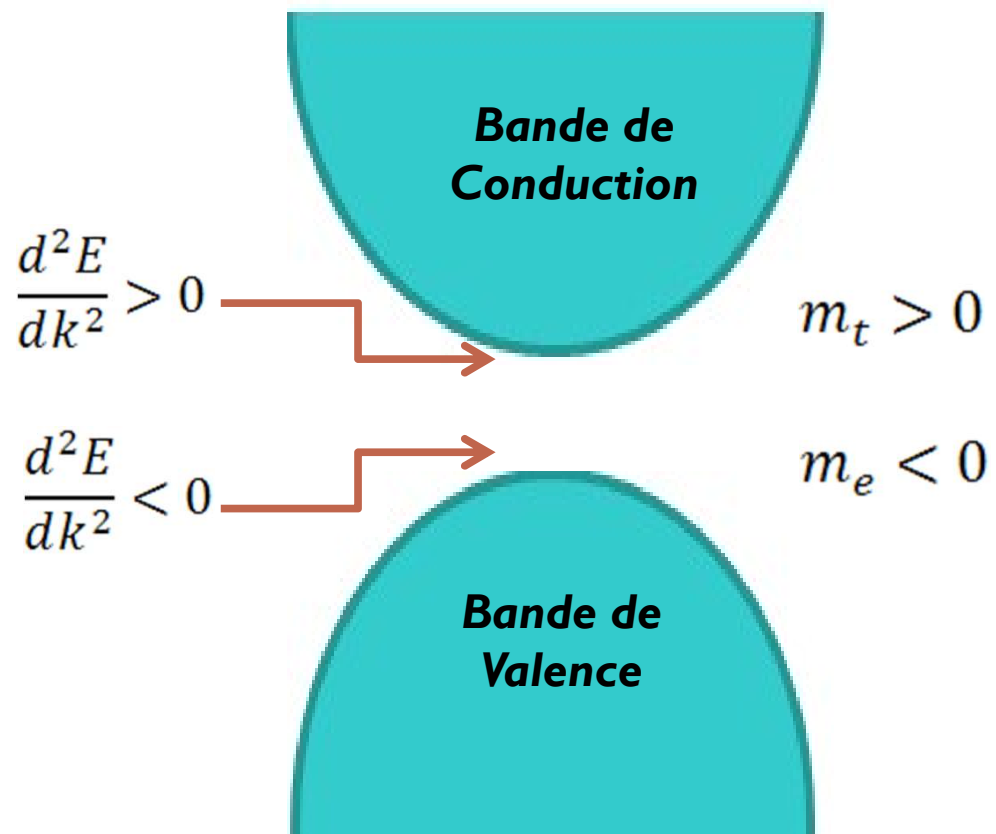
En présence d'un champ électrique

Les électrons du sommet de la BV se déplacent contre la force électrique due à ce champ, de masse effective : m_e

Les trous qui en résultent se déplacent dans le même sens que celui du champ

On associe à ses trous une masse effective notée : m_t

$$m_{ij} = \frac{\hbar^2}{\frac{d^2E}{dk_i dk_j}}$$



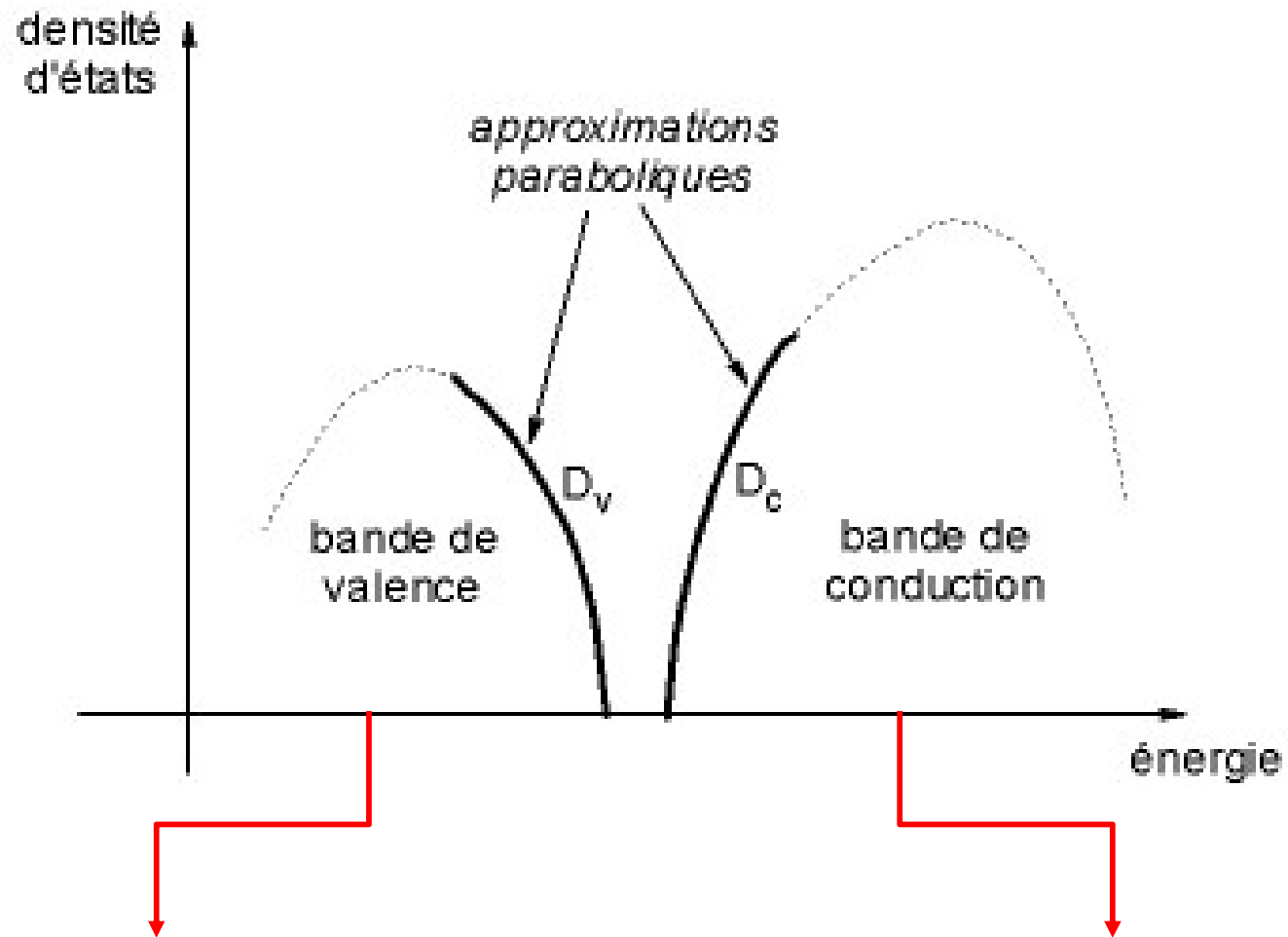
Concentration des porteurs de charge : électrons et trous

Nous pouvons toujours retenir le modèle des électrons « *presque libres* » 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



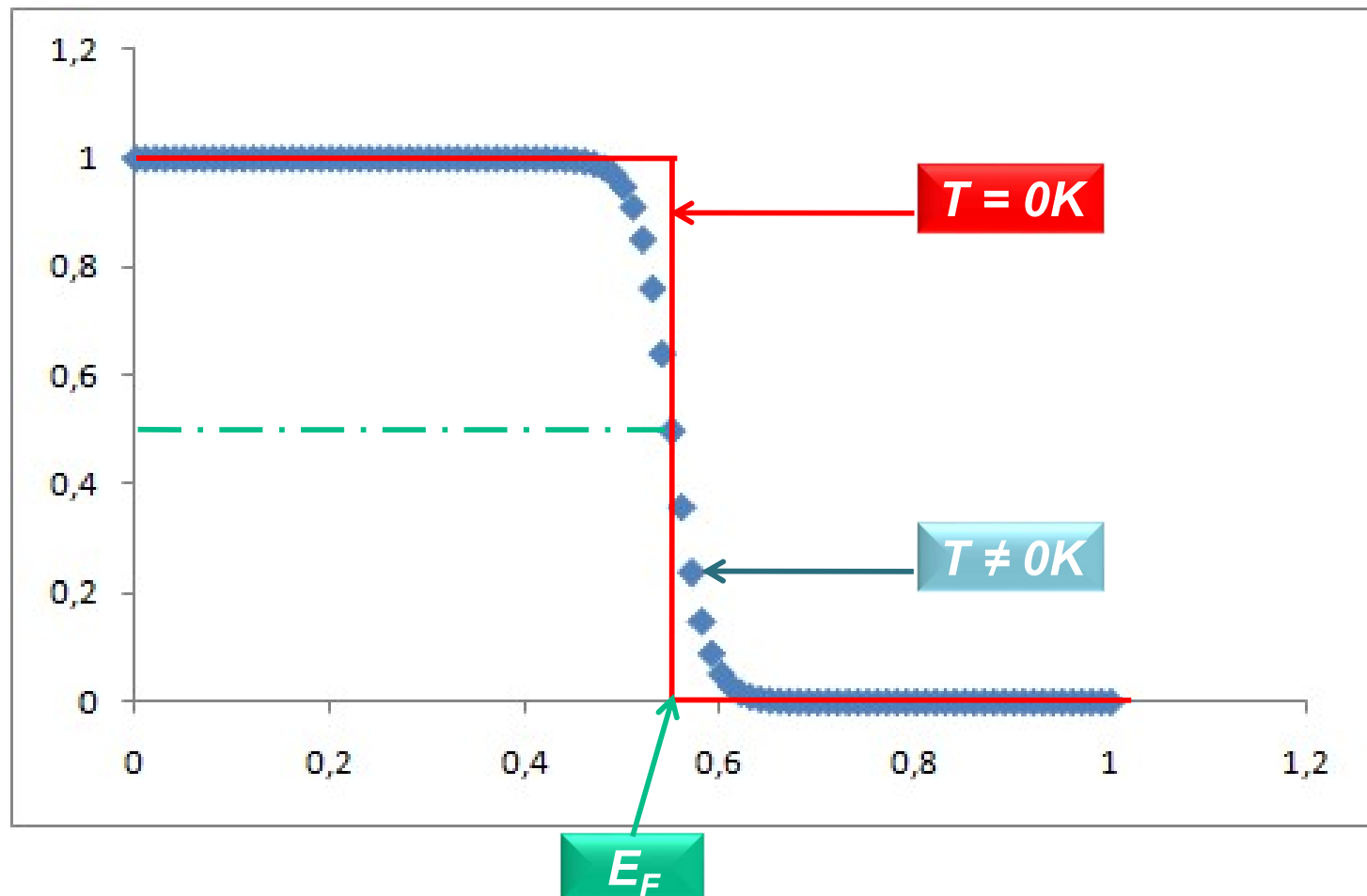
$$D_v(E) = \frac{V}{4\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$$

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

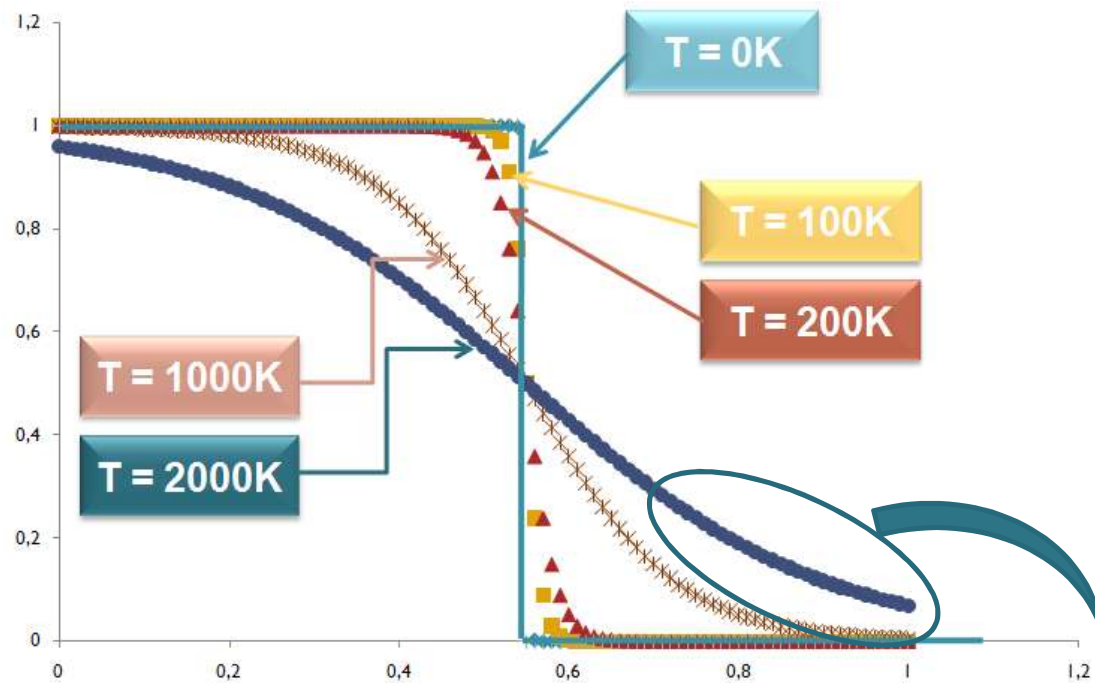
Comportement en fonction de T

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

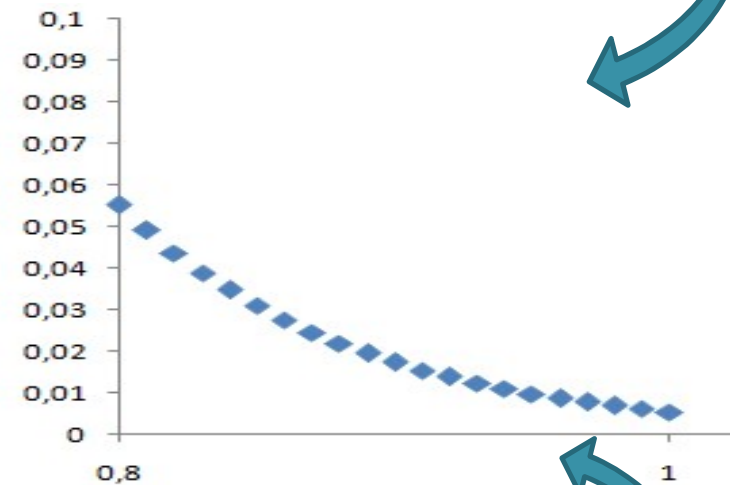
$$f_D(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$



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



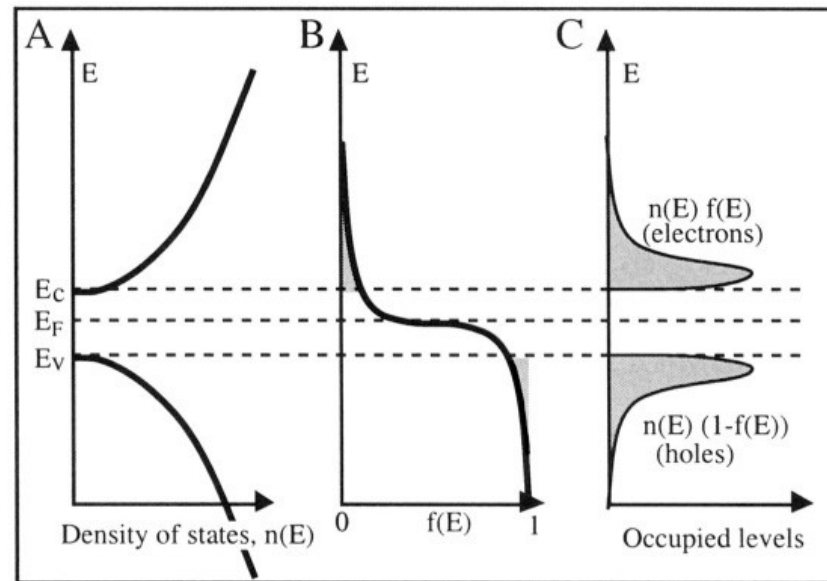
La distribution statistique de Fermi-Dirac peut être simplifiée de la façon suivante

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

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

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

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



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

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

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

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

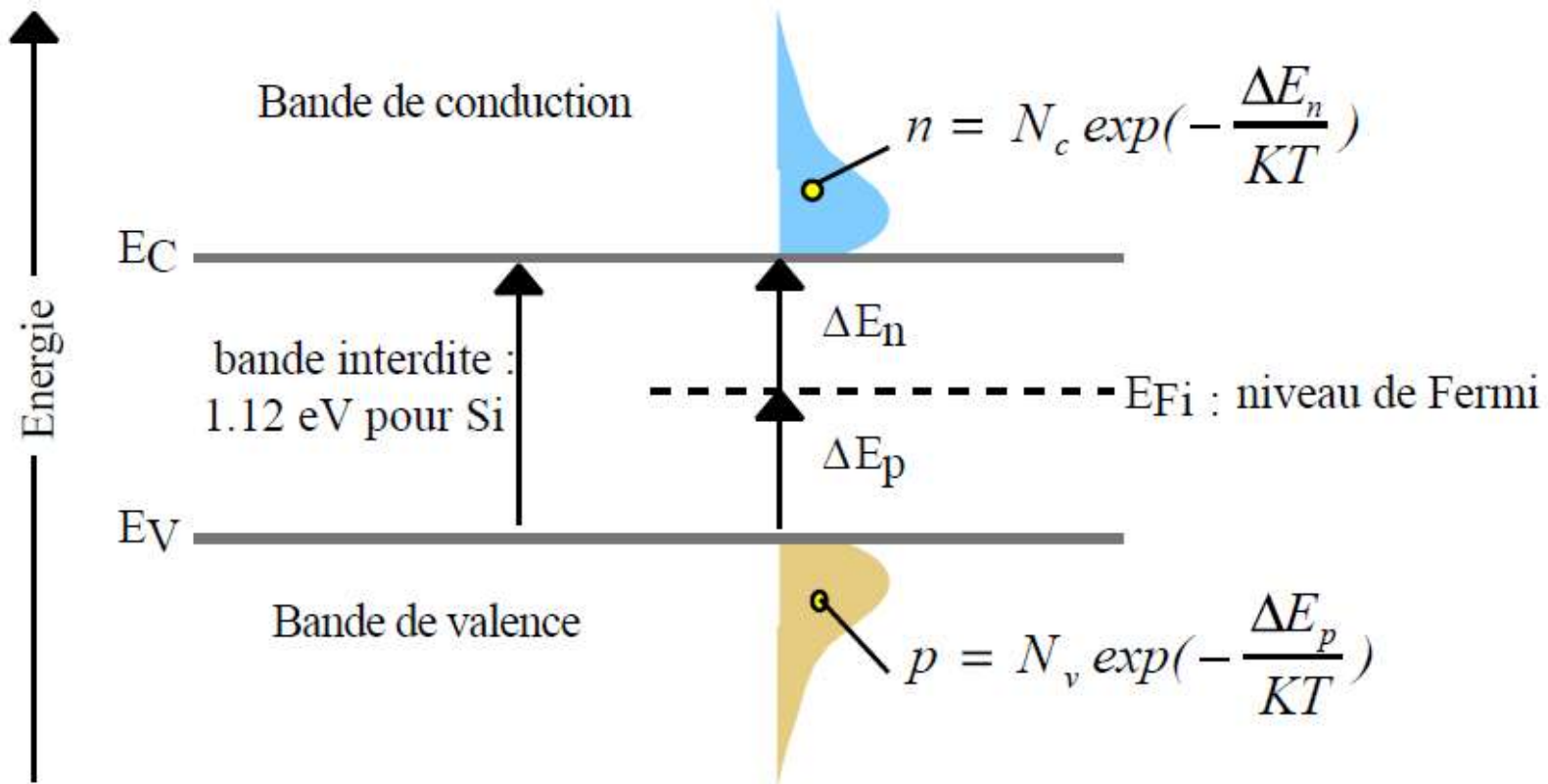
$$n_C = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

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

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

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

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