

**Master : Microélectronique**

**Corrigé Type de l'examen de la matière Physique des Composants semiconducteurs 1**

**Question de Cours (15 points)**

3 points

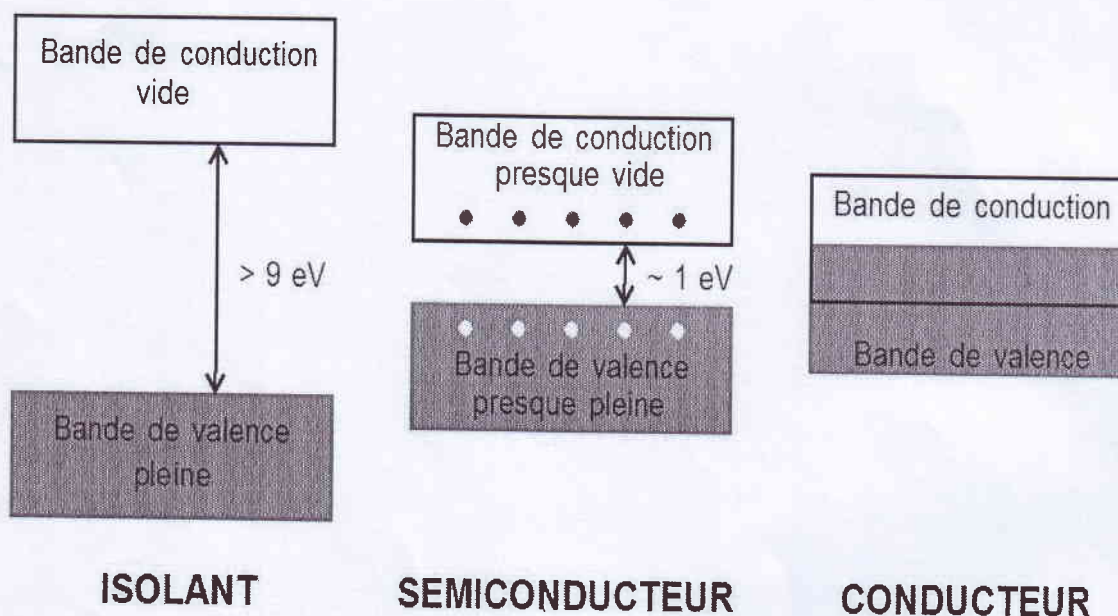
- 1) Classer les matériaux conducteurs, semiconducteurs et isolants selon le paramètre conductivité électrique et donner le diagramme de bandes d'énergie pour chaque cas.

Matériau	Nombre d'électrons libres	conductivité
Conducteur	Très grand	$\sigma > 10^3 \text{ S/cm}$
Semiconducteur	Très petit	$10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$
Isolant	Presque nul	$\sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$

Exemple : Argent ( $\sigma = 10^6 \text{ S/cm}$ )

Silicium ( $\sigma = \text{de } 10^{-5} \text{ S/cm à } 10^3 \text{ S/cm}$ )

Diamant ( $\sigma = 10^{-14} \text{ S/cm}$ )



L'écart (gap) entre la bande de valence et la bande de conduction détermine la conductivité du matériau

1 points

2) Quelle est la différence entre un état cristallin et un état amorphe.

**Etat cristallin :**

Cristal idéal : L'arrangement régulier s'étend à l'infini.

Cristal réel : arrangement régulier et périodique + défauts

Réseaux cristallins :

Les quatorze réseaux spatiaux de Bravais : quatorze façons de distribuer périodiquement des points dans l'espace. Ces réseaux sont répartis en sept systèmes cristallins qui diffèrent entre eux par leurs éléments de symétrie.

**Etat amorphe :**

- dense et peu structurée
- Similaire à celle des liquides
- Certaine périodicité à petite distance

2 points

3) Donner la définition d'un motif, réseau, maille et systèmes cristallin :

**Motif :** Entité volumique discernable qui se répète périodiquement, Pour un cristal, à l'échelle microscopique, le motif est une particule (atome, ion ou molécule).

**Réseaux cristallins :**

Les quatorze réseaux spatiaux de Bravais : quatorze façons de distribuer périodiquement des points dans l'espace. Ces réseaux sont répartis en sept systèmes cristallins qui diffèrent entre eux par leurs éléments de symétrie.

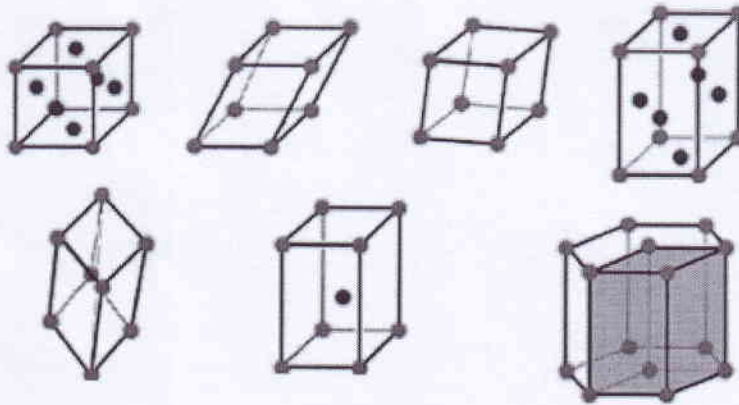
**Structure cristalline = Réseau + Motif**

**Définition de la maille :** Du point de vue géométrique, à deux dimension, la maille est le plus petit parallélogramme qui suffit à décrire le plan (remplir tout le plan sans laisser de lacunes), cette maille est définie par les vecteurs  $a$  et  $b$  et l'angle compris entre ces deux vecteurs. A trois dimensions, la maille est la plus petite entité (le plus petit volume) correspondant à un parallélépipède, elle est définie par trois vecteurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  (les périodes suivants les axes  $ox$ ,  $oy$  et  $oz$ , respectivement) non coplanaires et trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  (voir Figure). Avec cette maille on peut remplir tout l'espace du cristal sans laisser des lacunes.

On distingue deux types de mailles, simple et multiple

- a- Une maille simple contient seulement des nœuds aux sommets de la maille.
- b- b- Une maille multiple en contient plus des nœuds aux sommets soit au centre du volume, soit aux centres de toutes les faces soit aux centres de deux faces opposées.

**Systèmes cristallins : (7 systèmes cristallins)**



- **Systèmes cristallins :**

Système cubique

Système tétragonal (Quadratique)

Système orthorombique

Système trigonal (Rhomboédrique)

Système hexagonal

Système monoclinique

Système triclinique

2. 75pts 4) Classer les matériaux semiconducteurs selon la nature du paramètre gap d'énergie et quels sont les valeurs approximatives des gaps d'énergies des semiconducteurs Si, Ge et GaAs à la température ambiante et le quel est à gap direct ou indirect. Quelle est leur structure cristalline ?

- Les matériaux semiconducteurs peuvent être classer en deux types : semiconducteur à gap direct et indirect.

Semiconducteur	Valeur du gap (eV)	Nature du gap	Structure cristalline
Si	1.12	Indirect	Diamant
Ge	0.66	Indirect	Diamant
GaAs	1.42	Direct	Zincblende

4.75 pts

5) On considère un semi-conducteur intrinsèque dont les densités équivalentes d'états énergétiques dans la bande de conduction et dans la bande de valence sont notées respectivement  $N_c$  et  $N_v$ .

a) Donner les expressions de la densité d'électron  $n$  dans la bande de conduction et la densité de trous  $p$  dans la bande de valence.

b) En déduire l'expression de la densité intrinsèque  $n_i$  et la position du niveau de Fermi intrinsèque  $E_{Fi}$ .

c) Expliquer les façons d'amener un électron de la bande valence à la bande de conduction. Considérons un semiconducteur intrinsèque dont la bande de valence est à 6 eV et la bande de conduction est à 8 eV.

d) Quel est la valeur de sa bande interdite.

e) Quel est son  $E_F$ .

a) Les expressions de  $n$  et  $p$  sont :

$$n = N_c e^{-(E_c - E_F)/kT}$$

$$p = N_v e^{(E_v - E_F)/kT}$$

b) Pour un semiconducteur intrinsèque :  $n=p=n_i$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} e^{-E_g/2kT}$$

Le niveau de Fermi s'obtient en écrivant :

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_v}{N_c} \quad \cdot \frac{n}{p} = 1$$

c) Les façons d'amener un é de la bande de valence à la bande de conduction :

- En augmentant la température
- Avec la lumière
- Avec un gros champ

e)  $E_g = 2\text{eV}$

f)  $E_F$  est à 7 eV

1.5 pts

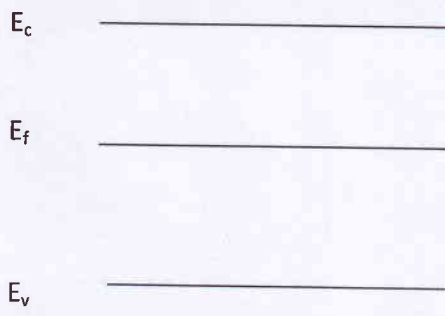
6) Donner le diagramme de bandes d'énergie pour les cas d'un semiconducteur intrinsèque et d'un semiconducteur extrinsèque

Semiconducteur intrinsèque ; semiconducteur pur

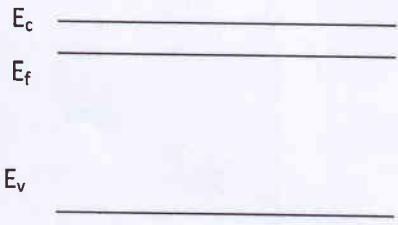
Semiconducteur dopé : Semiconducteur + impureté

Le dopage des semiconducteurs a pour but d'augmenter leur conductivité.

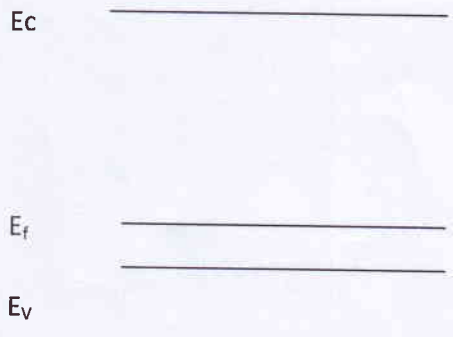
Type	Dopage
N	Semiconducteur+impureté pentavalente (Donneur)
P	Semiconducteur + impureté trivalente (Accepeteur)



Semiconducteur intrinsèque



Semiconducteur de type N



Semiconducteur de type P

**Jonction PN : (5 points)**

**Modèle de la jonction abrupte à l'équilibre :**

On suppose dans ce modèle que la concentration de dopage passe brutalement dans la plan  $x=0$  d'une valeur  $N_A$  à une valeur  $N_D$ .

**1) Formation de la jonction:**

- a) Expliquer la formation, au voisinage de la jonction, de la zone de charge d'espace.
- b) Justifier l'établissement d'un régime d'équilibre dynamique

**2) Jonction à l'équilibre thermodynamique:**

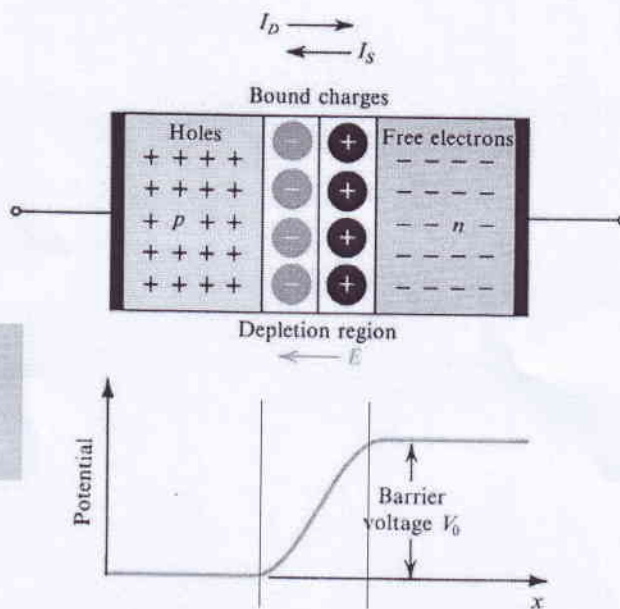
Donner l'expression du potentiel de diffusion  $V_d$ , en fonction de  $N_D$ ,  $N_A$  et  $n_i$ .

**3) Tracer les diagrammes de bandes d'énergie avant et après formation de la jonction.**

- Mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N

Diffusion : les électrons de la zone N viennent combler les trous dans la zone P

Création d'une zone dépourvue de porteur mobile (zone de déplétion ou zone de charge d'espace) – Il existe alors une différence de potentiel et donc un champ interne qui s'oppose à la diffusion des électrons de la zone N vers la zone P.



$I_D$  = courant de diffusion

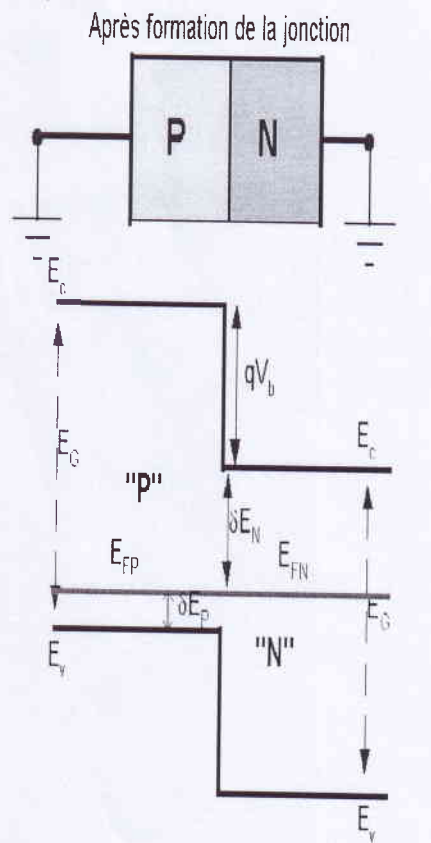
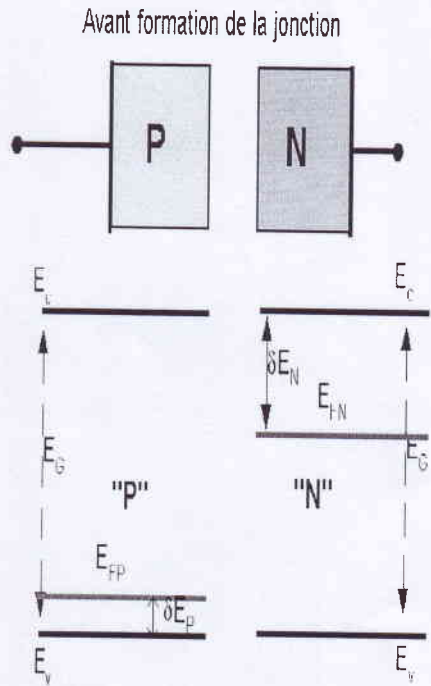
$I_S$  = courant de dérive

Equilibre :  $I_D = I_S$



• Envisageons une jonction PN abrupte (dopage P constant =  $N_A$ , dopage N constant =  $N_D$ ) à l'équilibre thermodynamique (jonction idéale).

**La barrière de potentiel.**



• Imaginons que le semiconducteur "P" soit séparé du semiconducteur "N"

• Dans le semiconducteur "P" le niveau de FERMI se situe à une distance au dessus du maximum de la BdV telle que :

$$\delta E_p = E_{FP} - E_V = k_B T \text{Log} \left( \frac{N_V}{N_A} \right)$$

• Dans le semiconducteur "N" le niveau de FERMI se situe en dessous du minimum de la Bdc à une distance telle que :

$$\delta E_n = E_C - E_{FN} = k_B T \text{Log} \left( \frac{N_C}{N_D} \right)$$

• Si les deux semiconducteurs font partie du même réseau cristallin et à l'équilibre thermodynamique les **niveaux de FERMI s'alignent**

$$E_G = qV_b + \delta E_n + \delta E_p$$

• Il apparaît une distorsion des bandes d'énergie. La différence entre le minimum de la Bdc du côté P et le minimum de la Bdc du côté N correspond à la variation de l'énergie potentielle de l'électron de conduction.

Cela se traduit par l'apparition d'une barrière de potentiel :

$$qV_b = E_G - k_B T \text{Log} \frac{N_C N_V}{N_A N_D} \text{ (eV)}$$

$V_b$  : **potentiel de barrière** ou **potentiel de diffusion** :

• En introduisant la définition du nombre intrinsèque, la relation précédente devient :

$$qV_b = k_B T \text{Log} \frac{N_A N_D}{n_i^2} \text{ (eV)}$$