



Filière : SMP -- Semestre : VI

Module : Physique des Matériaux II

Chapitre2 : Application – Physique des Semi-conducteurs

Pr Khechoubi El Mostafa

Année universitaire 2023/2024

Jonction & Hétérojonction

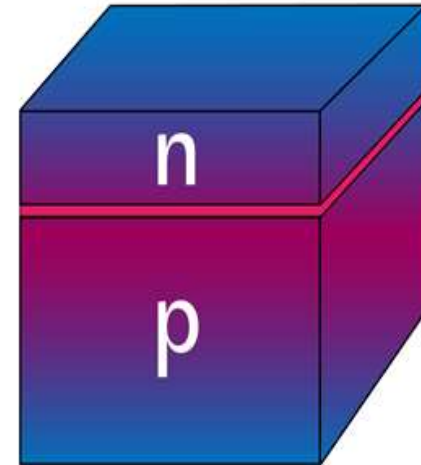
Jonction ou Homojonction

Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de type différent d'un même monocristal de semiconducteur

Hétérojonction

Quand deux semiconducteurs différents sont mis en contact, l'interface présente des propriétés particulières qui peuvent être mises en application pour certains dispositifs. On appelle alors ce dispositif hétérojonction.

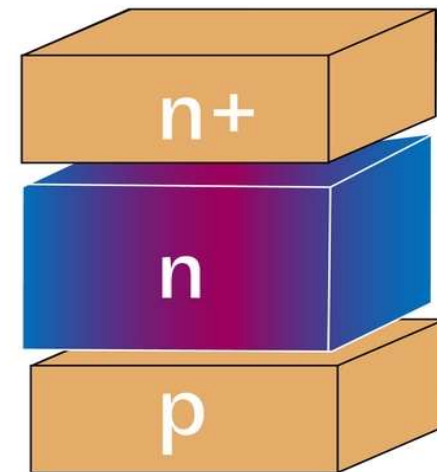
Silicium cristallin
jonction
Silicium cristallin



Silicium amorphe

Silicium cristallin

Silicium amorphe



Jonction ou Homojonction

La différence des densités de donneurs et d'accepteurs, « $N_d - N_a$ », passe d'une valeur négative dans la région de « **type P** » à une valeur positive dans la région de « **type N** ».

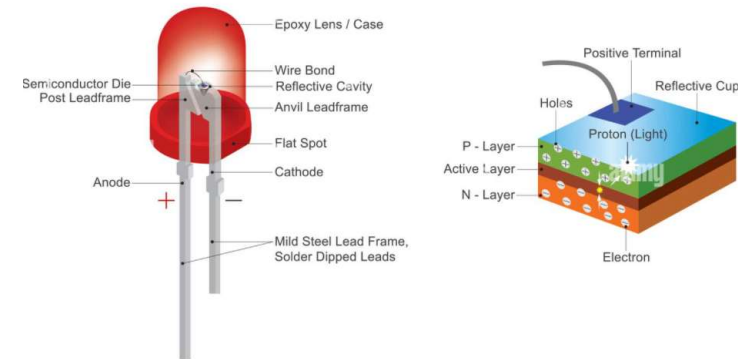
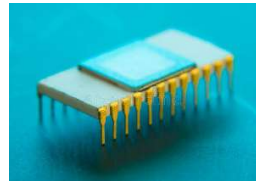
La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication.

Différents modèles peuvent être utilisés pour étudier théoriquement les propriétés de la jonction

Le modèle de la « **jonction abrupte** » donne des résultats en très bon accord avec le comportement de la jonction.

C'est le modèle que nous allons développer. Nous verrons ensuite comment généraliser les résultats à une jonction à profil de dopage quelconque.

La jonction **PN** est une structure de base dans les composants électroniques. Les composants étant formés de semiconducteurs dopés de manière différente, les jonctions **PN** ou **NP** sont présentes aux interfaces.

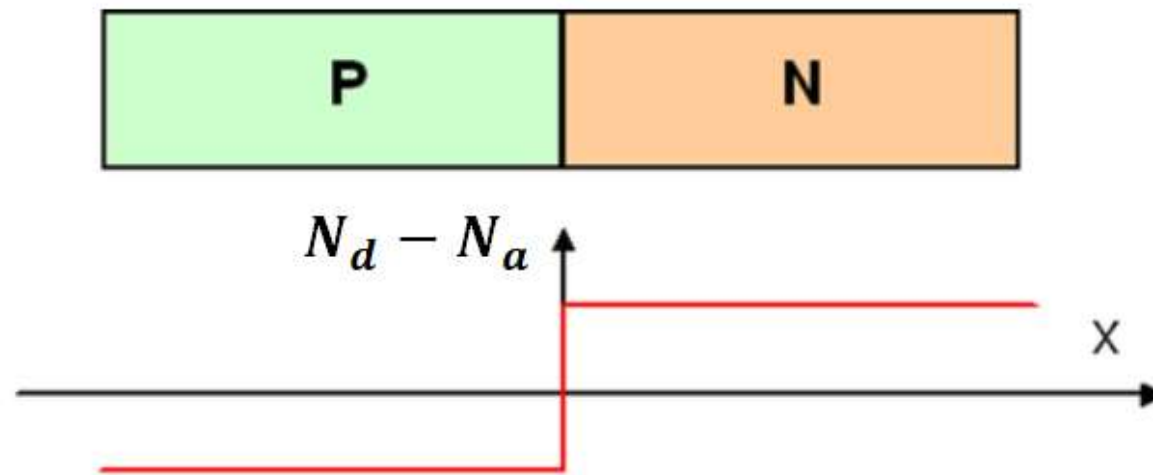


Il est donc indispensable de bien comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent.

La jonction **PN** est également un composant en soit. La fonction de ce composant est de laisser passer le courant dans un seul sens. Elle permet donc de transformer un signal alternatif en un signal unipolaire. Cette fonction est largement utilisée dans les systèmes électroniques d'alimentation ou de détection radiofréquence

Jonction abrupte à l'équilibre thermodynamique

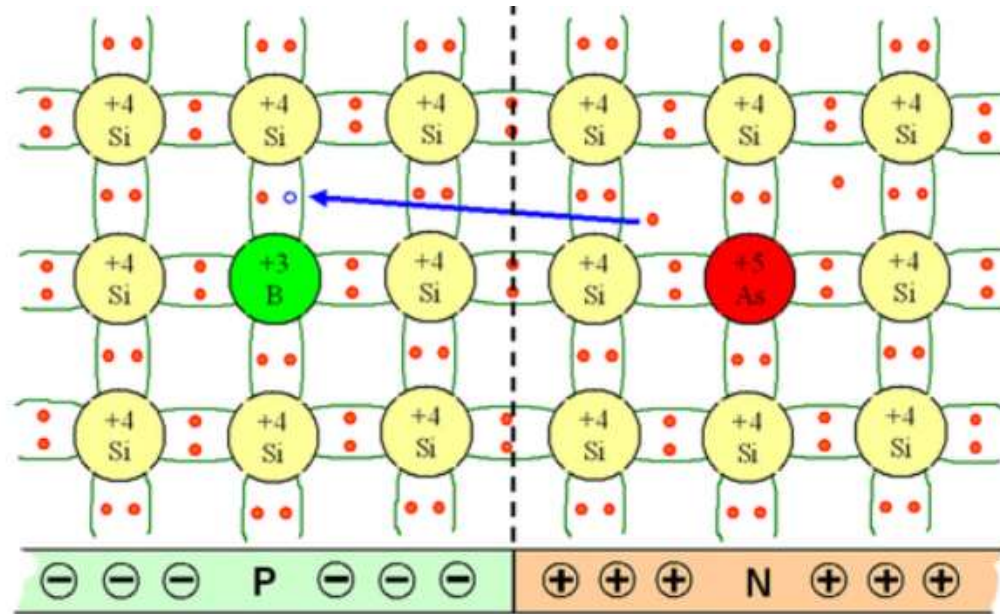
Dans le modèle de la jonction abrupte, la différence « $N_d - N_a$ » passe brutalement dans le plan $x = 0$, d'une valeur négative dans la région de type **P** à une valeur positive dans la région de type **N**



Il existe d'autres types de jonctions comme les jonctions exponentielles, linéaires, etc....

Cependant l'étude d'une jonction abrupte étant plus simple et plus aisément généralisable à une jonction quelconque

Pour mieux comprendre l'effet du rapprochement des deux semi-conducteurs sur le bilan électronique de la jonction, observons ainsi qu'à proximité de la jonction les électrons de conduction excédentaires coté **N** passent côté **P** pour se recombinaison avec des trous.



Une charge d'espace statique négative se crée coté **P** et une charge d'espace statique positive se crée coté **N**

Le lieu où réside cette charge d'espace est appelée **zone de charge d'espace** ou **zone de déplétion**

En raison de la présence, dans cette zone, d'un champ électrique intense, la densité de porteurs libres dans cette région est négligeable à l'équilibre thermodynamique

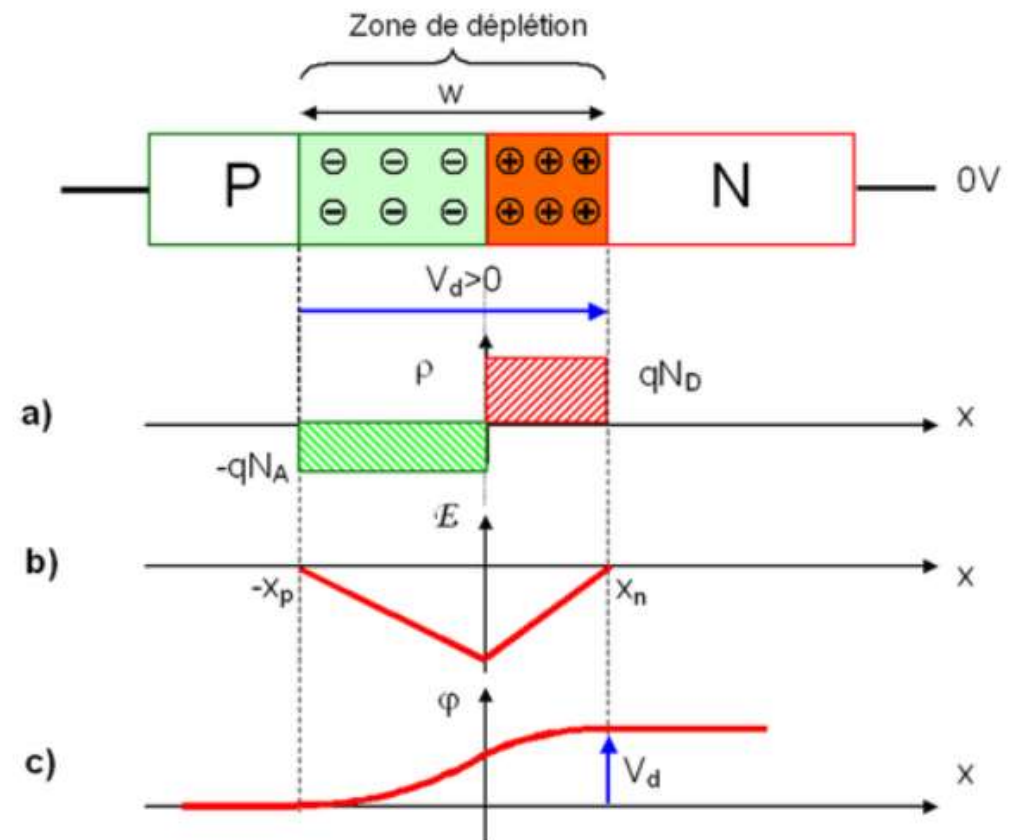
En outre les frontières entre la zone dépeuplée et les zones neutres de la jonction sont très abruptes

Après la mise en contact des deux SC de dopage différent, une barrière de potentiel pour les trous et les électrons est constituée.

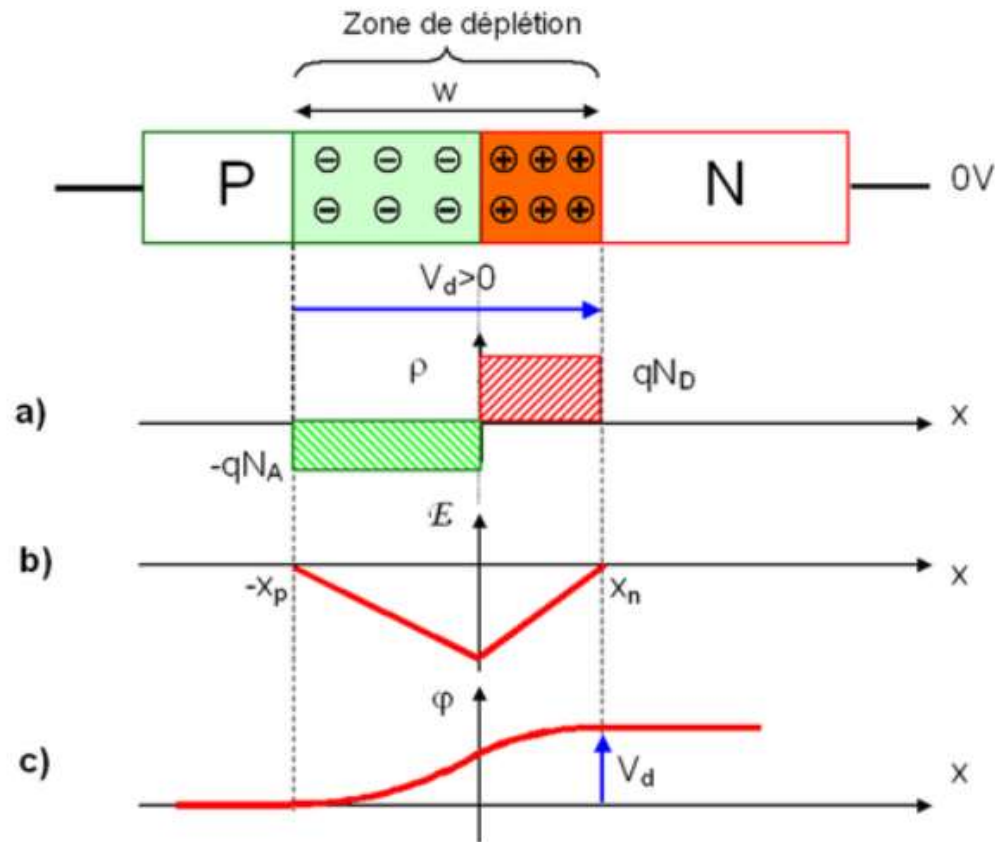
(a) Charge d'espace

(b) Champ électrique

(c) Potentiel électrostatique



En effet, la double couche de charges négatives côté **P** et positives coté **N**, crée un champ électrique dirigé de **N** vers **P** qui empêche la diffusion et maintient la séparation des trous côté **P** et des électrons côté **N**



Par ailleurs à cause de cette double couche, le potentiel électrostatique varie brusquement dans la zone de la jonction et la d.d.p. « V_d », appelée « **tension de diffusion** », atteint des valeurs non négligeables (ex : 0,8V pour le silicium)

Relation entre les différents paramètres

ρ : Charge d'espace

E : Champ électrique

ϕ : Potentiel électrostatique

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{dE}{dx} = -\frac{\rho}{\epsilon_s}$$

Le potentiel (chimique) d'un semi-conducteur étant donné par l'énergie de Fermi, la « **tension de diffusion** » est proportionnelle à la différence des niveaux de Fermi des semi-conducteurs non joints

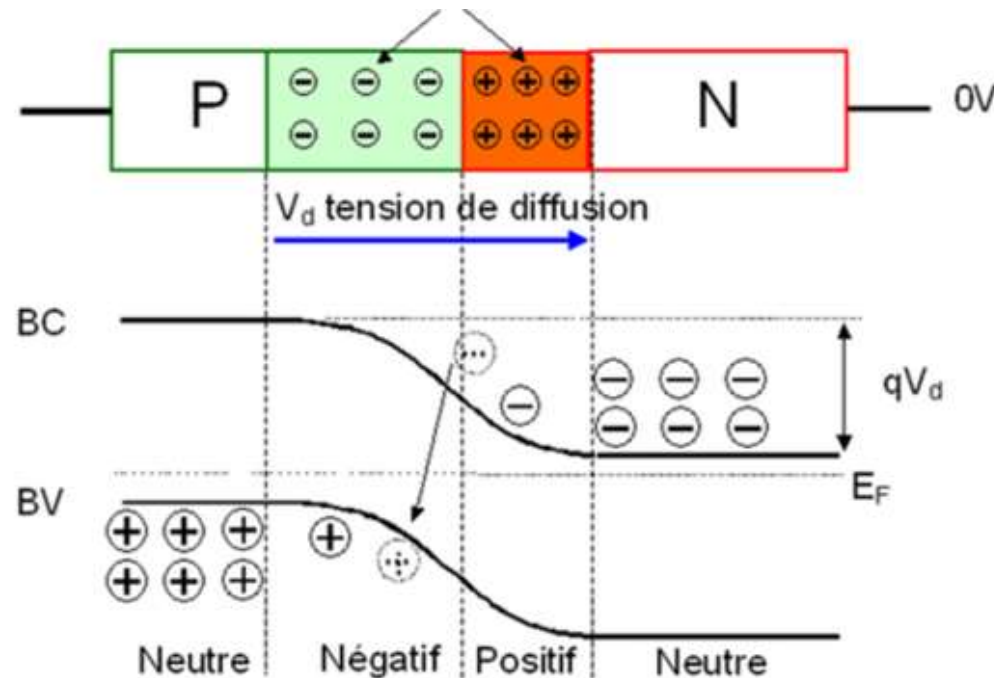
$$V_d = \frac{1}{q} (E_{F_p} - E_{F_n}) = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$



Pour la jonction et à l'équilibre thermodynamique, le « *niveau de Fermi* » côté dopé **P** et côté dopé **N** est identique

Le diagramme d'énergie de la jonction **PN** comporte donc une courbure des bandes de conduction et de valence.

Charges statiques ne pouvant générer de courant



Cette courbure fait apparaître une différence d'énergie potentiel électrostatique

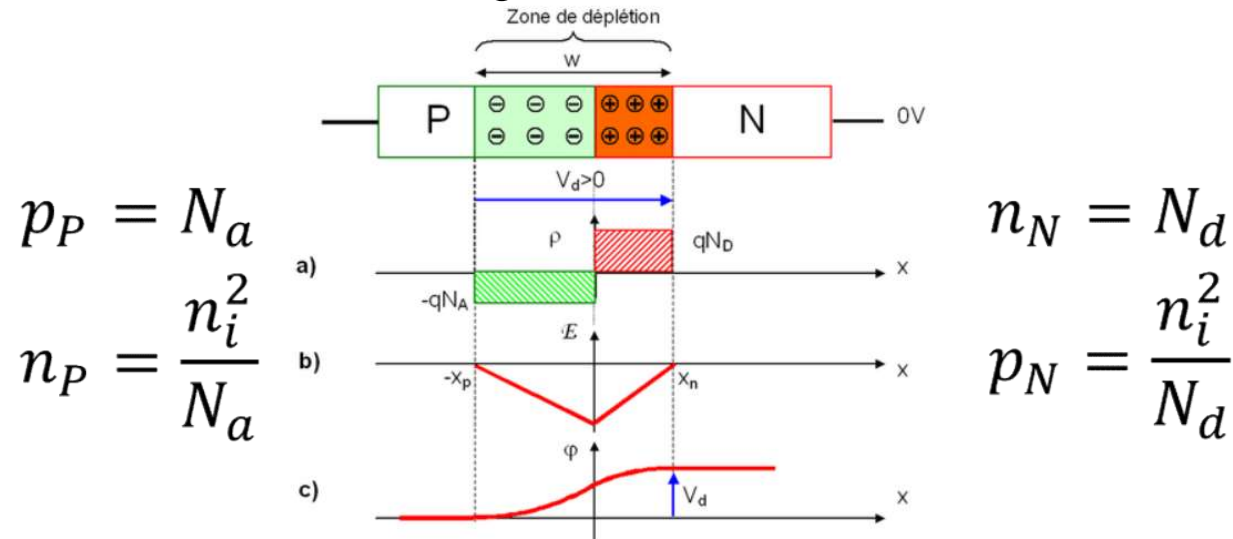
« qV_d »

Charge d'espace

Nous supposons que dans chacune des régions la conductivité est de nature extrinsèque, c'est-à-dire que les conditions :

$$(N_d - N_a)_N \gg n_i \qquad (N_a - N_d)_P \gg n_i$$

sont remplies dans chacune des régions. Tous les donneurs et accepteurs ionisés



Charge d'espace dans chacune des régions de la jonction

$$\rho(x) = e(N_d - N_a + p(x) - n(x))$$

En raison de la présence du champ électrique, la diffusion-recombinaison des porteurs est limitée au voisinage de la jonction métallurgique.

Loin de la jonction, les densités de porteurs libres sont données par les expressions

$$\rho(x) = 0 \quad x < x_p \quad \text{et} \quad x > x_n$$

$$\rho(x) = qN_a \quad x_p < x < 0$$

$$\rho(x) = eN_d \quad 0 < x < x_n$$

Potentiel et champ électriques dans la zone de charge d'espace

$$x_p < x < 0$$

$$0 < x < x_n$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = e \frac{N_a}{\varepsilon}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -e \frac{N_d}{\varepsilon}$$

Conditions aux limites

$$x = x_p \quad E = 0 \quad V = V_p$$

$$x = x_n \quad E = 0 \quad V = V_n$$

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\varepsilon} (x - x_p)^2 + V_p$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} (x - x_n)^2 + V_n$$

Champ électrique

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V$$

Il est dirigé suivant l'axe des x

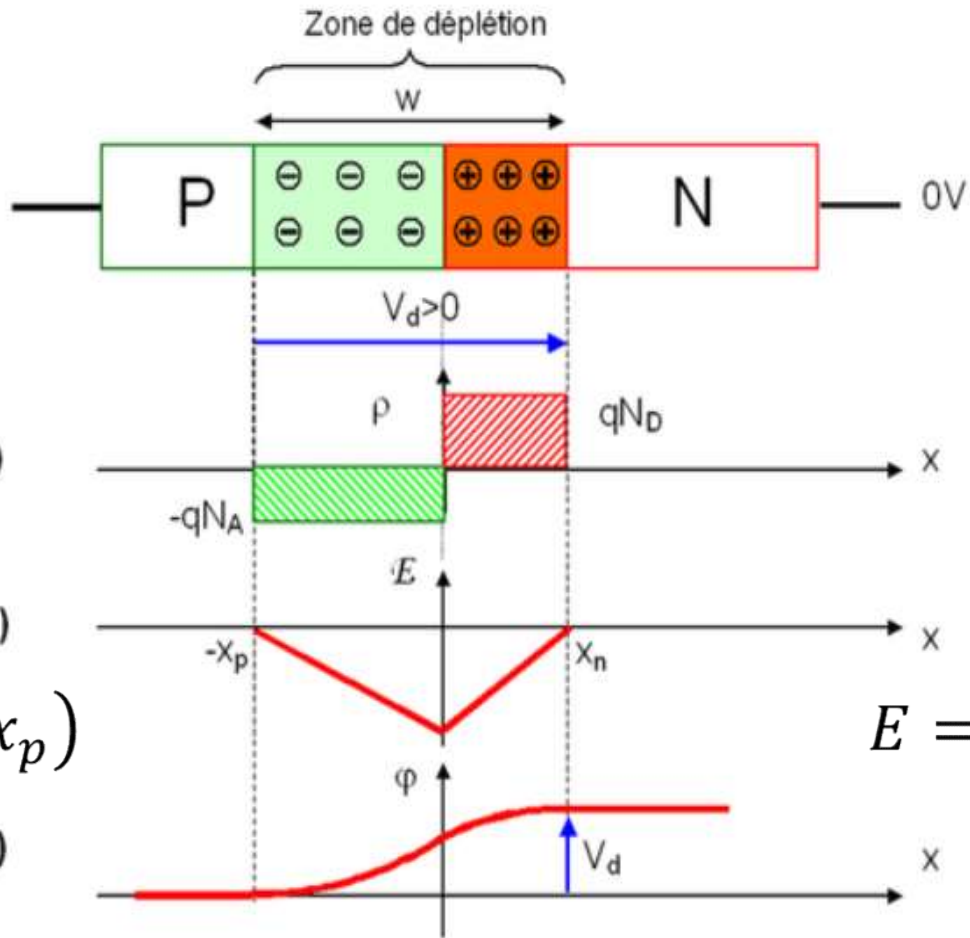
$$E = -\frac{dV}{dx}$$

$$x_p < x < 0$$

$$0 < x < x_n$$

$$E = -\frac{eN_a}{\varepsilon} (x - x_p)$$

$$E = \frac{eN_d}{\varepsilon} (x - x_n)$$



$$\rho(x) = qN_a$$

a)

$$\rho(x) = eN_d$$

$$E = -\frac{eN_a}{\epsilon}(x - x_p)$$

b)

$$E = \frac{eN_d}{\epsilon}(x - x_n)$$

c)

$$V(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon}(x - x_p)^2 + V_p$$

$$V(x) = -\frac{eN_d}{2\epsilon}(x - x_n)^2 + V_n$$

Largeur de la zone de charge d'espace

La continuité au point $x = 0$, de la composante normale du vecteur déplacement

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$$

permet d'établir une relation entre x_n et x_p

$$\varepsilon \cdot E_{0-} = \varepsilon \cdot E_{0+}$$

$$eN_a x_p = -eN_d x_n$$

On pose :

$$W_p = |x_p| = -x_p$$

$$W_n = |x_n| = x_n$$

$$N_a \cdot W_p = N_d \cdot W_n$$

Continuité du potentiel

$$V(0) = \frac{eN_a}{2\varepsilon} x_p^2 + V_p = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} x_n^2 + V_n$$

$$\frac{eN_a}{2\varepsilon} W_p^2 + V_p = -\frac{eN_d}{2\varepsilon} W_n^2 + V_n$$

$$V_d = V_n - V_p$$

$$V_d = \frac{e}{2\varepsilon} (N_a W_p^2 + N_d W_n^2)$$

$$V_d = \frac{e}{2\varepsilon} (N_a W_p^2 + N_d W_n^2)$$

$$N_a \cdot W_p = N_d \cdot W_n$$

$$V_d = \frac{e N_d}{2\varepsilon} W_n^2 \left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right) = \frac{e N_a}{2\varepsilon} W_p^2 \left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right)$$

$$W_n^2 = \frac{2\varepsilon}{e N_d} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right)} \cdot V_d \quad W_p^2 = \frac{2\varepsilon}{e N_a} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right)} \cdot V_d$$

$$V_d = \frac{k_B T}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

$$W_n^2 = \frac{2\varepsilon k_B T}{e^2 N_d} \cdot \frac{\ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)}{\left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right)}$$

$$W_p^2 = \frac{2\varepsilon k_B T}{e^2 N_a} \cdot \frac{\ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)}{\left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right)}$$

$$W_n = 2L_{Dn} \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{N_d}{N_a}\right)} \cdot \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \right)^{1/2}$$

$$W_p = 2L_{Dp} \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{N_a}{N_d}\right)} \cdot \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \right)^{1/2}$$

$$L_{Dn} = \sqrt{\frac{\epsilon k_B T}{2e^2 N_d}}$$

$$L_{Dp} = \sqrt{\frac{\epsilon k_B T}{2e^2 N_a}}$$

L_{Dn} et L_{Dp} sont les longueurs de **Debye** dans les régions de type n et de type p

La largeur de la zone de charge d'espace est $W = W_n + W_p$

Cette longueur mesure la profondeur de pénétration des électrons dans la zone de charge d'espace, côté **N**

Cette longueur mesure la profondeur de pénétration des trous dans la zone de charge d'espace, côté **P**