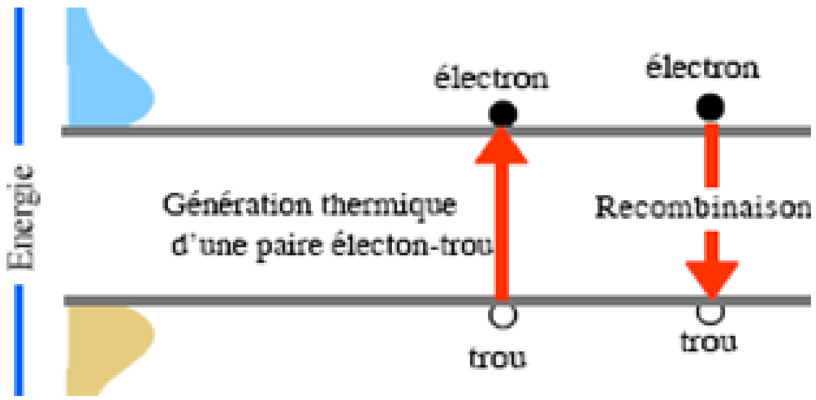
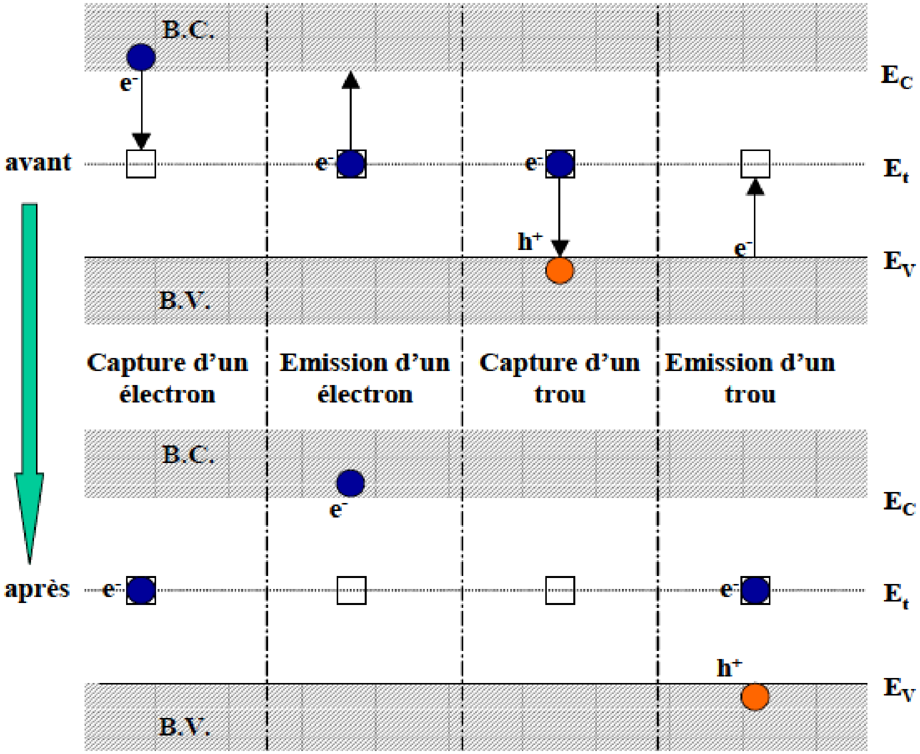
I. Comportement des semi-conducteurs

Génération - recombinaison

Le phénomène de génération et de recombinaison est largement exploité dans de nombreux capteurs (optiques, thermiques…), c'est le phénomène essentiel dans les cellules photovoltaïques

Génération d'une paire é-t se fait par apport énergétique à la structure cristalline. La disparition d'un trou (et donc d'un électron libre) s'appelle recombinaison d'une paire é-t. Elle se traduit par une restitution de l'énergie à l'environnement sous forme électromagnétique (photons) et de chaleur. Cette énergie n'est pas toujours égale à E_G car il y a toujours de « défauts » dans le matériau. On parle de centres recombinants.





I. Comportement des semi-conducteurs

Taux de génération – recombinaison

On s'intéresse au taux [$cm^{-3}s^{-1}$] de disparition (recombinaison) de paires e-t noté ici r'_n pour électrons r'_P pour les trous qui est évidemment le même que l'on note r'. Ce taux est bien sûr proportionnel à la population.

$$\boxed{r'_n = r'_p = r' = knp}$$

k: facteur de proportionnalité lié au matériau

On veut distinguer ce qui est dû à la température, puisque l'agitation thermique génère sans cesse des paires e-t. On définit alors le taux net de recombinaison r:

$$\boxed{r_n = r_p = r = r' - g_{th} = knp - g_{th}}$$

g_{th} est le taux de génération thermique

A l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire à température constante et uniforme, rien ne vient perturber le SC (pas d'éclairement, pas d'injection de courant…), l'agitation thermique existe toujours (tant que l'on est pas à 0 K), mais le phénomène de recombinaison aussi de sorte que les deux s'équilibrent

$$\boxed{r = 0 \quad \text{et} \quad g_{th} = kn_i^2}$$

Car $np=n_i^2$ à l'équilibre TD quelque soit le dopage

Ce qui nous permet d'écrire, pour distinguer ce qui est dû uniquement à la température à un certain équilibre, du taux de recombinaison dû à une perturbation qui engendre des porteurs excédentaires $np>n_i^2$. On dit que l'on est hors équilibre TD.

$$\boxed{r = k(np - n_i^2)}$$

I. Comportement des semi-conducteurs

Durée de vie des porteurs excédentaires

Une paire e-t générée par apport d'énergie « survit » statistiquement pendant un certain temps, on ramène ce temps « statistiquement » à une toute une population de porteurs que l'on nomme durée de vie. Au bout de ce temps moyen, tous les excédenatires auront disparu et l'on retrouve les concentration de l'équi TD (voir figure)

Optons pour ce type de notation:

Concentration d'excédentaires

$$n = n_0 + \Delta n \qquad p = p_0 + \Delta p$$

À l'équilibre TD

On génère autant d'e que de t excédentaires, donc:

$$\Delta n = \Delta p$$

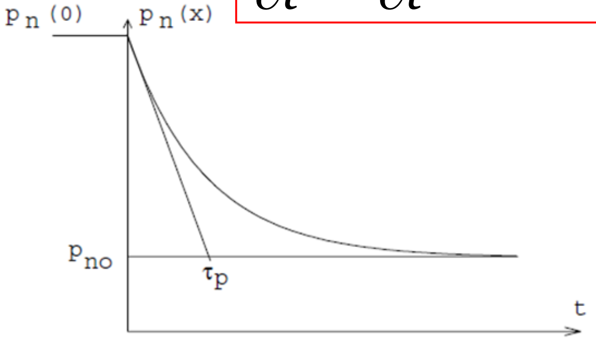
On définit les durées de vie τ_p et τ_n simplement:

$$\boxed{r = \frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{\Delta p}{\tau_p}}$$

De manière générale, en considérant les taux nets de génération et de recombinaison

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = g - r}$$

Recombinaison des trous (minoritaires) dans un SC de type N. La décroissance est exponentielle avec une constante de temps = durée de vie.

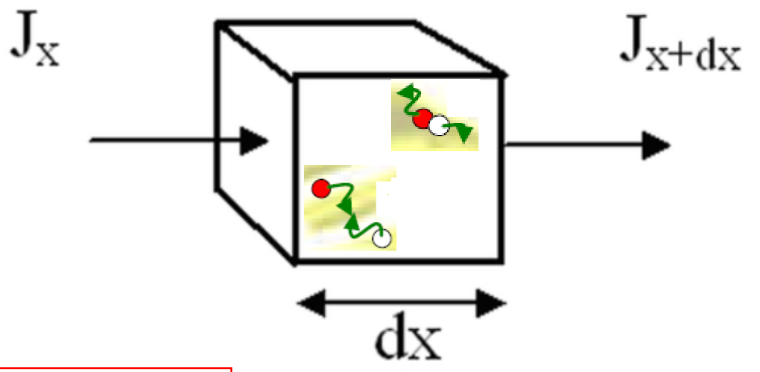


I. Comportement des semi-conducteurs

Equation de continuité: un simple bilan !!!

Remarque: Pour simplifier on écrit les équation en 1D

On prend en compte tous les phénomènes: génération, recombinaison, injection de courant et l'on fait simplement le bilan des charges en transit dans un volume élémentaire, ce qui donne:



Pour les électrons

$$\boxed{\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_{nx}}{\partial x} + (g_n - r_n) = \frac{1}{q}\frac{\partial J_{nx}}{\partial x} + (g_n - \frac{\Delta n}{\tau_n})}$$

Pour les trous

$$\boxed{\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_{px}}{\partial x} + (g_p - r_p) = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_{px}}{\partial x} + (g_p - \frac{\Delta p}{\tau_p})}$$

Vérifier l'équation aux dimensions. Que deviennent ces équations en régime permanent avec un éclairement constant par exemple ?
D'ailleurs c'est quoi un régime permanent ? Et un régime statique ?

I. Comportement des semi-conducteurs

Faible ou forte injection

Remarque: C'est le terme consacré, mais je préfère: Faible ou forte perturbation des concentrations de porteurs

On note n_0 ou p_0 les concentrations à l'équilibre TD, et Δn ou Δp les concentrations excédentaires dues à la perturbation

Faible injection (ou faible perturbation)

$$Type\ \mathrm{n} : \mathrm{donc} \quad n_0 \cong \mathrm{N_D}\ , \mathrm{si}\ (\Delta n = \Delta p) << n_0 \ \ \mathrm{donc} \ \ \mathrm{p} \cong \Delta p = \Delta n$$

Seuls les porteurs minoritaires (ici les trous) sont impactés

$$Type\ \mathrm{p} : \mathrm{donc} \quad p_0 \cong \mathrm{N_A}\ , \mathrm{si}\ (\Delta n = \Delta p) << p_0 \ \ \mathrm{donc} \ \ \mathrm{n} \cong \Delta n = \Delta p$$

Seuls les porteurs minoritaires (ici les électrons) sont impactés

Forte injection (ou forte perturbation)

$$Type\ \mathrm{n} : \ \ \mathrm{si} \ \ (\Delta n = \Delta p) >> n_0 \quad \mathrm{donc} \quad \mathrm{n} = \mathrm{p} \cong \Delta n = \Delta p$$

$$Type\ \mathrm{p} : \ \ \mathrm{si} \ \ (\Delta n = \Delta p) >> p_0 \quad \mathrm{donc} \quad \mathrm{n} = \mathrm{p} \cong \Delta n = \Delta p$$

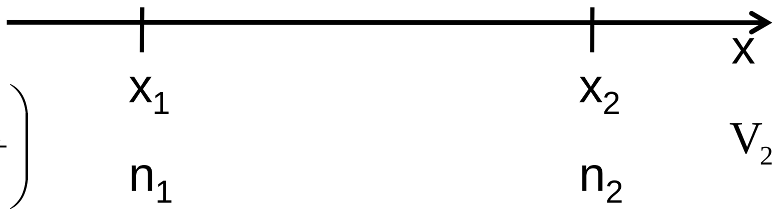
Tous les porteurs, minoritaires et majoritaires sont impactés

I. Comportement des semi-conducteurs

Un repère précieux pour la suite…

Ceci nous donne un repère pour les différences de potentiel, les champs électriques et fait le lien avec ce que constate un électronicien sur ses composants

$$V_1(\text{réf } V_0, n_i) = U_T \ln\left(\frac{n_1}{n_i}\right)$$



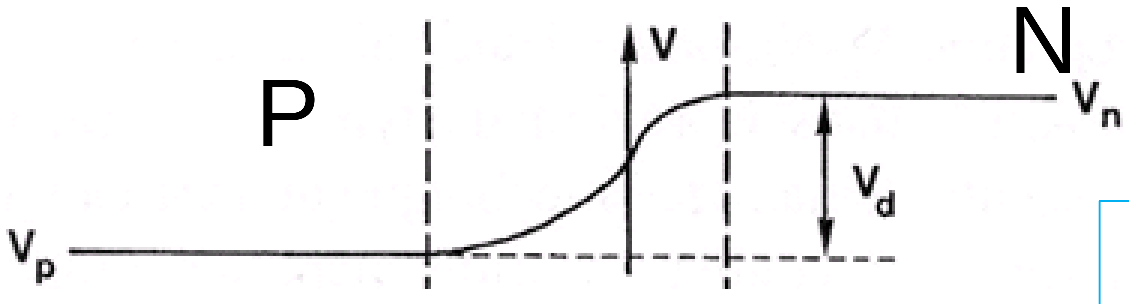
$$V_2(\text{réf } V_0, n_i) = U_T \ln\left(\frac{n_2}{n_i}\right)$$

Différence de potentiel V_2-V_1

$$\boxed{V_2 - V_1 = U_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right)}$$

Le potentiel électrique augmente avec la concentration des électrons

Faire la même chose avec les trou…



On travaille en UNIDIMENSIONNEL

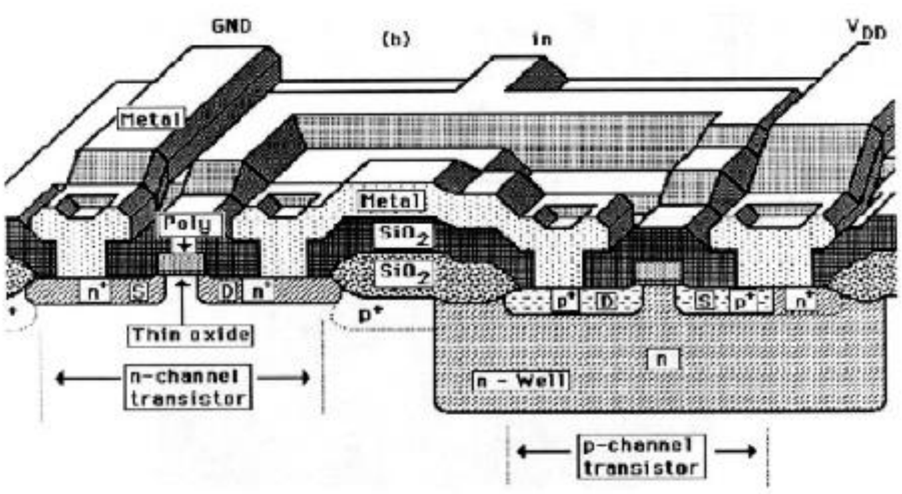
II. Jonction PN

Dans les composants électroniques, Il y en a partout !

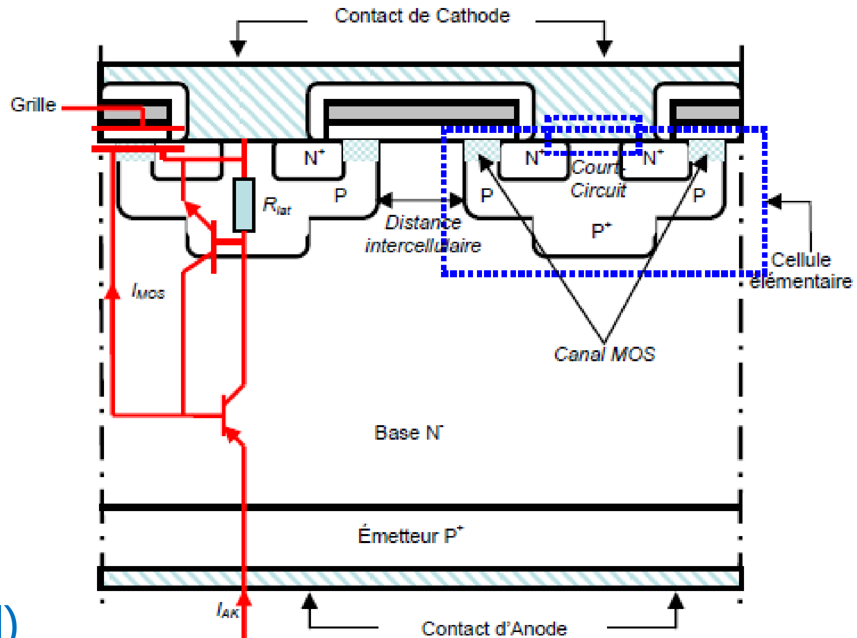
C'est quoi une jonction PN ?

Où trouve-t-on ces jonctions ?

Combien de jonctions ?



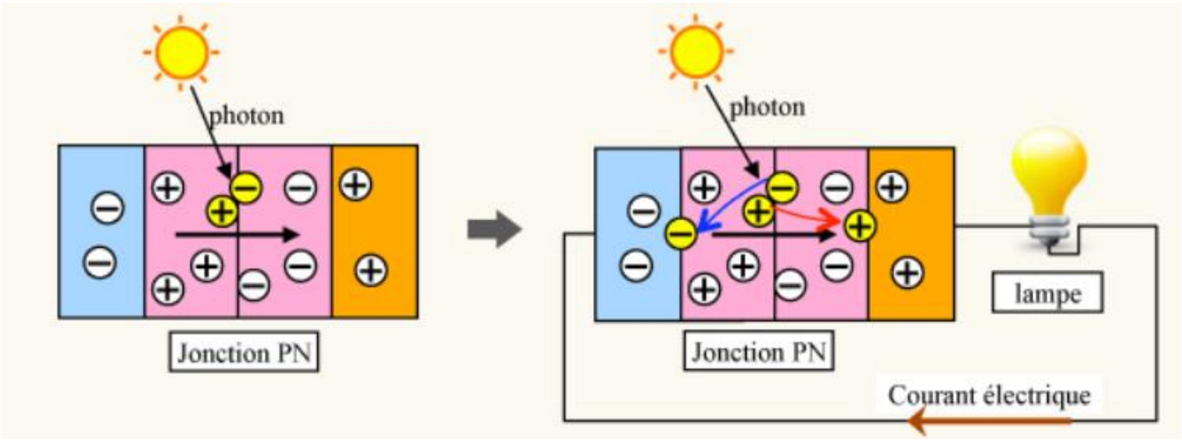
Structure CMOS (traitement numérique du signal)

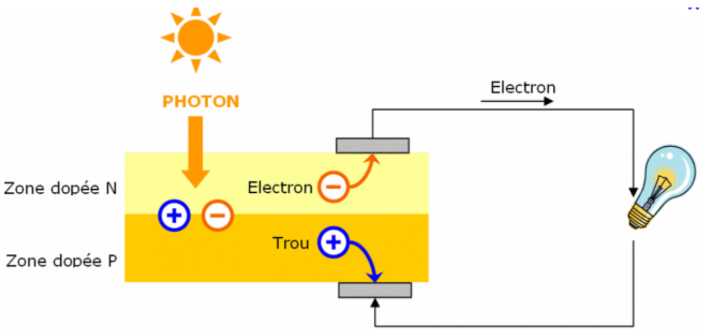


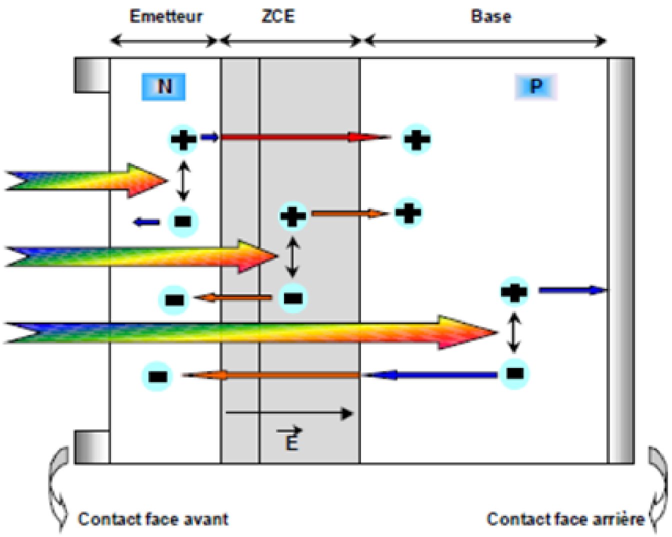
Structure IGBT (traitement de l'énergie)

II. Jonction PN

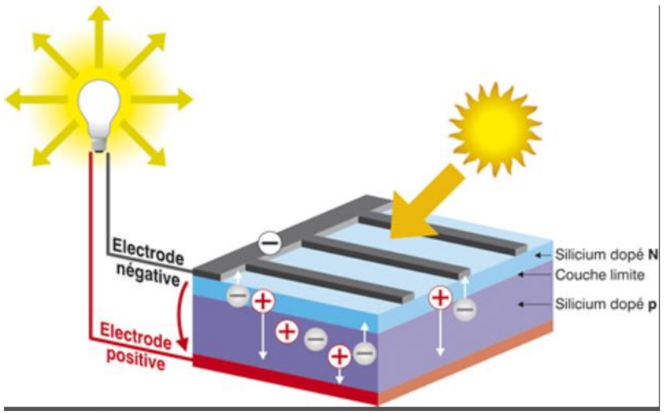
De multiples applications…





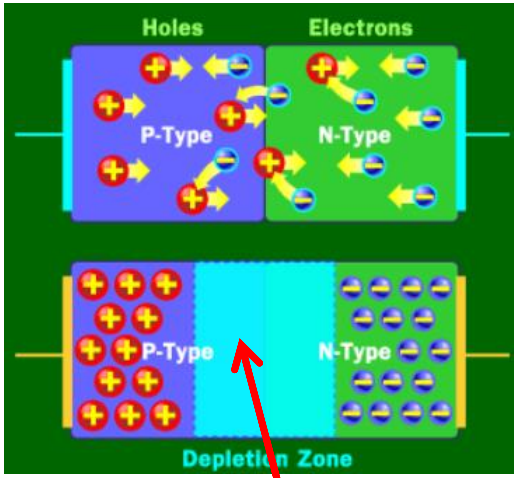


Il y a donc un champ électrique interne et un phénomène de génération. Voyons d'où cela vient-il

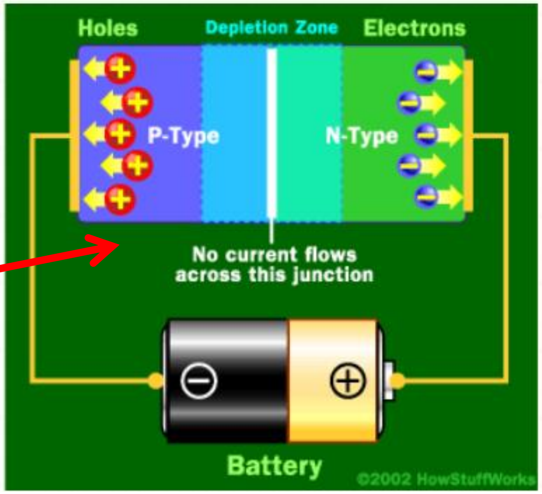


II. Jonction PN

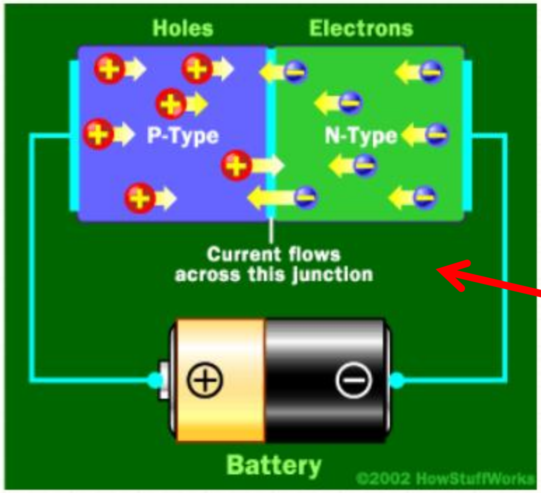
Création et variation du champ électrique



Y a-t-il un courant possible ? Pourquoi ?



Il y a une zone appelée:
ZCE (Zone de charge d'espace) ou zone déplétion ou zone déserte (d'ailleurs de quoi ?)



Y a-t-il un courant possible ? Pourquoi ?

II. Jonction PN

Tension de diffusion

ATTENTION: On traite la jonction abrupte. Définition….

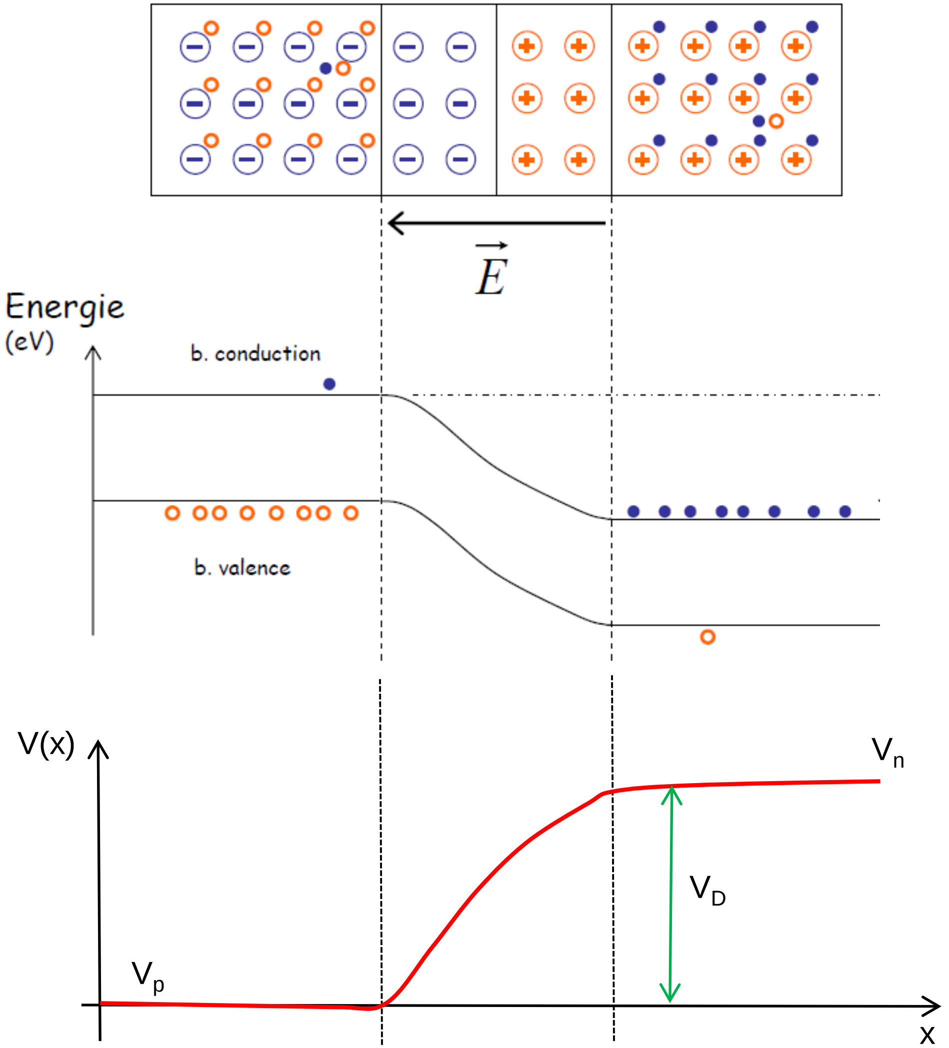
Rappelez-vous de ce qui été dit en p:26

Zone N $n_n = N_D \quad \text{et} \quad p_n = \dfrac{n_i^2}{N_D}$

Zone P $p_p = N_A \quad \text{et} \quad n_p = \dfrac{n_i^2}{N_A}$

D'où

$$\boxed{V_D = V_n - V_p = \frac{kT}{q} Ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = \Phi}$$



V_D est appelée potentiel interne ou tension de diffusion. C'est aussi la hauteur de la barrière de potentiel qui empêche la circulation des porteurs majoritaires.

II. Jonction PN

Deux zones, deux comportements distincts

Dans les Zones de Charge d'Espace (ZCE), il faut utiliser l'Equation de Poisson !

Elle vient de ce bon vieux théorème de Gauss:

$$div\vec{E} = \frac{\rho(x,y,z)}{\varepsilon}$$

$\rho(x,y,z)$: Charge nette (dans la ZCE, charges fixes des ions)

$$\vec{E} = -\overrightarrow{grad}\, V \Rightarrow$$ **Eq. de Poisson** $$\boxed{\nabla^2 V = -\frac{\rho(x,y,z)}{\varepsilon}}$$

Une dimension, cas général $\Rightarrow$ $$\boxed{\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon} = -\frac{q}{\varepsilon}(N_D^+ - N_A^- + p - n)}$$

ZCE côté P (dopage uniforme N_A) $\Rightarrow$ $$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = +\frac{q}{\varepsilon} N_A^-$$

ZCE côté N (dopage uniforme N_D) $\Rightarrow$ $$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = -\frac{q}{\varepsilon} N_D^+$$

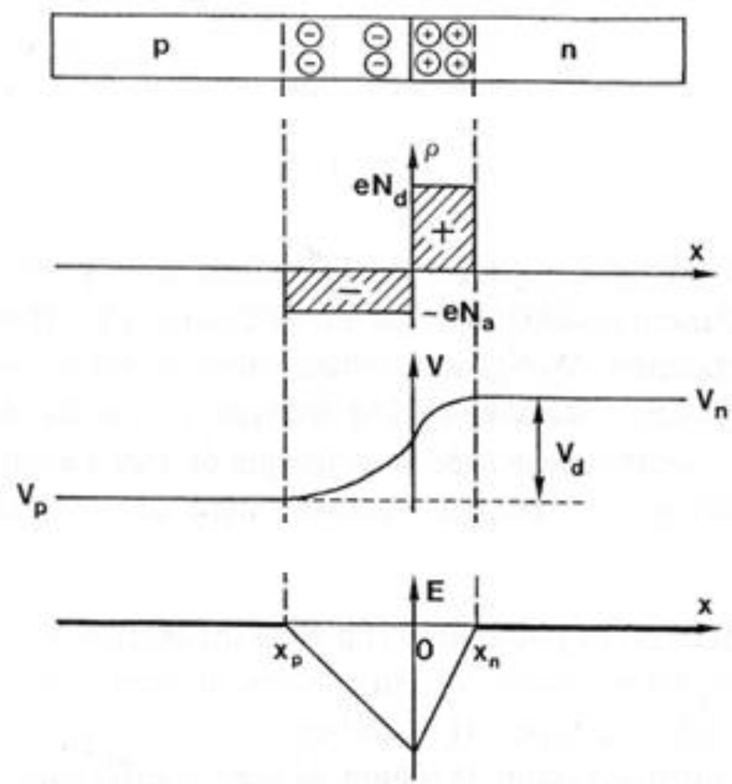
En dehors, c'est la zone quasi-neutre $\Rightarrow$ $$\boxed{\rho = q(N_D^+ - N_A^- + p - n) \cong 0}$$

Dans les zones neutres ou quasi-neutres, il ne faut pas utiliser l'équation de Poisson !

II. Jonction PN

Expressions du potentiel et du champ électrique

Concentrations charges nettes



Zone quasi-neutre

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

Si le dopage est uniforme pas de champ électrique dans les ZQN

Zone de charge d'espace

$$\rho(x) = -qN_A \quad \text{pour} \quad x_P < x < 0$$

$$\rho(x) = +qN_D \quad \text{pour} \quad 0 < x < x_n$$

Potentiel dans la ZCE (on applique Poisson !)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_A}{\varepsilon}(\text{zone P}) \qquad \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\varepsilon}(\text{zone N})$$

$$v(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon}(x - x_p)^2 + V(x_p)(\text{zone P}) \quad \Big| \quad v(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}(x - x_n)^2 + V(x_n)\ (\text{zone N})$$

Champ électrique dans la ZCE (on applique E=-dv/dx)

$$E(x) = -\frac{qN_A}{\varepsilon}(x - x_p)\,(\text{zone P}) \qquad E(x) = +\frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_n)\ (\text{zone N})$$

II. Jonction PN

Si la jonction n'est pas abrupte

Attention, il y a aussi un champ électrique dans les ZQN si la concentration des porteurs n'est pas uniforme !!!

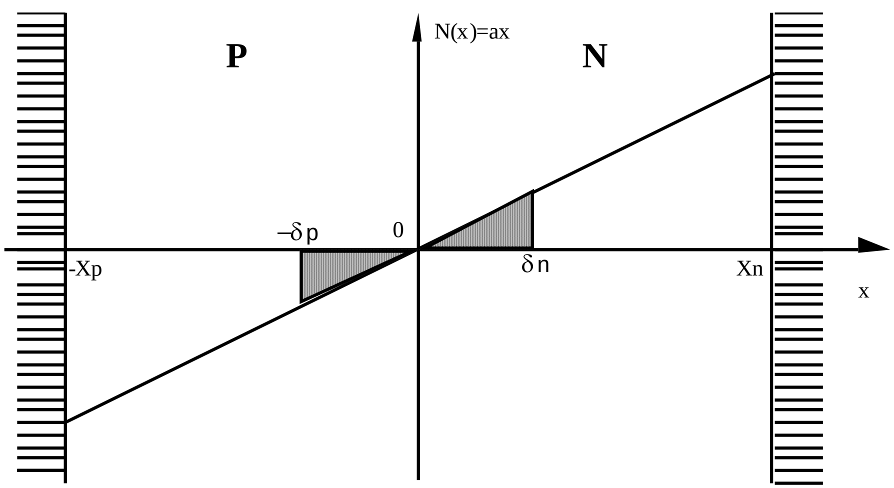
Comment le calculer à l'équilibre T.D.? Avec l'équation de Poisson ? **NON!!!**

Il faut juste dire que le courant de diffusion est contrarié par le courant de conduction de sorte que le courant total soit nul

Champ électrique (à l'équilibre)

$$\boxed{E(x) = -\frac{kT}{q}\frac{1}{n(x)}\frac{dn(x)}{dx} = +\frac{kT}{q}\frac{1}{p(x)}\frac{dp(x)}{dx}}$$

Exemple, dopage linéaire, ici $N(x)= N_D(x)-N_A(x)$

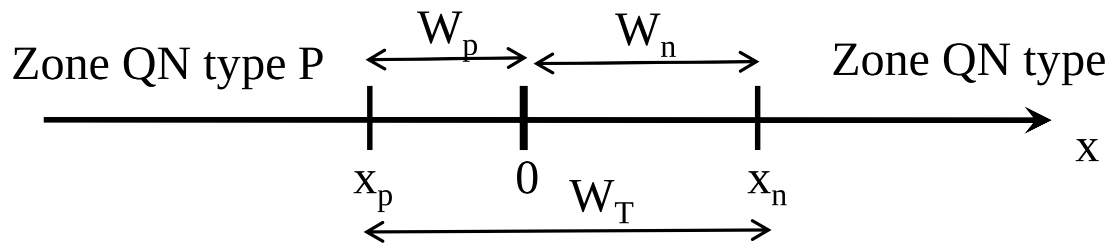


Trouver l'expression de E(x) dans les ZQN et mettre son sens sur la figure

Si le dopage est uniforme (jonction abrupte), à l'équilibre le champ électrique est nul dans les ZQN

II. Jonction PN

Largeurs de la zone de charge d’espace



Continuité du vecteur déplacement en x=0 $\vec{D} = \varepsilon\vec{E}$ $\quad \vec{D}_{0^+} = \vec{D}_{0^-} \quad \Rightarrow \quad E(0^+) = E(0^-)$

Même matériau

$$E(0) = -\frac{qN_A}{\varepsilon}(0 - x_p)\ (\text{zone P}) \quad = \quad E(0) = +\frac{qN_D}{\varepsilon}(0 - x_n)\ \ (\text{zone N})$$

$$qN_A x_p = -qN_D x_n \quad \text{on note} \quad W_p = -x_p,\ W_n = x_n \quad \Rightarrow \quad N_A W_p = N_D W_n$$

Continuité du potentiel en x=0 $\quad \dfrac{qN_A}{2\varepsilon}(x_p)^2 + V(x_p) = -\dfrac{qN_D}{2\varepsilon}(x_n)^2 + V(x_n)$

$$\boxed{W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D}\frac{N_A}{N_A + N_D}V_D} \quad \text{et} \quad W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_A}\frac{N_D}{N_A + N_D}V_D}}$$

$$N_A W_p = N_D W_n \quad \Rightarrow \frac{W_n}{N_A} = \frac{W_p}{N_D} = \frac{W_n + W_p}{N_A + N_D} = \frac{W_T}{N_A + N_D}$$

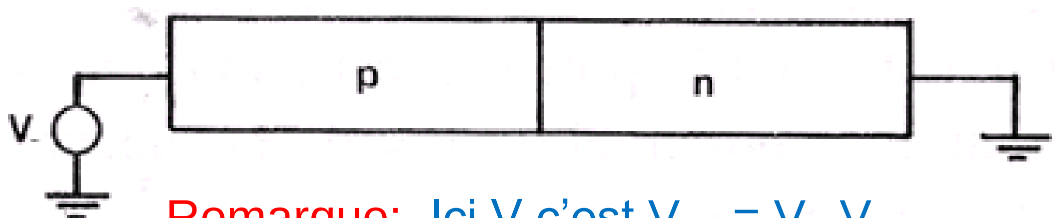
D’où

$$\boxed{W_T = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q}\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}V_D}}$$

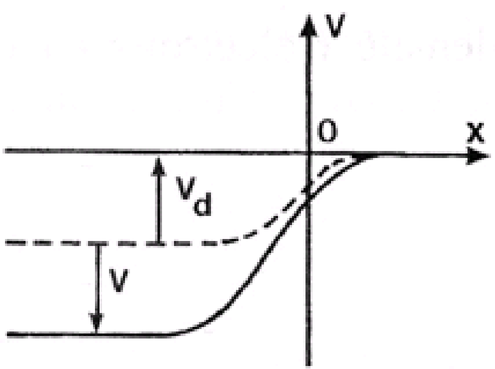
II. Jonction PN

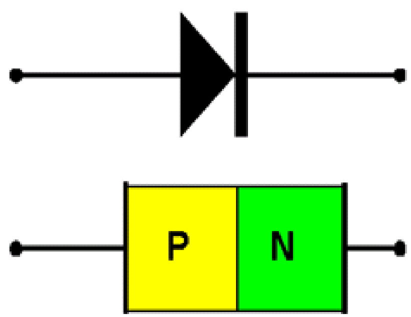
Application d'une tension extérieure

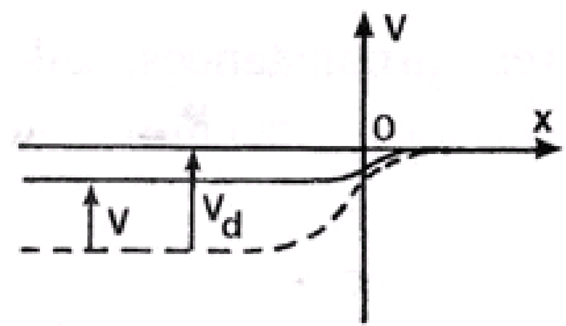
On applique une tension V (ou V_a) aux bornes de la jonction, suivant son signe on parle d'une polarisation directe ou inverse



Remarque: Ici V c'est $V_{AK} = V_A - V_K$







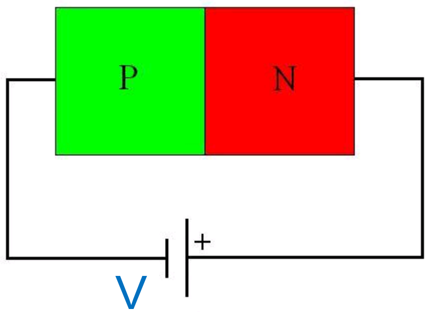
V est négative/positive
Polarisation directe/inverse
La ZCE devient plus large/étroite

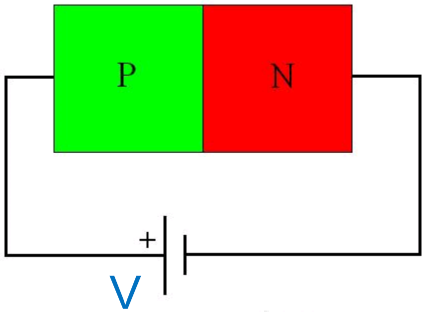
V est négative/positive
Polarisation directe/inverse
La ZCE devient plus large/étroite

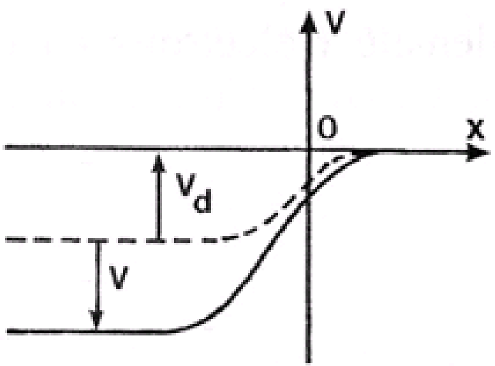
II. Jonction PN

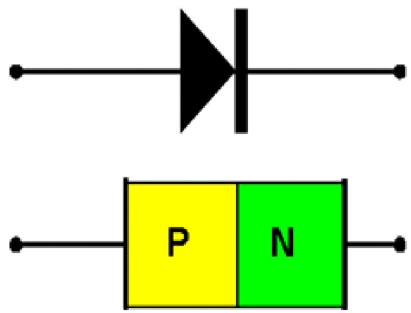
Application d’une tension extérieure

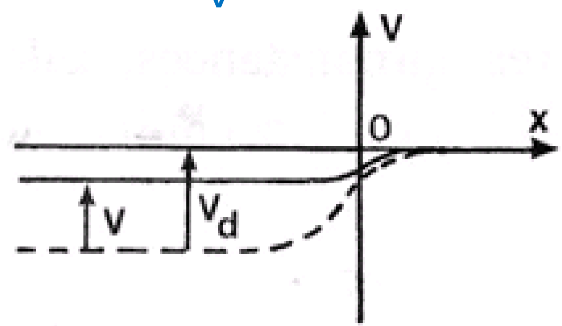
On applique une tension V (ou V_a) aux bornes de la jonction, suivant son signe on parle d’une polarisation directe ou inverse











V est négative/~~positive~~
Polarisation ~~directe~~/inverse
La ZCE devient plus large/~~étroite~~

V est ~~négative~~/positive
Polarisation directe/~~inverse~~
La ZCE devient plus ~~large/~~étroite