# CHAP 12

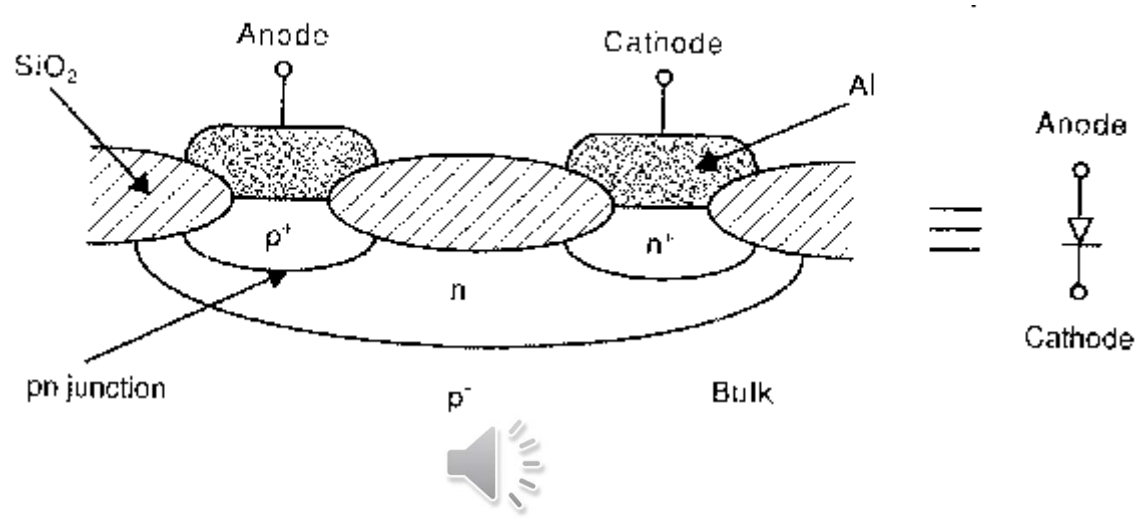


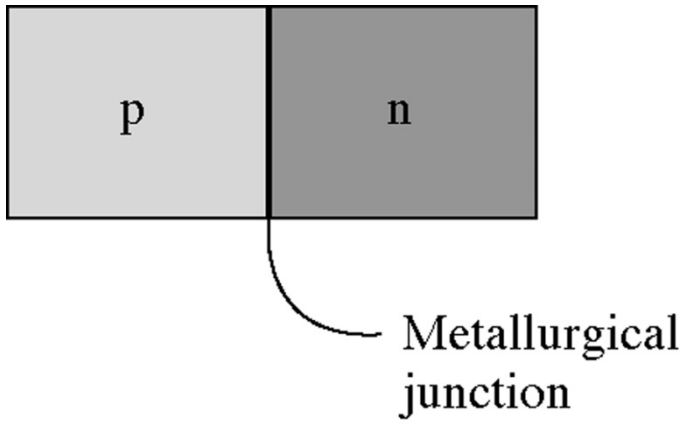
Homo-jonction à semi-conducteur

# Homojonction PN

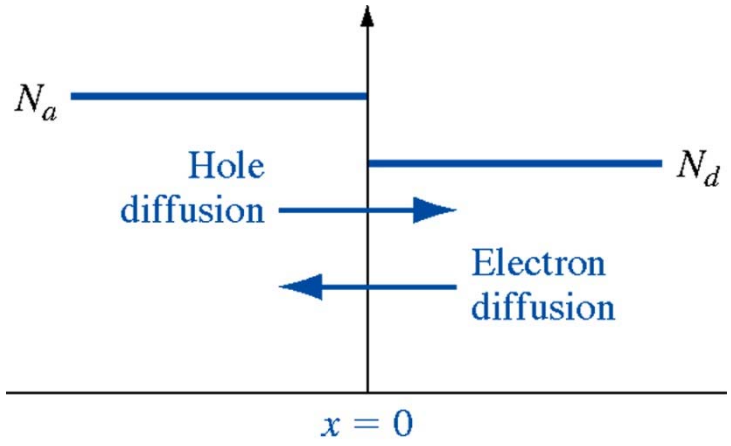
- Composant à réponse non linéaire
- Dispositifs redresseur ou « rectifier devices »
- 2 types pour arriver au « même » résultat:
  - Jonction PN (notre propos)
  - Jonction à contact Schottky (chapitre suivant)

# Mécanisme de formation de la jonction PN



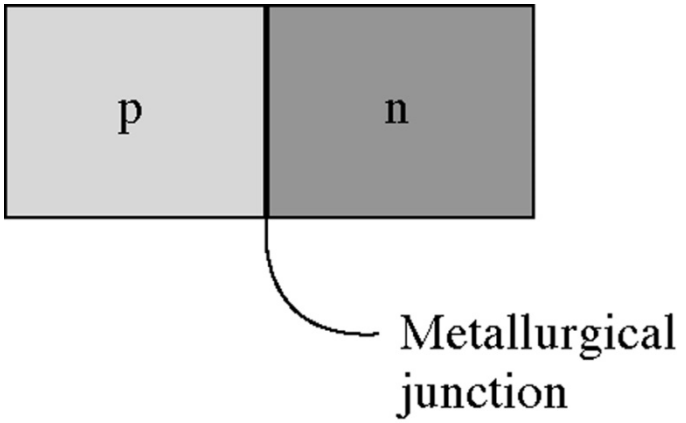




(a)

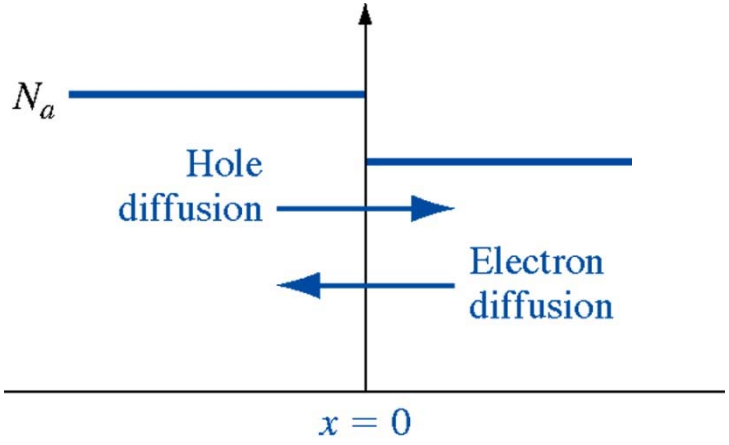



(b)

# Mécanisme de formation de la jonction PN



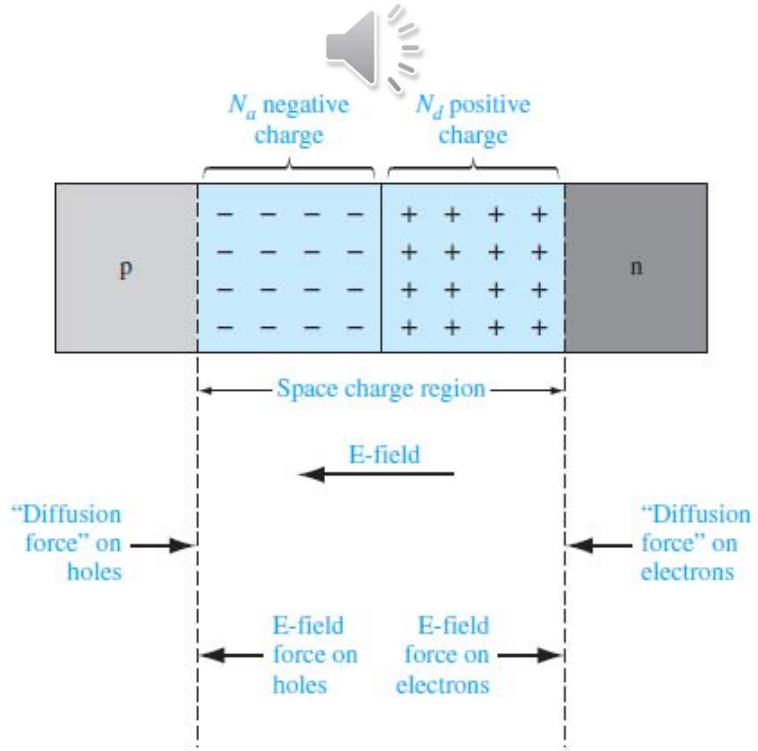

(a)




(b)

Accepteur

Donneur

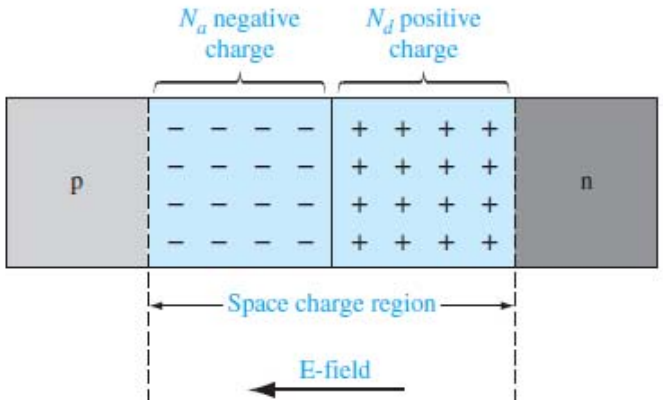


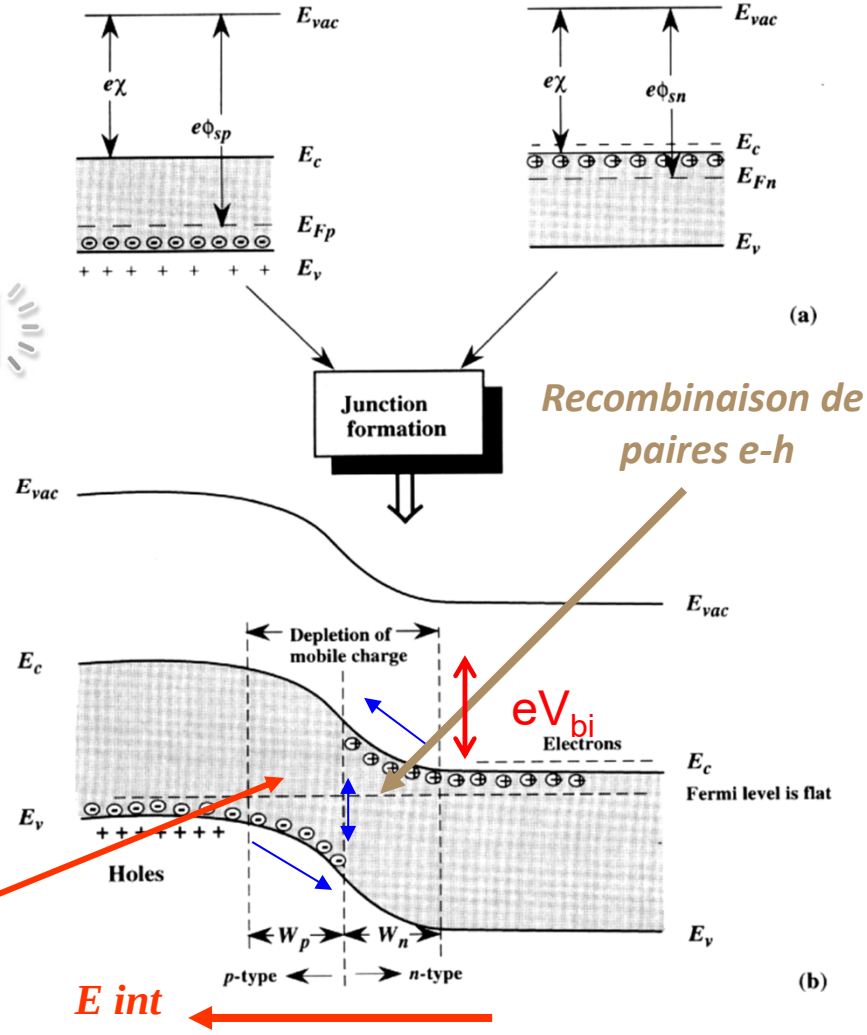
# Mécanisme de formation de la jonction PN

- *Processus de mise à l'équilibre*

*1° phase : processus de diffusion*

*2° phase : Apparition d'un E interne: équilibre la diffusion*




***Niveau de Fermi aligné: équilibre thermodynamique***

# • *Tension de diffusion $V_D$ ou « built in potential $V_{bi}$ »*

- Définition : différence de potentiel entre la région N et la région P

$$V_D = V_{bi} = V_N - V_P$$

Equation du courant de trous: $$J_P(x) = e\left[\mu_P\, p(x) E(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx}\right] = 0$$

Soit encore $$\frac{\mu_p}{D_p} E(x) = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$ ou $$\frac{-e}{kT} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

Soit $$dV(x) = -\frac{kT}{e} \frac{dp(x)}{p(x)} \Rightarrow \int_{V_n}^{V_p} dV(x) = -\frac{kT}{e} \int_{p_n}^{p_p} \frac{dp(x)}{p(x)}$$

En intégrant de la région N à la région P: $$V_D = V_{Bi} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

Soit finalement: $$V_D = V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$ avec $p_p = N_A$, $p_n = n_i^2 / N_D$

## •Champ, potentiel et largeur de zone d'espace (1)

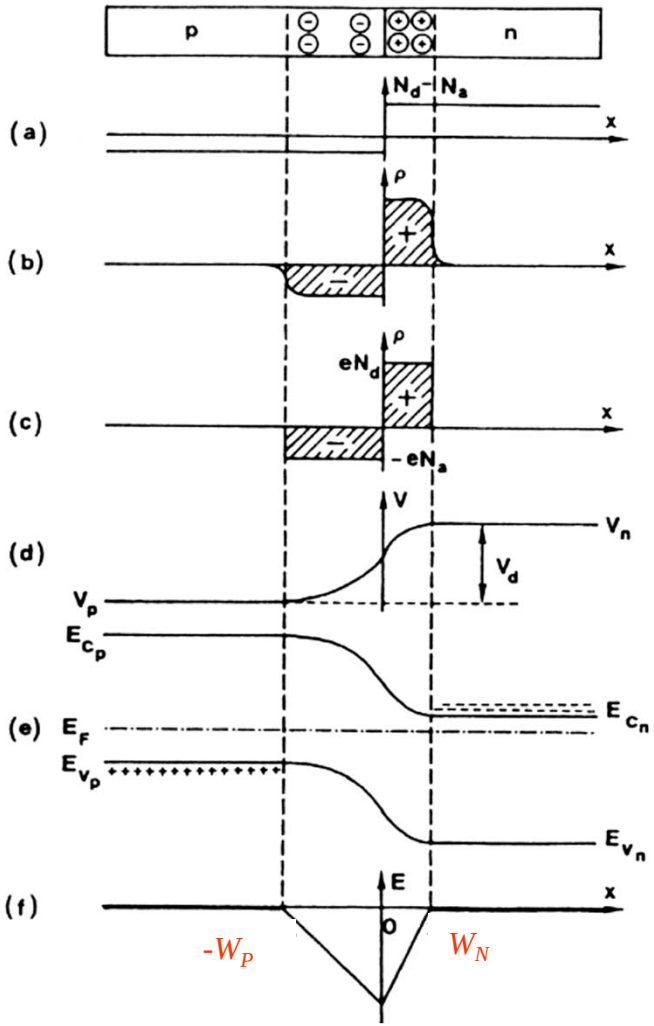
- *Equation de Poisson:*

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_{sc}} = -\frac{e}{\varepsilon_{sc}}\left[N_D(x) - N_A(x) + p(x) - n(x)\right]$$

- *Dans la région N et P:*

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{e}{\varepsilon_{sc}}N_D \qquad 0 < x < W_N$$

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = +\frac{e}{\varepsilon_{sc}}N_A \qquad -W_P < x < 0$$



## • *Champ, potentiel et largeur de zone d'espace (2)*

- Champ électrique E(x)

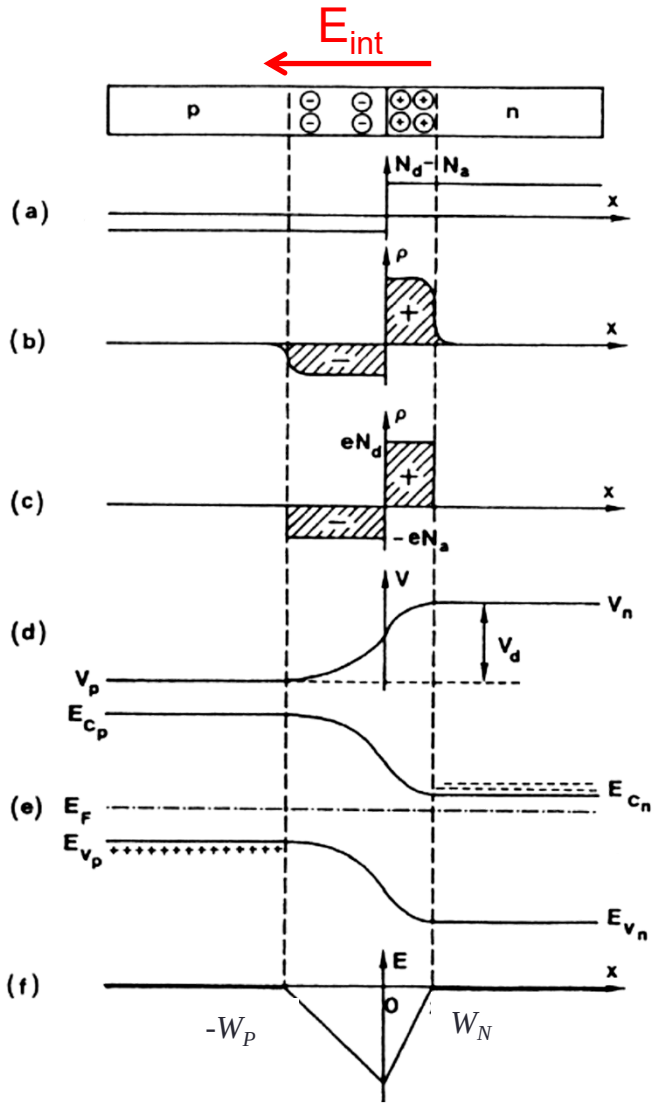
$$E_n(x) = +\frac{eN_D}{\varepsilon_{sc}}(x - W_N)$$

$$E_P(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon_{sc}}(x + W_P)$$

- Continuité du champ en x=0:

$$N_D W_N = N_A W_P$$

$$E_M = -\frac{eN_D W_N}{\varepsilon_{sc}} = -\frac{eN_A W_P}{\varepsilon_{sc}}$$



# •Champ, potentiel et largeur de zone d'espace (3)

- ***Potentiel électrique E(x)***

$$V_n(x) = -\frac{eN_D}{2\varepsilon_{sc}}(x - W_N)^2 + V_n$$

$$V_p(x) = \frac{eN_A}{2\varepsilon_{sc}}(x + W_P)^2 + V_p$$

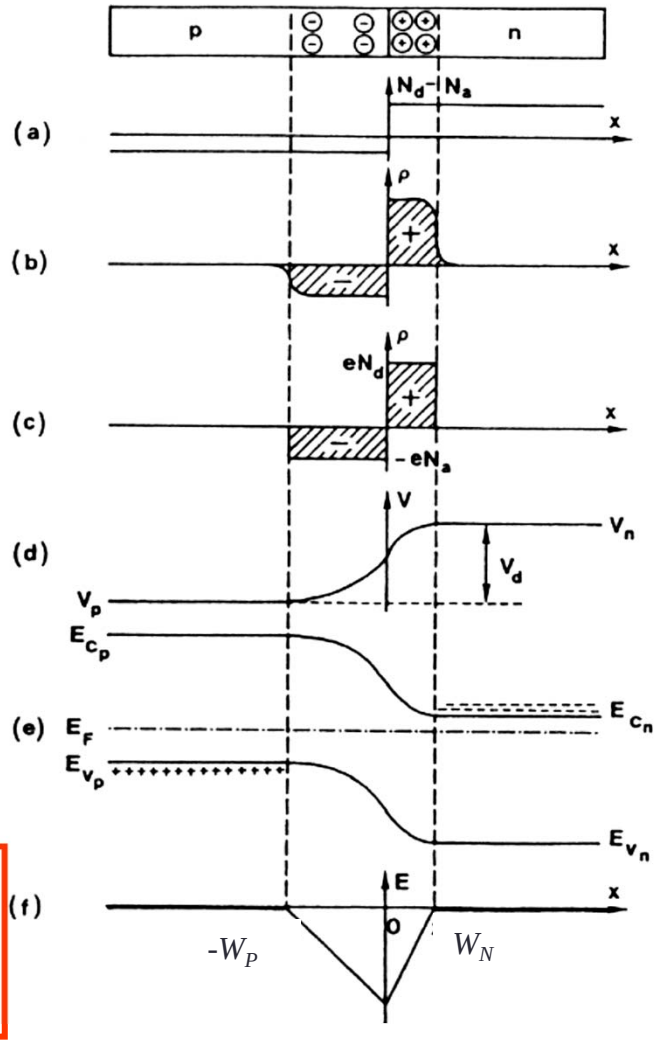
- ***Zone de charge d'espace (ZCE)***

$$V_n(0) = V_p(0) \Rightarrow -\frac{eN_D W_n^2}{2\varepsilon_{sc}} + V_N = \frac{eN_A W_p^2}{2\varepsilon_{sc}} + V_P$$

$$W_p(V_{bi}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{sc}}{e}\frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}V_{bi}}$$

$$W_n(V_{bi}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{sc}}{e}\frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}V_{bi}}$$

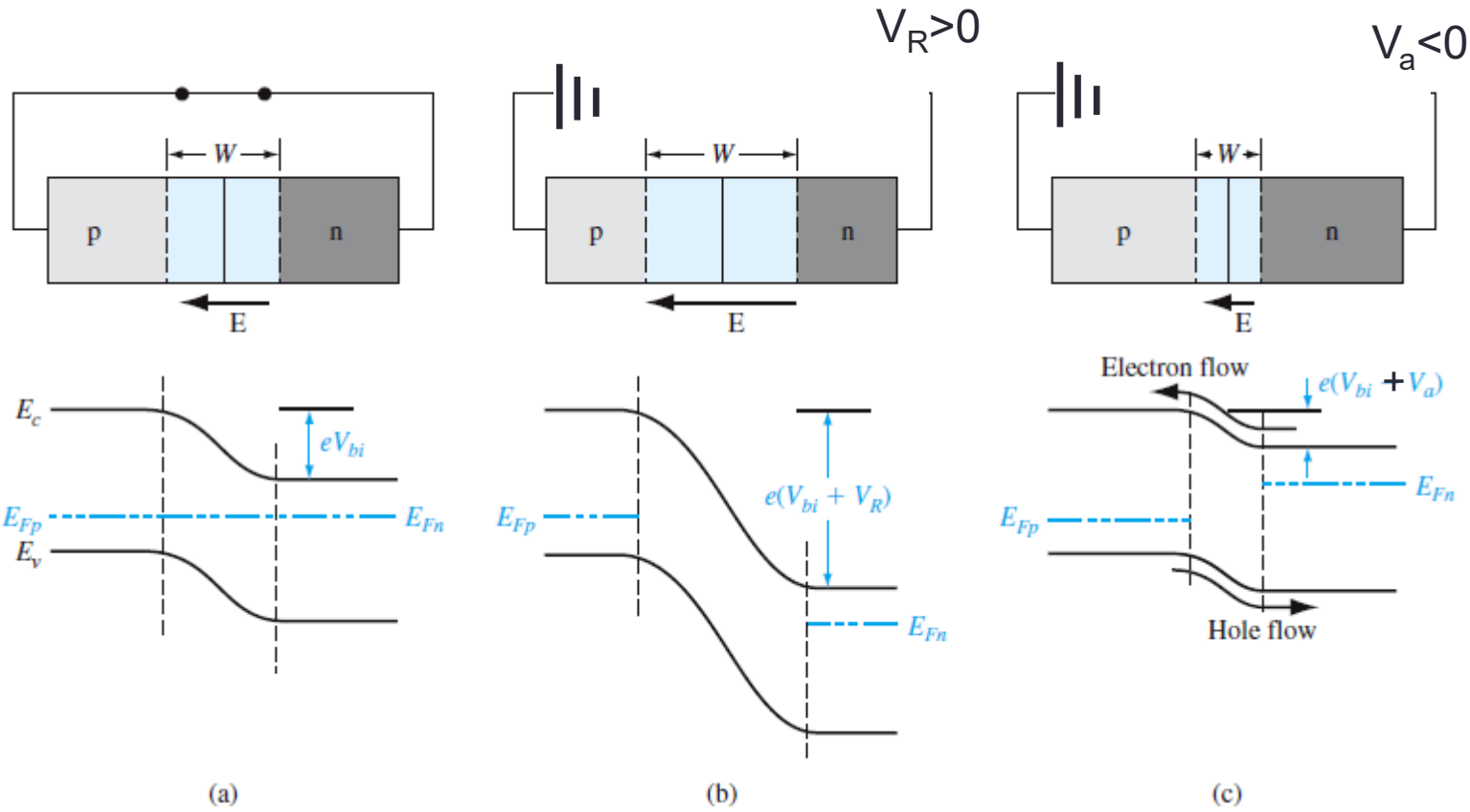
$$W(V_{bi}) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{sc}}{e}\frac{N_D + N_A}{N_A N_D}V_{bi}}$$



Attention: tout ce que l'on vient de voir était pour V=0. Lorsque la diode est polarisée par une tension $V_A$ ***sur P***, $V_{bi}$ doit être remplacée par $V_{bi} - V_A$



- *Composant redresseur ?*




Force Diffusion
=
Force Electrique

Force Diffusion
<
Force Electrique

Force Diffusion
>
Force Electrique

# Jonction PN sous polarisation

- Cette polarisation va rompre l'équilibre entre les forces de diffusion et de conduction: => apparition d'un courant ?



- Hypothèses simplificatrices:
  - ZCE vide de porteurs
  - Faible injection
  - Approximation de Boltzmann
  - Toute la tension $V_A$ appliquée sur la jonction
  - Pas de phénomènes de Génération - Recombinaison

# Jonction PN sous polarisation

À l'équilibre, courant nul ⇔ deux composantes (diff et cond) s'opposent. Pris à part , l'ordre de grandeur de ces composantes $10^4$ A/cm$^2$ (soit 1A pour diode typique) or en faible injection I est de l'ordre de qq mA à  qq 10 mA



- ***Approximation de Boltzmann:*** *L'approximation de Boltzmann consiste à dire que la résultante des courants étant faible devant les composantes de ce courant, on considère que l'on est encore en quasi-équilibre et donc que l'équation du courant est encore valide en remplaçant $V_d$ par $V_d - V_a$:*

$$\frac{-e}{kT}\frac{dV(x)}{dx} \approx \frac{1}{p(x)}\frac{dp(x)}{dx}$$

# Densité de porteurs injectés à la frontière de la ZCE

$$V_{bi} = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

- Si $V_a=0$ $$\frac{p(W_N)}{p_p} = \frac{p_n}{p_p} = \exp\left(-\frac{eV_{bi}}{kT}\right)$$
- Si $V_a \neq 0$ $$\frac{p'(W_N)}{p_p} = \frac{p'_n}{p_p} = \exp\left(-\frac{e(V_{bi}-V_A)}{kT}\right) = \frac{p_n}{p_p}\exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right)$$

$$p'_n = p_n \exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_D}\exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right) \qquad n'_p = n_p \exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_A}\exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right)$$

$$n'_p * p_p = p'_n * n_n = n_i^2 \exp\left(\frac{eV_A}{kT}\right)$$

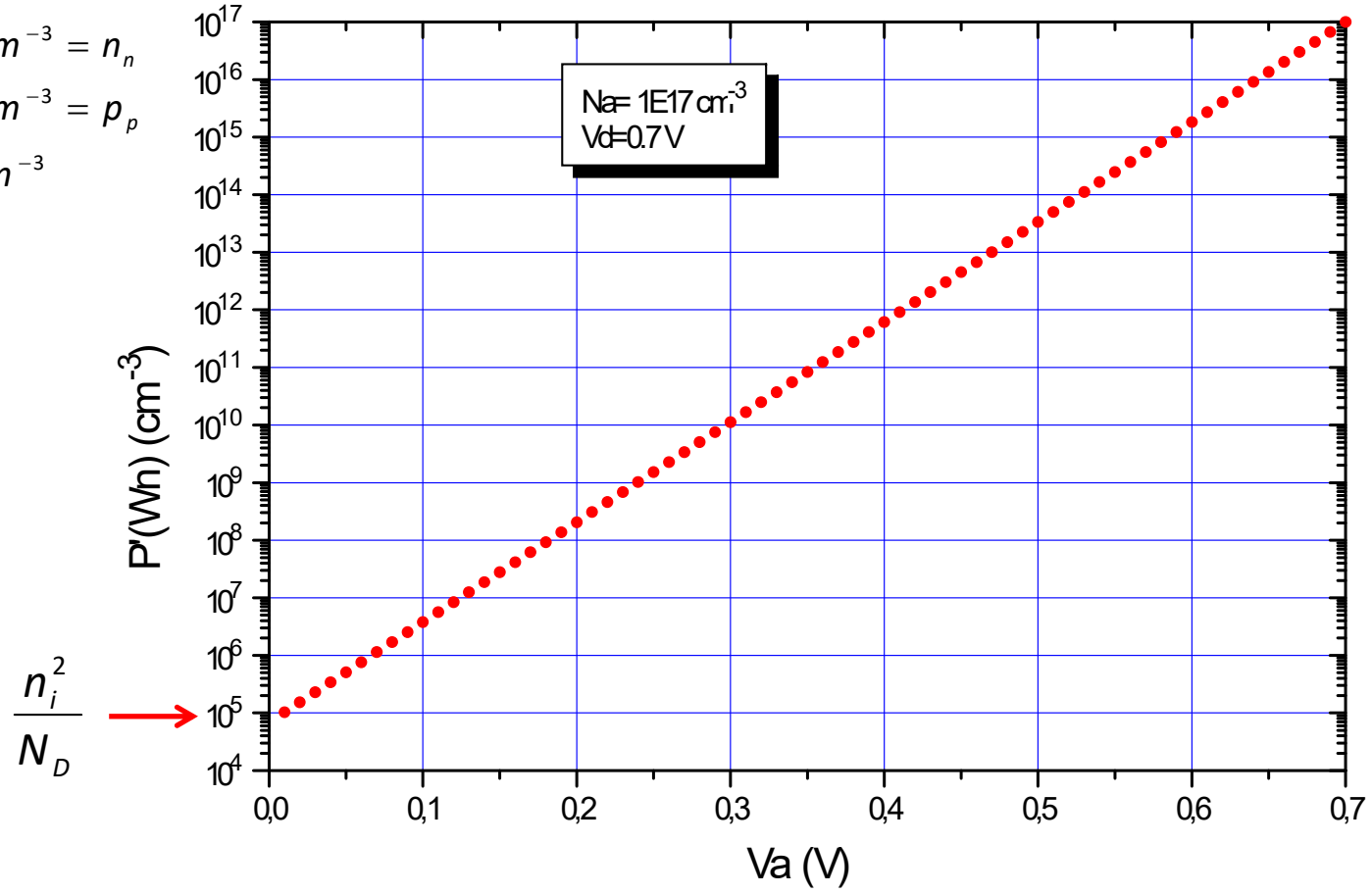
# Variation de la densité de trous injectés en fonction de Va

$$p'_n = p_p \exp(-\frac{e(V_{bi} - V_A)}{kT}) = N_A \exp(-\frac{e(0,7 - V_A)}{kT}) = p_n \exp(\frac{eV_A}{kT}) = \frac{n_i^2}{N_D} \exp(\frac{eV_A}{kT})$$

$N_D = 10^{15} cm^{-3} = n_n$

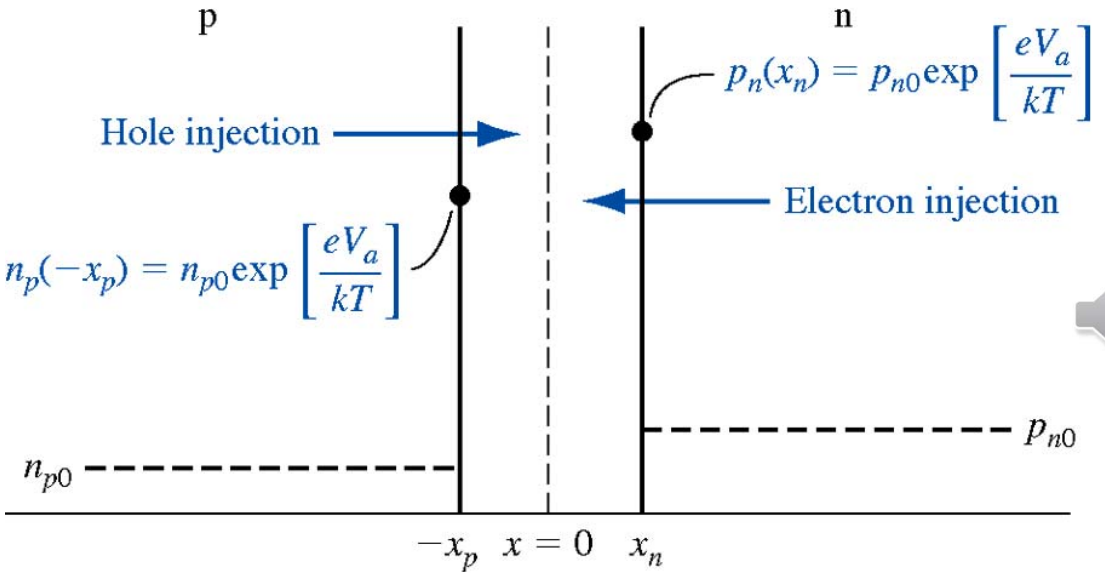
$N_A = 10^{17} cm^{-3} = p_p$

$n_i^2 = 10^{10} cm^{-3}$



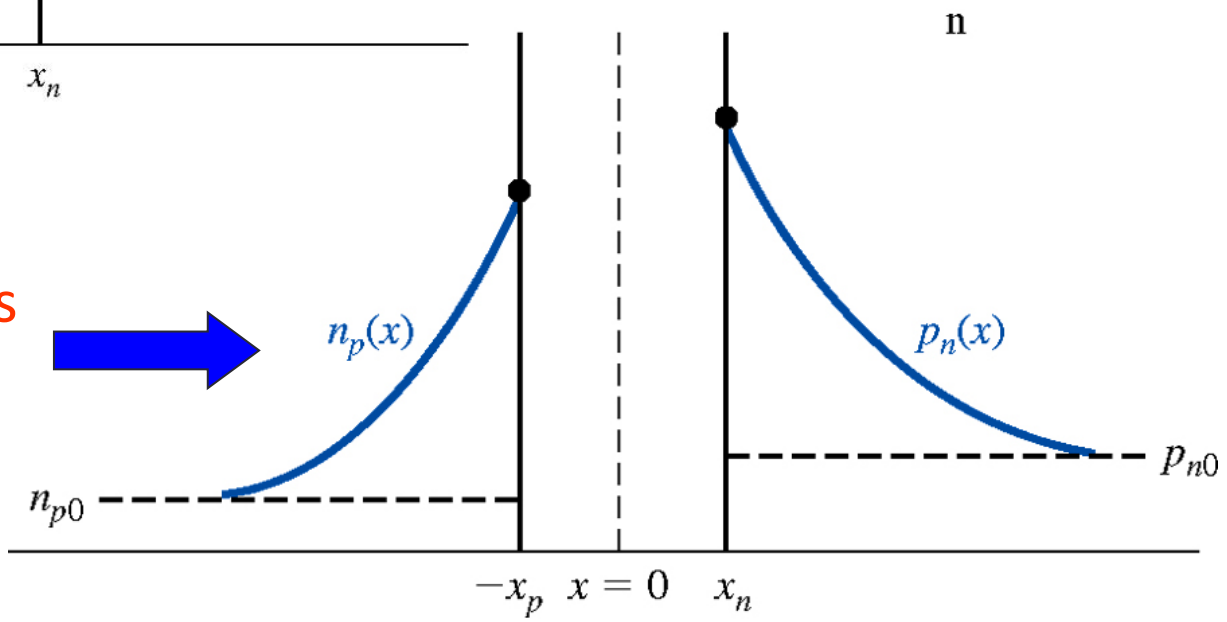

$\frac{n_i^2}{N_D}$ →

# Injection de porteurs




En polarisation directe, phénomènes de diffusion

Une fois injectés, les porteurs diffusent



# Distribution des porteurs dans les régions neutres

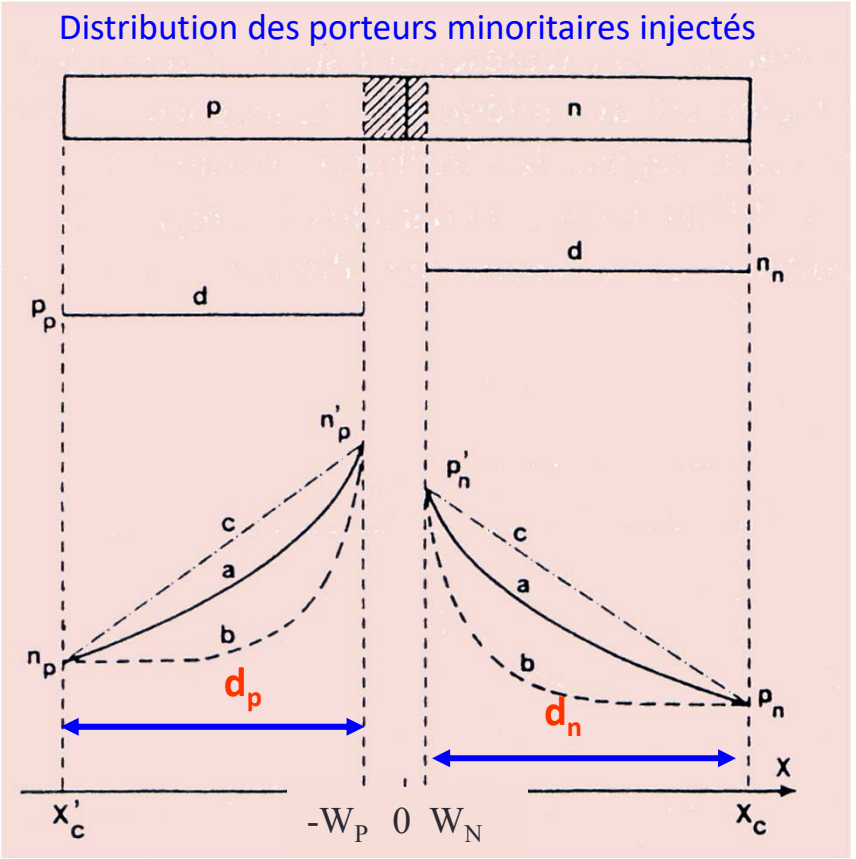
- Une fois les porteurs injectés, ils vont diffuser dans la région neutre et se recombiner avec les porteurs majoritaires

$$J_p(x) = -eD_p \frac{\partial p}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{p - p_n}{\tau_p}$$

- La distribution va être fonction de la géométrie de la région

$$p - p_n = Ae^{-x/L_p} + Be^{+x/L_p}$$

- Les paramètres discriminatoires : la longueur de diffusion $L_{Dn,p}$ des électrons et des trous et la largeur des régions neutres $d_{n,p}$




a: région qcq, b: longue, c:courte,

# Distribution des porteurs dans les régions neutres

- *Régions longues* ( $d_{n,p} >> L_{p,n}$ )

$$p'(x) - p_n = p_n(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)e^{(W_N - x)/L_p}$$

$$n'(x) - n_p = n_p(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)e^{(x+Wp)/L_n}$$

- *Régions courtes* ( $d_{n,p} << L_{p,n}$ )

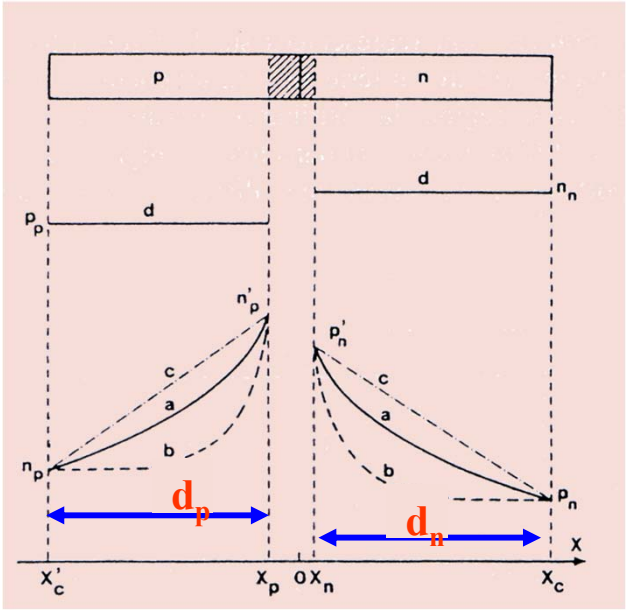
$$p'(x) - p_n = \frac{p_n}{d_n}(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)(x_c - x)$$

$$n'(x) - n_p = \frac{n_p}{d_p}(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)(x'_c + x)$$

- *Régions qcq*

$$p'(x) - p_n = \frac{p_n}{sh(\frac{d_n}{L_p})}(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)sh\left[\frac{(x_c - x)}{L_p}\right]$$

$$n'(x) - n_p = \frac{n_p}{sh(\frac{d_p}{L_n})}(e^{\frac{eV_a}{kT}} - 1)sh\left[\frac{(x + x'_c)}{L_n}\right]$$



# *Courant de porteurs minoritaires dans les régions neutres*

- La distribution connue, on peut facilement calculer le courant qui est un courant de diffusion:



$$J_p(x) = -eD_p \frac{dp(x)}{dx} \qquad J_n(x) = eD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

- Hypothèse : pas de Phénomènes de G-R dans la ZCE

$$J(V) = J_p(-W_p) + J_n(-W_p) = J_p(W_n) + J_n(-W_p)$$

- On obtient la formule classique:

$$J(V) = J_S(e^{eV/kT} - 1) = (J_{sp} + J_{sn}) \times (e^{eV/kT} - 1)$$

*$J_S$ est le courant de saturation de la diode, ou courant inverse théorique*

# Courant de porteurs minoritaires dans les régions neutres

- Régions courtes

$$J_S = \frac{en_i^2 D_P}{N_D d_n} + \frac{en_i^2 D_n}{N_A d_p}$$

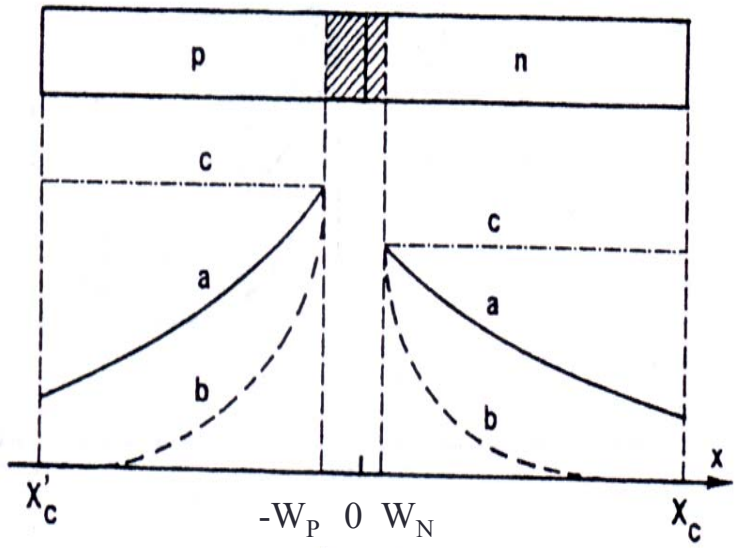
- Régions longues

$$J_S = \frac{en_i^2 D_P}{N_D L_P} + \frac{en_i^2 D_n}{N_A L_n}$$

- Régions qcq

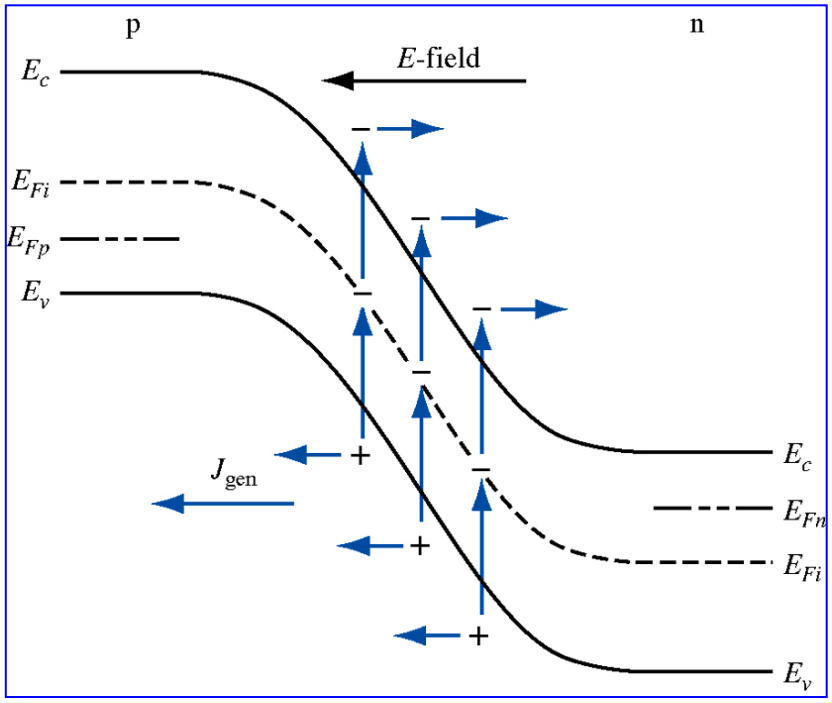
$$J_S = \frac{en_i^2 D_P}{N_D L_P th(\frac{d_n}{L_P})} + \frac{en_i^2 D_n}{N_A L_n th(\frac{d_p}{L_n})}$$

a: région qcq, b: longue, c:courte,

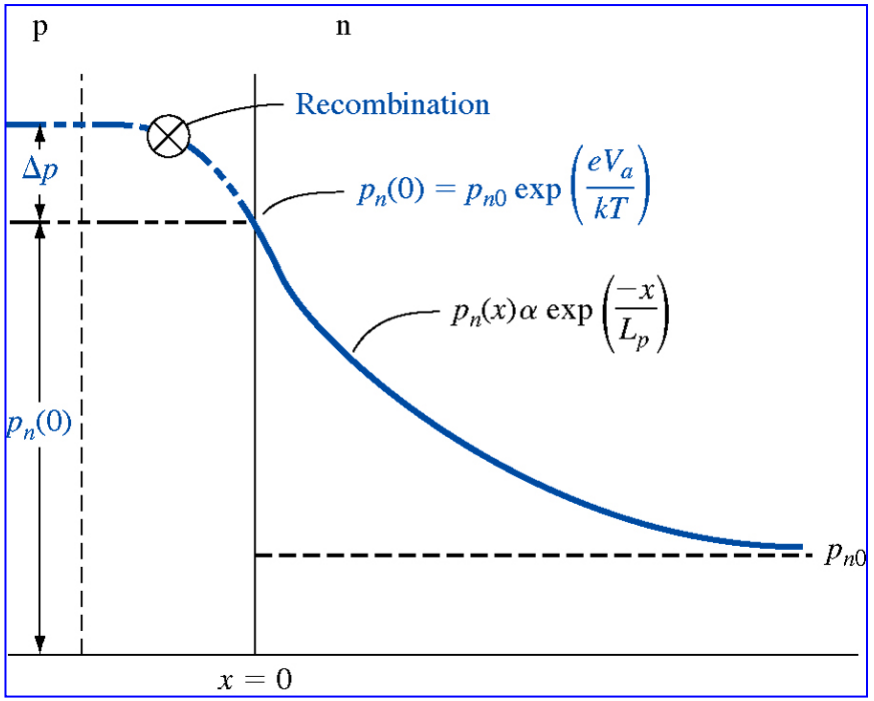



Courant de porteurs minoritaires

# Génération –recombinaison dans la ZCE




Génération en inverse




Recombinaison en direct

# La diode réelle : Phénomènes de génération-recombinaison dans la ZCE

- On affine le modèle ⇔on tient compte de la G-R dans la ZCE
- Mécanisme connu (Shockley-Read)

$$r = \frac{1}{\tau}\frac{pn - n_i^2}{2n_i + p + n}$$

- On sait également que $p(W_N)n(W_N) = p(W_P)n(W_P) = n_i^2 \exp(\frac{eVa}{kT})$
- Si on suppose *np* constant dans la ZCE et >> $n_i^2$ (en polarisation directe) , le taux *r* est max pour *n*=*p*, soit encore

$$r_{\max} = \frac{n_i}{2\tau}\exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

# La diode réelle : Phénomènes de génération-recombinaison dans la ZCE

- Le courant de génération recombinaison dans la ZCE s'écrit alors:



$$\cancel{\frac{dn}{dt}} = \frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx} + \cancel{g} - r \Leftrightarrow 0 = \frac{1}{e}\frac{dJ_n}{dx} - r \Rightarrow dJ_n = erdx$$

$$\int_{Jn(Wp)}^{Jn(Wn)} dJ_n = J_n(Wn) - J_n(Wp) = J_{GR} = e\int_{W_P}^{W_N} rdx = eW_T r$$

# La diode réelle : Phénomènes de génération-recombinaison dans la ZCE

- En polarisation inverse ($pn << n_i^2$), le taux est négatif ($r = -\frac{n_i}{2\tau} < 0$) et devient un taux net de génération

$$J_{GR} = e\int_{W_P}^{W_N} r dx = eW_T \times \left(\frac{-n_i}{2\tau_m}\right) = -\frac{en_i}{2\tau_m} W_T$$

- En polarisation directe , le taux est $r_{max}=cte$ et le courant est un courant de recombinaisons.

$$r_{\max} = \frac{n_i}{2\tau} \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

$$J_{GR} = eW_T \times \frac{n_i}{2\tau_m} \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right) = \frac{en_i}{2\tau_m} \times W_T \times \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

# La diode réelle : Phénomènes de génération-recombinaison dans la ZCE

- Le courant de génération recombinaison dans la ZCE s'écrit alors:

$$J_{GR} = J_{GR}^0 \left( \exp(\frac{eV_a}{2kT}) - 1 \right) \qquad J_{GR}^0 = \frac{en_i}{2\tau} W_T$$

- Le courant global en intégrant cet effet s'écrit:

$$J(V_a) = J_S \left( \exp(\frac{eV_a}{kT}) - 1 \right) + J_{GR}^0 \left( \exp(\frac{eV_a}{2kT}) - 1 \right)$$

- Facteur d'idéalité:

$$J(V) = J_0 \left( \exp(\frac{eV_a}{nkT}) - 1 \right)$$

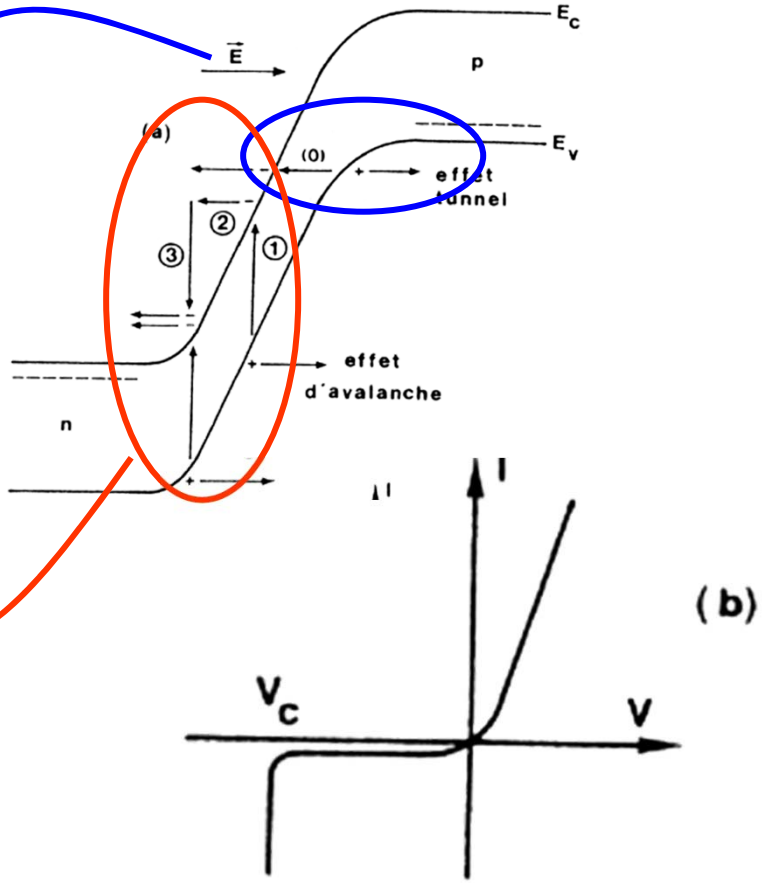
# Diode en polarisation inverse / claquage de la jonction

$$J_{inverse} = -J_S = -\left(\frac{en_i^2 D_P}{N_D d_n} + \frac{en_i^2 D_n}{N_A d_p}\right)$$

- Effet thermique
- Effet Zener:
  - Passage direct de la BV à la BC par effet tunnel (0) si champ électrique supérieur à $E_{critique}$
- Effet Avalanche:
  - Avant le « tunneling », accélération des électrons qui excitent par impact des électrons de BV vers BC (1,2,3) etc….

$$V_{BD} = \frac{\varepsilon . E_C^2}{2eN_B}$$

- Perçage ou « punchtrough »



# Jonction en régime dynamique: capacités de la jonction

- Capacité associée à charges
- 2 types de charges dans la jonction
  - Fixes (les  dopants ionisés) dans la ZCE
  - Mobiles (les $e^-$ et $h^+$) injectés en direct
- 2 types de capacités
  - Capacité de transition ou de la jonction
  - Capacité de diffusion ou stockage

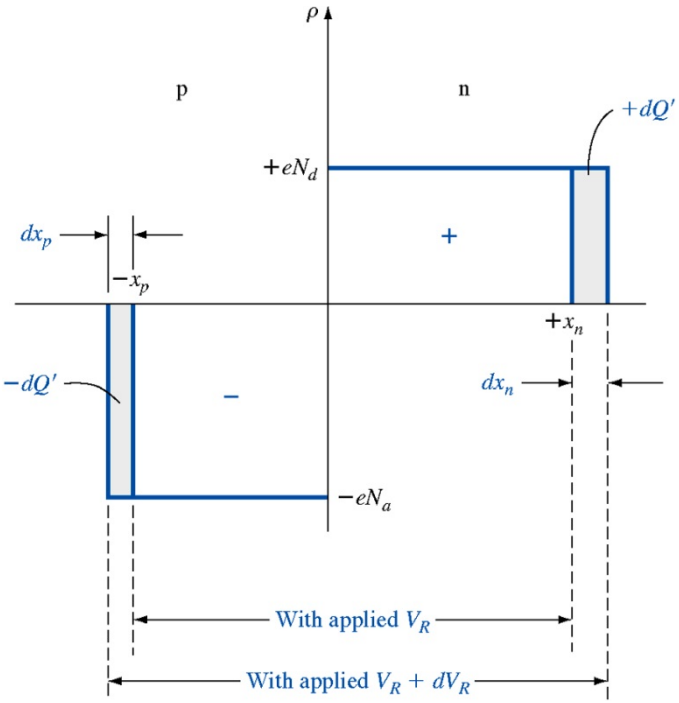


# Capacité de transition ou de jonction

Elle est simplement associée à la charge Q contenue dans la ZCE

$$|Q| = eAN_A W_P = eAN_D W_N$$

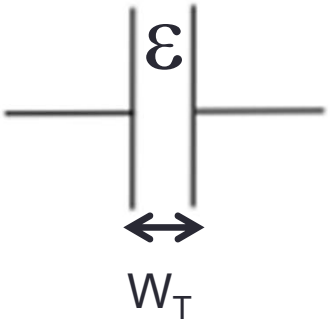
$$C_T = \left|\frac{dQ'}{dV}\right|$$




$$W_p(V_d + V_A) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{sc}}{e}\frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)}(V_d - V_A)}$$

Soit:

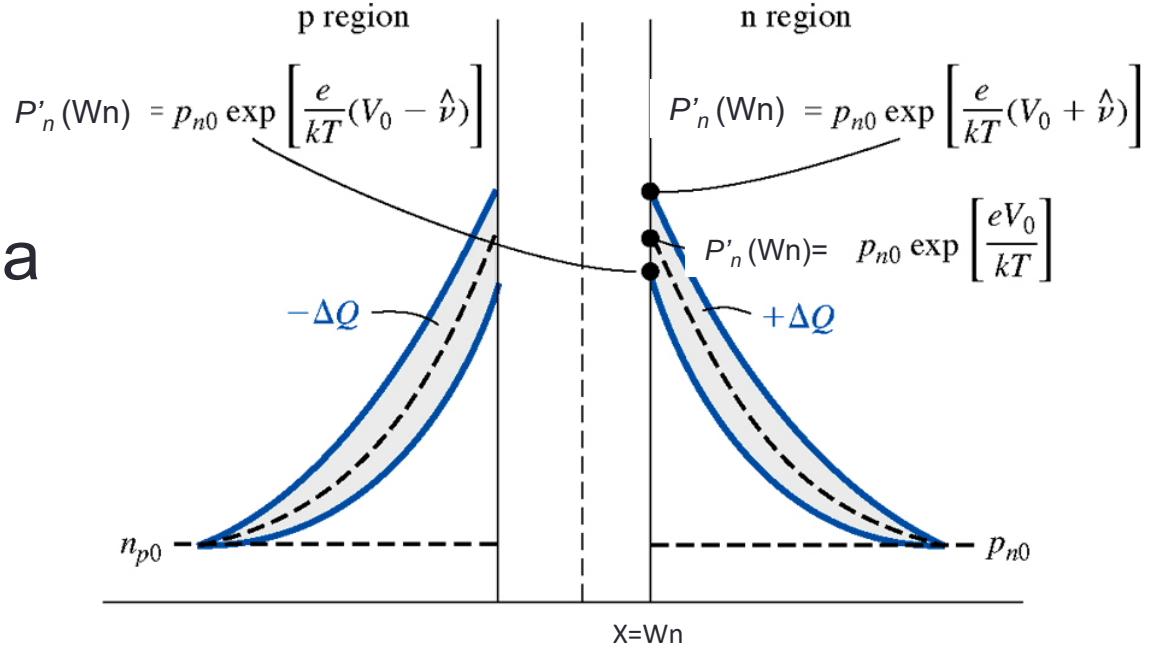
$$C_T = \frac{A}{2}\sqrt{\frac{2e\varepsilon}{(V_{bi} - V_A)}\frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)}} = \frac{A\varepsilon}{W_T}$$



# Capacité de diffusion ou de stockage

$$v(t) = V_0 + \hat{v}\sin(\omega t)$$

- Traduit le retard entre la tension et le courant
- Associée aux charges injectées dans les régions neutres:




$$Q_{Sp} = A\int_{W_N}^{X_C} e(p'(x) - p_{n0})dx$$

Densité de trous excédentaires dans la région neutre N

$$Q_{Sp} = \tau_p J_p(Wn)$$

$$Q_{Sp} = e(p'(W_n) - p_{n0})L_P\left[\coth\left(\frac{d_n}{L_P}\right) - \frac{1}{sh\left(\frac{d_n}{L_P}\right)}\right]$$

## *Capacité de diffusion ou de stockage*

- *L'expression précédente peut se mettre sous la forme:*

$$Q_{Sp} = \tau_{(p)} J_P(W_N) \qquad \text{avec} \qquad \tau_{(p)} = \tau_P \left( 1 - \frac{1}{ch(\frac{d_n}{L_P})} \right)$$

- L'expression du temps peut être simplifiée en fonction de la « géométrie » de la diode:
  - *Diode courte*: $\tau_{(p)} = \tau_t = \frac{d_n^2}{2D_P}$ ⇔ temps de transit
  - *Diode longue* : $\tau_{(p)} = \tau_P$ ⇔ durée de vie

# Capacité de diffusion ou de stockage

- Cette étude dans la région N est valable dans la région P, et en final on obtient:

$$Q_S = Q_{Sn} + Q_{Sp} = \tau_{(n)} J_n(-W_P) + \tau_{(p)} J_p(W_N)$$

Soit à partir de : $C_S = \dfrac{dQ_S}{dV}$

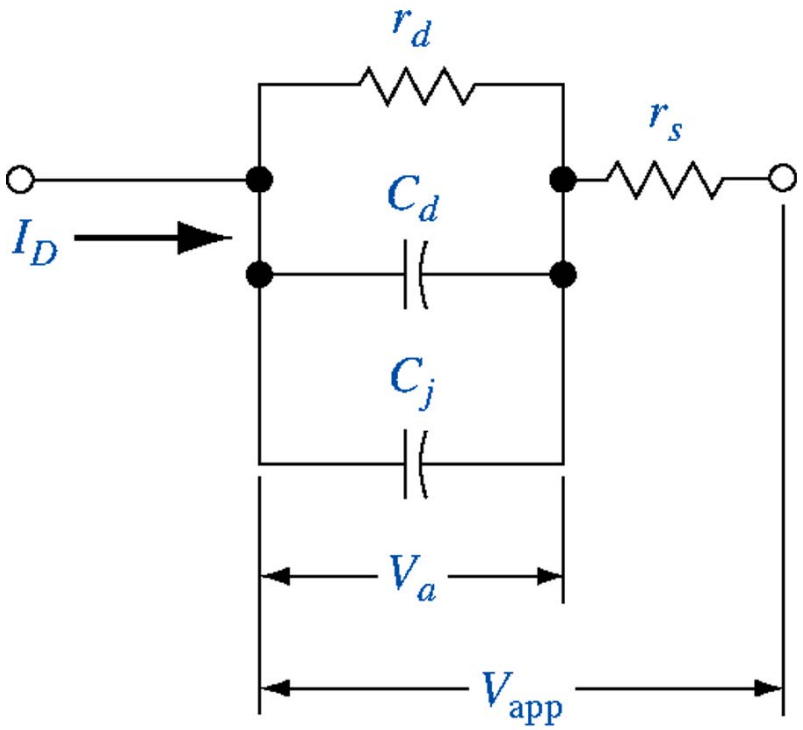
$$C_S = C_{Sn} + C_{Sp} = \frac{e}{kT} K(\tau_{(n)} I_n + \tau_{(p)} I_p)$$

Facteur qui dépend de la géométrie

(2/3 ⇔ courte)

(1/2 ⇔ longue)

# Schéma équivalent jonction pn




résistance dynamique:

$$r_d = \frac{dV}{dI} = \frac{kT}{e}\frac{1}{I}$$

capacité de diffusion (en direct):

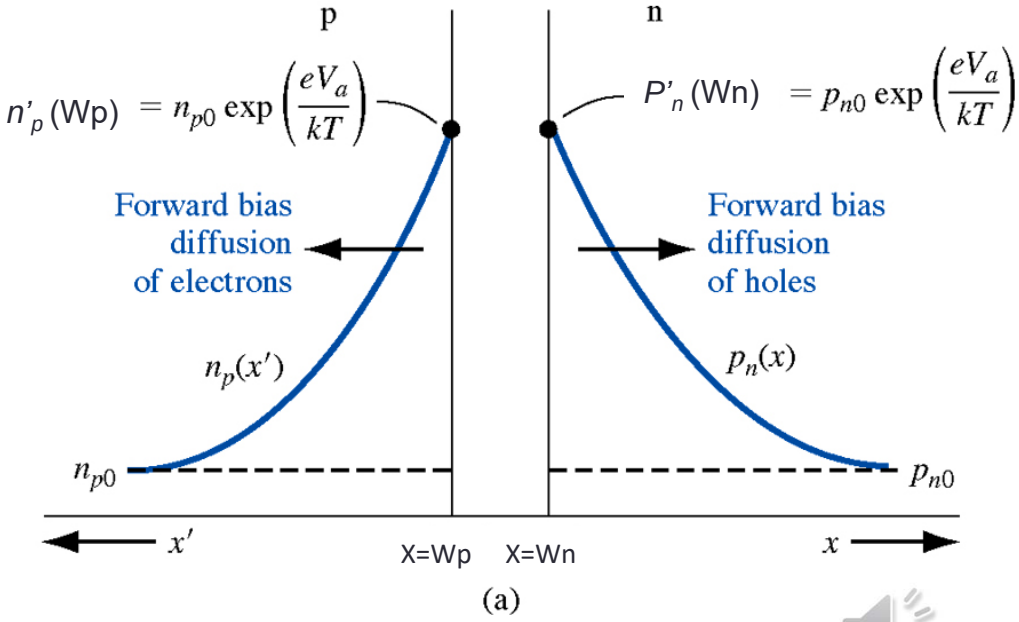
$$C_d = C_S = C_{Sn} + C_{Sp} = \frac{e}{kT} K(\tau_{(n)} I_n + \tau_{(p)} I_p)$$

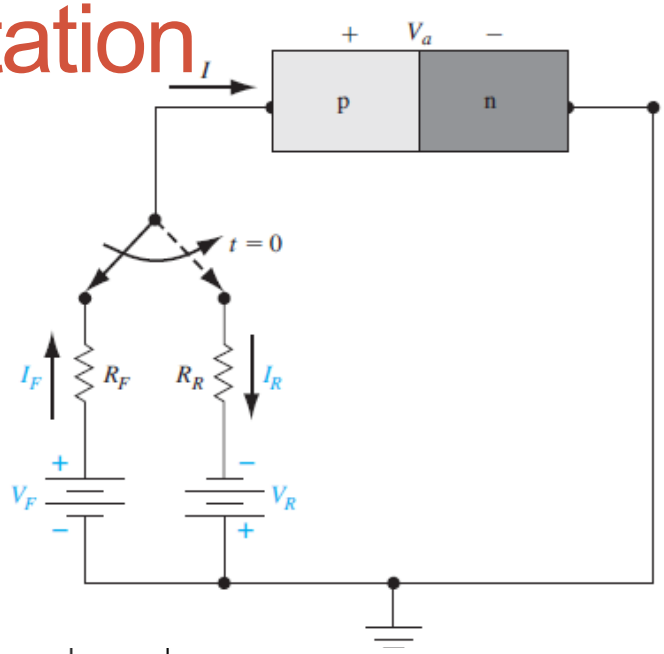
capacité de jonction ( essentiellement en inverse):

$$C_T = C_J = \frac{A}{2}\sqrt{\frac{2e\varepsilon}{(V_{bi} - V_A)}\frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)}} = \frac{A\varepsilon}{W_T}$$

$r_S$ résistance série

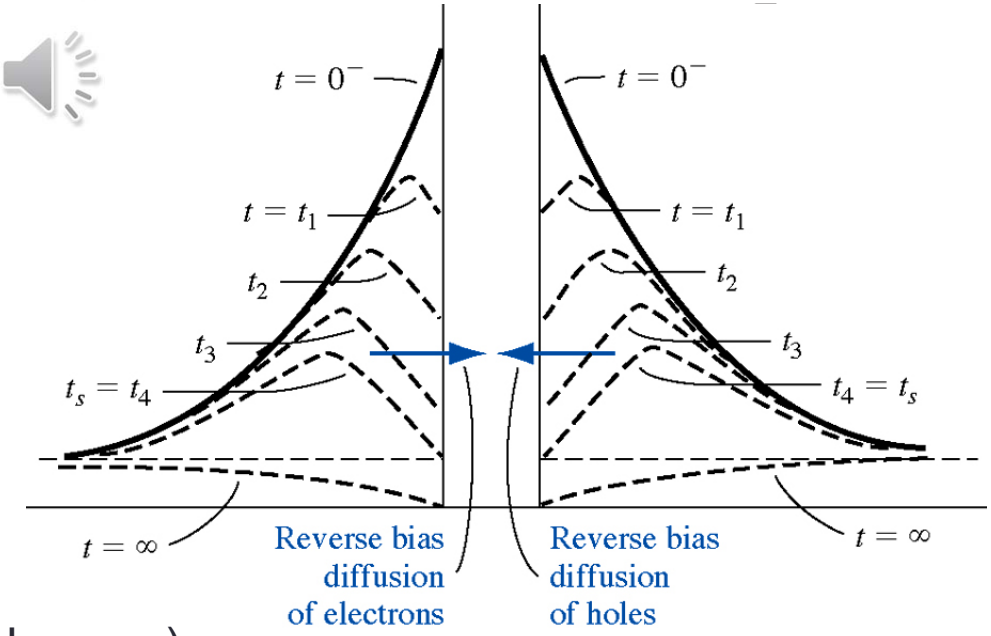
# Jonction PN en commutation



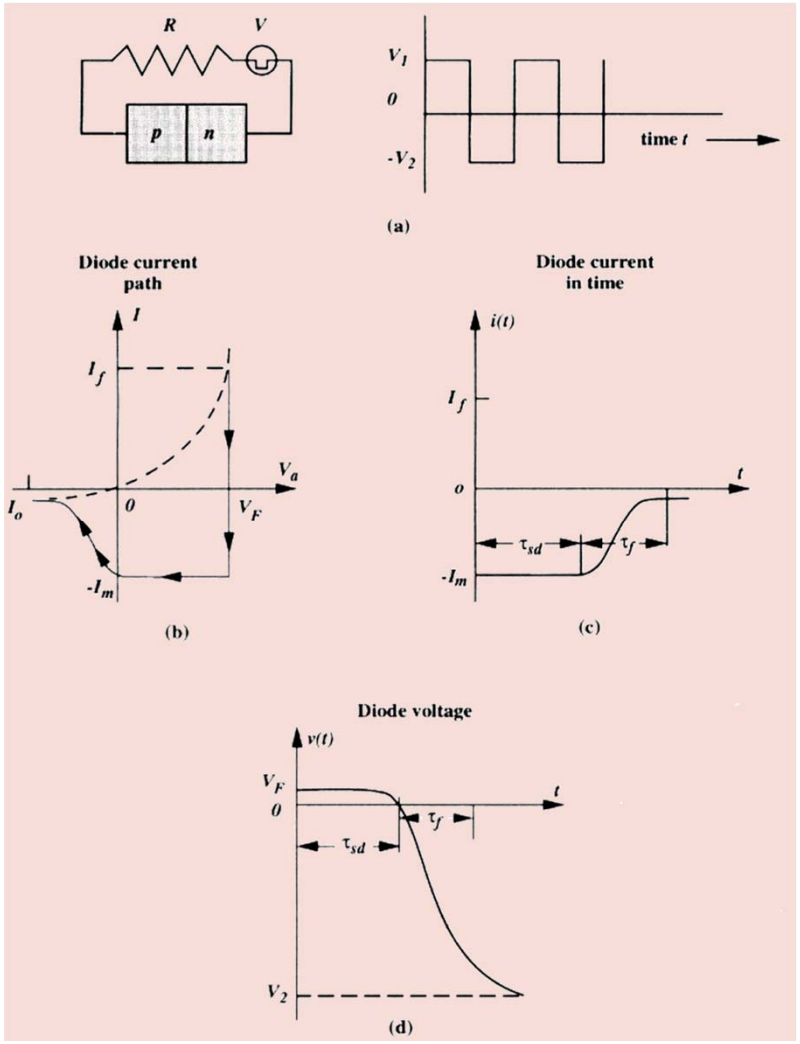

$$V_a(t) = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{p_n'(W_n,t)}{p_{n0}}\right)$$

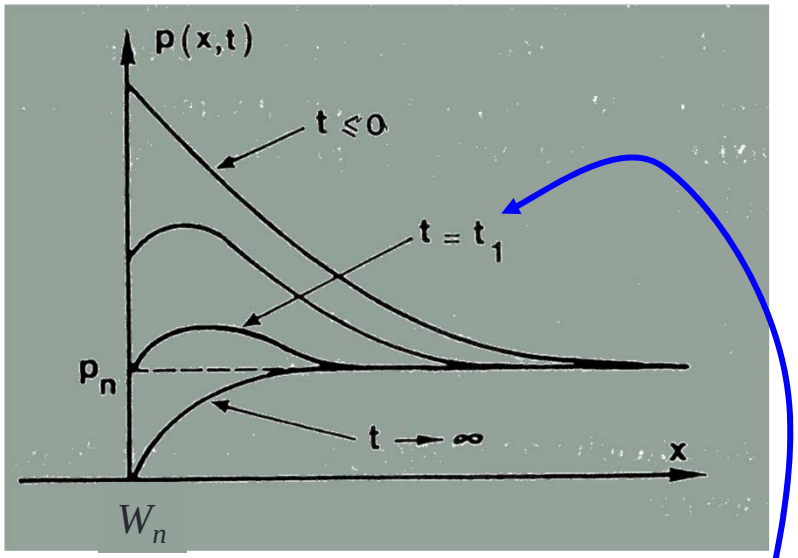
$V_a(t) > 0$ pour $t \le t_4 = t_s$




(D'après Neamen)

# Jonction PN en commutation




Tant que l'excédent de trous en $W_n$ est positif

⇔ Diode polarisée en direct

$$p'_n - p_n = p_n e^{\frac{eV_a}{kT}}$$

$\tau_{sd}$ ⇔ Temps de stockage *ie* $p'(W_N) = p_n$

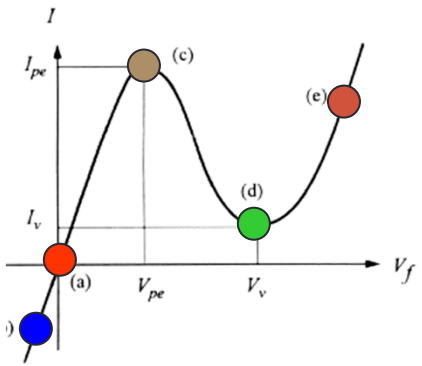
# Jonction PN en commutation

- Problème majeur dans les composants à porteurs minoritaires:
  - Suivant que la diode est longue ou courte , le temps total (stockage + montée) s'écrira:

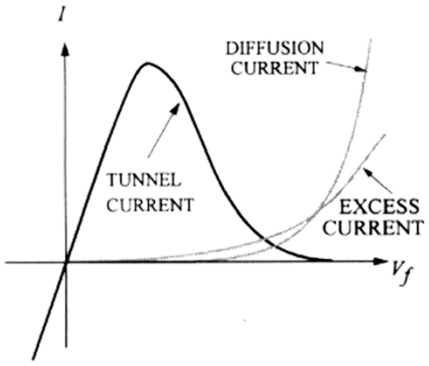
$$\tau_r = \frac{J_d}{J_i}\frac{d_n^2}{2D_p} \qquad pour \;\; d_n << L_p$$

$$\tau_r = \frac{J_d}{J_i}\tau_p \qquad pour \;\; d_n >> L_p$$

# Diode Tunnel – diode Backward

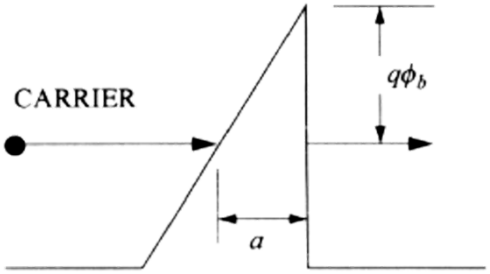



(a)

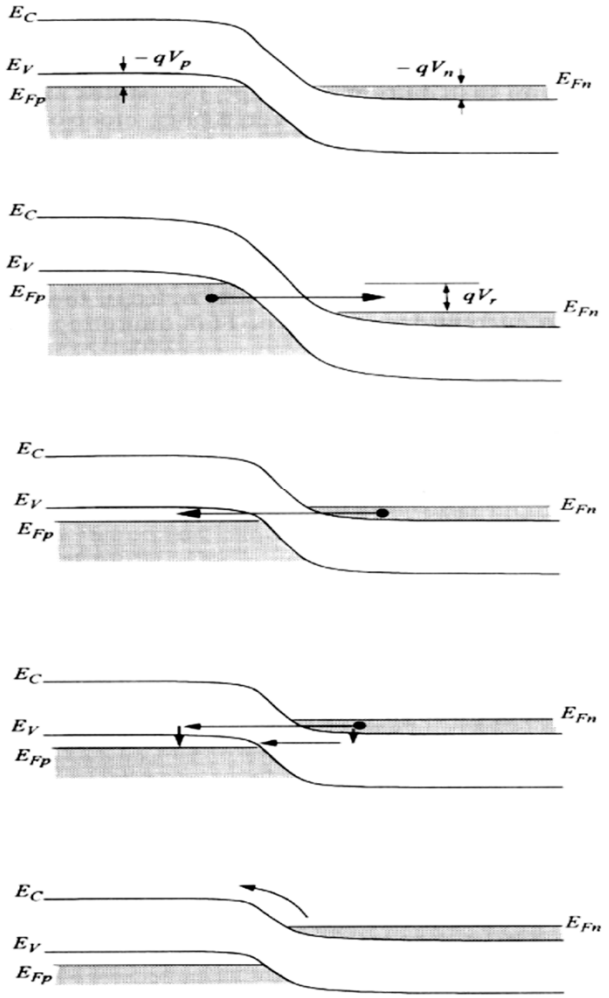



(b)

$$I_t = I_{pe}\left(\frac{V_a}{V_{pe}}\right)\exp\left(1-\frac{V_a}{V_{pe}}\right)$$




$$T_t \approx \exp\left(-\frac{4a\sqrt{2m^* e\phi_b}}{3\hbar}\right)$$




(a)

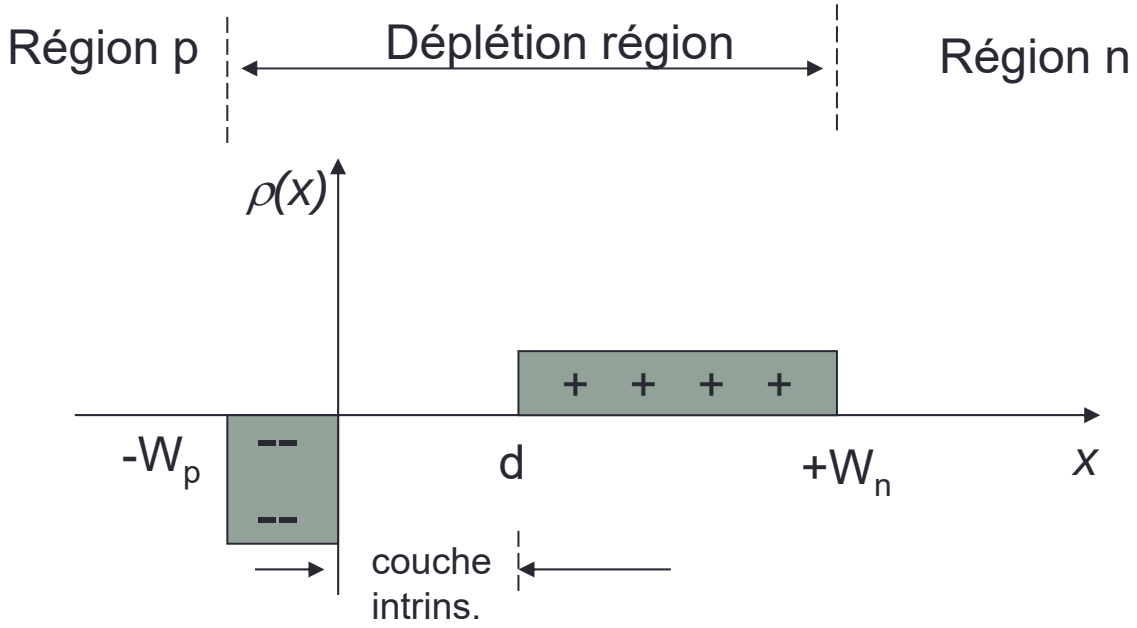
(b)

(c)

(d)

# Diodes PIN

- Dispos VLSI modernes ⇔ très fort champ électrique
- Pb d'avalanche et effet de porteurs chauds
- Solutions:
  - Réduction du champ par augmentation de la ZCE
  - Incorporation d'une couche « non dopée » dite intrinsèque d'où le nom !



# Diodes PIN

champ max ( dans la zone intrinsèque)

$$E_m = -\frac{eN_A x_p}{\varepsilon_{Si}} = -\frac{eN_D (x_n - d)}{\varepsilon_{Si}}$$

Tension de diffusion ("built in potential")

$$V_{bi} = \frac{|E_m|}{2}(x_p + x_n + d) = \frac{|E_m|}{2}(W_d + d)$$

largeur de la ZCE

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{e}\frac{(N_A + N_D)}{N_A N_D}V_{bi} + d^2} = \sqrt{W_{d0}^2 + d^2}$$

capacité

$$\frac{C_T}{C_{T0}} = \frac{W_{d0}}{W_d} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d^2}{W_{d0}^2}}}$$

champ électrique

$$\frac{E_m}{E_{m0}} = \frac{W_d}{W_d + W_{d0}} = \sqrt{1 + \frac{d^2}{W_{d0}^2}} - \frac{d}{W_{d0}}$$