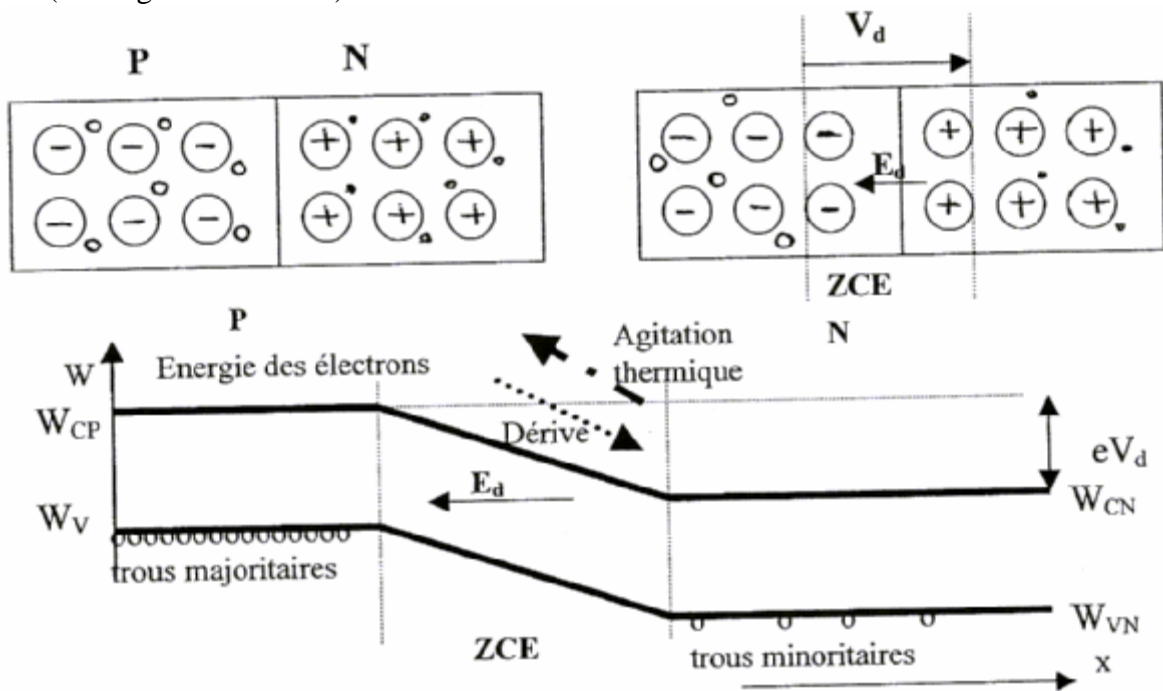


Chapitre 2 : Jonction P-N et diodes

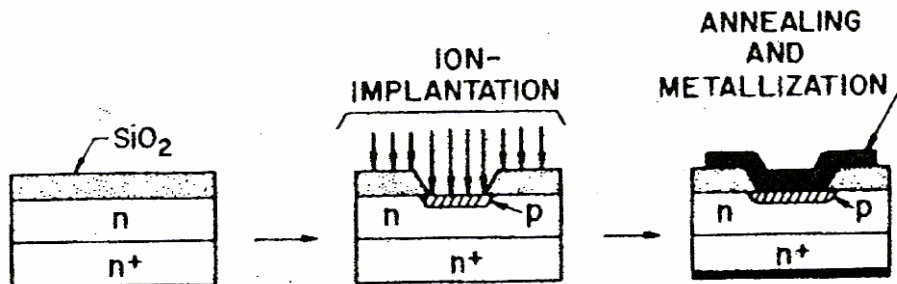
1. Description de la jonction P-N

1.1 Phénomènes physiques à l'établissement de la jonction (pas de tension de polarisation, équilibre thermodynamique)

- Il existe un gradient de concentration à la jonction → les porteurs majoritaires d'une région diffusent vers la région où ils sont en plus faible concentration → au voisinage de la jonction on a apparition d'une zone de déplétion (pas de porteurs libres) correspond à une zone de charge d'espace (ZCE).
- Il existe un champ électrique E_d dans la ZCE qui s'oppose au passage des porteurs majoritaires mais favorise la diffusion des minoritaires. A l'équilibre le courant des porteurs minoritaires est compensé par le courant des majoritaires.
- Il apparaît donc une d.d.p. V_d dite tension de diffusion entre les deux frontières de la ZCE. (voir figure ci-dessous)



1.2. Technologie de fabrication (Technologie planaire ou planar)



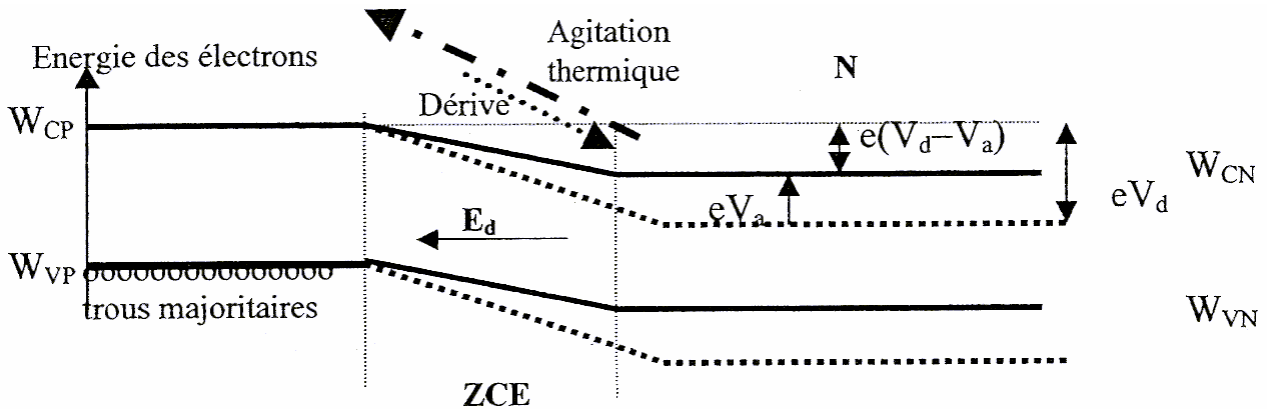
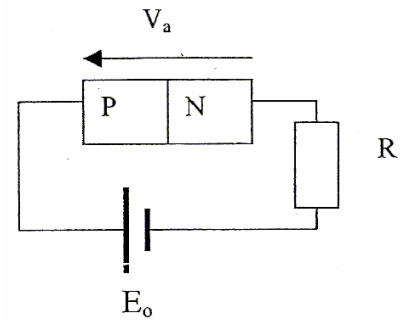
Le passage du type P au type N peut être :

- abrupt (passage brutal)
- progressif mais restant limité à une très faible épaisseur.

1.3. Polarisation de la diode, description phénoménologique

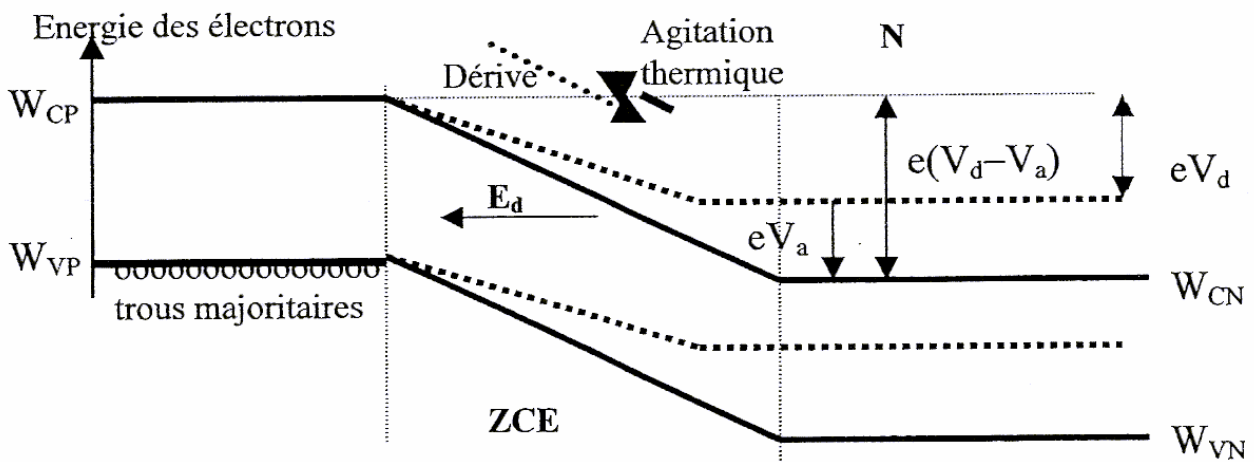
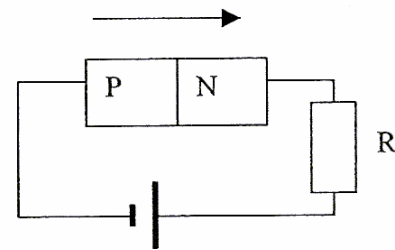
Polarisation directe (d.d.p. V_a)

- Région N est à un potentiel $-V_a$ par rapport à la région P d'ou le diagramme de bande ci-dessous
- La barrière de potentiel pour les porteurs majoritaires est plus faible (égale à $e(V_d - V_a)$), il en résulte un fort courant de trous majoritaires (dû à la *diffusion*).
- Le courant de trous minoritaires reste inchangé.
- On a diminution de la largeur de la ZCE.



Polarisation inverse

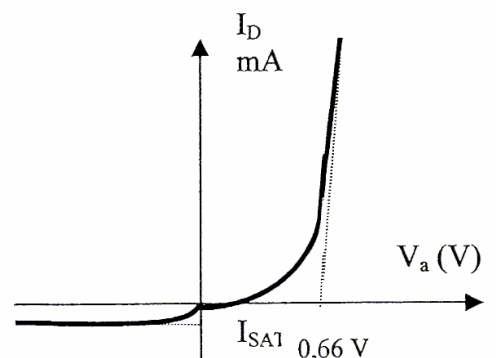
- région N est à un potentiel $+V_a$ par rapport à la région P d'où le diagramme ci-dessous
- La barrière de potentiel est plus haute, elle empêche le passage de tous les trous majoritaires
- le courant de trous minoritaires reste inchangé
- On a augmentation de la largeur de la ZCE



Caractéristique courant-tension

Forme générale

- I_{SAT} est le courant inverse de minoritaires
- en direct, le courant qui traverse la jonction varie exponentiellement avec V_a



Mise en équation rapide

Exemple: courant d'électrons avec 2 passages de P→N ($I_{P \rightarrow N}$) et de N→P ($I_{N \rightarrow P}$). On montre que

$$I_{P \rightarrow N} \sim \underbrace{F(W_{FP})}_{\text{places occupées}} \underbrace{\{1-F(W_{FN})\}}_{\text{places libres}}, \text{ de même } I_{N \rightarrow P} \sim \underbrace{F(W_{FN})}_{\text{places occupées}} \underbrace{\{1-F(W_{FP})\}}_{\text{places libres}},$$

places occupées places libres places occupées places libres

Pas de polarisation

Alors $W_{FN}=W_{FP}=W_{F0}$ car courant d'électrons I_n nul. On définit $I_{SAT,n}= I_{N \rightarrow P}$

Polarisation Va

- i) $I_{P \rightarrow N}$ inchangé
- ii) $W_{FN}=W_{F0} + eVa \Rightarrow I_{N \rightarrow P} = I_{SAT,n} [\exp(e Va / k_B T) - 1]$
- iii) Expression du courant de diode (courant électrons + trous) :

$$I_D = I_{SAT} \left[\exp\left(\frac{eVa}{k_B T}\right) - 1 \right] \text{ avec } I_{SAT} = I_{SAT,n} + I_{SAT,p}$$

2. **Modèle physique de la jonction à l'équilibre et en polarisation**

2.1. Pas de polarisation

Concentrations de porteurs

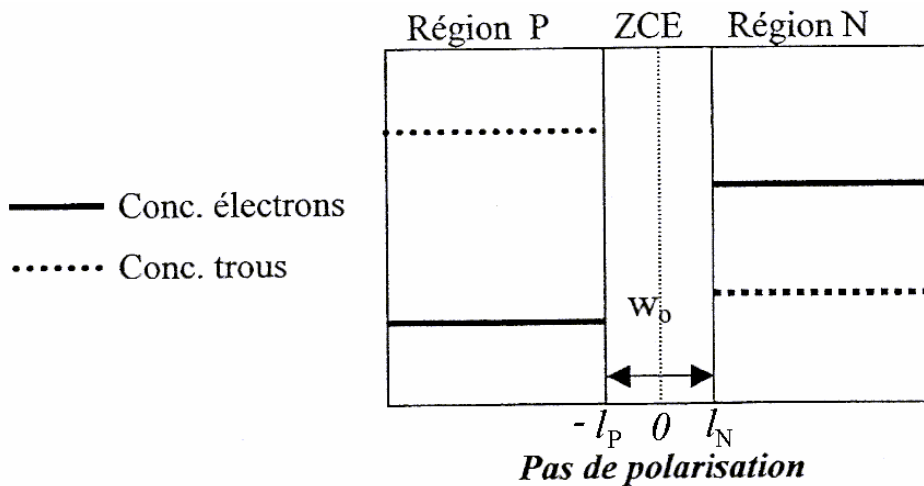
- Dans les zones neutres

Pour la zone N : $n_{n0} = N_D$ et $n_i^2 = p_{n0} N_D$ (indice 0 indique que l'on est à l'équilibre)

Pour la zone P : $p_{p0} = N_A$ et $n_i^2 = n_{p0} N_A$

- Dans la zone de transition (ZCE):

Pour les « majos » injectés existe un gradient de concentration :



Pas de polarisation

Étude de la ZCE.: Champ électrique et potentiel, potentiel de diffusion (cas d'une jonction abrupte, voir TDI)

- Le champ électrique et la charge sont liés par l'équation de Poisson: $\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon$
- Le champ dérive du potentiel $\mathbf{E} = \mathbf{grad } V$
- Le problème que l'on traite est un problème 1D ($E(x)$)

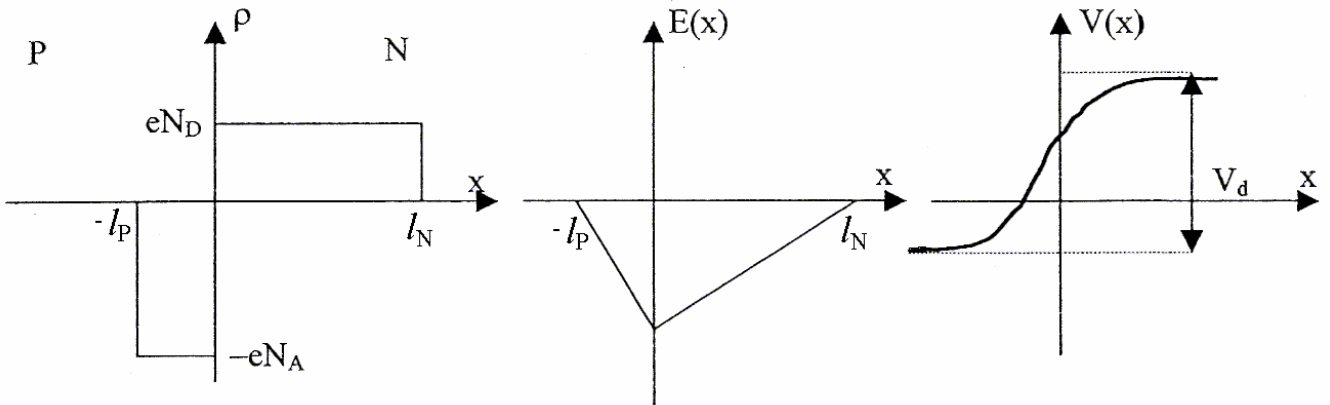
Calcul du champ:

- dans la ZCE coté P on a $E_P = - (eN_A/\epsilon) \cdot x + Cte$ et à la limite $x = -l_P$ le champ est nul, donc $E_P = - (eN_A/\epsilon) \cdot (x + l_P)$
- Il existe une relation semblable pour le champ E_N dans la ZCE cote N : $E_N = (eN_D/\epsilon) \cdot (x - l_N)$
- A la jonction en $x = 0$ ces deux champs sont égaux donc $N_A l_P = N_D l_N$: de chaque coté la largeur de la ZCE est inversement proportionnelle à la concentration d'impuretés.

Calcul du potentiel V_d :

- Les potentiels V_N et V_P se déduisent des expressions des champs. Ainsi pour la ZCE coté P on peut écrire : $V(x) = V_P + (eN_A/2\epsilon) (x + l_P)^2$, équation valable pour $-l_P < x < 0$
- On procède de même du coté N et l'on écrit l'égalité des deux potentiels à la jonction, d'où

l'expression du potentiel de diffusion V_d : $V_d = \frac{e}{2\epsilon} (N_D l_N^2 + N_A l_P^2)$ (Eq. 3c)



Calcul de la largeur w_0 de la ZCE

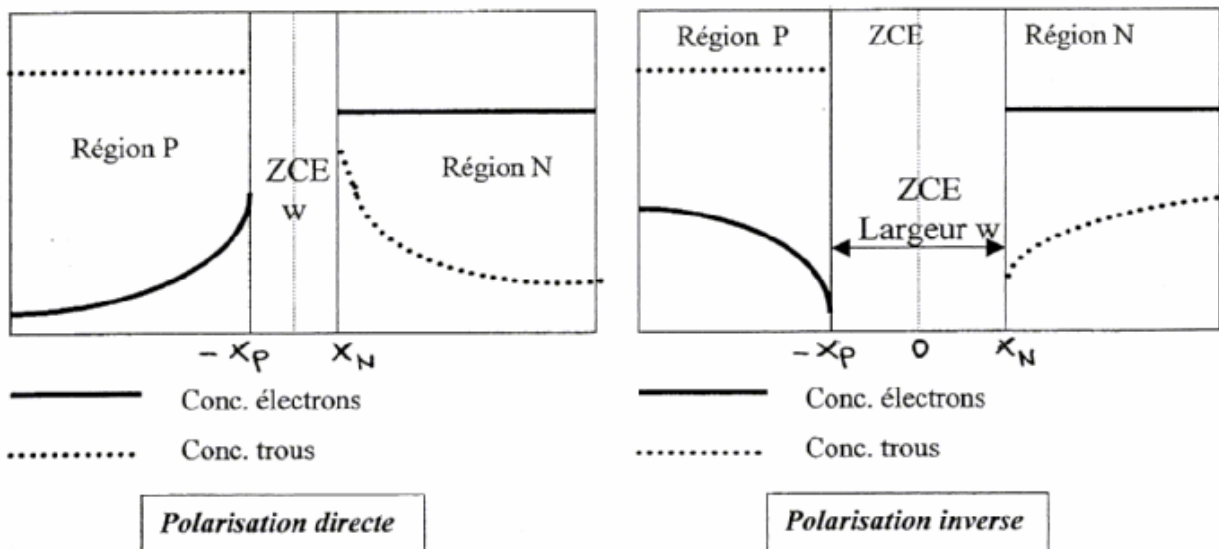
- comme $N_A l_P = N_D l_N$ nous pouvons utiliser l'Eq.3c pour montrer que:

$$w_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon}{e} V_d \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$
 Eq. 3d

2.2. Étude de la jonction polarisée (régime statique)

Concentrations de porteurs

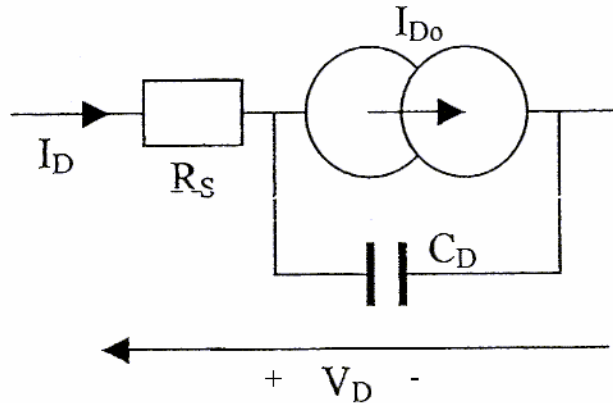
- La *d.d.p.* appliquée étant essentiellement prise en compte dans la ZCE et les concentrations des porteurs ne changent pas loin de la ZCE.
- Les porteurs majoritaires d'une région envoyés vers l'autre région (porteurs injectés) deviennent dans cette région des porteurs de type minoritaire
- A proximité de la ZCE (en dehors de la ZCE) les concentrations des porteurs majoritaires (pour une région) peuvent être considérées comme constantes alors que les concentrations des porteurs minoritaires varient beaucoup. Il existe donc des *gradients de concentration* dans les régions N et P (en dehors de la ZCE) et pratiquement pas de chute de potentiel.



3. Les modèles SPICE

3.1. Modèle grands signaux

- Schéma équivalent « grands signaux »



- Source de courant
 $I_{D0} = I_S [\exp(eV_a/nk_B T) - 1]$ ou n (0.5-2) est un facteur de correction et $I_S = I_{SAT}$.
- Résistance série R_S :
 R_S résistance des régions N et P (hors ZCE)
- La capacité C_D
 - Charges *mobiles* stockées dans la diode et capacité C_t

les porteurs injectés dans les 2 régions neutres constituent des charges stockées Q_{tp} et Q_{tn}

On montre que: $Q_t = \tau_t I_D(V_a) \sim [\exp(eV_a/nk_B T) - 1]$ ou τ_t est le temps de transit (~ le temps nécessaire pour « stocker » ou « restituer » les charges mobiles).

- Charge d'espace (charges fixes et capacité de jonction)

De chaque cote de la jonction dans la ZCE on a une charge (en valeur absolue) $Q_j = A_j e x_P N_A = A_j e x_N N_D$ (ou A_j est la surface de la section de la jonction)

On obtient (voir TD1) :
$$C_j = \frac{C_j(0)}{\sqrt{1 - V_a/V_d}} = \frac{eA_j}{x_N}$$

$C_j(0)$ est la capacité de jonction à tension appliquée nulle.

- Capacité totale

Tout se passe comme si on avait deux capacités en parallèle et $C_D = C_t + C_j$

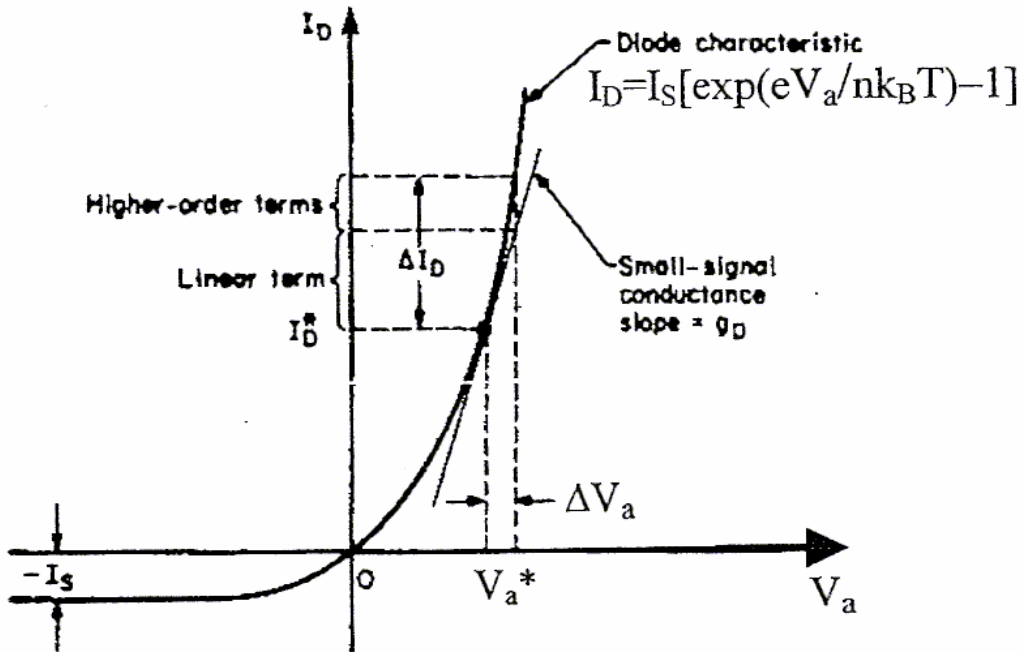
- Remarques finales

Nous avons deux types de charges Q_t et Q_j dont l'importance relative dépend de la tension de polarisation :

- Polarisation inverse et faible tension directe : la charge d'espace Q_j est la plus grande et elle varie en $\sqrt{V_j}$ (Application: diodes à capacité variable: réglage de la fréquence d'oscillateurs)
- En polarisation directe c'est la charge Q_t stockée dans les régions neutres qui est la plus grande

3.2. Le modèle « petits signaux » de PSPICE

Soit $V_a = V_a^* + \Delta V_a$ avec $\Delta V_a \ll V_a^*$ on peut définir une conductance dynamique : $g_D = \left. \frac{dI_D}{dV_a} \right]_{op}$



A basses fréquences on a en tenant compte du facteur de correction n:

$$I_D = I_S [\exp(eV_a/nk_B T) - 1]$$

On peut remplacer V_a par sa valeur $V_a^* + \Delta V_a$ et effectuer un développement de Taylor autour de V_a^* qui limité au premier ordre donne:

$$I_D = I_D(V_a^*) + [dI_D/dV_a] \Delta V_a = I_S [\exp(eV_a^*/nk_B T) - 1] + g_D \Delta V_a \text{ avec } g_D = \frac{eI_S}{nk_B T} \exp\left(\frac{eV_a^*}{nk_B T}\right)$$

Le premier terme correspond au courant statique I_D^* et le deuxième terme fait intervenir la conductance dynamique.

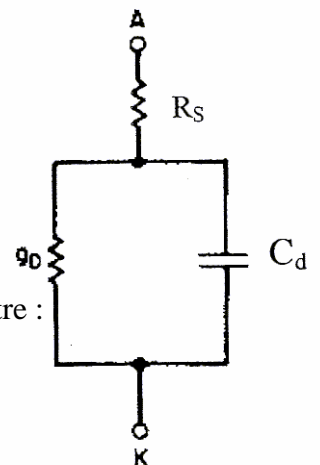
La charge totale $Q_D = Q_t + Q_j$ fluctue et l'on peut donc définir des capacités dynamiques :

$$C_t = \left. \frac{dQ_t}{dV_a} \right]_{op}$$

$$C_j = \left. \frac{dQ_j}{dV_a} \right]_{op}$$

calculées au point de fonctionnement statique.

Le modèle équivalent « petits signaux » de la diode est donné sur la figure ci-contre :



4. Applications des diodes

Voir TD2