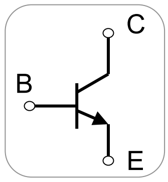
Transistor bipolaire

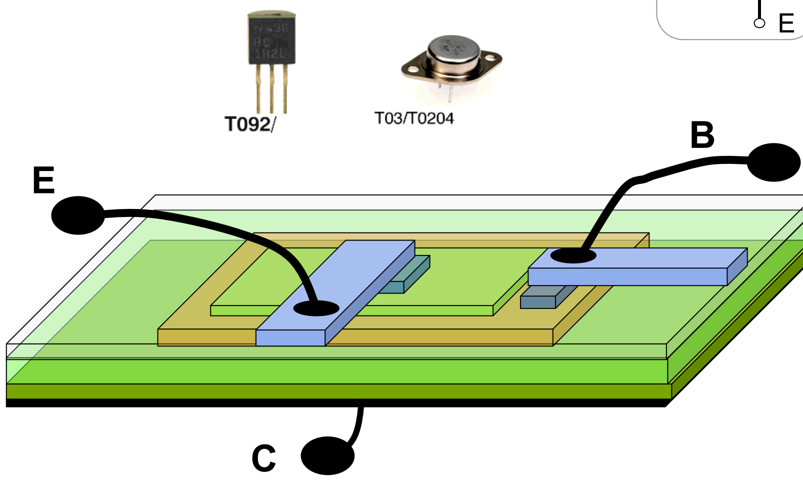
découvert en 1947 par Brattain, Bardeen et Shockley;
ils obtinrent le prix Nobel pour cette invention en 1956.

Transistor bipolaire

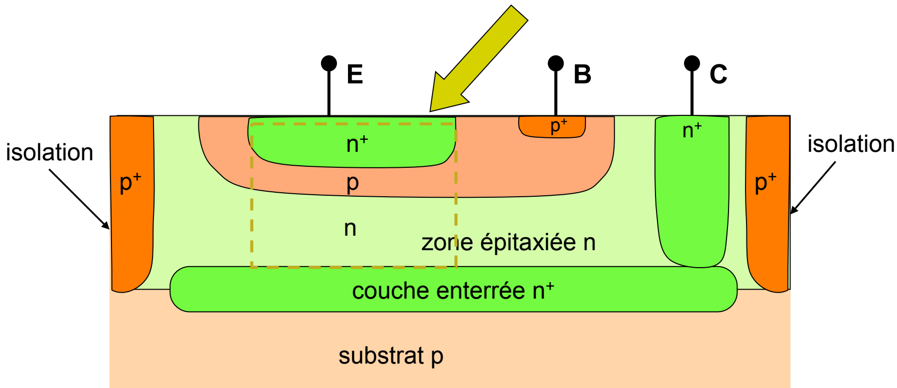
- structure et principe
- régime actif
- régime inverse
- régime saturé
- écarts par rapport à l'idéal (effet Early, température…)
- comportement dynamique
- applications

fabrication du transistor



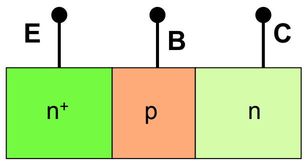


structure

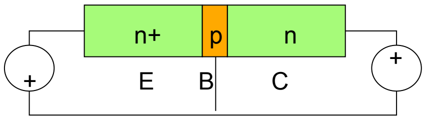


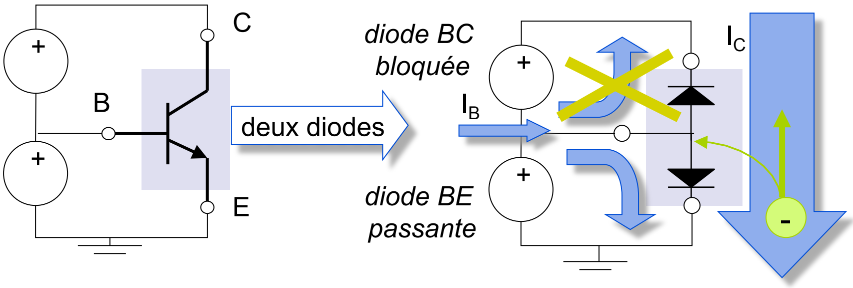
structure idéalisée :

transistor
« intrinsèque »



régime actif

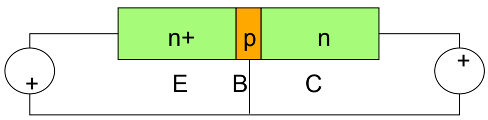




I_B = courant de base :
commandé par la diode BE

I_C = courant de collecteur :
« aspire » le courant d'émetteur (si W_B courte)

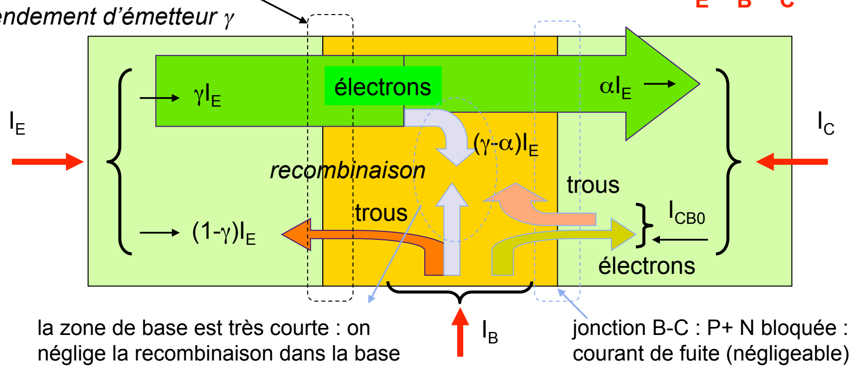
les différents courants



jonction B-E : N+ P passante

rendement d'émetteur γ

$I_E+I_B+I_C = 0$



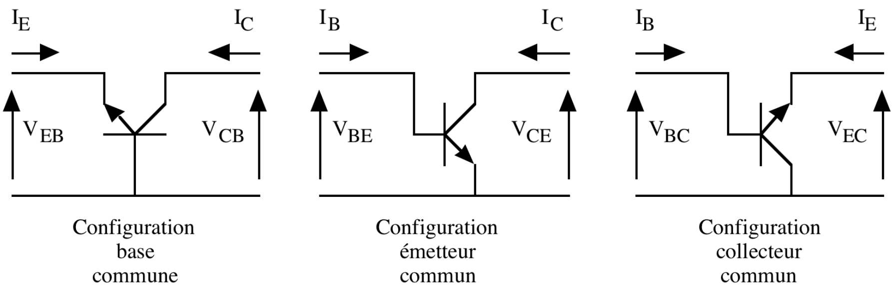
la zone de base est très courte : on néglige la recombinaison dans la base

jonction B-C : P+ N bloquée : courant de fuite (négligeable)

configurations et caractéristiques

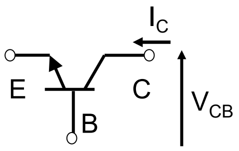
Transistor : quadripôle à deux accès

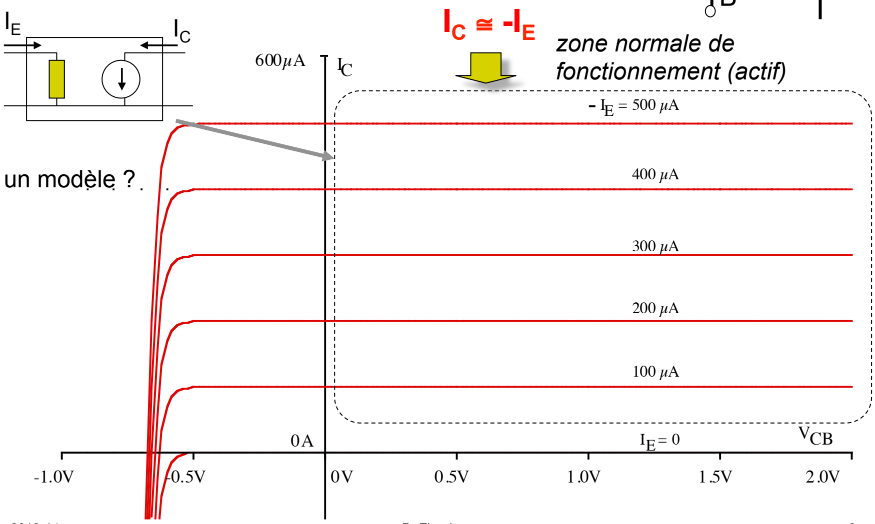
Borne de référence commune à l'entrée et à la sortie



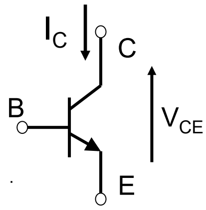
Convention de signe : courants positifs entrants !

caractéristiques de sortie en base commune





caractéristiques de sortie en émetteur commun

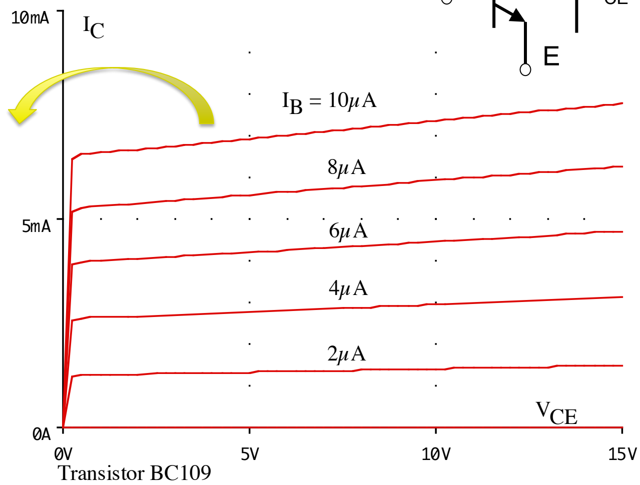


Régime actif:

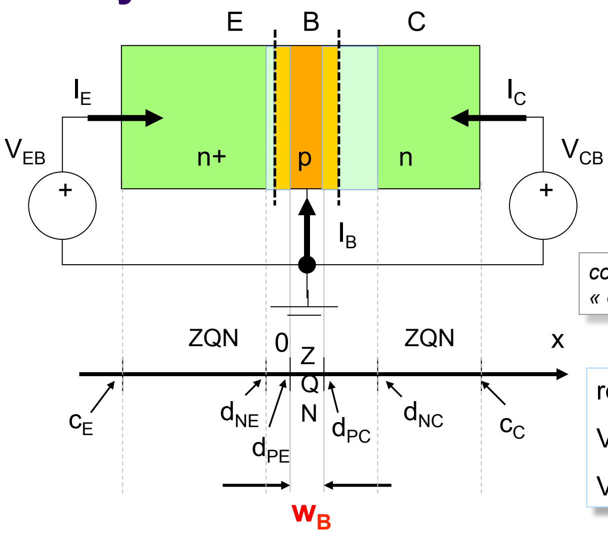
$I_C \approx I_B \, . \, \beta_F$

$\beta_F \approx 100$

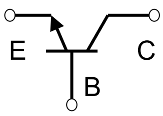
Gain « forward » (sens direct) en émetteur commun



analyse du fonctionnement



Largeur de base neutre (< 1 µm)



CAUTION

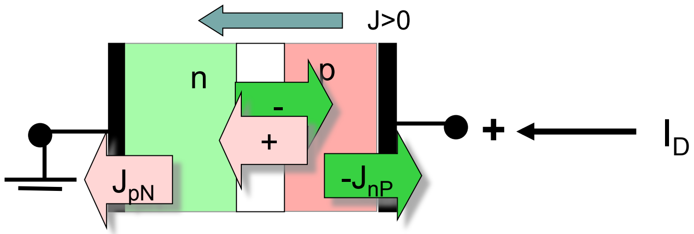
conventions de signe : courants « entrant » dans le dispositif

régime actif :

$V_{BE} = -V_{EB} \cong 0.7\ V > 0$

$V_{CB} = $ qqs volts > 0

rappel : diode



Diode courte : la recombinaison est négligeable.

$$I_D = A\,(J_{pN} + J_{nP})$$

⇒ on calcule tout à partir des minoritaires, en considérant les excédents de porteurs (n' et p')

I_s : fonction de W ou L selon le temps de vie et les dimensions

2013-14 D. Flandre 11

jonctions base-émetteur passante et base-collecteur bloquée

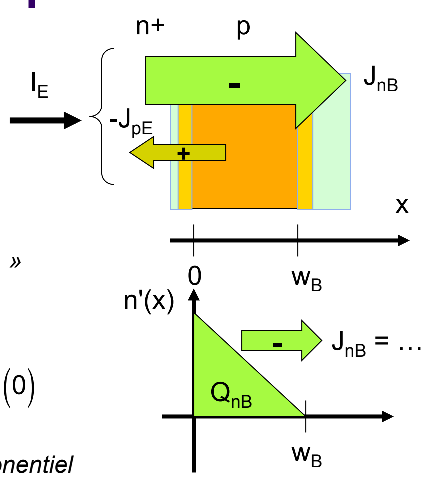
hypothèse : pas de recombinaison dans la base

$$n_B'(0) = n_{0B}\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right] \cong n_{0B}\,e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}}$$

diode B-E passante : terme « -1 » négligeable

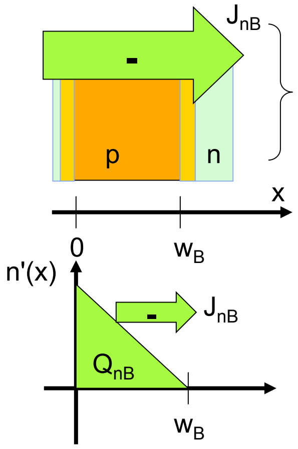
$$n_B'(w_B) = n_{0B}\left[e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right] \cong -n_{0B} \ll n_B'(0)$$

diode B-C bloquée : terme exponentiel négligeable



2013-14 D. Flandre 12

calcul du courant de collecteur



$$I_C = - A \,.\, J_{nB}$$

$$J_{nB} = q.\mu_n.\phi_T.\frac{dn'}{dx}$$ pente de la concentration de charge

effet de la « diffusion » du profil de charges

cas particulier : profil de dopage homogène

$$- \quad J_{nB} = q\,\mu_n\,\phi_T\,\frac{n_{P0}}{w_B}\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$

cas général: profil quelconque

$$I_C = - \quad A\,J_{nB} = \frac{Q_{nB0}}{\tau_T}\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$

2013-14 D. Flandre 13

calcul du courant d' émetteur

$$I_E = A\left(J_{nB} + J_{pE}\right) = A\,J_{nB}\left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right)$$

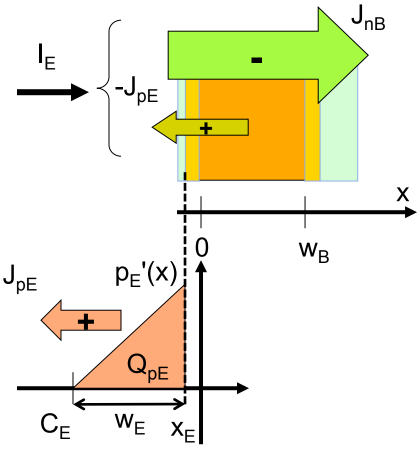
$$I_B = -A.J_{pE}$$

$$J_{pE} = -q.\mu_{pE}.\phi_T.\frac{dp_E'}{dx}$$

$$p_E(x_E) = p_{E0}.e^{V_{BE}/\phi_T}$$

$$J_{pE} = -\frac{q.\mu_{pE}.\phi_T.p_{oE}}{w_E}.\left(e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right)$$

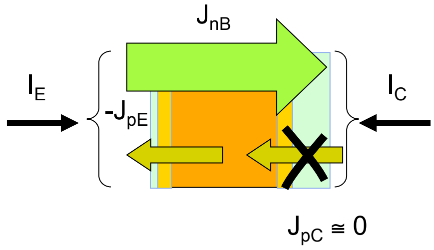
$$\beta_F = \frac{J_{nB}}{J_{pE}} = \frac{\mu_{nB}.w_E.N_{DE}}{\mu_{pE}.w_B.N_{AB}}$$



2013-14 D. Flandre 14

seuls les électrons arrivent au collecteur

$$I_C = -A\,J_{nB} = I_s\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$



ce courant de fuite I_S correspond uniquement au courant d'électrons J_{nB} : il est mesurable (sépare électrons et trous)

$$\Rightarrow J_{nB} = \frac{-I_s}{A}\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$

$$I_s = A\,q\,\mu_n\,\phi_T\,\frac{n_{P0}}{W_B}$$

$$J_{pE} = \frac{1}{\beta_F}\frac{I_s}{A}\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$

c'est I_C/I_s qui correspond à V_{EB}, et non I_B/I_s !

jonction base-collecteur bloquée

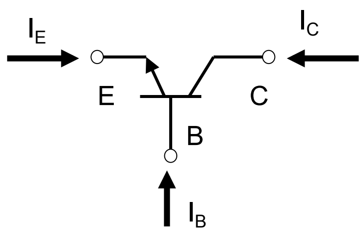
courant collecteur : uniquement électrons qui ont traversé la base $\Rightarrow$ **courant de transport I_F** :

$$I_C = -A\,J_{nB} = I_F = I_s\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right]$$

$$\Rightarrow I_E = A\left(J_{nB} + J_{pE}\right) = -I_F\left(1 + \frac{1}{\beta_F}\right)$$

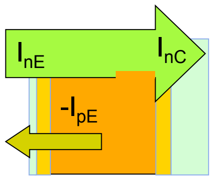
courant de base par Kirchoff :

$$I_B = -\left(I_E + I_C\right) = \frac{I_F}{\beta_F}$$



$$\text{avec}\quad \beta_F = \frac{J_{nB}}{J_{pE}}$$

Interprétation



Rendement d'émetteur (en direct) $\gamma_F = \left.\dfrac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}}\right|_{V_{BC}=0}$

$$\gamma_F \cong \frac{1}{1+\dfrac{D_{pE}\, p_{oE}\, L_{nB}}{D_{nB}\, n_{oB}\, w_E}\dfrac{w_B}{L_{nB}}} = \frac{1}{1+\dfrac{\mu_{pE}\, p_{oE}\, w_B}{\mu_{nB}\, n_{oB}\, w_E}}$$

$$n_{oE} \cong N_{DE} \gg N_{AB} \cong p_{oB} \quad \text{implique} \quad \frac{n_i^2}{n_{oE}} = p_{oE} \ll n_{oB} = \frac{n_i^2}{p_{oB}}$$

Facteur de transport dans la base $\beta_T = -\left.\dfrac{I_{nC}}{I_{nE}}\right|_{V_{BC}=0} = +\left.\dfrac{J_{nC}}{J_{nE}}\right|_{V_{BC}=0}$

$$\beta_T \cong 1 - \frac{(w_B/L_{nB})^2}{2}$$

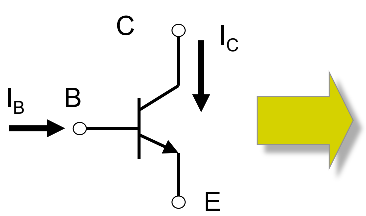
β_F augmente si $w_B \ll L_{nB}$ w_B = 20 μm... en 1954, $\leq$ 0,1 μm... en 1993

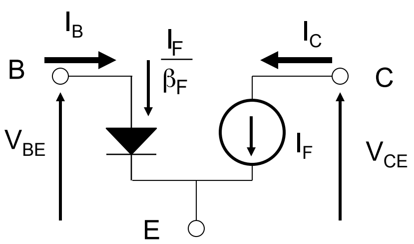
$$\alpha_F = \beta_T\, \gamma_F \qquad \beta_F = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F}$$

$\beta_F > 100 \ldots \rightarrow \alpha_F > 0{,}99$

2013-14 D. Flandre 17

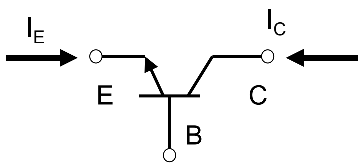
modèle régime actif





β_F : gain en courant direct en **émetteur** commun (base = entrée, collecteur = sortie) : $\mathbf{I_C = \beta_F\, I_B}$

en **base** commune : $\mathbf{I_C = -\,\alpha_F\, I_E}$

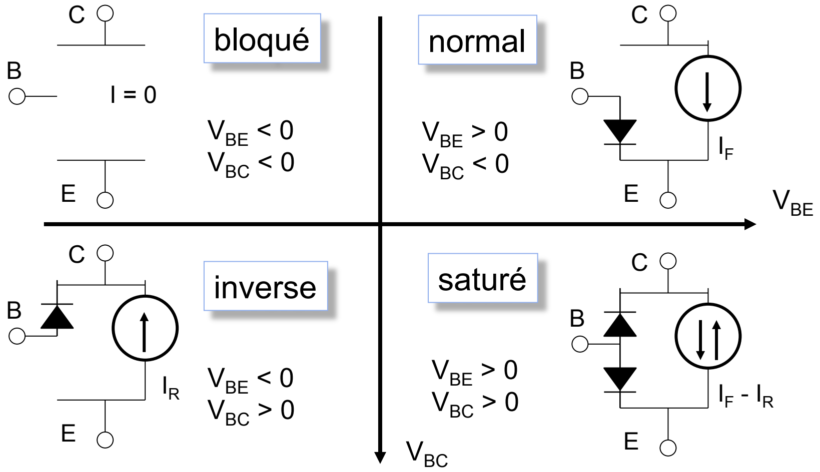


avec

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1+\beta_F}$$

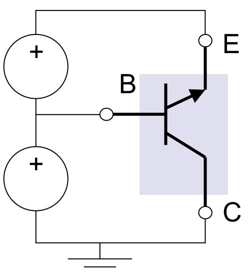
2013-14 D. Flandre 18

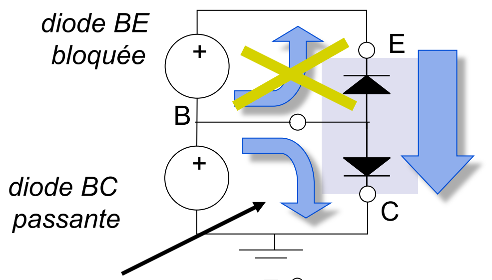
4 modes de fonctionnement



Le régime actif est un cas particulier du régime normal : $V_{BE} \approx 0.7$ V (Si)

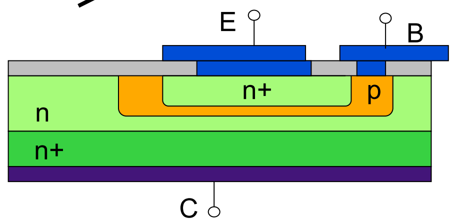
régime inverse





mais la géométrie n'est pas symétrique

et les dopages non plus

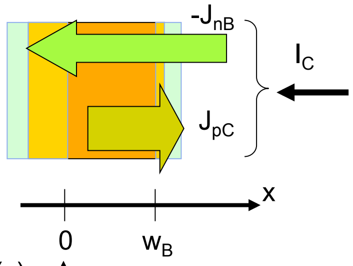


jonction base collecteur passante

$$n'_B(w_B) = n_{0B}\left[e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right]$$

courant de **transport inverse I_R** :

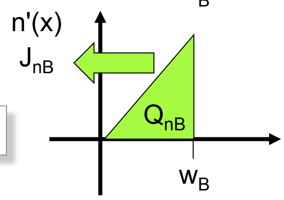
$$I_E = A\,J_{nB} = I_R = I_s\left[e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right]$$



$$I_C = -A\left(J_{nB} + J_{pC}\right) = -\left(1 + \frac{1}{\beta_R}\right) I_R$$

$$I_B = -\left(I_E + I_C\right) = \frac{I_R}{\beta_R}$$

$$\boxed{I_E = \beta_R\, I_B}$$



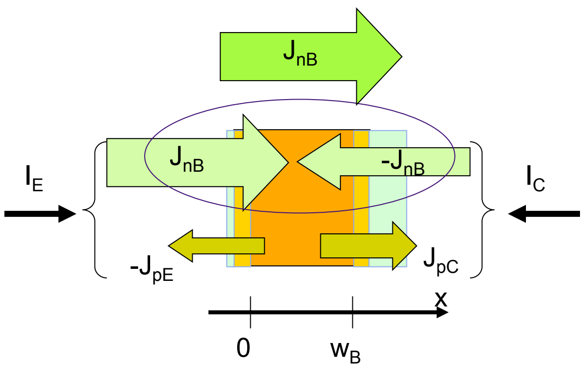
avec

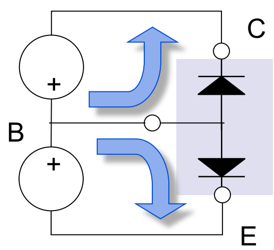
$$\beta_R = \frac{J_{nB}}{J_{pC}} = \frac{\mu_{nB}.w_C.N_{DC}}{\mu_{pC}.w_B.N_{AB}}$$

$$I_s = A\,q\,\mu_n\,\phi_T\,\frac{n_{P0}}{w_B}$$

régime saturé

les 2 jonctions sont passantes





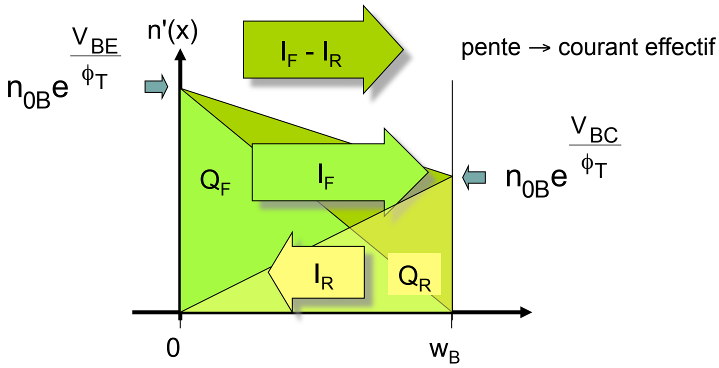
la relation courant ↔ charges est linéaire

⇒ superposition

$$J_{nB} = \frac{I_s}{A}\left[\left(e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right) - \left(e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right)\right]$$

charges dans la base

$$I_F = I_s\left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right] \qquad I_R = I_s\left[e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right]$$

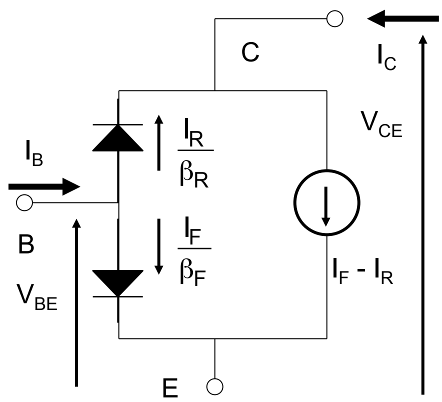


modèle complet : Ebers-Moll

$$I_C = -A\left(J_{nB} + J_{pC}\right) = \left(I_F - I_R\right) - \frac{I_R}{\beta_R}$$

$$I_E = A\left(J_{pE} + J_{nB}\right) = -\left(I_F - I_R\right) - \frac{I_F}{\beta_F}$$

$$I_B = -\left(I_E + I_C\right) = \frac{I_F}{\beta_F} + \frac{I_R}{\beta_R}$$



« Effet transistor » : modulation du courant de sortie (important) par un courant d'entrée faible !

$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = I_S \begin{bmatrix} -\frac{1}{\alpha_F} & 1 \\ 1 & -\frac{1}{\alpha_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(qV_{BE}/kT)-1 \\ \exp(qV_{BC}/kT)-1 \end{bmatrix}$$

$$I_C + I_B + I_E = 0$$

$$\beta_F = \frac{\alpha_F}{1-\alpha_F} \quad \text{et} \quad \beta_R = \frac{\alpha_R}{1-\alpha_R}$$

$$\alpha_F = \frac{\beta_F}{1+\beta_F}, \quad \frac{1}{\alpha_F} = 1 + \frac{1}{\beta_F}$$

$$\alpha_R = \frac{\beta_R}{1+\beta_R}, \quad \frac{1}{\alpha_R} = 1 + \frac{1}{\beta_R}$$

Ebers-Moll :

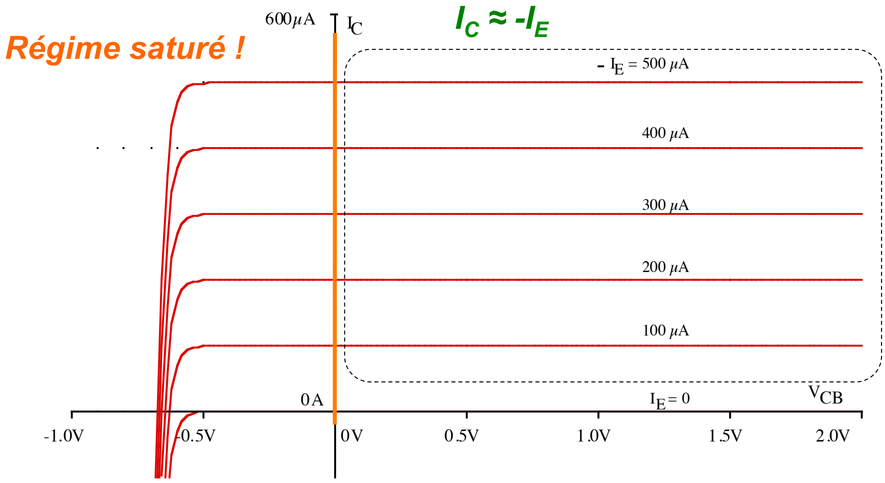
2 formes matricielles

$$\begin{bmatrix} I_E \\ I_C \end{bmatrix} = I_S \begin{bmatrix} -\frac{1}{\beta_F}-1 & 1 \\ 1 & -1-\frac{1}{\beta_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(qV_{BE}/kT)-1 \\ \exp(qV_{BC}/kT)-1 \end{bmatrix}$$

Interprétation des courbes I-V

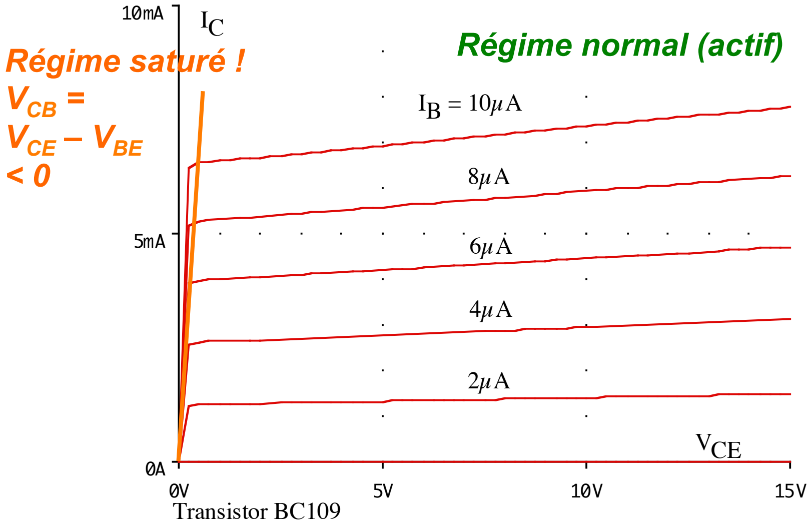
- en base commune

Régime normal (actif) :
$I_C \approx -I_E$



Interprétation des courbes I-V

- en émetteur commun

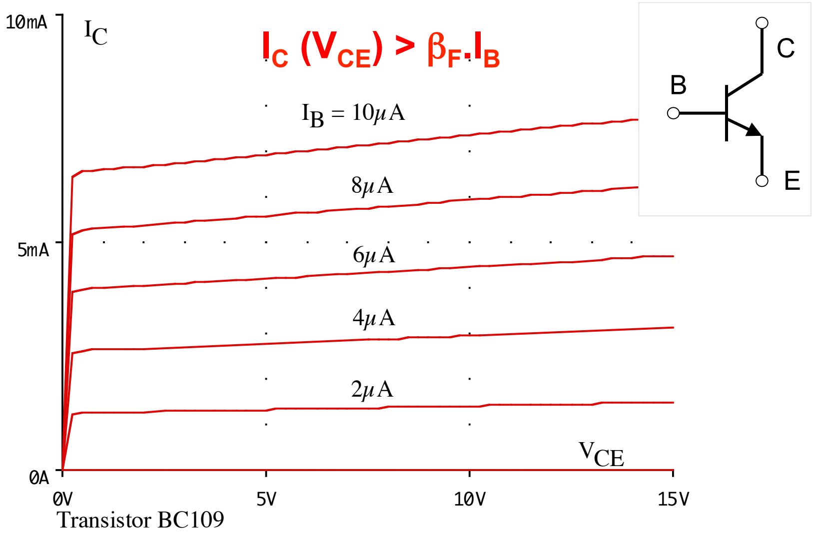


2013-14 D. Flandre 27

- structure et principe
- régime actif
- régime inverse
- régime saturé
- écarts par rapport à l'idéal
(effet Early, température…)
- comportement dynamique
- applications

2013-14 D. Flandre 28

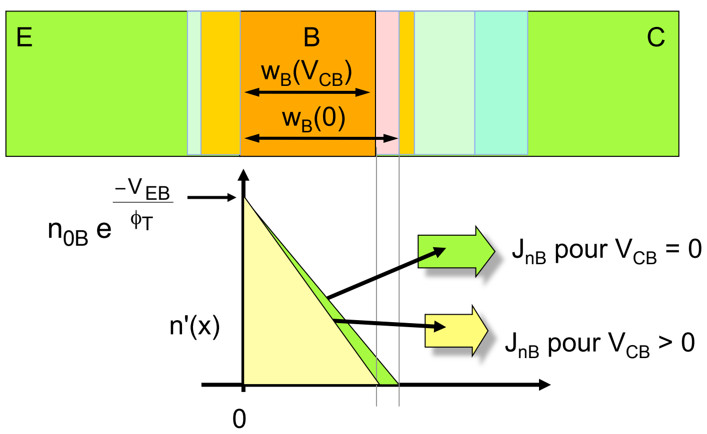
effet Early : en émetteur commun



2013-14 D. Flandre 29

variation de w_B

$$w_B(V_{CB}) = w_B(0) - \left(l_{CB}(V_{CB}) - l_{CB}(0)\right)$$



la largeur de base effective ↓ si V_{CB} ↑ ⇒ la pente du profil ↑ et le courant ↑

2013-14 D. Flandre 30

variation de w_B ?

Rappel diode : $l_{CB}(0) = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_S}{q}.\frac{\phi_0.N_{DC}}{N_{AB}^2}}$ $\quad l_{CB}(V_{CB}) = \sqrt{\frac{2.\varepsilon_S}{q}.\frac{(\phi_0 + V_{CB}).N_{DC}}{N_{AB}^2}}$

$$w_B(V_{CB}) - w_B(0) = l_{CB}(0)\left(1 - \sqrt{1 + \frac{V_{CB}}{\phi_0}}\right)$$

$$\beta_F = \frac{J_{nB}}{J_{pE}} = \frac{\mu_{nB}.w_E.N_{DE}}{\mu_{pE}.w_B.N_{AB}}$$

Dépend du dopage de collecteur :

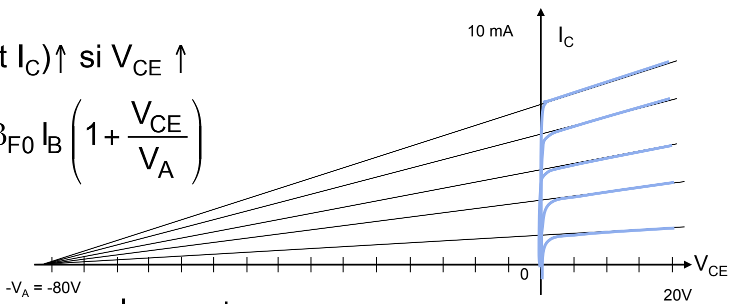
Si $N_{DC} << N_{AB}$, déplétion ↑ dans la région de collecteur, ↓ dans la base
Et effet Early ↓

2013-14 D. Flandre 31

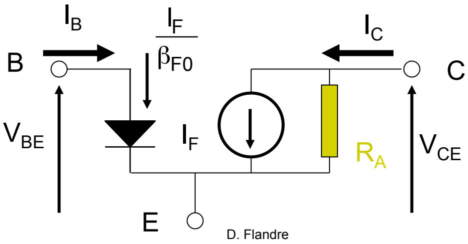
modélisation par tension d'Early V_A

β_F (et I_C)↑ si V_{CE} ↑

$$I_C = \beta_{F0}\, I_B \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$$



$$R_A = \frac{V_A}{I_F}$$

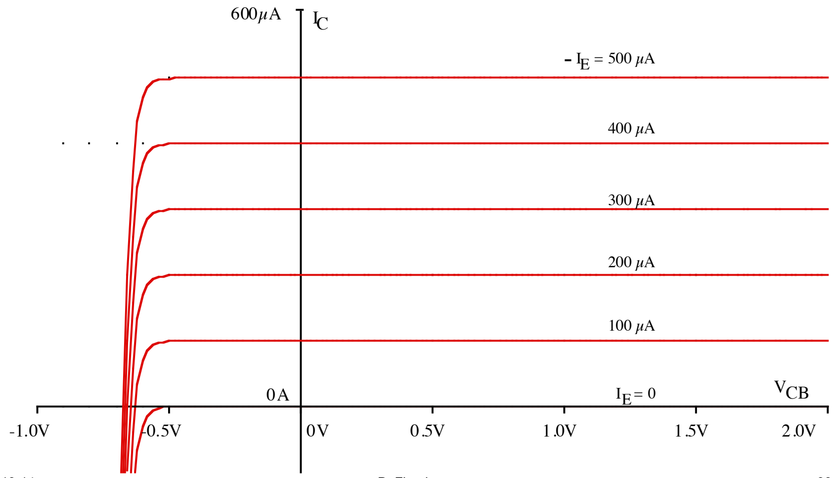


on n'a plus une source de courant parfaite à la sortie

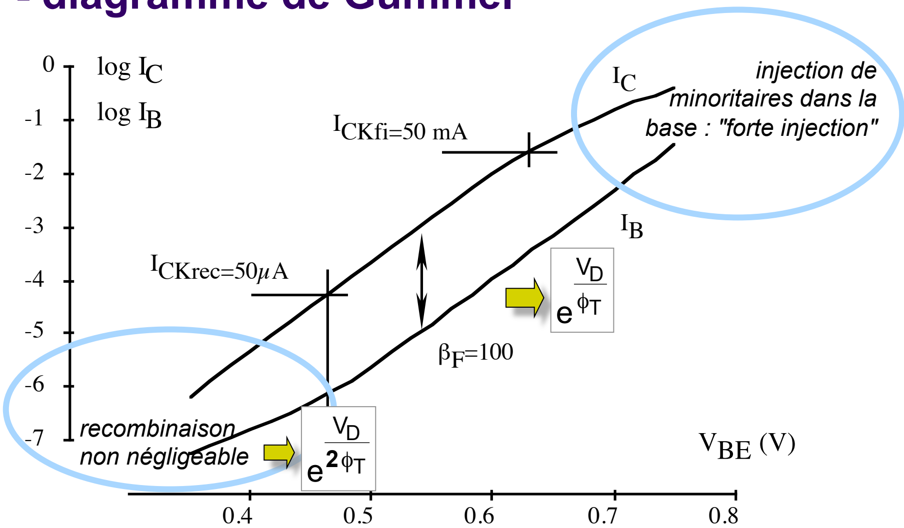
2013-14 D. Flandre 32

En base commune:

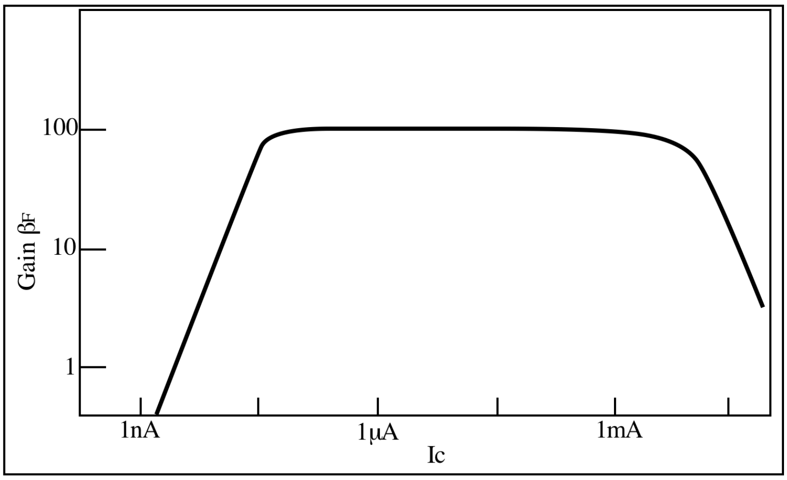
$$V_{EAB} = \left[\beta_F(0) + 1\right] V_{EAE}$$



variation du gain
- diagramme de Gummel



β_F dépend de la polarisation



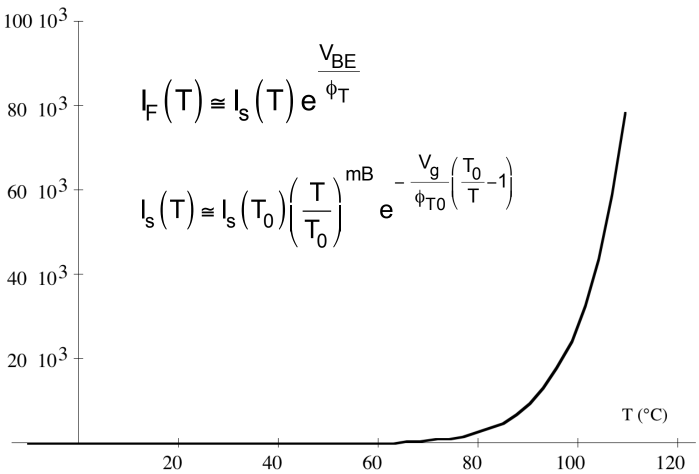
Effet de la température

le courant de saturation I_S dépend de la température :

$I_F(T)/I_F(T_0)$

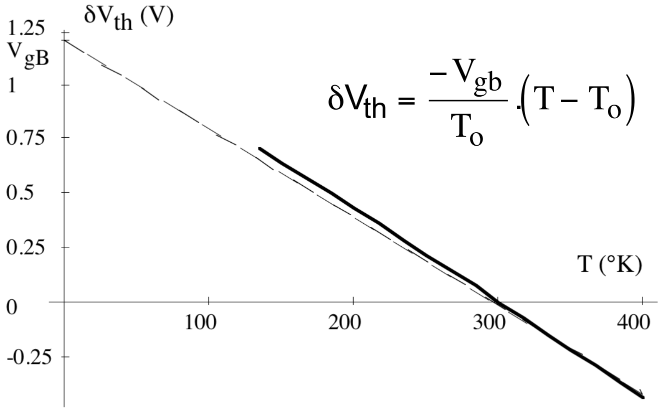
$$I_F(T) \cong I_s(T)\, e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}}$$

$$I_s(T) \cong I_s(T_0)\left(\frac{T}{T_0}\right)^{mB} e^{-\frac{V_g}{\phi_{T0}}\left(\frac{T_0}{T}-1\right)}$$



Variation de V_{BE} en fonction de T pour I_F constant

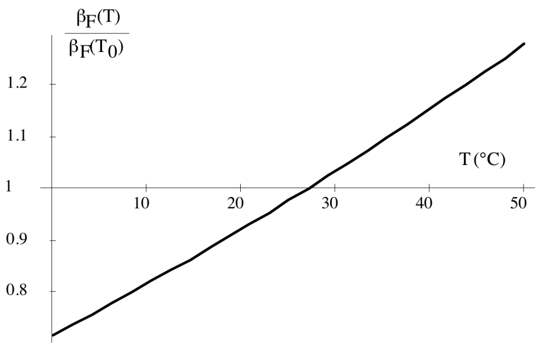
Pour garder I_F constant et égal à $I_F(T_o)$ si la température T varie par rapport à T_o, il faut appliquer à la tension V_{BE} une correction, notée ∂V_{th}



$$\delta V_{th} = \frac{-V_{gb}}{T_o}.\left(T - T_o\right)$$

β_F dépend de la température

$$\beta_F(T) = \beta_F(T_o)\left(\frac{T}{T_o}\right)^{(m_B-m_E)} \exp\left[\frac{E_{gB} - E_{gE}}{kT_o}\left(\frac{T_o}{T} - 1\right)\right]$$



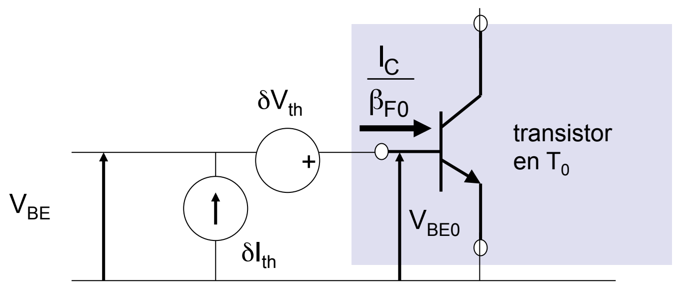
≈ 1 %/K

$$\delta I_{th}(T) = I_B \frac{\beta_F(T) - \beta_F(T_o)}{\beta_F(T)}$$

Pour maintenir I_C constant quand la température monte, il faut diminuer la valeur du courant de base d'une quantité ∂I_{th}

modèle simplifié vs T

L'effet de la température se manifestant comme une variation de la tension appliquée à la jonction d'émetteur, et une variation du courant injecté dans la base; on peut expliciter cela dans le schéma équivalent du transistor en lui adjoignant deux sources, ∂V_{th} = 4 mV/K et ∂I_{th} = 1% I_B/K (dans le Silicium)



2013-14 D. Flandre 39

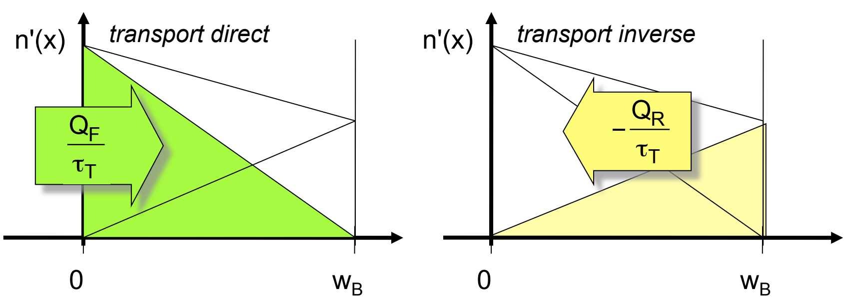
comportement dynamique

partir du modèle général : écrire les relations de courant en fonction des charges (τ_T = temps de transit dans la base)

$Q_F = \tau_T I_F$ $Q_R = \tau_T I_R$

ces charges sont non linéaires

on simplifie en prenant le même temps de transit



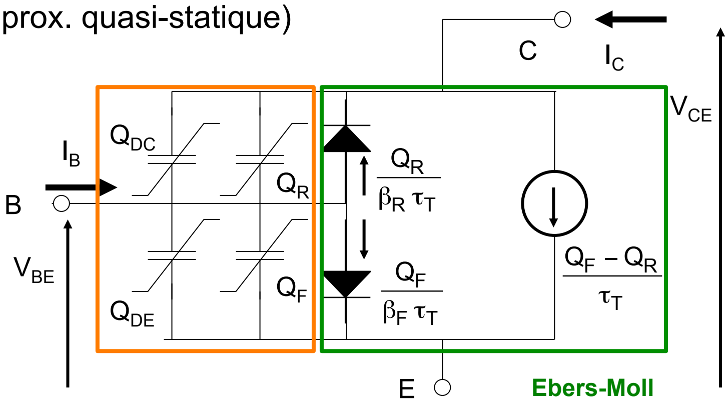
2013-14 D. Flandre 40

modèle de charges

Variation de charges
⇒ courants dynamiques

(approx. quasi-statique)

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}\left[Q(V)\right] = \frac{dQ}{dV} * \frac{dV}{dt}$$



Q_{DC}, Q_{DE} : charges de déplétion

2013-14 D. Flandre 41

équations des charges

$$\phi_{0E} = \phi_T \ln\left(\frac{N_{AB} * N_{DE}}{n_i^2}\right) \qquad \phi_{0C} = \phi_T \ln\left(\frac{N_{AB} * N_{DC}}{n_i^2}\right)$$

charges de déplétion :

$$Q_{DE} = Q_{DE0}\sqrt{\frac{\phi_{0E} - V_{BE}}{\phi_{0E}}} \qquad Q_{DC} = Q_{DC0}\sqrt{\frac{\phi_{0C} - V_{BC}}{\phi_{0C}}}$$

influence de la tension sur la largeur des zones de déplétion

charges de diffusion :

$$Q_F = \tau_T I_s \left[e^{\frac{V_{BE}}{\phi_T}} - 1\right] \qquad Q_R = \tau_T I_s \left[e^{\frac{V_{BC}}{\phi_T}} - 1\right]$$

influence de la tension sur le profil des charges de minoritaires dans la base

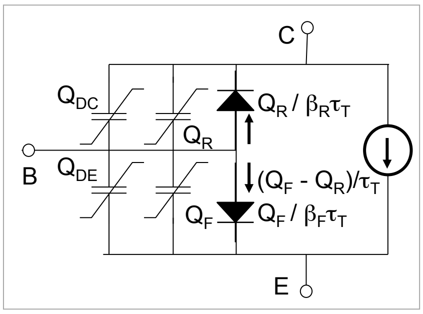
2013-14 D. Flandre 42

calcul du courant

$$I_C = \frac{Q_F - Q_R}{\tau_T} - \frac{Q_R}{\beta_R\,\tau_T} - \frac{d\left(Q_{DC} + Q_R\right)}{d\,V_{BC}} * \frac{d\,V_{BC}}{dt}$$

$$I_E = -\frac{Q_F - Q_R}{\tau_T} - \frac{Q_F}{\beta_F\,\tau_T} - \frac{d\left(Q_{DE} + Q_F\right)}{d\,V_{BE}} * \frac{d\,V_{BE}}{dt}$$

$$I_B = \frac{Q_F}{\beta_F\,\tau_T} + \frac{Q_R}{\beta_R\,\tau_T} + \frac{d\left(Q_{DE} + Q_F\right)}{d\,V_{BE}} * \frac{d\,V_{BE}}{dt} + \frac{d\left(Q_{DC} + Q_R\right)}{d\,V_{BC}} * \frac{d\,V_{BC}}{dt}$$



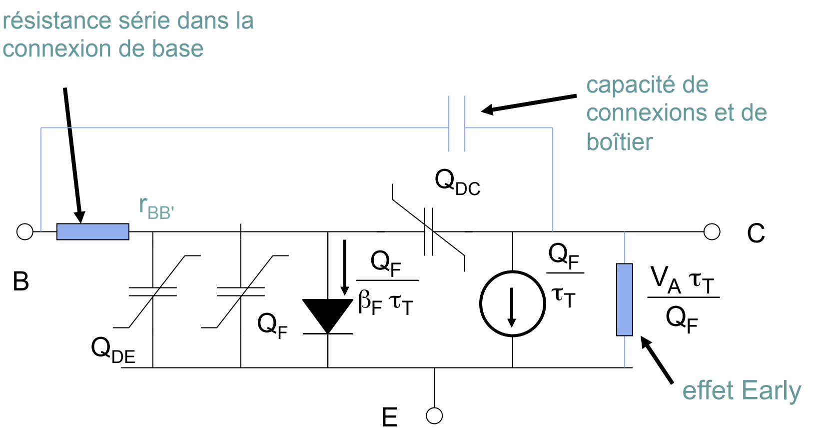
Transistor intrinsèque

modèle en régime actif

T092/

T03/T0204

Q_R est négligeable



avec les éléments parasites

modèle petit-signal ou linéaire

Ici, courant I1 fonction non-linéaire de deux tensions V1, V2

Si chaque tension est la somme d'un terme continu Vo, et d'un terme variationnel v

V1 = V1o + v1 et V2 = V2o + v2

et de même pour le courant

I1 = I1o + i1

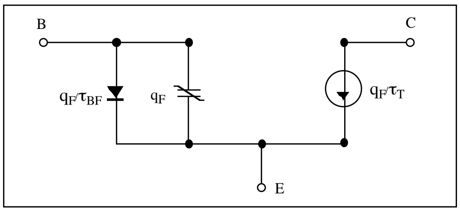
un développement en série donne (l'indice "o" qualifie les termes statiques)

$$I1o + i1 = f(V1o, V2o) + v1 \left.\frac{\partial f}{\partial V1}\right|_{V1o, V2o} + v2 \left.\frac{\partial f}{\partial V2}\right|_{V1o, V2o} + \ldots$$

$$i1 = v1 \left.\frac{\partial f}{\partial V1}\right|_{V1o, V2o} + v2 \left.\frac{\partial f}{\partial V2}\right|_{V1o, V2o}$$

2013-14 D. Flandre 45

en régime actif



$$I_C = \frac{q_F}{\tau_T}, \qquad I_B = \frac{q_F}{\tau_{BF}} + \frac{dq_F}{dt}$$

$$I_E = -(I_B + I_C) = -q_F\left(\frac{1}{\tau_{BF}} + \frac{1}{\tau_T}\right) - \frac{dq_F}{dt}$$

$$q_F = q_{F0}\left[\exp(qV_{BE}/kT) - 1\right] \quad , \quad \beta_F = \frac{\tau_{BF}}{\tau_T} \quad , \quad q_{F0} = I_{TS}\,\tau_T$$

$$V_{BE}(t) = V_{BEo} + v_{BE}(t)$$

$$I_{Co} + i_C = \boxed{\frac{q_{F0}}{\tau_T}\left[\exp(qV_{BEo}/kT) - 1\right]} + \boxed{v_{BE}\boxed{\frac{q}{kT}\frac{q_{F0}}{\tau_T}\exp(qV_{BEo}/kT)}}$$

soit

DC $I_{Co} = \frac{q_{F0}}{\tau_T}\left[\exp(qV_{BEo}/kT) - 1\right]$

et

AC $i_C = g_m v_{BE}$ $\qquad g_m = \frac{q}{kT} I_{Co}$ *transconductance*

2013-14 D. Flandre 46

$$I_{Bo} + i_B = \boxed{\frac{q_{F0}}{\tau_{BF}}\left[\exp(qV_{BEo}/kT) - 1\right]} + \boxed{\frac{q}{kT}\, q_{F0} \exp(qV_{BEo}/kT)\left(\frac{v_{BE}}{\tau_{BF}} + \frac{dv_{BE}}{dt}\right)}$$

soit

DC $I_{Bo} = \frac{q_{F0}}{\tau_{BF}}\left[\exp(V_{BEo}/kT) - 1\right]$

et

AC $i_B = \frac{v_{EB}}{r_\pi} + C_F \frac{dv_{BE}}{dt}$ si $r_\pi = \frac{\tau_{BF}}{\tau_T}\frac{1}{g_m}$ et $C_F = g_m \tau_T$

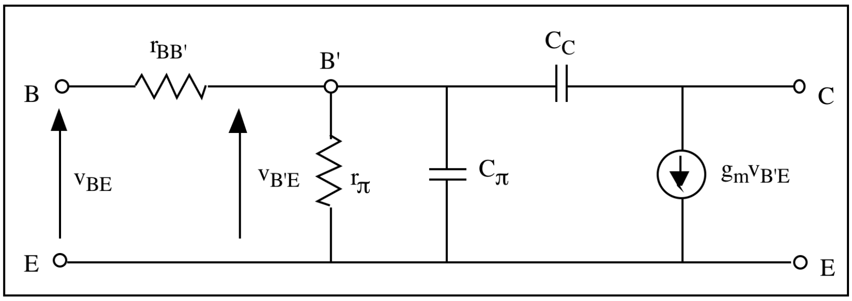
$C_F = dq_F/dV_{BE}$ représente la capacité de diffusion associée aux variations des charges stockées dans la base

r_π est la résistance dynamique d'entrée

+ capacités des zones de transition des jonctions E-B et B-C, et la résistance série du contact de base.

$$C_E = \frac{dq_E}{dV_{BE}} \quad \text{et} \quad C_C = \frac{dq_C}{dV_{BC}}$$

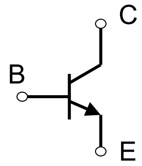
Modèle π-hybride petit-signal

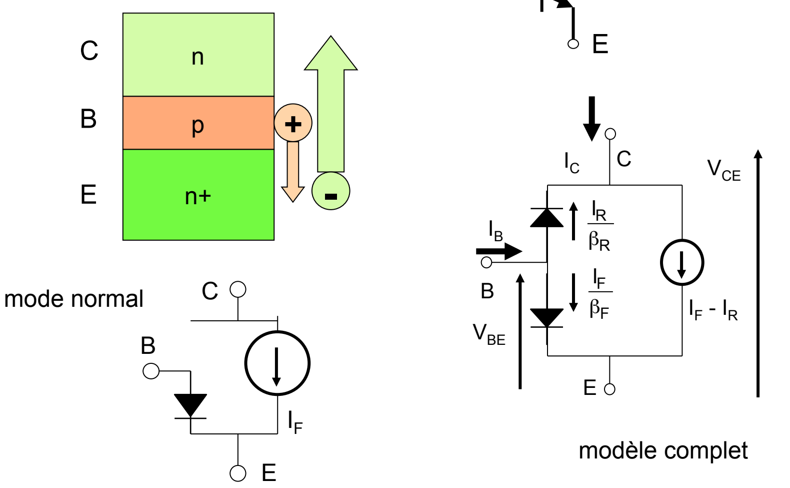


en l'absence d'effet Early et parasites

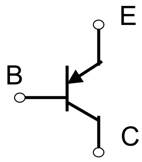
$C_\pi = C_F + C_E$

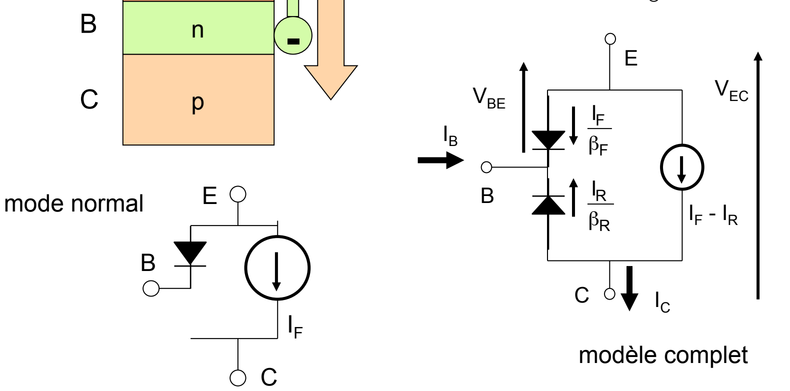
NPN : résumé





un composant symétrique : le PNP





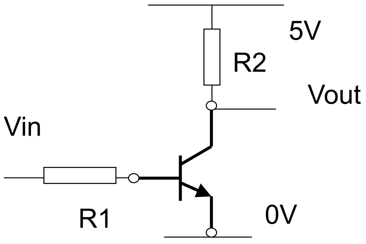
Transistor bipolaire

- structure et principe
- régime actif
- régime inverse
- régime saturé
- écarts par rapport à l'idéal
(effet Early, température…)
- comportement dynamique

utiliser un transistor (*modèles*)

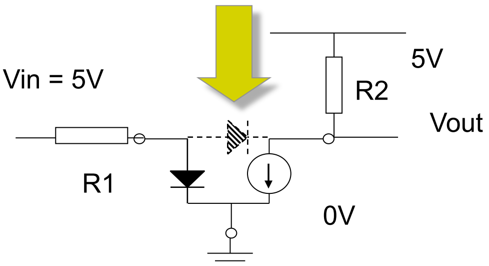
- en amplificateur
  - « bien » polariser le transistor (*DC*)
    - pour meilleures performances
    - effet de la température ?
    - ... stabilité !
  - gain en tension et/ou en courant ? (*AC*)
    - limite en fréquence (*capacités*) …
- en interrupteur
  - Niveaux logiques ou binaires (*DC*)
  - Transitoires (*dynamique*)
    - Limite en vitesse (*charges*)

utilisation comme interrupteur



cette diode devient passante si Vout < V_{BE}

saturation !



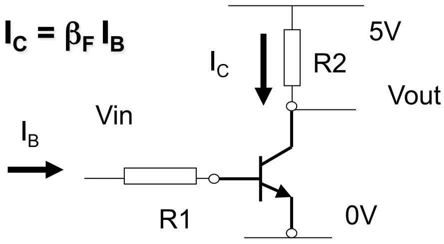
Vout

si Vin = 0V ?

si Vin = 5V ?

quand est-ce qu'on sature le transistor ?

$\mathbf{I_C = \beta_F I_B}$

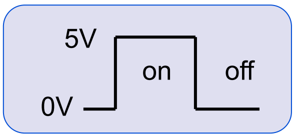


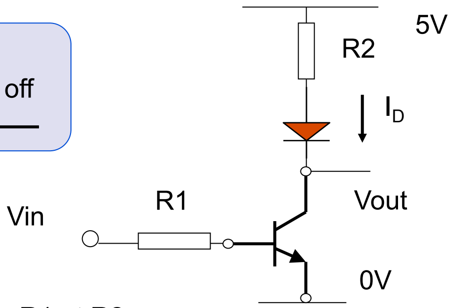
$$\text{si Vin} > 0 \Rightarrow I_B \cong \frac{\text{Vin} - 0.7}{\text{R1}}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta_F I_B \text{ et Vout} = \left(5 - I_C * \text{R2}\right)$$

si Vout < 0.7 : la jonction B-C devient passante, et le transistor sature

commander une led ?





déterminer les valeurs de R1 et R2 pour

I_D = 0 pour Vin = 0V

I_D = 10 mA pour Vin = 5V

quelle valeur choisir pour Vout ?