

# Chapitre V. Le transistor bipolaire

- 5.1. Présentation du transistor TB
- 5.2. Paramètres du TB
- 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB
- 5.4. Caractéristiques statiques du TB
- 5.5. Le régime dynamique du TB

# 5.1. Présentation du transistor TB

Définition: Dispositif a séquence spatiale *pnp* ou *nnp*.

- 3 bornes : E,B,C.
- dispositif bipolaire.

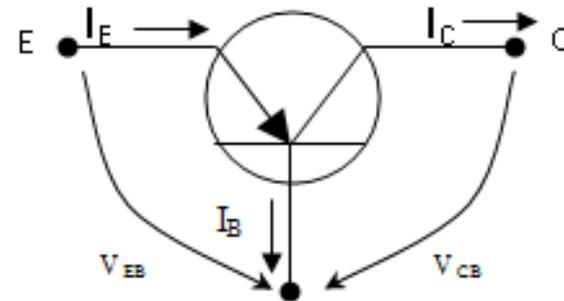
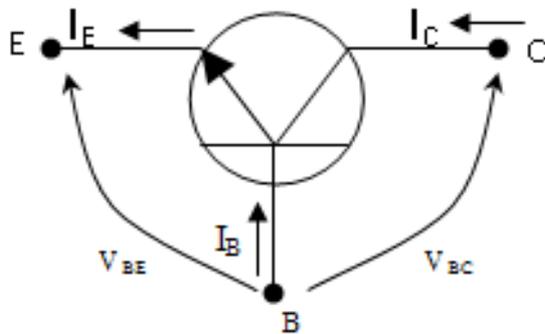
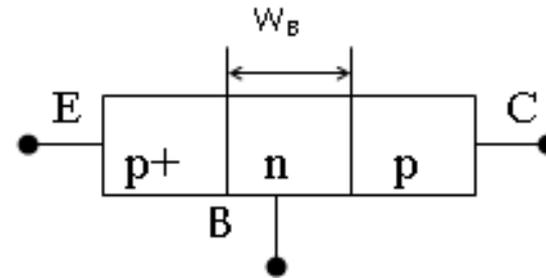
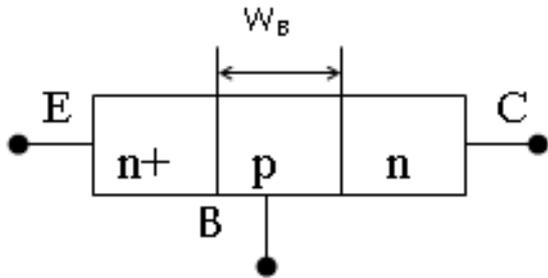
Conditions constructives:

1. jonction BE doit être fortement asymétrique, ( $n^+p$  ou  $p^+n$ ).
2. L'épaisseur de base,  $W_B$  devrait être très mince:

$$W_B \ll L_{n,p}.$$

# 5.1. Présentation TB

Symbole/ str:



## 5.1. Présentation TB

- On va définir 3 crt et 3 tens.

- Liaisons I-V pour npn:

$$V_{BE} = V_{BC} + V_{CE}$$

$$I_E = I_B + I_C$$

- Pour pnp ...
- 4 Régime: RAN, RAI, sat, bloq.
- Connexion BC, EC.
- Ex. pour amplif. en puissance:  $A_p = ..$  (BC, EC)

## 5.2. Paramètres du TB

Facteur de transfert dans la connexion BC:

Typique :  $\alpha_F = 0,98 \dots 0,999$ .

En connexion BC:

$$I_C = \alpha_F I_E + I_{BC0}$$

En connexion EC:

$$I_C = \beta_F I_B + I_{CE0}$$

## 5.2. Paramètres du TB

ou  $\beta_F$ ,  $I_{CE0}$  sont:

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

$$I_{CE0} = \frac{I_{BC0}}{1 - \alpha_F}$$

Parametre  $\beta_F$  représente le gain de la connexion EC.

Typique :  $\beta_F = 80 \dots 100 \dots 200$  .

## 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB

Objectif: déduction  $I_C, I_E, I_B$  vers  $V_{BE}, V_{BC}$ .

Hypothèses :

1. superposition du courant propre de la jonction et une fraction de la jonction voisins.
2. Crt. Sont de diffusion:

$$I_{\text{jonct}} = I_0 \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{\text{jonct}}}{kT}\right) - 1 \right]$$

3. Hypothèse de réciprocité :

$$I_{ES} \alpha_F = I_{CS} \alpha_R = I_S$$

## 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB

- Convention:
- Adresser la situation: TB - NPN
- tous les crt. entre dans les terminaux
- dessin TB

$$I_C = -\alpha_F I_E - I_{C0} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -\alpha_R I_C - I_{E0} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

## 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB

- *Modele Ebers-Moll fondamentale, modele d'injection: 4 paramètres ( $\alpha_F$ ,  $\alpha_R$ ,  $I_{ES}$ ,  $I_{CS}$ ):*

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] - I_{CS} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_{ES} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] + \alpha_R I_{CS} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

## 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB

- *Modele Ebers-Moll fondamentale, modèle de transport, (ou modèle en “ $\pi$ ”).*
- *3 parametres de modele:  $I_S$ ,  $\beta_F$ ,  $\beta_R$ .*

$$I_C = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_E = -I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \right] - \frac{I_S}{\beta_F} \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$I_{CT} = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \right]$$

## 5.3. Modele Ebers-Moll fondamentale du TB

- Application. Soit TB npn,  $I_S = 10\text{pA}$ ,  $\beta_F = 100$ ,  $\beta_R = 80$ , polarise a  $V_{BE} = +0.4\text{V}$ ,  $V_{BC} = -10\text{V}$ .
- $I_C, I_B = ?$

$$I_C \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \frac{I_S}{\beta_R} \cdot [-1] \approx I_S \cdot 8,8 \cdot 10^6$$

$$I_B \approx \frac{I_S}{\beta_F} \cdot \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - \frac{I_S}{\beta_R} \approx I_S \cdot 8,8 \cdot 10^4 - I_S \cdot 10^{-2} \approx I_S \cdot 8,8 \cdot 10^4$$

## 5.4. Caractéristiques statiques du TB

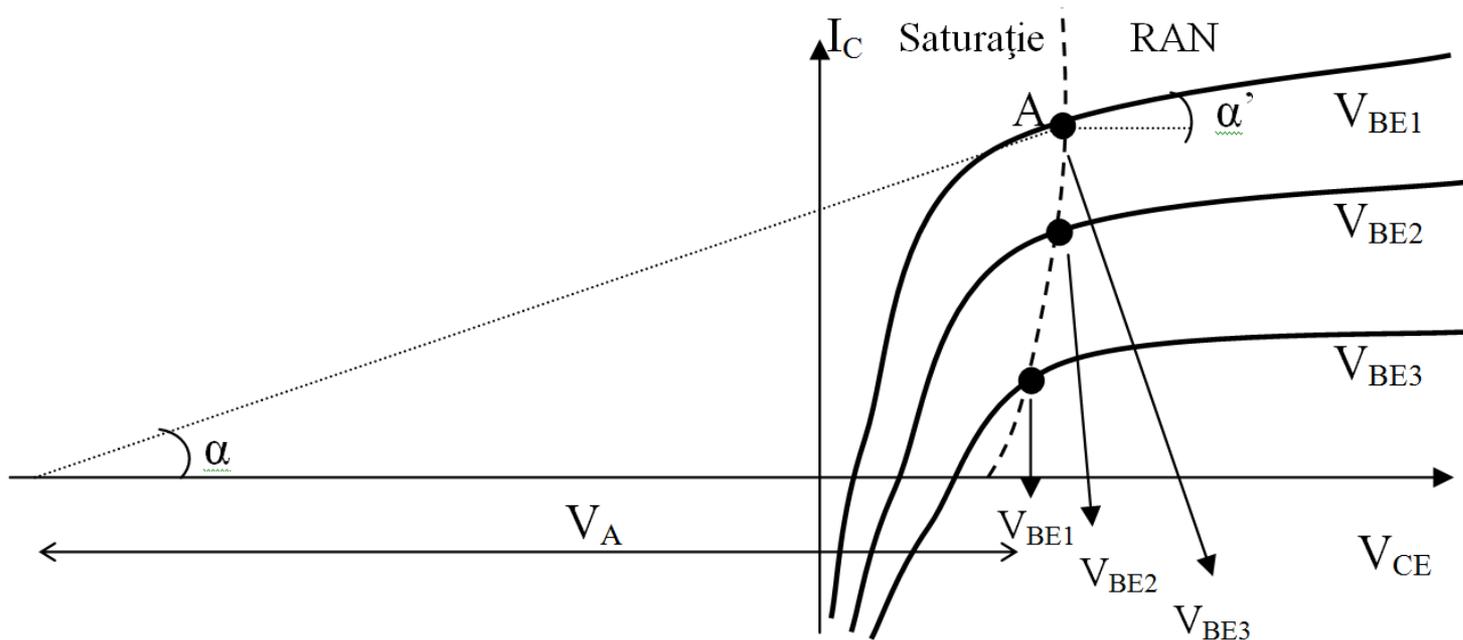
### Connexion Emetteur-Commune

- *Caractéristique d'entrée* est:  $I_B = I_B(V_{BE})$  a  $V_{BC} = \text{const.}$
- *Caractéristique de sortie* est:  $I_C = I_C(V_{CE})$  a  $V_{BE} = \text{const.}$
- *Caractéristique de transfert* est:  $I_C = I_C(V_{BE})$  a  $V_{BC} = \text{const.}$

$$V_{BE} = V_{BC} + V_{CE}$$

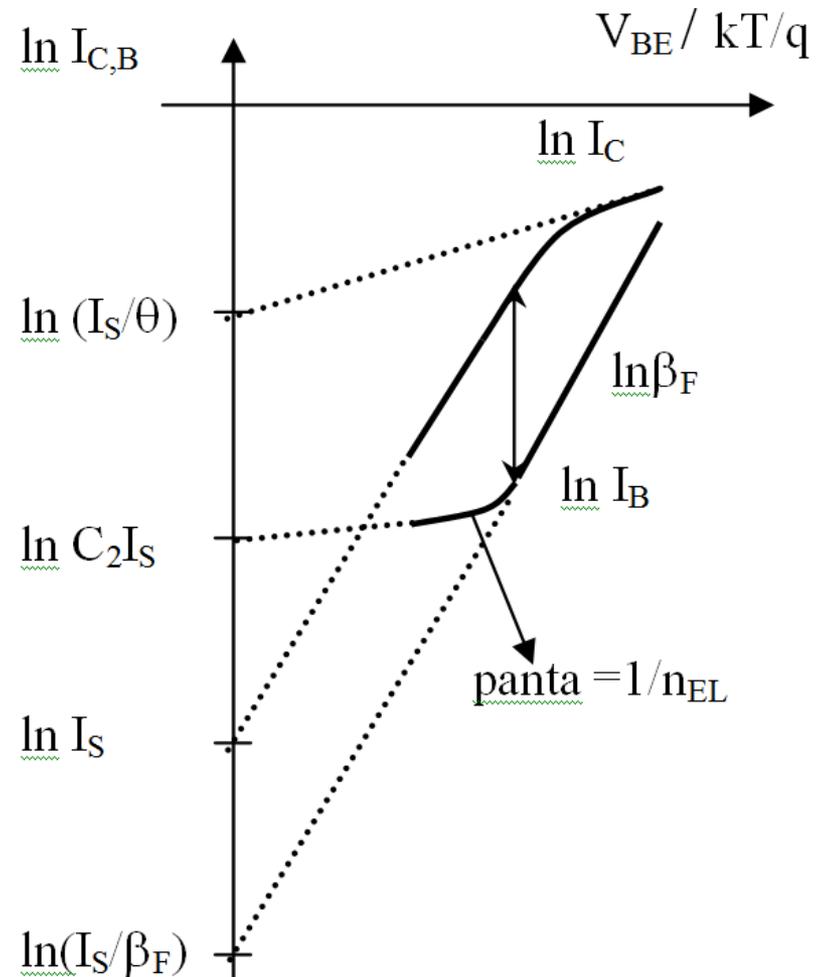
## 5.4. Caractéristiques statiques du TB

EC. En RAN ( $V_{CE} > V_{BE}$ ), avec eff. Early:



## 5.4. Caractéristiques statiques du TB

- EC.
- Les caractéristiques d'entrée et les caractéristiques de transfert



## 5.5. Le régime dynamique du TB

### 5.5.1. Circuit équivalent de petit signal et basse fréquence

- Condition de petit signal demande:

$$V_{be}, V_{bc} \ll 3kT/q.$$

$$V_{BE} = V_{BE} + v_{be}(t) = V_{BE} + V_{be} \cdot \sin \omega t$$

$$V_{BC} = V_{BC} + v_{bc}(t) = V_{BC} + V_{bc} \cdot \sin \omega t$$

## 5.5.1.

- Conditions de basse fréquence :

$$i_T = i_T(v_{BE}, v_{BC}) = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{q v_{BE}}{kT}\right) - \exp\left(\frac{q v_{BC}}{kT}\right) \right]$$

- Par différenciation :

$$di_T = \frac{\partial i_T}{\partial v_{BE}} dv_{BE} + \frac{\partial i_T}{\partial v_{BC}} dv_{BC} \Leftrightarrow i_t = g_{mF} v_{be} + g_{mR} v_{bc}$$

$$g_{mF} = \frac{\partial i_T}{\partial v_{BE}} \stackrel{\text{RAN}}{\approx} \frac{I_C}{kT/q} = 40[V^{-1}] \cdot I_C$$

## 5.5.1.

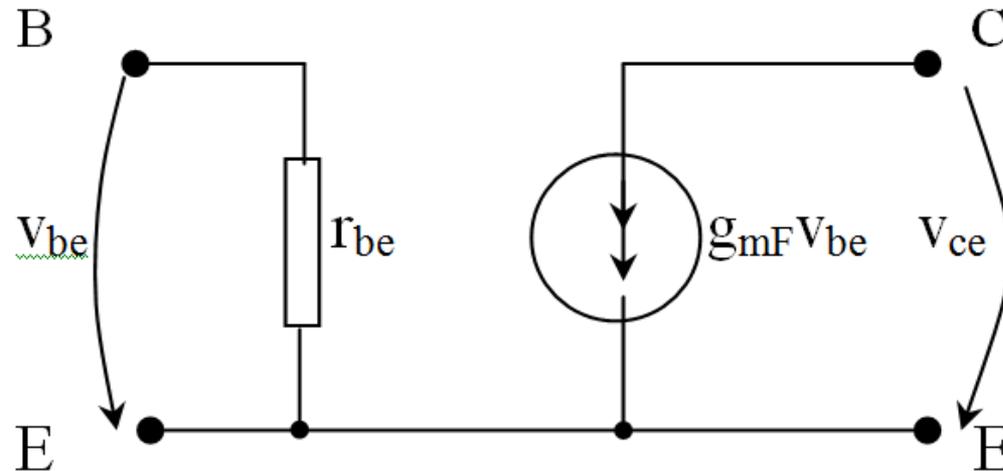
Les résistances BE et BC:

$$r_{be} = \frac{kT/q}{\frac{I_S}{\beta_F} \cdot \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)} \approx \frac{kT}{qI_C} \beta_F = \frac{\beta_F}{g_{mF}}$$

Notations alternatives qui apparaissent dans  
autres livres :  $r_B = r_{bb'}$ ,  $r_C = r_{cc'}$ ,  $r_E = r_{ee'}$ ,  $r_{b'e'} = r_{\pi}$ ,  
 $r_{b'c'} = r_{\mu}$ .

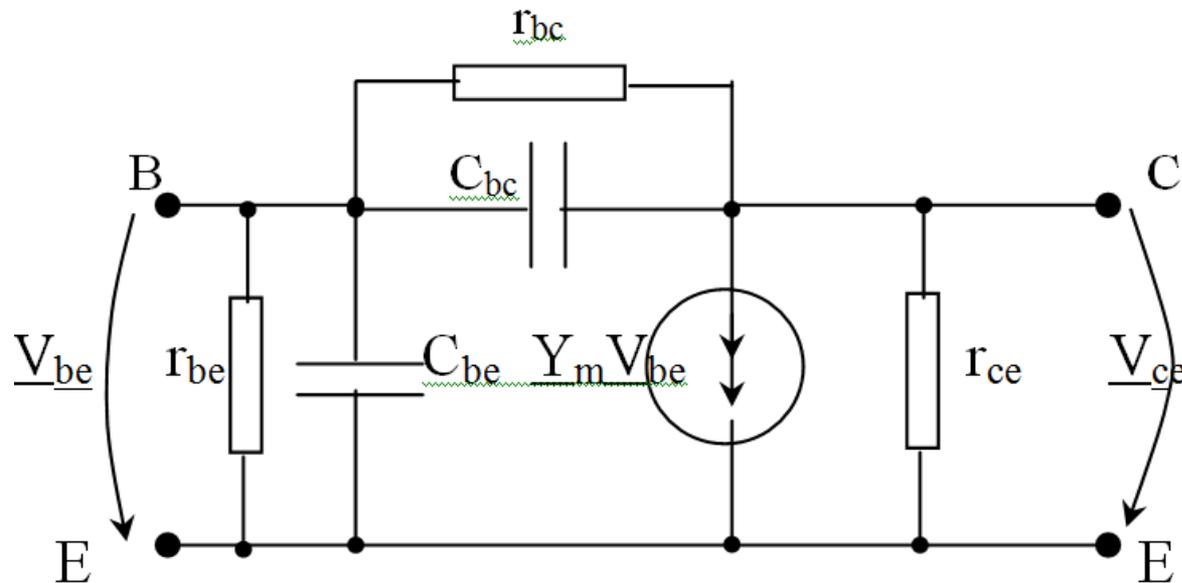
## 5.5.1.

- Circuit équivalent de petits signaux et basses fréquences, sans résistances séries



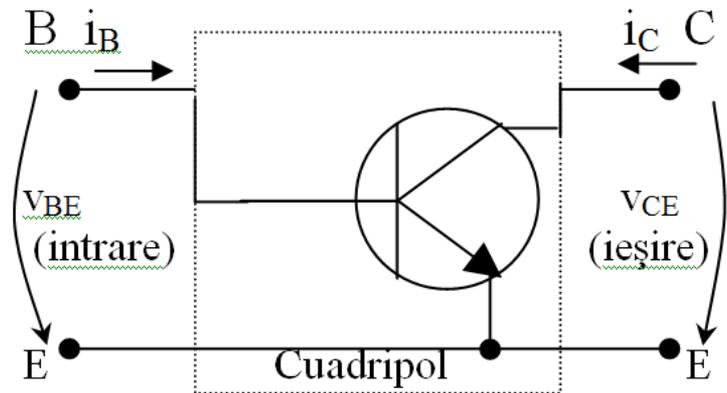
## 5.5.2. Circuit équivalent de petit signal et haute fréquence

Circuit a haute fréquence, inclure la capacité des deux jonctions.



## 5.5.3. Le circuit équivalent a paramètres "h"

- TB semble a cuadripol a entrée/sortie:

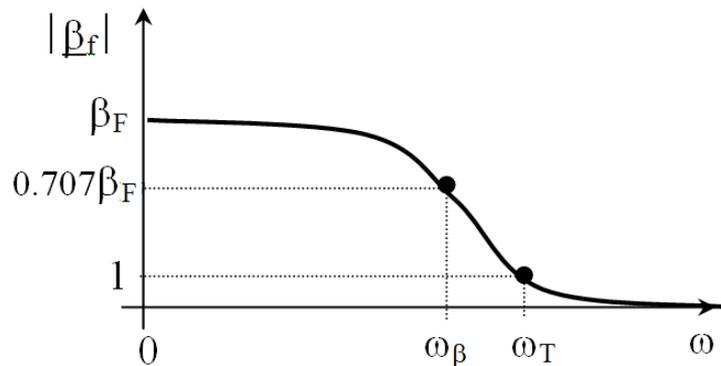


$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} v_{be} \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11E} & h_{12E} \\ h_{21E} & h_{22E} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{pmatrix}$$

## 5.5.4. Fréquences caractéristiques du TB

- Dependence  $|\underline{\beta}_f|$  - fréquence .



$$|\underline{\beta}_f| = \frac{\beta_F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}}$$

- I Fréquence caractéristique ,  $\omega_\beta$ , quand  $|\underline{\beta}_f| = 0,707\beta_F$ :

$$\omega_\beta = \frac{1}{r_{be}(C_{be} + C_{bc})}$$

## 5.5.4. Fréquences caractéristiques du TB

- La II Fréquence caractéristique,  $\omega_T$ , ou fréquence de coupure (**taiere**), lorsque  $|\underline{\beta}_f| = 1$ .

$$1 = \frac{\beta_F}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_T}{\omega_\beta}\right)^2}} \approx \beta_F \left(\frac{\omega_\beta}{\omega_T}\right) \Leftrightarrow \omega_T = \omega_\beta \cdot \beta_F$$

- Ex en catalogue: Transistor 2N2222 a  $f_T = 220\text{MHz}$