

Chapitre 4 : Le Transistor Bipolaire à Jonction

4.1. Définition :

Le transistor bipolaire est une source de courant commandée en courant. Un transistor sert à **amplifier le courant**, dans ce cas il fonctionne en **régime linéaire**. Un transistor peut être utilisé comme un **interrupteur** commandé, on dit alors qu'il fonctionne en **commutation (régime non linéaire)**. On distingue deux types de transistors bipolaires :

- Transistor bipolaire NPN
- Transistor bipolaire PNP

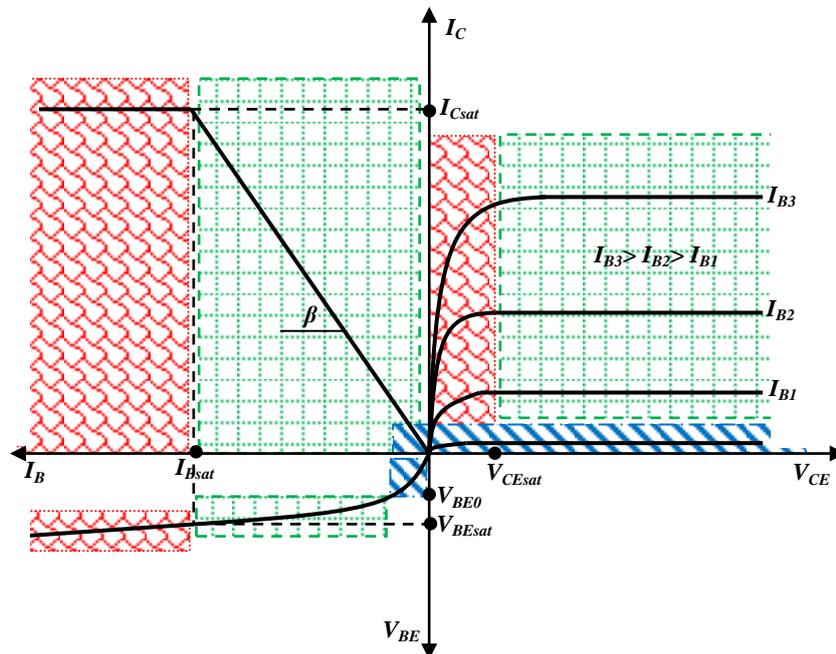


Les trois électrodes d'un transistor bipolaire se nomment : émetteur (E), base (B) et collecteur (C).

4.2. Réseau de caractéristiques d'un transistor bipolaire NPN:

Le fonctionnement du transistor se résume à l'aide de son réseau de caractéristiques.

- La caractéristique d'entrée : $i_B = f(v_{BE})$.
- La caractéristique de transfert : $i_C = f(i_B)$ à v_{CE} constante.
- La caractéristique de sortie : $v_{CE} = f(i_C)$ à i_B constant.



4.2.1. Zone active (amplification):

Le transistor est alors, le plus souvent, utilisé dans un montage amplificateur.

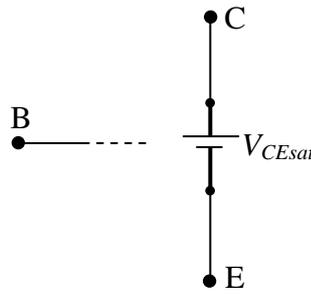
$$I_C = \beta I_B \text{ avec } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \text{gain en courant bêta et } \alpha = \frac{I_C}{I_E} = \text{gain en courant alpha}$$

$$I_E = I_C + I_B = I_C + \frac{I_C}{\beta} = \frac{1}{\alpha} I_C$$

$$V_{BE0} < V_{BE} < V_{BEsat}; V_{BE} \cong V_{BE0} = 0.6 \text{ à } 0.7 \text{ V (silicium)}$$

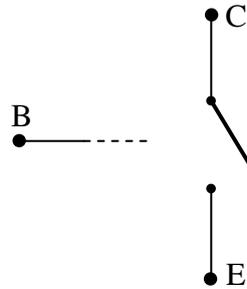
4.2.2. Zone de saturation:

$I_C < \beta I_B$
 $V_{CE} = V_{CEsat}$
 $V_{BEsat} \cong V_{BE0} = 0.6 \text{ à } 0.7 \text{ V (silicium)}$
 $I_B > I_{Bsat}$
 V_{CEsat} est de l'ordre de 0,3 à 0,4V.
 En pratique, on prendra donc $V_{CEsat} \approx 0V$.



4.2.3. Zone de blocage:

$I_B = 0$ et $V_{BE} < V_{BE0} = 0.7 \text{ V}$ ou 0.6 V
 $I_C = 0 \Rightarrow I_E = 0$



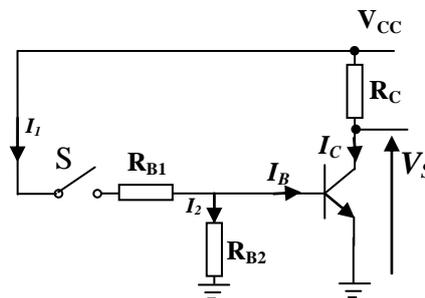
4.3. Transistor en commutation (Interrupteur).

On peut assimiler le transistor à un **interrupteur** commandé électriquement. La commande étant la base, et l'interrupteur étant entre le collecteur et l'émetteur.

Exemple:

Calculer la tension de sortie V_S pour S ouvert et fermé.

On donne: $V_{CC}=5 \text{ V}$, $R_C=100 \Omega$, $R_{B1}=10 \text{ k}\Omega$, $R_{B2}=10 \text{ k}\Omega$, $\beta=200$, $V_{BE0}=0.7 \text{ V}$, $V_{CEsat}=0.3V$, $V_{BEsat} \approx V_{BE0}$.



a) Interrupteur ouvert:

Pour montrer que le transistor est bloqué, on calcule V_{BE} pour $I_B=0$ et on le compare à V_{BE0} .

Le courant I_1 est nul, donc: $I_2 = -I_B$.

$$R_{B2}I_2 - V_{BE} = 0 \Rightarrow -R_{B2}I_B - V_{BE} = 0 \Rightarrow V_{BE}(I_B = 0) = -R_{B2}I_B = 0$$

$$\Rightarrow V_{BE}(I_B = 0) = 0 < V_{BE0} = 0.7 \text{ V}$$

\Rightarrow le transistor est bloqué $\Rightarrow I_B = I_C = I_E = 0$

$$\Rightarrow V_S = V_{CC} - R_C I_C = V_{CC}$$

b) Interrupteur fermé:

De la même façon que précédent, on calcule V_{BE} pour $I_B=0$ et le compare à V_{BE0} .

$$I_B=0 \Rightarrow I_1=I_2 \Rightarrow V_{BE} = V_{R_{B2}} = \frac{R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}} V_{CC}$$

$$\Rightarrow V_{BE} = 2.5V > V_{BE0} = 0.7 \text{ V}$$

\Rightarrow le transistor est soit saturé soit amplificateur.

Pour confirmer qu'il est saturé, on suppose qu'il est saturé et on calcule I_B et I_C ensuite on vérifie l'inégalité:

$$I_C < \beta I_B.$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} = 47 \text{ mA}$$

$$I_B = I_1 - I_2; I_2 = \frac{V_{BE0}}{R_{B2}} = 70 \mu A; I_1 = \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_{B1}} = 430 \mu A$$

$$\Rightarrow I_B = 360 \mu A$$

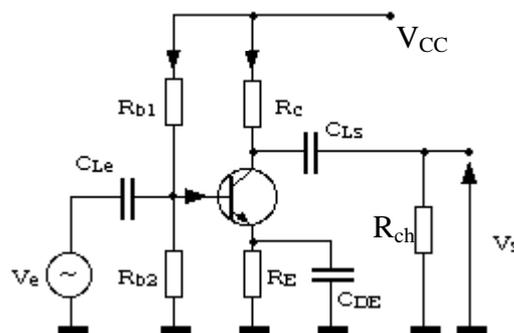
$$\Rightarrow I_C = 47 mA < \beta I_B = 72 mA \Rightarrow \text{le transistor est saturé.}$$

4.4. Transistor en amplification.

Le transistor est un composant unidirectionnel, pour amplifier des signaux sinusoïdaux il faut donc ajouter une composante continue appelée « polarisation » à chaque grandeur qui sollicite le transistor. Alors la tension à l'entrée de transistor est $v_E = V_0 + v_e$ où v_e est le signal à amplifier et V_0 la composante continue. Il faut dans tous les cas pour un transistor NPN $V_0 > 0$. Donc la composante continue V_0 doit être plus grande que l'amplitude de v_e . En régime linéaire le principe de superposition est applicable, on distinguera donc l'étude de la polarisation (étude en statique) et de l'amplification des signaux (étude en dynamique).

4.4.1. Montage émetteur commun :

Dans ce montage l'émetteur est relié directement à la masse ou au travers d'une résistance, alors que la base du transistor est reliée à l'entrée et le collecteur à la sortie.



On fera les calculs dans l'ordre suivant :

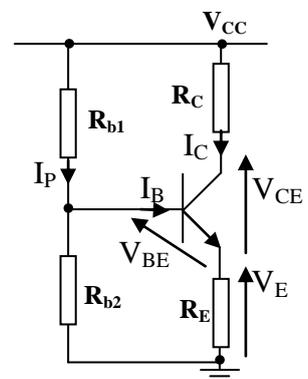
a) En statique ($v_e=0$):

On utilise alors un schéma simplifié en sachant qu'en continu tous les condensateurs sont enlevés (remplacés par des interrupteurs ouverts).

a.1) Droite d'attaque et droite de charge statiques:

On trace la droite de charge statique ($I_C=f(V_{CE})$) et la droite d'attaque statique ($I_B=f(V_{BE})$) sur les caractéristiques de transistor pour mieux voir le fonctionnement du transistor et voir dans quelle région il fonctionne (on positionne le point de repos Q dans la zone d'amplification).

Pour le courant continu ($v_e=0$), les condensateurs sont ouverts.



Droite d'attaque statique $I_B=f(V_{BE})$:

$$R_{b2}(I_p - I_B) - V_{BE} - R_E I_E = 0$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

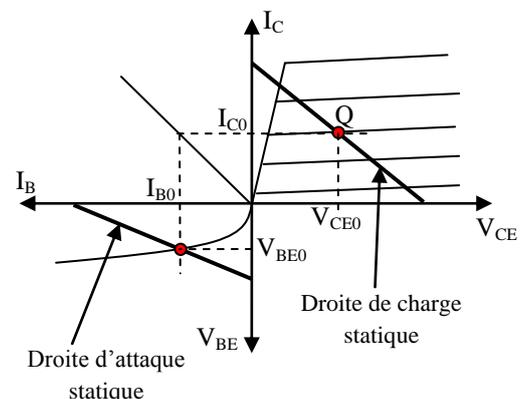
$$I_p = \frac{(V_{CC} - R_{b2}(I_p - I_B))}{R_{b1}}$$

$$\Rightarrow I_B = -\frac{1}{R_{b1}/R_{b2} + (\beta + 1)R_E} V_{BE} + \frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC}}{R_{b1}/R_{b2} + (\beta + 1)R_E}$$

Droite de charge statique $I_C=f(V_{CE})$:

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} - R_E I_E = 0$$

$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_C$$



$$\Rightarrow I_C = -\frac{1}{R_C + \frac{\beta+1}{\beta}R_E}V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C + \frac{\beta+1}{\beta}R_E}$$

Le point de polarisation Q (point de repos) correspond à l'intersection de la droite de charge avec la caractéristique du transistor. **Un point de polarisation particulier est celui défini par le milieu de la droite de charge.**

a.2) Calcul des coordonnées du point de repos Q:

Pour calculer les coordonnées I_{C0} et V_{CE0} du point Q, on admet l'approximation: $V_{BE} \approx V_{BE0}$.

A l'entrée du transistor, on peut remplacer V_{CC} , R_{b1} et R_{b2} par le générateur de Thévenin: E_{Th} et R_{Th} .

Avec: $E_{Th} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}V_{CC}$ et $R_{Th} = R_{b1} // R_{b2}$

$E_{Th} - R_{Th}I_B - V_{BE} - R_E I_E$; avec: $I_E = (\beta + 1)I_B$ et $V_{BE} \approx V_{BE0}$

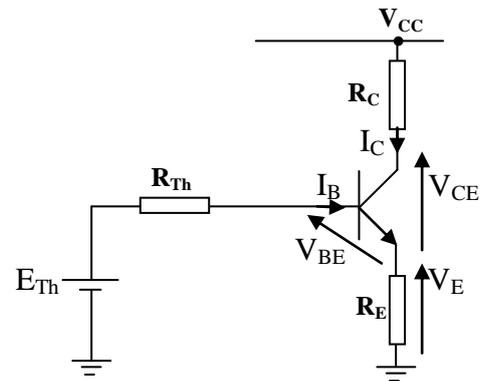
$$\Rightarrow I_{B0} = \frac{E_{Th} - V_{BE0}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

$$\Rightarrow I_{C0} = \beta I_{B0} = \beta \frac{E_{Th} - V_{BE0}}{R_{Th} + (\beta + 1)R_E}$$

$$V_{CC} - R_C I_{C0} - V_{CE0} - R_E I_{E0} = 0$$

$$\text{avec: } I_{E0} = I_{B0} + I_{C0} = \left(\frac{1}{\beta} + 1\right) I_{C0}$$

$$\Rightarrow V_{CE0} = V_{CC} - \left(R_C + \left(\frac{1}{\beta} + 1\right)R_E\right) I_{C0}$$



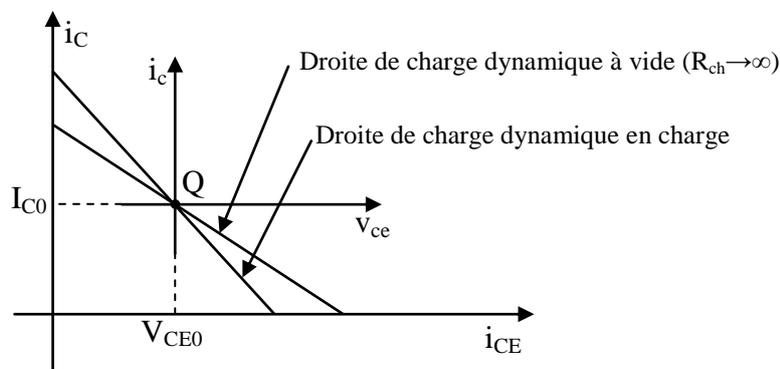
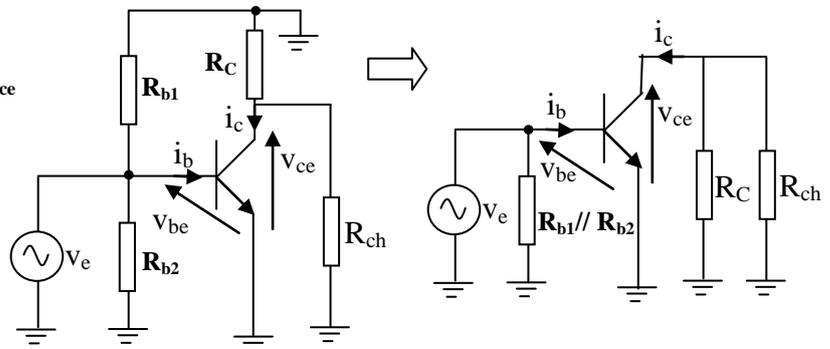
b) En dynamique ($V_{CC}=0$):

Notons en outre qu'en régime alternatif la source d'alimentation continue V_{CC} est équivalente à sa résistance interne supposée nulle (donc le point V_{CC} et la masse sont reliés par un court-circuit en alternatif) et que **les condensateurs sont supposés équivalents à des court-circuits.**

b.1) Droite de charge dynamique :

La droite de charge dynamique s'écrit : $i_c = f(v_{ce})$

$$\text{Amplificateur en charge : } i_c = -\frac{1}{R_C // R_{ch}} v_{ce}$$



$$i_c = I_{C0} + i_c ; v_{ce} = V_{CE0} + v_{ce}$$

i_c : courant total; I_{C0} : courant en statique; i_c : courant en dynamique.

v_{ce} : tension totale; V_{CE0} : tension en statique; v_{ce} : tension en dynamique.

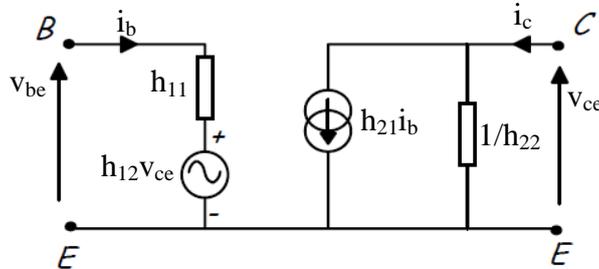
b.2) Schéma équivalent alternatif petits signaux du transistor: paramètres hybrides

Le transistor est considéré comme un quadripôle ; il a deux bornes d'entrée (base et émetteur) et deux bornes de sortie (collecteur et émetteur). L'émetteur est alors commune à l'entrée et à la sortie.

Autour du point de repos Q, les relations entre les faibles variations sont décrites par :

$$\begin{cases} v_{be} = h_{11}i_b + h_{12}v_{ce} \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}v_{ce} \end{cases}$$

Ces relations décrivent les lois électriques du schéma ci dessous qu'on appelle schéma équivalent alternatif petits signaux ou schéma équivalent en dynamique du transistor.



- h_{11} est l'impédance d'entrée du transistor.

$$h_{11} = \frac{kT/q}{I_{B0}} \approx \frac{0.026}{I_{B0}}; I_{B0} \text{ est le courant de la base en statique.}$$

- h_{21} est le gain en courant du transistor.

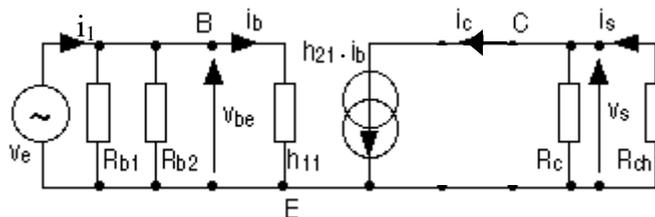
$$h_{21} = \beta.$$

- h_{12} est un terme de réaction interne. Sa valeur est très faible, il sera le plus souvent négligé.
- $1/h_{22}$ est l'impédance de sortie du transistor.

Dans les calculs qui suivent, on prend: $h_{12}=0$ et $h_{22}=0$.

b.3) Paramètres de l'amplificateur :

Si on applique les règles (on court-circuite les sources de tension continues, on ouvre les sources de courant continues et on remplace le transistor par son schéma équivalent), on obtient le schéma équivalent en alternatif ci-dessous. Pour simplifier l'étude, on néglige les impédances des condensateurs (on court-circuite les condensateurs).



b.3.1) Gain en tension :

Le gain en tension A_v est le rapport entre les tensions de sortie et d'entrée : $A_v = \frac{v_s}{v_e}$

Le gain en tension peut être défini de deux manières : Le gain à vide, c'est à dire sans charge connectée en sortie du montage ($R_{ch} \rightarrow \infty$) et le gain en charge, avec la charge connectée.

- **Gain en tension en charge:**

$$\text{On appliquant la loi des mailles : } \begin{cases} v_e = h_{11}i_b \\ v_s = -(R_C // R_{ch})i_c \\ i_c = h_{21}i_b \end{cases} \Rightarrow A_v = \frac{v_s}{v_e} = -\frac{h_{21}(R_C // R_{ch})}{h_{11}}$$

- **Gain en tension à vide ($R_{ch} \rightarrow \infty$):**

Le gain à vide est donnée par : $A_v = -\frac{h_{21}R_C}{h_{11}}$

b.3.2) Impédance d'entrée :

Ensuite, il faut regarder en quoi le montage peut s'interfacer avec la source d'entrée sans la perturber ; il doit rester le plus neutre possible vis à vis de cette source, surtout s'il s'agit d'un capteur de mesure. La grandeur représentative

est l'impédance d'entrée Z_e : $Z_e = \frac{v_e}{i_1}$

$$v_e = (R_{b1} // R_{b2} // h_{11}) i_1 \Rightarrow Z_e = R_{b1} // R_{b2} // h_{11}$$

b.3.3) Impédance de sortie :

Même chose vis à vis de la charge branchée en sortie du montage, qui va utiliser le signal amplifié : il va falloir regarder dans quelle mesure l'étage à transistor n'est pas perturbé par cette charge. La grandeur représentative est

l'impédance de sortie Z_s : $Z_s = \frac{v_s}{i_s} \Big|_{v_e=0}$

$$\begin{cases} v_s = R_C (i_s - i_c) \\ i_c = h_{21} i_b \\ v_e = h_{11} i_b; \quad v_e = 0 \Rightarrow i_b = 0 \end{cases} \Rightarrow Z_s = R_C$$