

**4.1. Définition :**

Le transistor bipolaire est un composant unidirectionnel et ne peut pas amplifier les signaux alternatifs sans ajouter une composante continue par le circuit de polarisation.

Le transistor bipolaire est une source de courant commandée en courant.

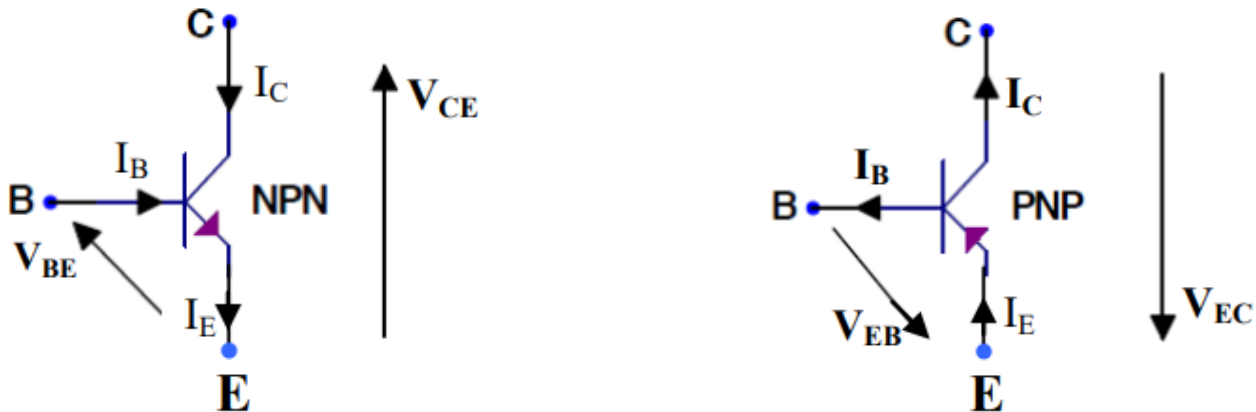
Un transistor sert à amplifier le courant, dans ce cas il fonctionne en régime linéaire.

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 :

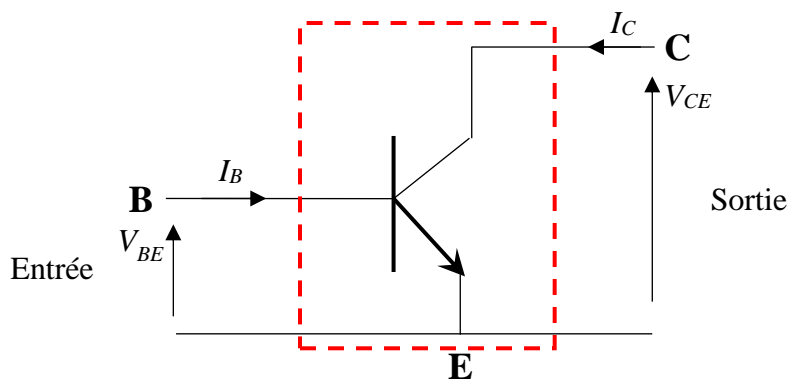
- émetteur (E),
- base (B)
- et collecteur (C).

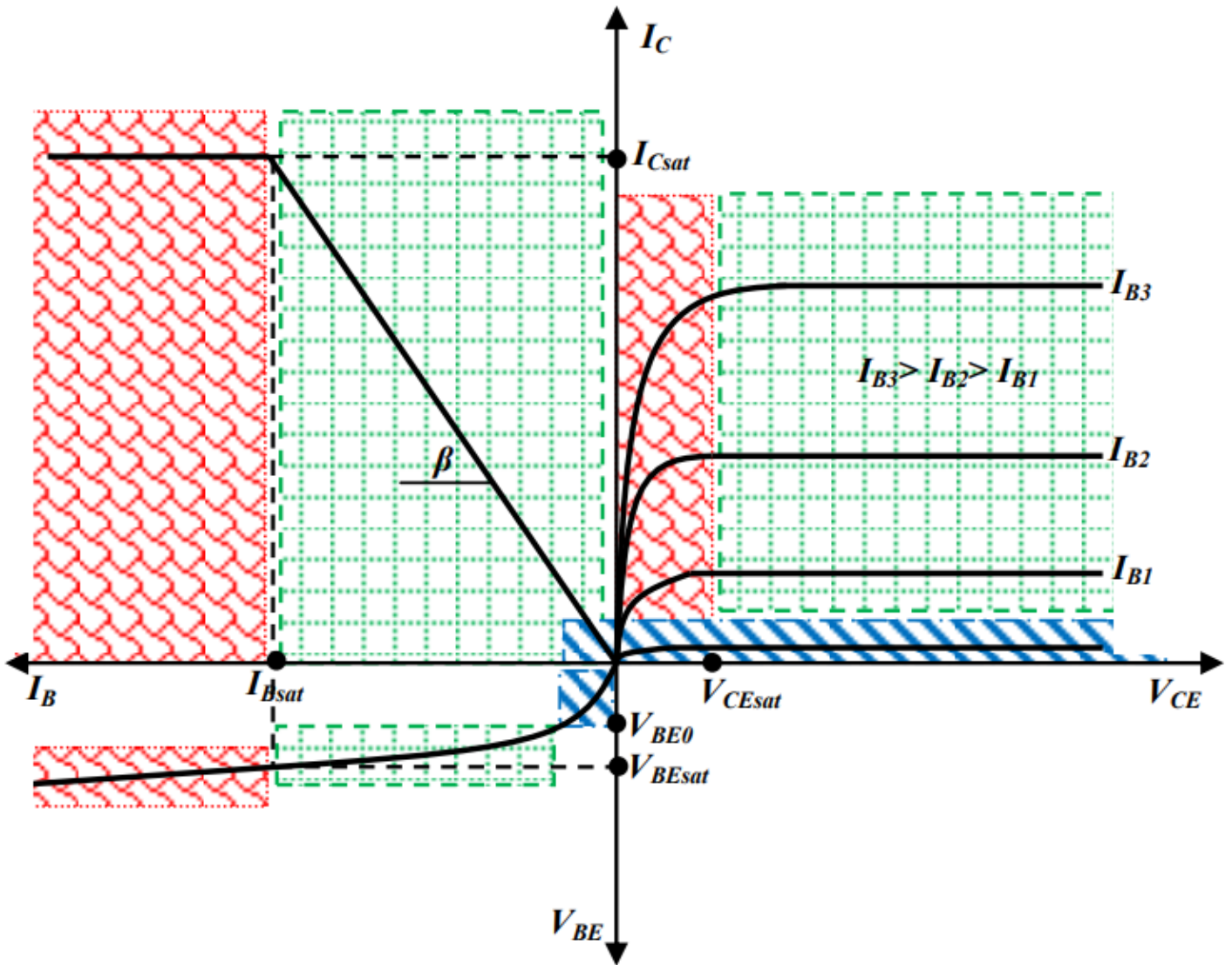
Le courant de l'émetteur est donné par la loi des nœuds :  $I_E = I_B + I_C$ .

**4.2. Réseau de caractéristiques statiques d'un transistor bipolaire NPN**

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

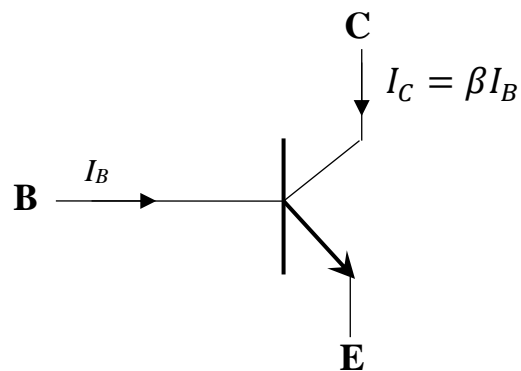
- La caractéristique d'entrée :  $I_B = f(V_{BE})$ .
- La caractéristique de transfert :  $I_C = f(I_B)$  à  $V_{CE}$  constante.
- La caractéristique de sortie :  $I_C = f(V_{CE})$  à  $I_B$  constant.



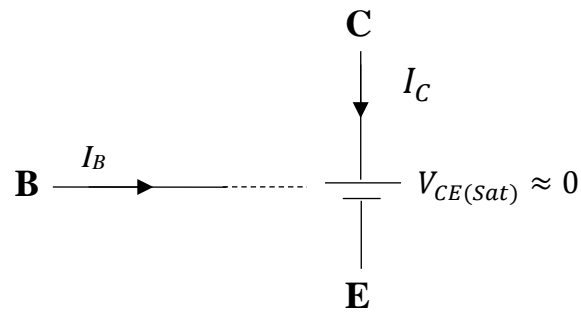


On distingue trois régions :

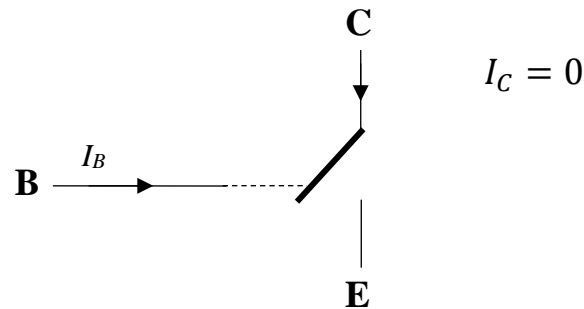
- **Région verte** : le transistor est utilisé comme un amplificateur ( $I_C = \beta I_B$ ).



- **Région rouge (mode commutation) :** le transistor est saturé (interrupteur fermé entre collecteur et émetteur :  $V_{CE}=V_{CE(Sat)}\approx 0$ ).



- **Région Blue (mode commutation):** le transistor est bloqué (interrupteur ouvert entre collecteur et émetteur :  $I_B=0$ ).

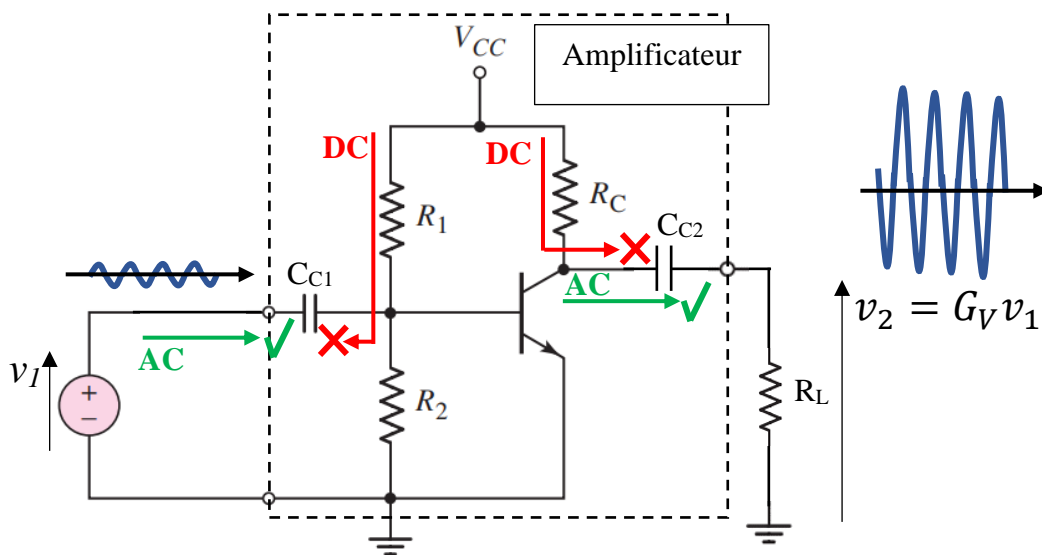


### 4.3. Etude du montage amplificateur à émetteur commun à base d'un BJT NPN

Dans le transistor NPN :  $I_B \geq 0$ ,  $I_C \geq 0$ ,  $I_E \geq 0$ ,  $V_{BE} \geq 0$  et  $V_{CE} \geq 0$ .

Dans le montage émetteur commun :

- L'entrée  $v_1$  est appliquée sur la base à travers la capacité de couplage  $C_{C1}$ ,
- La sortie  $v_2$  est recueillie du collecteur à travers la capacité de couplage  $C_{C2}$ .



Le montage contient deux sources : source continue  $V_{CC}$  (Alimentation) et source alternatif  $v_e$  (Entrée).

On utilise pour cela le théorème de superposition pour analyser le montage.

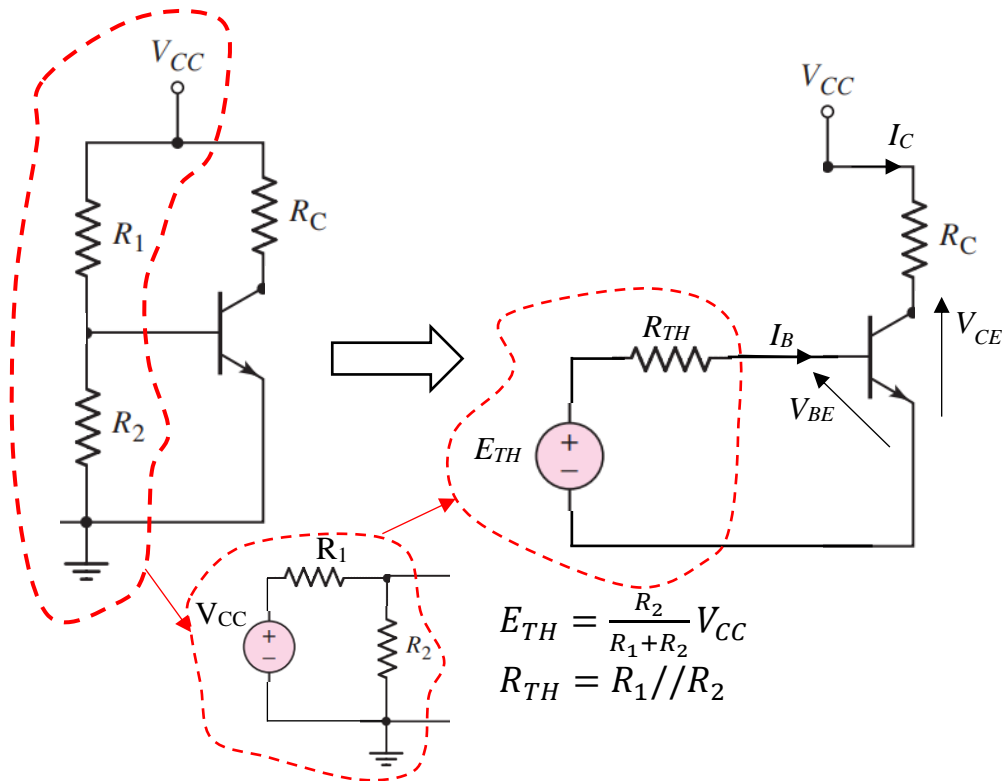
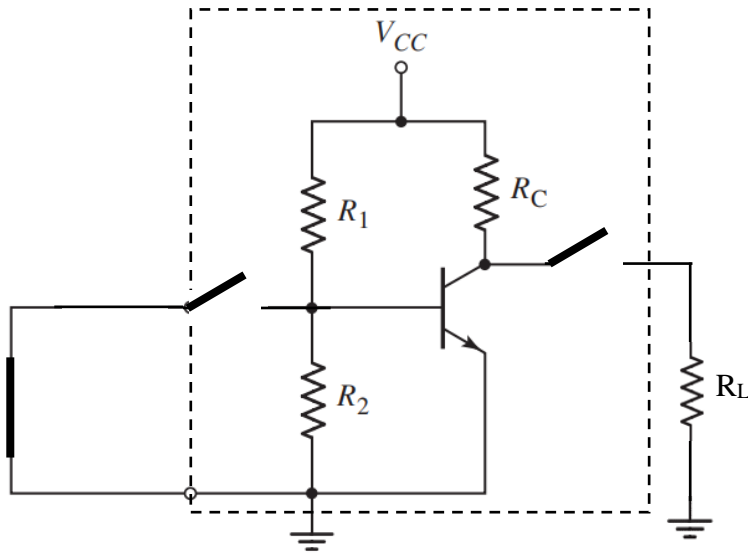
Le courant collecteur :  $i_C = i_C(v_e=0) + i_C(V_{CC}=0) = I_C + i_c$ .

La tension collecteur-émetteur :  $v_{CE} = v_{CE}(v_e=0) + v_{CE}(V_{CC}=0) = V_{CE} + v_{ce}$ .

De la même manière pour les autres grandeurs :  $i_B, v_{BE}, \dots$  etc.

#### 4.3.1. Analyse en DC ( $v_e=0$ ) : droite de charge statique et point de repos

- On remplace tous les condensateurs par des interrupteurs ouverts.
- On court-circuite l'entrée ( $v_I=0$ ).

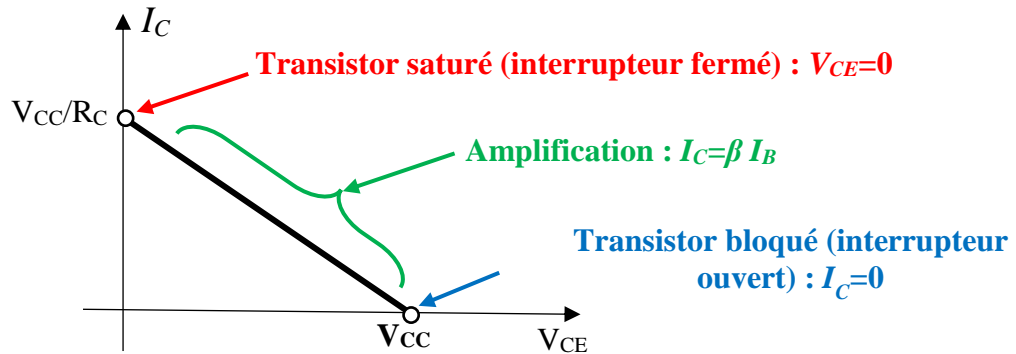


**a) Droite de charge statique  $I_C=f(V_{CE})$**

En appliquant la loi des mailles :

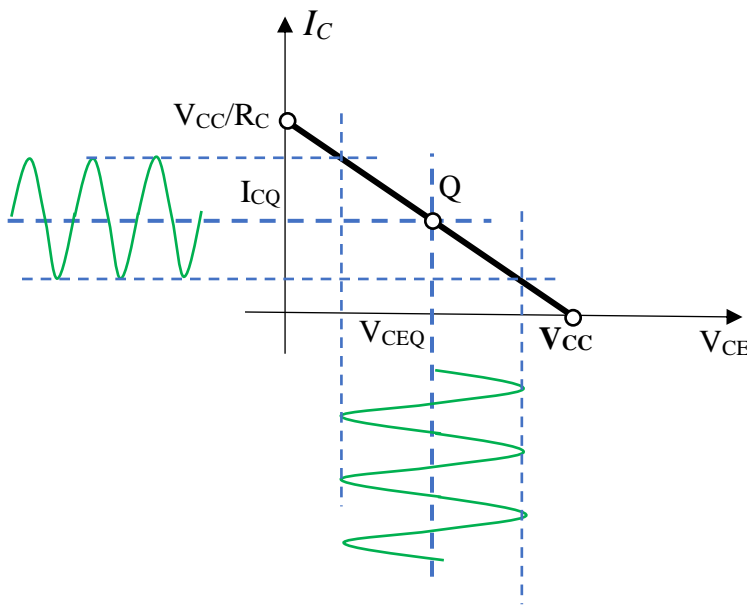
$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0$$

$$\Rightarrow I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} = 0$$



**b) Point de repos Q( $V_{CEQ}$ ,  $I_{CQ}$ )**

Le point de repos Q( $V_{CEQ}$ ,  $I_{CQ}$ ) est choisi de préférence au milieu de la droite de charge statique pour obtenir une dynamique maximale de  $I_C$  et de  $V_{CE}$  et par conséquent une dynamique maximale en sortie.



On peut soit imposer le point de repos (au milieu de préférence) ensuite déterminer les éléments du circuit ou bien à partir des éléments du circuit donné on détermine le point de repos.

- A l'entrée :  $E_{TH} - R_{TH} I_{BQ} - V_{BE0} = 0$  avec :  $V_{BE0} \approx 0.7 V$ .
- A la sortie :  $V_{CC} - R_C I_{CQ} - V_{CEQ} = 0$
- On utilise le réseau de caractéristiques pour placer le point de repos dans la zone d'amplification ( $I_C = \beta I_B$ ) et aussi pour ne pas dépasser les valeurs limites du transistor.

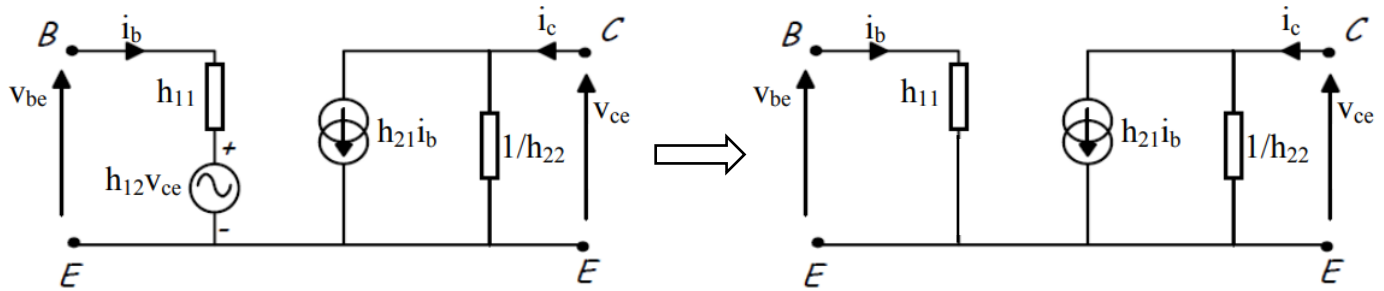
### 4.3.2. Analyse AC petits signaux ( $V_{CC}=0$ )

Dans l'analyse petits signaux :

- on remplace  $V_{CC}$  par la masse:  $V_{CC}=0$ ,
- on remplace les condensateurs de couplage par des courts-circuits:

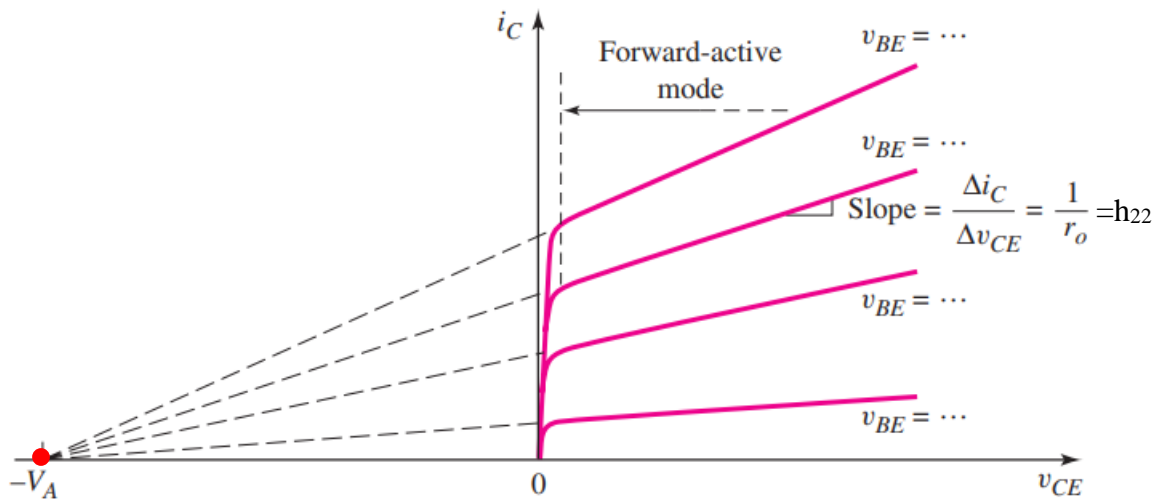


- on remplace le transistor par son schéma équivalent (paramètres hybrides  $h_{ij}$ ):

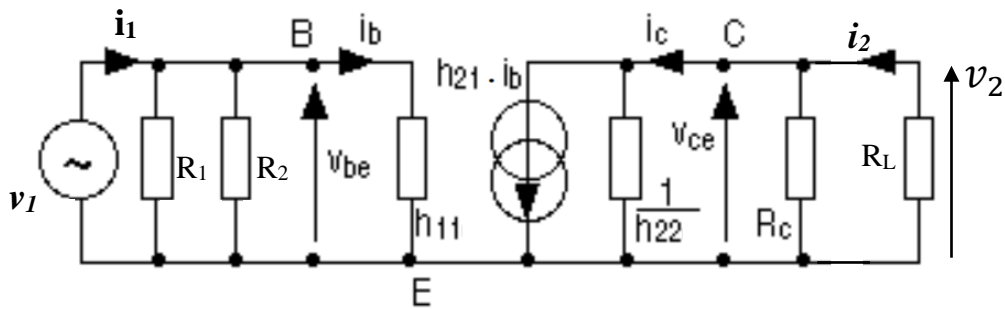
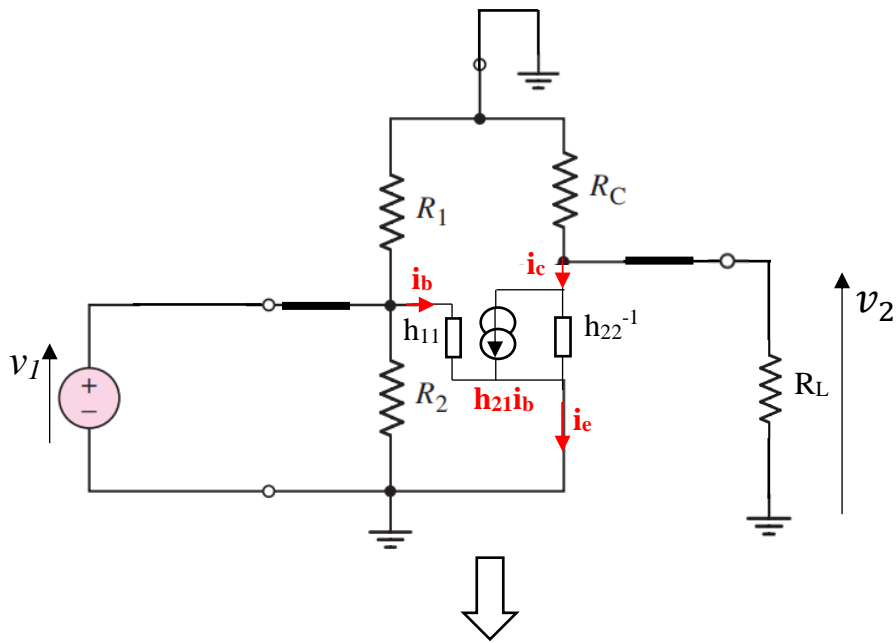


- Le gain en courant  $h_{21}$  est donnée par le fabricant de transistor (datasheet).
- Généralement  $h_{12}$  est négligeable :  $h_{12} \approx 0$ .
- Les paramètres  $h_{11}$  et  $h_{22}$  sont donnée par :  

$$h_{11} = \beta \frac{V_T}{I_{CQ}}, \quad h_{22}^{-1} \approx \frac{V_A}{I_{CQ}}$$
- $V_T$  est la tension thermique :  $V_T = \frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$  à  $T = 300 \text{ K}$ .
- $V_A$  est la tension Early (datasheet).



Le schéma équivalent petits signaux de l'amplificateur devient comme suit :



a) Résistance d'entrée :

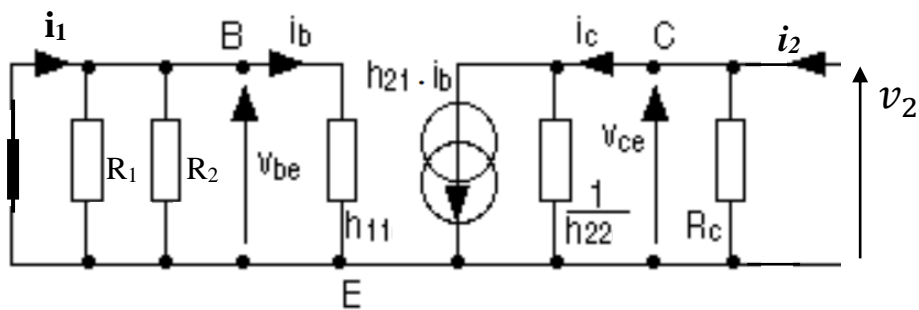
$$R_e = \frac{v_1}{i_1} = h_{11} // R_1 // R_2$$

b) Résistance de sortie ( $R_L$  débranchée et  $v_1 = 0$ ) :

$$R_s = \left. \frac{v_2}{i_2} \right|_{v_1=0}$$

$$h_{11} i_b = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow h_{21} i_b = 0$$

$$\Rightarrow R_s = h_{22}^{-1} // R_C$$



c) Gain en tension  $G_V$  :  $G_V = \frac{v_2}{v_1}$

Ce gain est calculé pour les amplificateurs de tension comme l'amplificateur émetteur commun.

$$v_1 = h_{11}i_b \quad (1)$$

$$i_c = h_{21}i_b + h_{22}v_2 \quad (2)$$

$$v_2 = -(R_L // R_C)i_c \quad (3)$$

$$\Rightarrow G_v = -\frac{h_{21} (R_L // R_C)}{h_{11} (1 + h_{22}(R_L // R_C))},$$

$$\text{pour } h_{22}=0: G_v = -\frac{h_{21}}{h_{11}} (R_L // R_C)$$

⇒ Gain en tension en circuit ouvert ( $R_L \rightarrow \infty$ ) :

$$G_{v0} = -\frac{h_{21} R_C}{h_{11} (1 + h_{22}R_C)},$$

$$\text{pour } h_{22}=0: G_{v0} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} R_C$$

#### d) Gain en courant $G_i$ (amplificateur en charge):

Ce gain est calculé pour les amplificateurs de courant comme l'amplificateur collecteur commun (émetteur suiveur).

$$G_i = \frac{i_L}{i_1} \text{ avec : } i_L = -i_2$$

$$i_b = \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + h_{11}} i_1 \quad (1)$$

$$v_2 = -R_L i_2 = (h_{22}^{-1} // R_C)(i_2 - h_{21}i_b) \quad (2)$$

$$\Rightarrow -R_L i_2 = (h_{22}^{-1} // R_C) \left( i_2 - h_{21} \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + h_{11}} i_1 \right)$$

$$\Rightarrow G_i = \frac{i_L}{i_1} = -\frac{i_2}{i_1} = -\frac{h_{21} \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + h_{11}} h_{22}^{-1} // R_C}{R_L + h_{22}^{-1} // R_C}$$

$$\Rightarrow \text{Gain en courant de court-circuit } (R_L=0) : G_{is} = -h_{21} \cdot \frac{R_1 // R_2}{R_1 // R_2 + h_{11}}$$

#### e) Schéma équivalent d'un amplificateur :

Pour un amplificateur à BJT, Il existe 2 variantes du schéma équivalent :

Schéma équivalent de l'amplificateur de tension en utilisant le générateur de Thévenin en sortie.

$A_{vo}$  est le gain en tension à vide ( $R_L$  débranchée).

$R_i$  est la résistance d'entrée.

$R_o$  est la résistance de sortie.

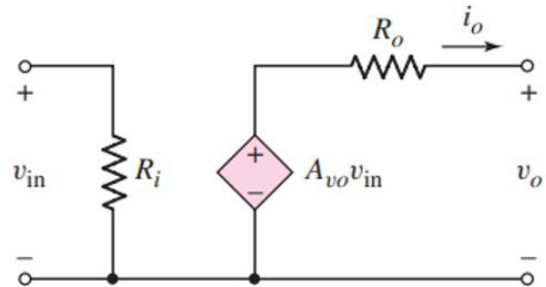
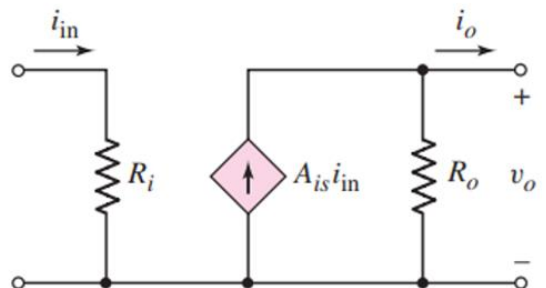


Schéma équivalent de l'amplificateur de courant en utilisant le générateur de Norton en sortie.

$A_{is}$  est le gain en courant de court-circuit ( $R_L=0$ ).

$R_i$  est la résistance d'entrée.

$R_o$  est la résistance de sortie.

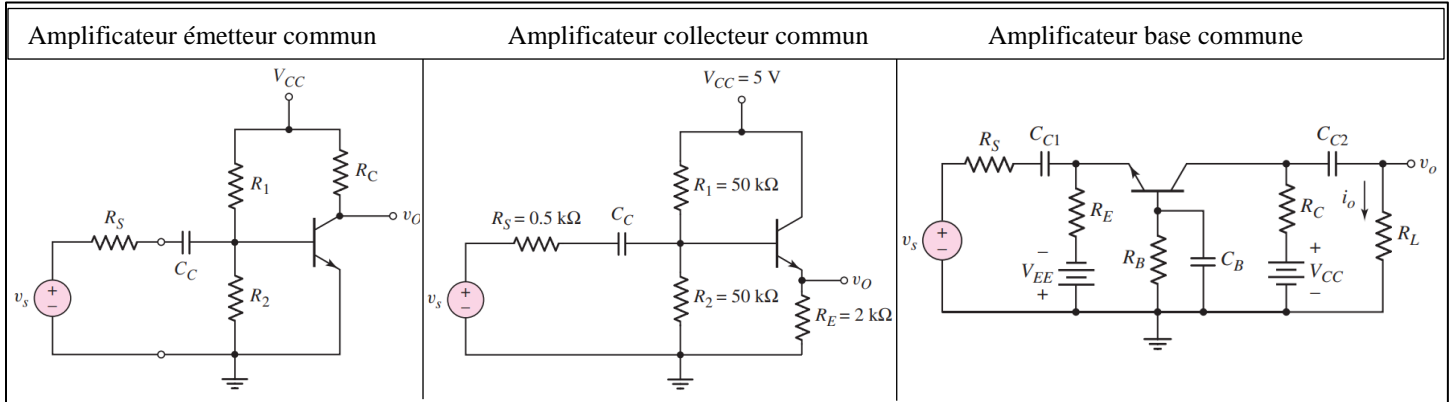




#### 4.4. Comparaison entre les trois configurations d'un amplificateur à transistor bipolaire (BJT)

Les trois montages fondamentaux d'un amplificateur à BJT sont :

- Amplificateur émetteur commun,
- Amplificateur collecteur commun,
- Amplificateur base commune.



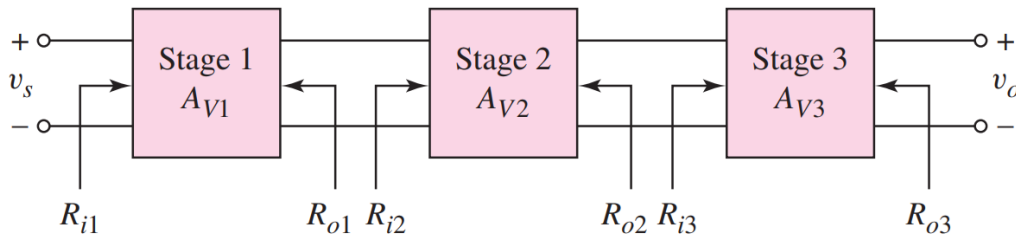
Le choix de l'une de ces trois configurations dépend de :

- type de la source d'entrée (source de courant ou source de tension).
- sortie désirée : tension (grande valeur de  $R_L$ ) ou courant (petite valeur de  $R_L$ ).

Configuration	Gain en tension	Gain en courant	Résistance d'entrée	Résistance de sortie
Emetteur commun	$> 1$	$> 1$	Moyenne	Moyenne ou élevée
Collecteur commun	$\cong 1$	$> 1$	Élevée	Faible
Base commune	$> 1$	$\cong 1$	Faible	Moyenne ou élevée

#### 4.5. Amplificateurs à plusieurs étages

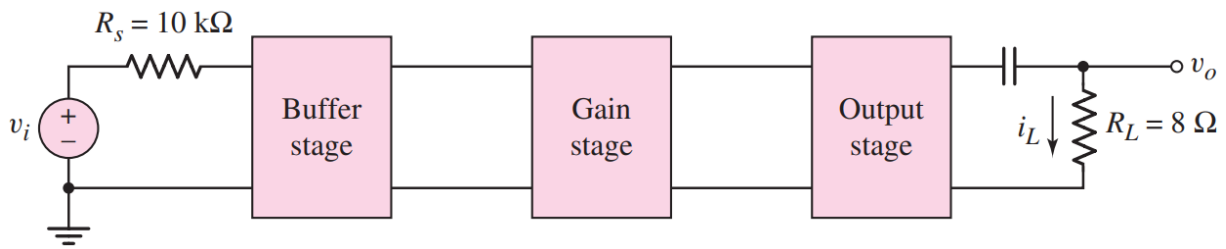
Pour obtenir un amplificateur ayant des performances qui convient une application spécifique, il faut dans la majorité des cas utilisé des montages à plusieurs étages (étages en cascade).



#### Exemple d'application : Amplificateur audio de puissance

Pour obtenir un amplificateur audio de puissance (amplificateur de courant et de tension) à grande résistance d'entrée et à faible résistance de sortie, on peut utiliser trois étages en cascade :

- un amplificateur collecteur commun comme buffer d'entrée,
- un amplificateur émetteur commun comme amplificateur de tension,
- un amplificateur collecteur commun comme amplificateur de courant à faible résistance de sortie.



Cet amplificateur possède les caractéristiques suivantes :

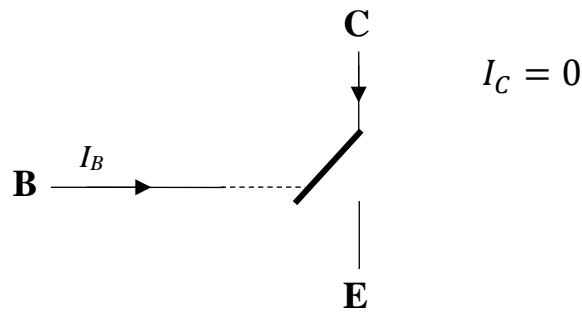
- Résistance d'entrée :  $R_i = R_{i1}$
- Résistance de sortie :  $R_o = R_{o3}$
- Gain en tension :  $G_v = \frac{R_L}{R_L + R_{o3}} G_{v30} \frac{R_{i3}}{R_{i3} + R_{o2}} G_{v20} \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_{o1}} G_{v10} \cong G_{v20} > 1.$
- Gain en courant :  $G_i = \frac{R_{o3}}{R_L + R_{o3}} G_{i3s} \frac{R_{o2}}{R_{i3} + R_{o2}} G_{i2s} \frac{R_{o1}}{R_{i2} + R_{o1}} G_{i1s} \cong G_{i3s} > 1.$

#### 4.6. Transistor BJT en commutation

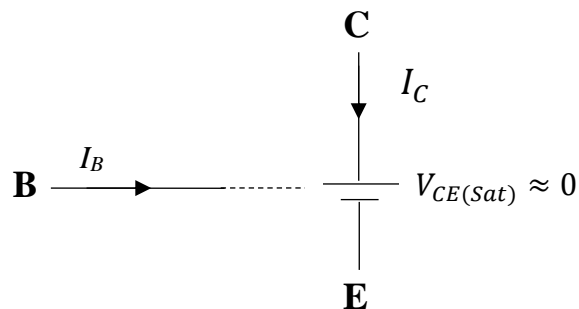
Le transistor se comporte comme un interrupteur entre collecteur et émetteur contrôlé par la base.

On distingue deux situations :

- Si  $v_{BE} < v_{BE0}$  alors le transistor est bloqué (off) :  $i_C = i_B = 0.$



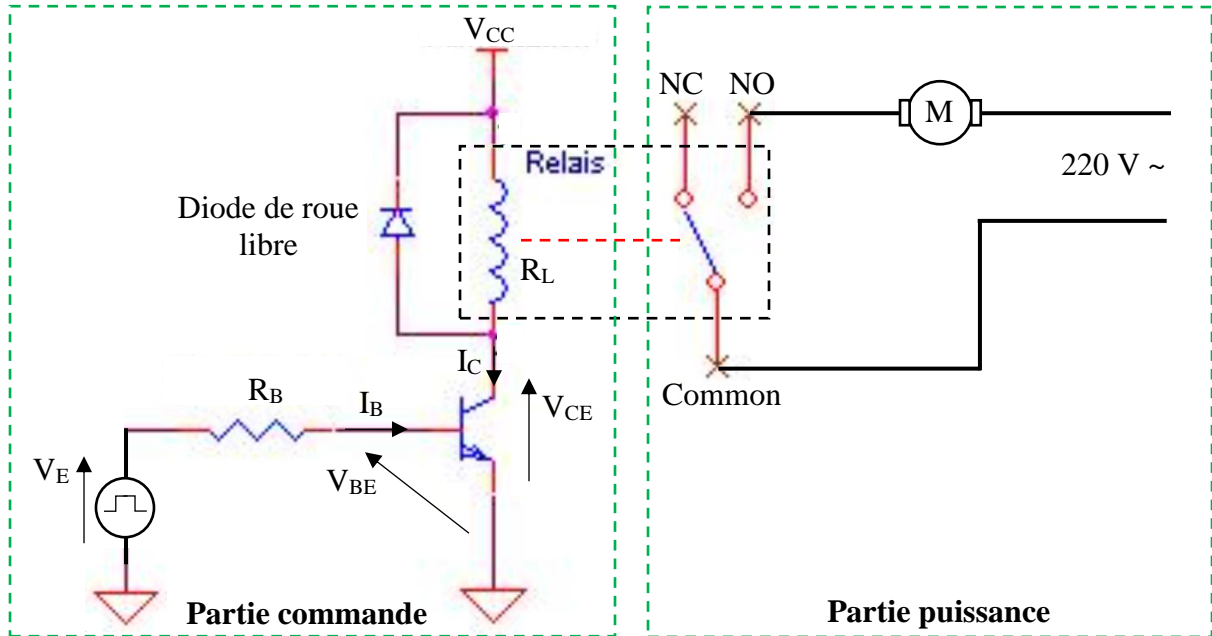
- Si  $v_{BE} \geq v_{BE0}$  et  $i_C < \beta i_B$  alors le transistor est saturé (on) :  $v_{CE} = v_{CEsat} \approx 0$  et  $v_{BE} = v_{BEsat} \approx v_{BE0}.$



### Exemple d'application : commande d'un moteur un relais électromécanique

Un relais électromécanique permet l'ouverture et la fermeture d'un circuit électrique de puissance (moteur dans cet exemple) à partir d'une information logique ( $V_E$  dans cet exemple). Les deux circuits, puissance et commande (information), sont complètement isolés.

- Si  $V_E=0\text{ V}$   $\rightarrow$  Transistor bloqué  $\rightarrow I_C=0 \rightarrow$  relais en position NC (Normally Closed).
- Si  $V_E=5\text{ V}$   $\rightarrow$  Transistor saturé  $\rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \rightarrow$  relais en position NO (Normally Open).



#### Analyse de circuit :

- 1) Détermination de la tension de Thévenin  $V_{BE-TH}$  aux borne de la jonction Base-Emetteur ( $I_B=0$ ):

$$V_E - R_B I_B - V_{BE-TH} = 0 \Rightarrow V_{BE-TH} = V_E.$$

- 2) On compare cette tension par  $V_{BE0}$  ( $V_{BE0} \approx 0.7\text{ V}$ ).

2.1) Si  $V_{BE-TH} = V_E < V_{BE0} \rightarrow$  transistor bloqué  $\rightarrow I_B=0 \rightarrow I_C=0 \rightarrow$  relais en position NC  $\rightarrow$  moteur est éteint.

2.2) Si  $V_{BE-TH} = V_E > V_{BE0} \rightarrow$  transistor saturé  $\rightarrow V_{CE} \approx 0\text{ V} \rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \rightarrow$  relais en position NC  $\rightarrow$  moteur se mettre en mouvement.

#### Détermination de $R_B$ :

La condition de saturation du transistor bipolaire est donnée par:

$$\text{Transistor saturé} \rightarrow \begin{cases} I_C < \beta I_B \\ V_{CE} = V_{CEsat} \approx 0\text{ V} \\ V_{BE} = V_{BEsat} \approx V_{BE0} \approx 0.7\text{ V} \end{cases}$$

D'après le circuit, on a :

$$V_E - R_B I_B - V_{BE0} = 0 \Rightarrow I_B = \frac{V_E - V_{BE0}}{R_B} \quad (1)$$

$$V_{CC} - R_L I_C - V_{CEsat} = 0 \Rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC}}{R_L} \quad (2)$$

$$I_C < \beta I_B \Rightarrow \frac{V_{CC}}{R_L} < \frac{V_E - V_{BE0}}{R_B} \Rightarrow R_B < \frac{V_E - V_{BE0}}{V_{CC}} R_L$$

$$\text{Donc : } R_{B(\max)} = \frac{V_E - V_{BE0}}{V_{CC}} R_L.$$