

LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

Le transistor à jonction

I. Constitution et caractéristiques d'un transistor bipolaire.

I.1. Constitution

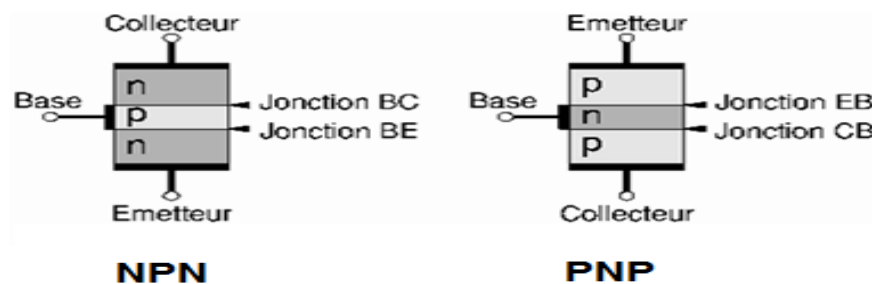
Le transistor bipolaire est constitué d'un barreau de semi-conducteur dans lequel on a créé deux jonctions (trois couches de semi – conducteurs), obtenant ainsi trois zones dopées de façons différentes. Suite à cette disposition deux variantes y découlent, selon la nature des dopages (dopage P ou dopage N) : NPN et PNP.

Le transistor bipolaire possède trois broches (03 pattes) :

- La base (B).
- Le collecteur (C).
- L'émetteur (E).
- ✓ La base traversée par le courant I_B , utilisée comme entrée.
- ✓ Le collecteur traversé par le courant I_C , utilisé comme sortie.
- ✓ L'émetteur traversé par le courant I_E , utilisé comme référence.

On distingue deux types de transistors bipolaires, suite à la disposition des zones dopées :

- Transistor bipolaire NPN
- Transistor bipolaire PNP



Symbole :

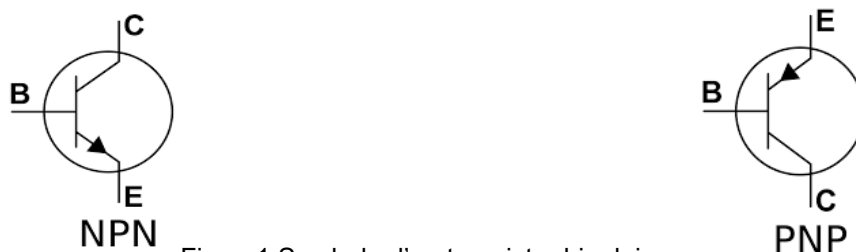


Figure1.Symbole d'un transistor bipolaire

- La flèche représente la jonction base émetteur
PN pour le NPN, NP pour le PNP

- Il faut retenir les noms des pattes. L'émetteur est toujours repéré par la flèche. Le sens de la flèche indique le type de transistor.
- Les deux types de transistors sont nécessaires et complémentaires. Pour certaines applications, on peut utiliser indifféremment les deux types; pour d'autres, on doit utiliser exclusivement un certain type (notamment pour les amplificateurs audio de classe B).

Le transistor bipolaire présente une source de courant commandée en courant qui utilise le plus souvent la base comme entrée de commande.

Le transistor bipolaire sert à amplifier le courant lorsqu'il fonctionne en régime linéaire et il peut être utilisé comme interrupteur commandé lorsqu'il fonctionne en commutation (régime non linéaire).

Symbole, tensions et courants.

Les transistors sont des composants polarisés : les courants indiqués sont les seuls possibles pour un fonctionnement correct. En conséquence, il faudra choisir le type de transistor adapté au besoin (NPN ou PNP) et faire attention au sens de branchement.

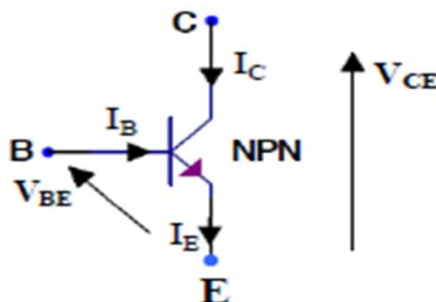


Figure2.Courants et tensions d' un transistor NPN

Dans ce type de transistor, les courants de base et de collecteur sont rentrants, et le courant d'émetteur est sortant. Les tensions V_{BE} et V_{CE} sont ici positives.

I.2.Caractéristiques du transistor bipolaire

Les transistors NPN sont plus répandus car ils ont de meilleures performances que les PNP (la conductibilité du silicium N est meilleure que celle du silicium P, ainsi que la tenue en tension). Nous allons donc ; étudier les caractéristiques des transistors NPN.

Montages de base.

Quand on branche un transistor, on s'arrange pour qu'il y ait une patte commune à l'entrée et à la sortie du montage, il y a 3 manières fondamentales de procéder :

- la patte commune est l'émetteur : on parle de montage **émetteur commun**. L'entrée est la base et la sortie le collecteur.

- La patte commune est la base : on parle de montage **base commune**. L'entrée est l'émetteur et la sortie le collecteur.
- La patte commune est le collecteur : on parle de montage **collecteur commun**. L'entrée est la base et la sortie l'émetteur.

Schéma de mesure des caractéristiques.

Les caractéristiques d'un transistor bipolaire sont données pour un montage très simple, qui est le montage de base : montage émetteur commun. (Voir figure 3).

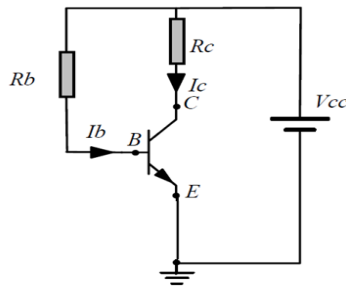


Figure 3. Montage de base émetteur commun

Le schéma montre que la base est polarisée en direct par la résistance de base R_b : le potentiel de la base est alors de 0,7V environ, car l'émetteur est à la masse et la jonction base émetteur est l'équivalent d'une diode passante.

Le collecteur est lui polarisé par la résistance de collecteur R_c de telle manière que la tension du collecteur soit supérieure à la tension de la base : la jonction base collecteur est alors polarisée en inverse.

On polarise donc le transistor avec une simple alimentation continue et deux résistances.

L'entrée est caractérisée par les deux grandeurs I_B et V_{BE} , et la sortie par les grandeurs I_C et V_{CE} , soit quatre (4) variables.

I.2.1 Caractéristique d'entrée.

La caractéristique d'entrée du transistor est donnée par la relation $I_B = f(V_{BE})$ avec $V_{CE} = \text{cte}$.

En fait, le circuit d'entrée est la jonction base émetteur du transistor, soit une jonction diode.

La courbe de la caractéristique d'entrée est montrée par la figure 4 (La tension V_{BE} est d'environ 0,7V pour une polarisation normale du transistor)

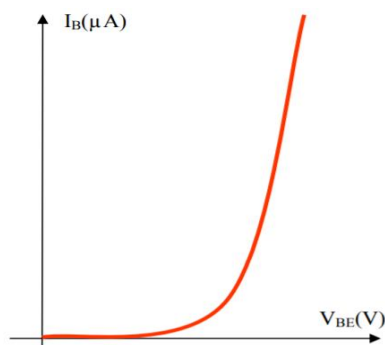


Figure 4. Caractéristique d'entrée du transistor.

I.2.2 Caractéristique de transfert.

Le transistor bipolaire est un amplificateur de courant, il est caractérisé par la relation entre le courant à la sortie I_C et le courant à l'entrée I_B par le facteur gain en courant β (le courant d'émetteur est proportionnel au courant de base)

$$I_C = \beta I_B$$

La caractéristique de transfert est définie par la relation $I_C = f(I_B)$ avec $V_{CE} = \text{cte.}$

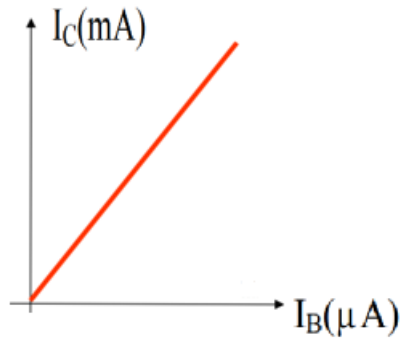
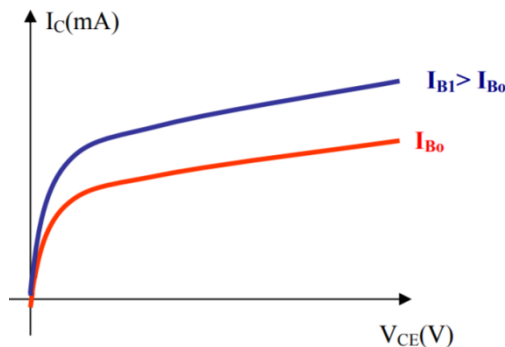


Figure. 5. Caractéristique de transfert du transistor.

La caractéristique de transfert est donc une droite ; le transistor est un générateur de courant commandé par un courant. Si on considère le courant de fuite I_{CEO} , la caractéristique ne passe pas par l'origine, car $I_C = I_{CEO}$ pour $I_B = 0$.

I.2.3 Caractéristique de sortie.

La caractéristique de sortie du transistor est définie par la relation $I_C = f(V_{CE})$ avec $I_B = \text{cte.}$



En pratique, on donne un réseau de caractéristiques pour plusieurs valeurs de I_B .

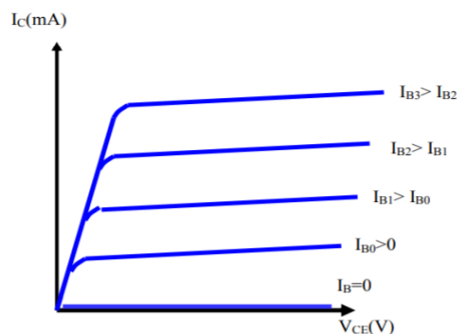


Figure 6. Caractéristiques de sortie du transistor.

Sur cette caractéristique, on peut remarquer que le courant collecteur croît très rapidement pour se stabiliser autour de la valeur βI_{B0}

II.1 Régimes de fonctionnement

Nous avons cité que la base du transistor bipolaire permet de commander le passage du courant, suite à cette commande le transistor comporte deux régimes de fonctionnement:

- Régime de saturation
- Régime linéaire
- ✓ Régime de saturation : dans ce régime, le transistor peut avoir deux états : un état "bloqué" ou un état "passant" (ou "saturé"). On parle de saturation lorsque le transistor est à l'état passant, c'est à dire lorsque le courant traverse le transistor du collecteur vers l'émetteur. Inversement, il est dit bloqué lorsque le courant ne le traverse plus.

Exemple de commande :

En régime de saturation, le transistor bipolaire permet très facilement de commander un élément à partir d'un capteur quelconque. Par exemple, il est possible de placer un capteur de présence (capteur de mouvement) qui émet un signal dans la base du transistor, permettant de commander l'état passant du transistor et ainsi de commander l'activation d'une lampe alimentée (voir figure7)..

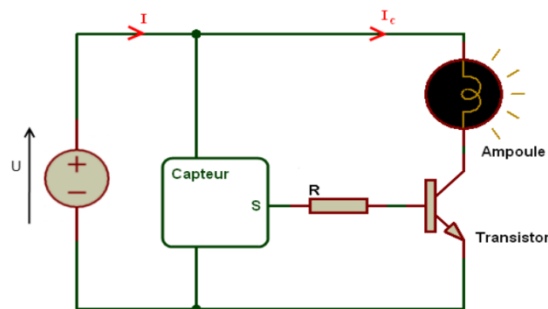


Figure 7. Commande par transistor

Condition de saturation:

- Pour que le transistor soit saturé on doit assurer la condition :

$$I_c < \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CEsat}.$$

C'est également un paramètre constructeur qui dépend beaucoup du transistor.

- ✓ Régime linéaire : ce régime permet de laisser plus ou moins passer le courant à travers le transistor.

Linéarité : Le signal ne doit pas être déformé par la non linéarité de l'amplificateur

En amplification (zone d'activité) le transistor doit assurer la condition :

$$I_c = \beta I_B$$

III. Polarisation du transistor bipolaire

Polariser un transistor c'est le faire conduire à l'aide d'une alimentation continue et par ajout d'éléments externes actifs ou passifs (résistances, inductances, diodes), dans le but d'imposer **le point de fonctionnement**.

Les montages de polarisation d'un transistor bipolaire sont diverses comme :

- Polarisation par résistance de base.
- Polarisation par réaction d'émetteur.
- Polarisation par réaction de collecteur.
- Polarisation par pont.

III.1 Polarisation par une résistance de base.

On détermine le courant I_B en utilisant la maille d'entrée (figure 8)

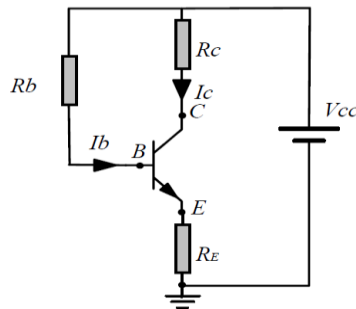


Figure 8. Polarisation par résistance de base

- $V_{CC} = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E$ avec $V_{BE} = 0.7V$
- β est généralement > 100 , comme β est "grand", le courant de base est négligeable par rapport au courant du collecteur avec $I_E = I_C + I_B$ donc on peut écrire que $I_E \approx I_C$

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_B - \beta R_E}$$

- I_C est directement déduit :

$$I_C = \beta I_B$$

- La tension V_{CE} est calculée en utilisant la maille de sortie :

$$\begin{aligned} V_{CC} &= (R_C + R_E) I_C + V_{CE} \\ V_{CE} &= V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \\ I_C &= \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C + R_E} \end{aligned}$$

III.2. Fonctionnement statique:

On parle de fonctionnement statique quand toutes les grandeurs (courants et tensions) sont des grandeurs continues, c'est-à-dire qui ne varient pas dans le temps.

N.B : On les notera en MAJUSCULE

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

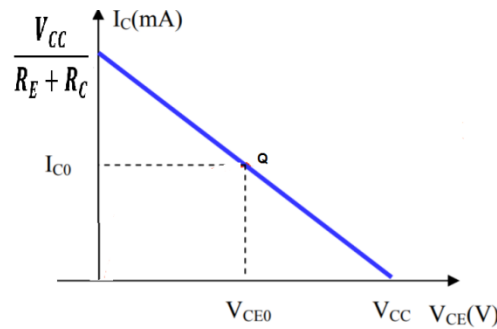


Figure 9 .Droite de charge statique

Pour tracer la droite de charge statique, on prend :

$$I_C = 0 \Rightarrow V_{CC} = V_{CE}$$

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

- Point de fonctionnement du montage :

On choisit le point de fonctionnement **Q** au milieu de la droite de charge statique.

$$V_{CE0} = V_{CC}/2$$

$$I_{C0} = \frac{V_{CC}}{2(R_E + R_C)}$$

- Calcul du point de fonctionnement du transistor bipolaire à partir des caractéristiques :

Un autre moyen de savoir avec quelles résistances polariser le transistor est à l'aide des données du fabricant. Grace aux caractéristiques du transistor, celle qui nous intéresse c'est celle qui donne le courant de collecteur qui est **la caractéristique de sortie I_C** en fonction de la tension **V_{CE}** :

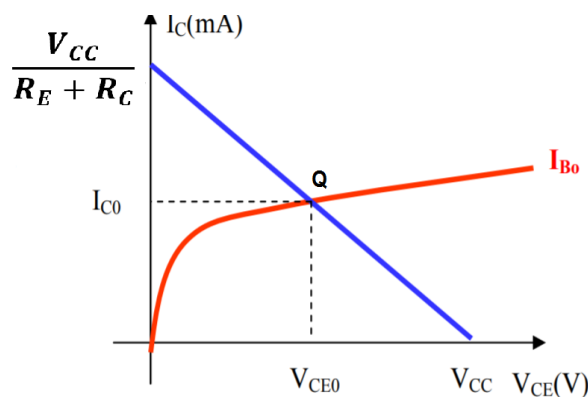


Figure 10 .Intersection de la droite de charge avec la caractéristique de sortie

L'intersection de la droite de charge statique avec le courant base **I_B** donne le point **Q** du transistor (aussi appelé le point de fonctionnement ou le point de repos). (Q vient du mot latin Quies (repos))

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

On trace la droite d'attaque statique $I_B = f(V_{BE})$ sur la caractéristique d'entrée du transistor pour voir le fonctionnement de ce dernier et voir la région dans laquelle il fonctionne.

On peut déterminer graphiquement le point de fonctionnement en traçant la droite d'attaque. (On reprend l'expression de la maille d'entrée de la figure 8) :

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B - \beta R_E}$$

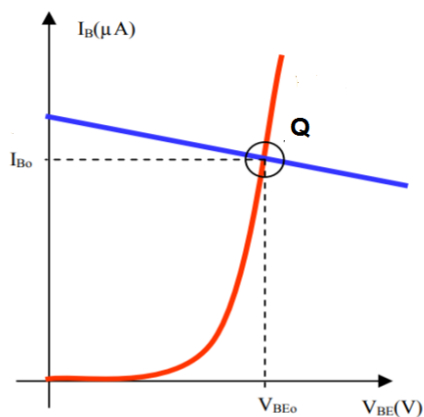


Figure 11 Intersection de la droite d'attaque avec la caractéristique d'entrée

Généralement, V_{CC} est connue et il faut choisir les valeurs de R_B et les autres résistances pour fixer I_{B0} .

I_{B0} étant fixé, on peut en déduire la valeur de I_{C0} par : $I_{C0} = \beta I_{B0}$.

Ou graphiquement par l'exploitation de la caractéristique de transfert du transistor. Mais cela ne peut être fait que si on autorise le passage d'un courant collecteur, c'est à dire s'il existe un circuit de charge.

IV Schéma équivalent d'un transistor bipolaire en régime dynamique :

Le Schéma équivalent en dynamique est lié aux termes :

- Alternatif
- Petits signaux.
- Paramètres hybrides.

Le transistor est considéré comme un quadripôle (voir figure 13) ; avec deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie (une patte sera alors commune à l'entrée et à la sortie) et va être défini par quatre (4) signaux : courant et tension d'entrée, courant et tension de sortie.

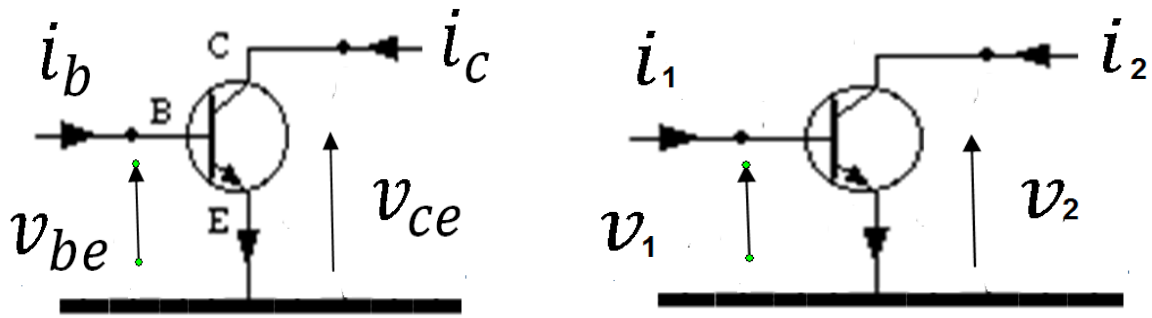


Figure 12. Compatibilité transistor-quadripôle

En basses fréquences (petits signaux) le transistor est défini par les paramètres hybrides h_{ij}

$$\begin{cases} v_1 = h_{11}i_1 + h_{12}v_2 \\ i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}v_2 \end{cases} \quad \begin{cases} v_{be} = h_{11}i_b + h_{12}v_{ce} \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}v_{ce} \end{cases}$$

Ces relations décrivent les lois électriques du schéma équivalent alternatif petits signaux

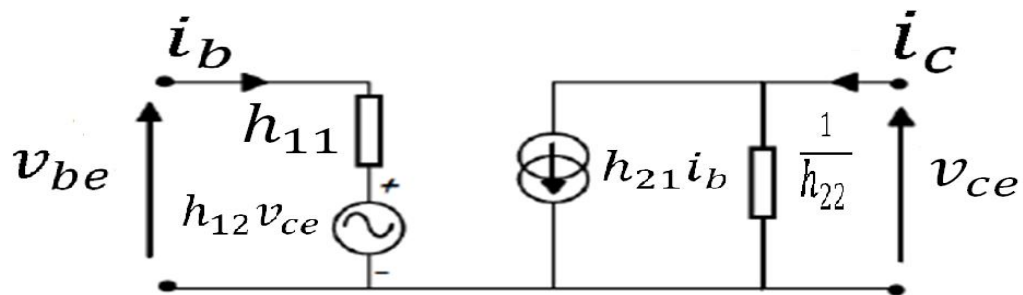


Figure 13. Schéma équivalent d'un transistor en régime dynamique

Si on néglige l'influence des paramètres hybrides h_{12} et h_{22} on aura :

$$\begin{cases} v_{be} = h_{11}i_b \\ i_c = h_{21}i_b \end{cases}$$

Avec : $h_{21} = \beta$: gain en courant du transistor.

h_{11} : impédance d'entrée du transistor.

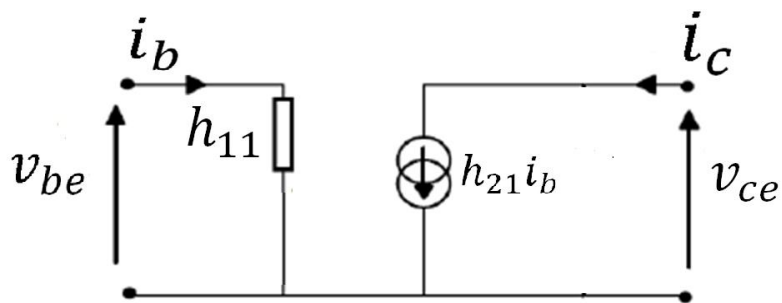


Figure 14. Schéma équivalent simplifié

IV.1. Fonctionnement en petits signaux alternatifs.

- Montage émetteur commun, étude dynamique.

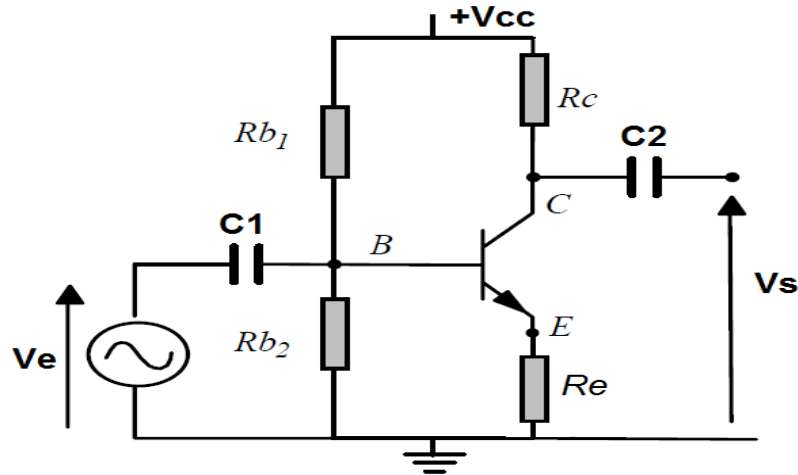


Figure 15. Montage émetteur commun.

Pour appliquer le signal d'entrée à amplifier et prélever le signal amplifié à la sortie (signaux alternatifs) sans perturber le point de fonctionnement statique du montage, on fait appel à des capacités de liaison qui laissent passer l'alternatif mais pas le continu.

Sur le montage les deux condensateurs C1 et C2 sont appelés des condensateurs de liaison, ils servent à séparer l'étage de la source d'entrée et de la charge en continu. Par contre en dynamique, les condensateurs laissent passer le signal alternatif.

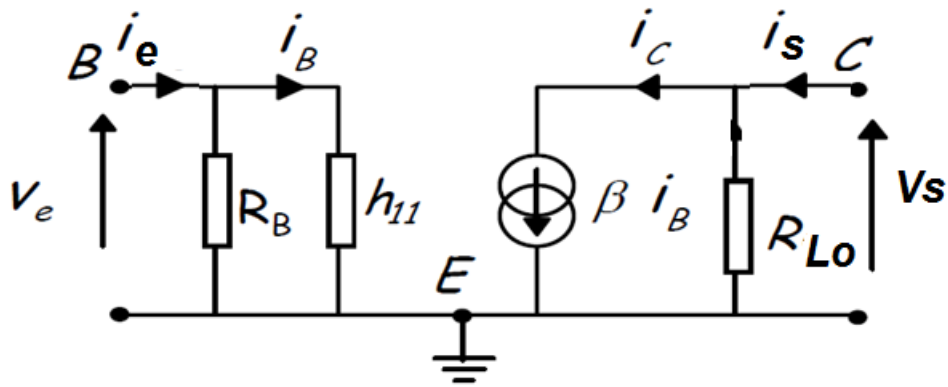
★ N.B : En dynamique:

- Les impédances des condensateurs sont nulles
 - Court-circuit
- Les alimentations continues sont éteintes
 - Court-circuit
- Les grandeurs variables tensions et courants :
 - Restent actives (lettres minuscules)

IV.2. Calcul des éléments dynamiques de l'amplificateur :

On court-circuite les sources de tension continues, on ouvre les sources de courant continues, on néglige les impédances des condensateurs ce qui donne des courts-circuits des capacités et on remplace le transistor par son schéma équivalent (on applique ces règles sur le montage de la figure 15 après rajout d'une charge R_L à la sortie).

Schéma équivalent :



On a : $R_B = R_{b1} // R_{b2}$ et $R_{Lo} = R_C // R_L$

Paramètres de l'amplificateur :

- Gain en tension
- Gain en courant
- Résistance d'entrée
- Résistance de sortie

Gain en tension avec charge :

$$A_V = \frac{V_s}{V_e}$$

On a : $V_e = (R_B // h_{11}) \cdot i_e = h_{11} i_b$ et $V_s = -(h_{21} i_b) \cdot R_{Lo}$

$$A_V = -\frac{h_{21}}{h_{11}} R_{Lo}$$

Gain en courant :

$$A_i = \frac{i_s}{i_e}$$

Pour calculer i_s , on calcule V_s ; $V_s = -R_{Lo} i_s = -(R_C // R_L) \cdot h_{21} i_b$

$i_s = -\frac{R_C}{R_L + R_C} h_{21} i_b$; pour le calcul de i_e on utilise le diviseur de courant.

$$i_b = \frac{R_B}{h_{11} + R_B} i_e \rightarrow i_e = \frac{h_{11} + R_B}{R_B} \cdot i_b \Rightarrow A_i = \frac{i_s}{i_e} = -\frac{R_C \cdot R_B \cdot h_{21}}{(h_{11} + R_B) \cdot (R_L + R_C)}$$

Résistance d'entrée:

$$R_e = R_B // h_{11}$$

Résistance de sortie:

La résistance de charge est déconnectée, la résistance de sortie est vue entre les bornes de la charge

$$R_s = R_C$$

Bonne lecture

S. MOKHNACHE et N. ZERROUG 2020