

Chapitre 3 : Les transistors bipolaires

1. Introduction

Un transistor bipolaire (BJT) est un semi-conducteur comportant deux jonctions PN. Selon l'orientation de ces jonctions, on obtient deux types de transistors : les transistors PNP et les transistors NPN. Il y a donc trois parties : P, N, P pour un transistor PNP et N, P, N pour un transistor NPN. Un nom est donné à chacune de ces parties : base pour la partie centrale, émetteur et collecteur pour les deux autres parties.

Les transistors sont des dispositifs à l'état solide composés de matériaux semi-conducteurs, généralement de silicium, de germanium et de l'arséniure de gallium. Ils possèdent généralement trois bornes : une borne commune aux signaux d'entrée et de sortie, tandis qu'un signal sur l'une des bornes restantes contrôle le courant dans l'autre borne.

2. Description du transistor bipolaire

- ✓ Le transistor à jonction est constitué de trois éléments SCs juxtaposés, donc de deux jonctions.
- ✓ Suivant la nature des dopages, on peut les classer en deux catégories (NPN et PNP).
- ✓ Pour un transistor NPN, deux zones dopées N sont séparées par une zone dopée P tandis que pour un transistor PNP, deux zones dopées P sont séparées par une zone dopée N.
- ✓ Les trois régions sont appelées émetteur (E), base (B) et collecteur (C).
- ✓ La jonction PN reliant la région de la base et celle de l'émetteur est appelée la jonction base-émetteur.
- ✓ La jonction PN reliant la région de la base et celle de collecteur est appelée la jonction base-collecteur.
- ✓ Les trois couches constituant le transistor doivent avoir les propriétés très importantes suivantes :

- La concentration des impuretés (dopage) dans l'émetteur plus grande que dans la base.
- L'épaisseur de la zone de la base est mince.

3. Structure NPN & PNP

Il existe deux manières de disposer les jonctions P-N pour fabriquer un transistor:

- Une zone N, une zone P suivie par une zone N: on a alors un transistor NPN (c'est le modèle le plus répandu);
- Une zone P, une zone N puis une autre zone de type P: on a dans ce cas un transistor PNP.

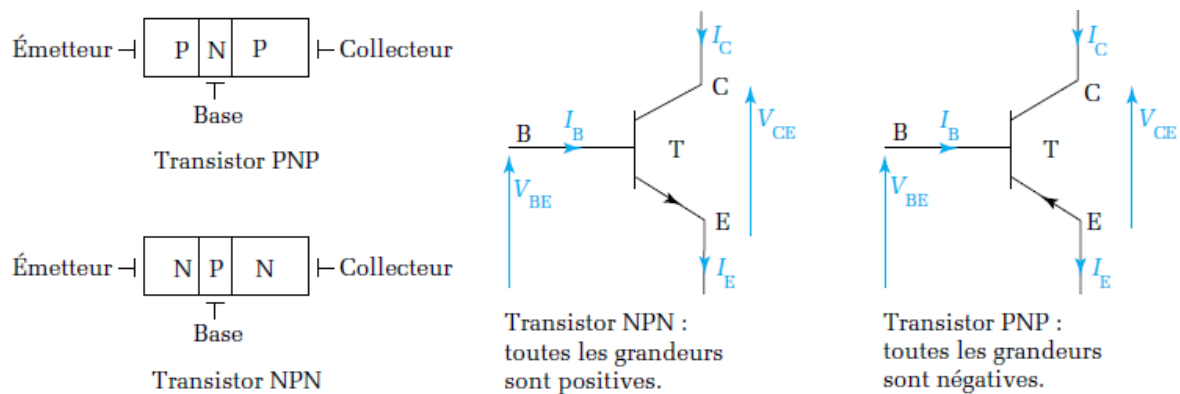


Figure 1

Sur le symbole d'un transistor, une flèche est portée par l'émetteur : elle indique le sens passant de la jonction base-émetteur ; le sens de la flèche permet d'identifier le type du transistor.

- ✓ Le rapport entre le courant collecteur I_C et le courant I_B est appelé le gain β (betat) tel que : $\beta = \frac{I_C}{I_B}$
- ✓ $I_E = I_C + I_B$
- ✓ $V_{CE} = V_{BE} + V_{CB}$

4. Principe de fonctionnement d'un transistor bipolaire

Pour que le transistor puisse fonctionner, les deux jonctions doivent être correctement polarisées par des tensions.

- ✓ La jonction BE est polarisée en directe : $V_B > V_E$.
- ✓ La jonction BC est polarisée en inverse : $V_B < V_C$.
- ✓ **Conditions** : $\Leftrightarrow V_C > V_B > V_E$
- ✓ On dit dans ce cas que le transistor est polarisé normalement.

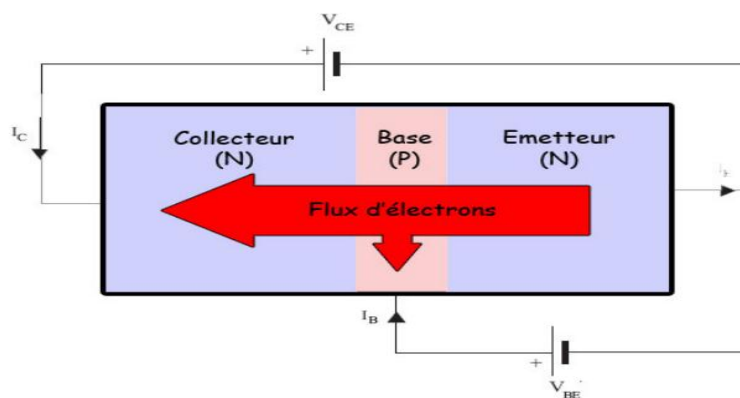


Figure 2 : Polarisation d'un transistor

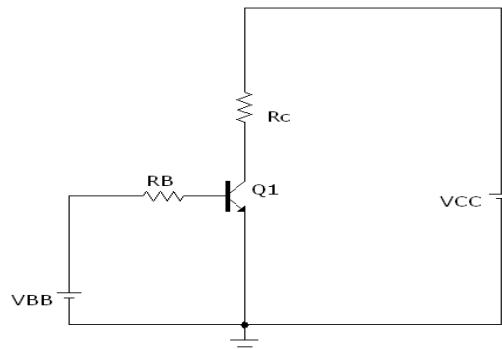
- ✓ *L'effet transistor* consiste à injecter des porteurs d'un émetteur très dopé vers une base assez mince, où ils deviennent minoritaires et grâce au champ inverse intense, ils sont collectés vers la région du collecteur.
- ✓ Environ 99% des électrons libres partent de l'émetteur atteignent le collecteur (quelques dixième de % des électrons se recombinent dans la base) le courant émetteur s'exprime à l'aide de la relation suivante : $I_E = I_S(e^{V_{BE}/U_T} - 1)$

$U_T = 26\text{mV}$ à la température ambiante.

I_S : est le courant de saturation inverse dans la jonction BE.

Exemple

Soit le circuit à base de transistor bipolaire donné par la figure ci-dessous :



On donne : $V_{BB}=5V$, $R_B=10K\Omega$, $R_C=100\Omega$, $V_{CC}=10V$, $V_{BE}=0.7V$.

Déterminer I_B , I_C , I_E , V_{CE} , V_{CB} . Le transistor possède une valeur de $\beta=150$.

Solution

$$I_B = ?, \quad I_C = ?, \quad I_E = ?, \quad V_{CE} = ?, \quad V_{CB} = ?$$

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{10K} = 430\mu A$$

$$I_C = \beta I_B = 150(430\mu A) = 64.5mA$$

$$I_E = I_C + I_B = 150(430\mu A) = 64.5mA + 430\mu A = 64.9mA$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 10 - (64.5)(100) = 3.55V$$

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 3.55 - 0.7 = 2.85V$$

5. Régimes de fonctionnement d'un transistor bipolaire

Il existe 4 modes d'opération qui dépendent de la polarité des tensions appliquées aux jonctions émetteur/base et collecteur/ base.

Mode d'opération	E/B	C/B
Régime actif/normal	Direct	Inverse
Régime saturé	Direct	Direct
Mode de coupure/ bloqué	Inverse	Inverse
Mode inversé	Inverse	Direct

✓ Régime actif

- Dans le régime **actif**, la jonction émetteur-base est polarisée en mode direct et la jonction base-collecteur en mode inverse.

✓ Mode bloqué

- Dans le mode **bloqué**, les deux jonctions sont polarisées en mode inverse. On peut dire qu'un transistor est bloqué lorsque les courants de base et de collecteur sont négligeables ($i_b \approx 0$ et $i_c \approx 0$). Dans ces conditions, la diffusion des porteurs majoritaires est nulle pour les deux jonctions.

✓ Mode saturation

Un transistor est saturé lorsque les jonctions émetteur-base et base collecteur sont polarisées en sens direct.

$I_B > 0$ et $V_{BE} \approx 0.7V$ et la tension $V_{CE} \approx 0$.

✓ Mode inversé

Dans le mode **inversé**, la jonction émetteur-base est polarisée en inverse et la jonction base-collecteur en direct.

6. Caractéristiques statiques d'un transistor

Les constructeurs fournissent une série de courbes pour chaque type de transistor fabriqué. Nous allons nous intéresser principalement aux caractéristiques du montage émetteur commun, comme le montre la figure suivante :

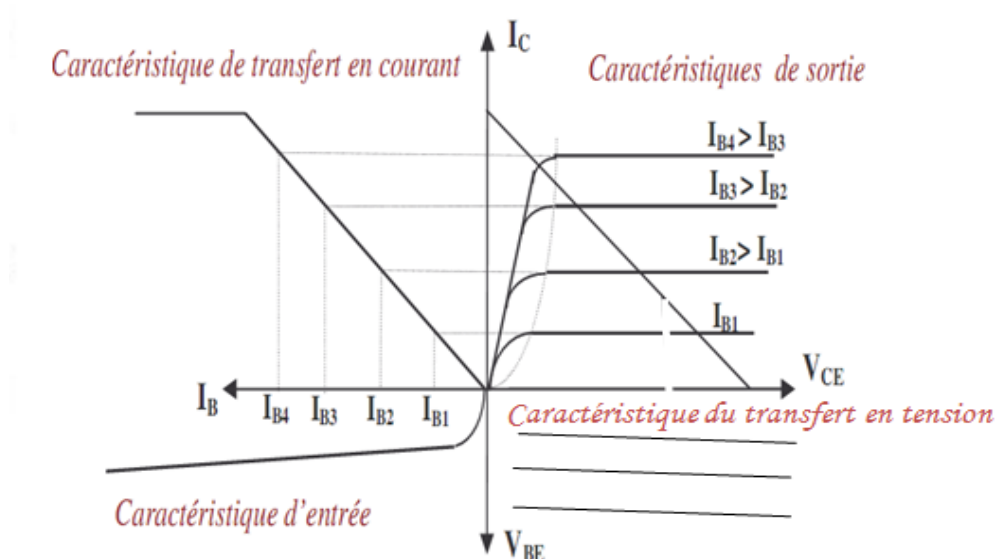


Figure 3 : Caractéristiques statiques du bipolaire

➤ **Caractéristiques de sortie $I_C = f(V_{CE})$**

C'est le réseau $I_C = f(V_{CE})$ à $I_B = \text{Cte}$. Les courbes $I_C = f(V_{CE})$ sont tracés pour différentes valeurs de I_B permettent de définir le comportement de la sortie du transistor et du circuit qui le charge.

Chaque caractéristique est tracée en fixant I_B et en relevant le courant I_C en fonction de V_{CE} . Dans ce réseau on distingue trois zones :

- V_{CE} : faible (inférieure à 0,7V), la jonction base - collecteur est polarisée en directe. Le courant I_C varie linéairement avec V_{CE} . *Région de saturation*
- V_{CE} intermédiaires : Région active
- V_{CE} : grand, il y a claquage inverse de la jonction et croissance du courant par avalanche. Selon les transistors la tension de claquage varie de 30V à 250V.

1.1. Caractéristiques d'entrée $I_B = f(V_{BE})$

Les courbes $I_B = f(V_{BE})$ pour différentes valeurs de V_{CE} donnent le comportement de l'entrée et du circuit qui l'attaque.

Toutes les courbes sont pratiquement confondues. La courbe est identique à la caractéristique d'une diode (jonction base émetteur). Pour un transistor au silicium V_{BE} varie très peu et reste voisin de la tension seuil de la jonction base-émetteur, soit 0,7V.

2. Caractéristiques du gain en courant I_C/I_B

La courbe $I_C = f(I_B)$ c'est un réseau de transfert en courant, la courbe est linéaire et passe par le point $I_B = 0$ et I_{CEO} .

➤ **Caractéristiques de transfert de tension**

Les courbes $V_{BE} = f(V_{CE})$ pour différentes valeurs de I_B donnent la réaction du circuit de sortie sur le circuit d'entrée.

7. Droite de charge et d'attaque statique

7.1. La droite de charge

La droite de charge est celle dont l'équation relie le courant de sortie I_C à la tension de sortie V_{CE} .

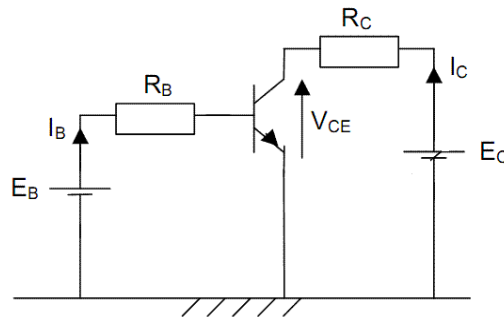
7.2. La droite d'attaque

La droite d'attaque est celle dont l'équation relie le courant d'entrée I_B à la tension d'entrée V_{BE} .

8. Circuits de polarisation d'un transistor bipolaire

Polariser un transistor, ça revient à définir les grandeurs continues (statiques) I_B , I_C , V_{CE} et V_{BE} . La connaissance de valeur de ces paramètres permet de fixer un point de fonctionnement (repos) Q.

2.1. Polarisation par courant de base imposé

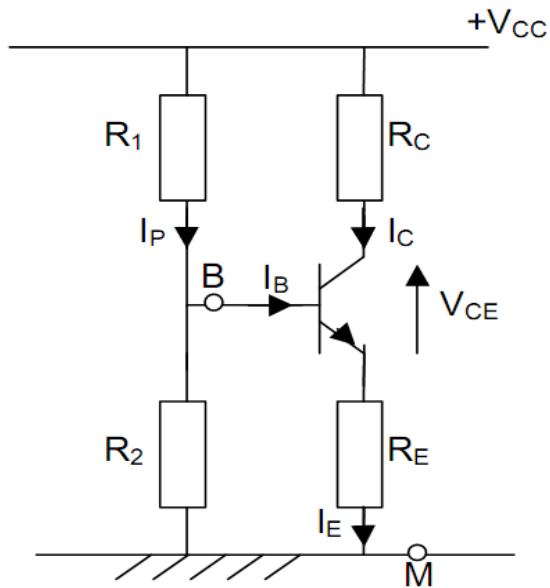


Trouver l'équation de la droite de charge et d'attaque.

- L'équation de la droite de charge. $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$
- L'équation de la droite d'attaque. $I_B = \frac{V_{BB}}{R_B} - \frac{V_{BE}}{R_B}$

2.2. Polarisation par pont de base

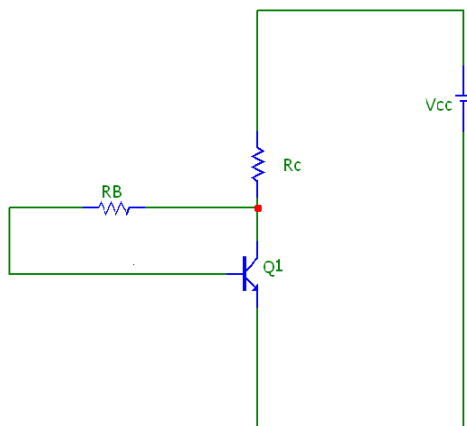
- Dans cette configuration on économise une alimentation.
- Les résistances R_1 et R_2 sont choisies de sorte que le courant I_B soit négligeable devant le courant traversant ces résistances.



$\beta=100$, $V_{CC}=10V$ et que l'on désire un point de fonctionnement $I_C=5mA$ et $V_{CE}=5V$, $R_E=495\Omega$, $R_2=6.8K\Omega$, $V_{BE}=0.6V$.

Quelles est la valeur de R_1 ? pour aboutir à ce point de repos ?.

2.3. Polarisation par résistance base-collecteur



$V_{CC}=10V$, $V_{CE0}=5V$; $I_{C0}=5mA$; $\beta=200$, $V_{BE}=0.6V$.

R_C = ? ; R_B = ?.

9. Utilisations et applications

Le transistor bipolaire est l'opérateur technique de base de fonctions de l'électronique telles que l'**amplification** ou la **commutation**.

10. Transistors bipolaires en régime d'amplification

Le premier rôle du transistor est l'amplification. Il est utilisé pour amplifier n'importe quel type de signal « BF » ou « HF ».

10.1. Exemple d'un montage amplificateur

On ajoute au potentiel continu de base un signal variable au cours du temps (V_1 : générateur de fem e et de résistance R_g), avec l'utilisation des condensateurs de liaison (C_1 et C_2) et de découplage (C_E) comme le montre la figure ci-dessous (amplificateur en émetteur commun).

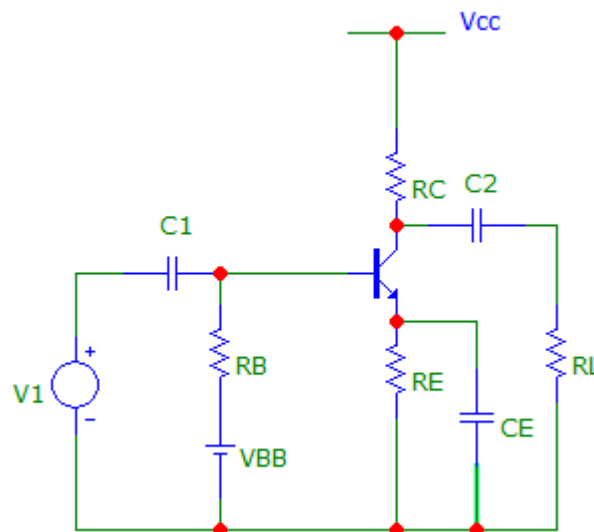
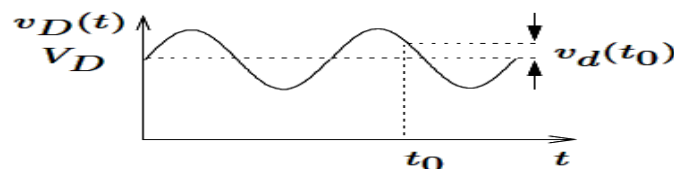


Figure 5. 1

Les grandeurs électriques envisagées dépendent du temps (exemple : tension émetteur-base $V_{BE}(t)$, courant collecteur $I_C(t)$).

Variations de faibles amplitudes de tensions et de courants.



Un régime dynamique particulier est le régime petit signal où les grandeurs électriques sont formées par une valeur statique plus une petite variation dynamique autour de cette valeur :

$$V_{BE}(t) = V_{BE} + v_{BE}(t) = V_{BE} + \Delta V_{BE} \sin \omega t \quad (\text{cas d'un régime sinusoïdal})$$

$$I_C(t) = I_C + i_C(t) = I_C + \Delta I_C \sin \omega t \quad (\text{cas d'un régime sinusoïdal})$$

Remarque :

- Les grandeurs continues, notées en majuscules, (V_{BE} , I_C ,) définissent le point de fonctionnement statique.
- Les grandeurs dynamiques, notées en minuscules, (v_{be} , i_c ) définissent le fonctionnement dynamique.
- Le régime petit signal est toujours caractérisé par des amplitudes crêtes des grandeurs dynamiques beaucoup plus petites que les valeurs des grandeurs statiques ($\Delta V_{BE} \ll V_{BE}$, $\Delta I_C \ll I_C$ )

10.2. Modèle du transistor petit signal

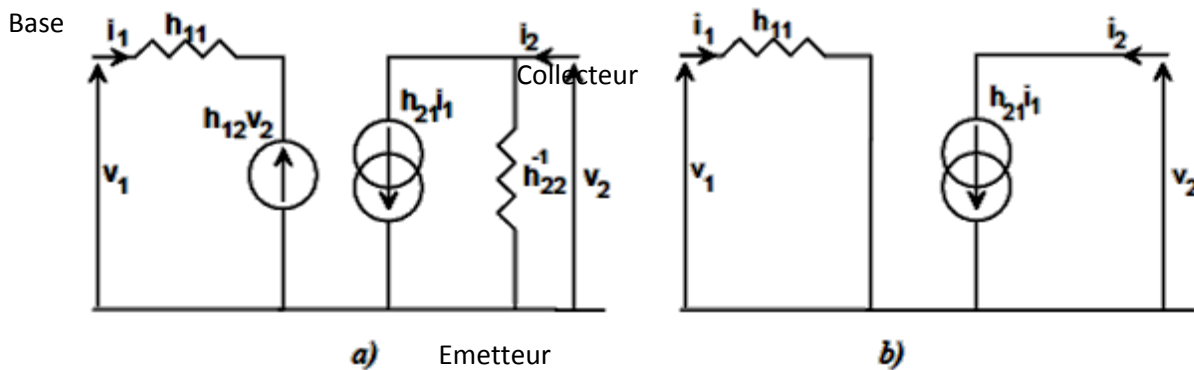


Figure 4: Schémas équivalents petits signaux en basse fréquence a) : Schéma complet ; b) Schéma simplifié

h_{11} : impédance d'entrée.

h_{21} : gain en courant.

L'exploitation du schéma équivalent du transistor permettra de calculer les grandeurs suivantes :

- L'amplification en courant $A_i = \frac{i_2}{i_1}$
- L'amplification en tension $A_v = \frac{v_2}{v_1}$
- Impédance d'entrée $Z_e = \frac{v_1}{i_1}$
- Impédance de sortie $Z_s = \frac{v_2}{i_2}$

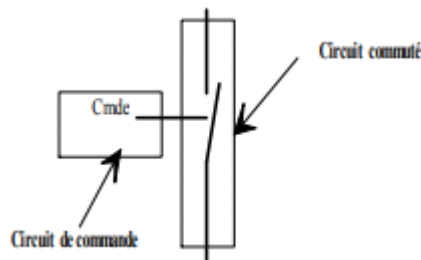
Remarque :

Dans le régime dynamique :

- ✓ Les condensateurs C sont remplacés par des courts circuits à la fréquence du signal.
- ✓ La source CC est remplacée par la mise à la terre.

10.3. Transistors bipolaires en régime de commutation

Le transistor en commutation est utilisé afin d'ouvrir ou de fermer un circuit. Ainsi il peut commander une LED, un relais, un moteur...etc... On assimile généralement le circuit de sortie du transistor à un interrupteur qui est commandé soit par une tension, soit par un courant suivant le type de transistor choisi.

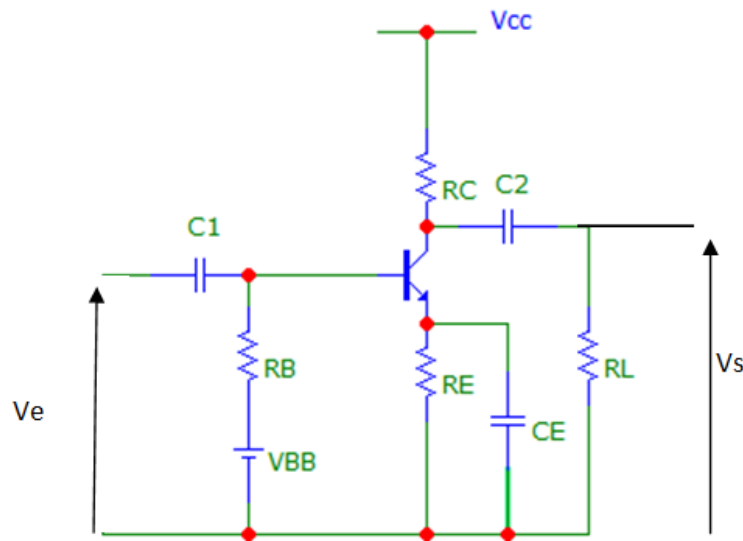


Le transistor se comporte comme un interrupteur entre C et E commandé par la base.

- ✓ Transistor bloqué si ($V_{be}=0$) I_b est nul $\rightarrow I_c=0$ Transistor bloqué $\Leftrightarrow$ interrupteur ouvert ;
- ✓ $V_{be}=0.7V \Leftrightarrow$ Interrupteur fermé ; le transistor est saturé: $I_b > I_c / \beta_{min}$ ($V_{cesat}=0V$).

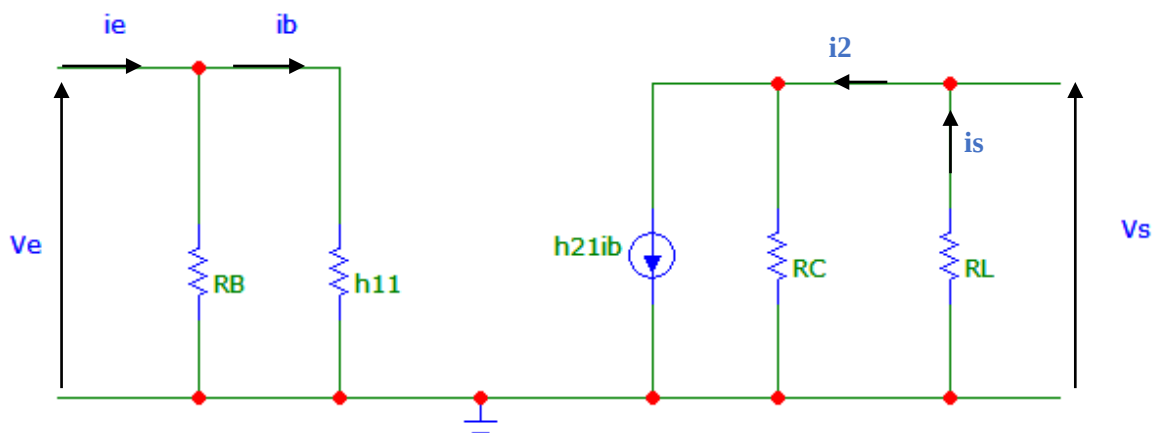
11. Etude du montage émetteur commun

➤ Montage



En régime dynamique les condensateurs C_1 , C_2 et C_E sont remplacés par des court circuits

➤ Le schéma équivalent en alternatif



➤ Le gain en tension du montage : $G_V = \frac{V_s}{V_e}$

$$v_s = -h_{21} \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} i_b \quad (1)$$

$$v_e = h_{11} i_b \Rightarrow \quad (2)$$

On prend le rapport l'eq1/l'eq2 on obtient :

$$G_V = \frac{v_s}{v_e} = -h_{21} \frac{R_C R_L}{(R_C + R_L) h_{11}}$$

➤ Le gain en courant du montage : $A_i = \frac{i_s}{i_e}$

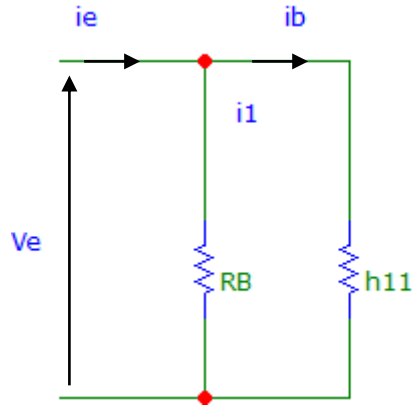
$$i_s = \frac{R_C}{R_C + R_L} h_{21} i_b \quad (3)$$

$$i_b = \frac{R_B}{R_B + h_{11}} i_e \Rightarrow i_e = \frac{R_B + h_{11}}{R_B} i_b \quad (4)$$

Alors :

$$A_i = \frac{i_s}{i_e} = \frac{R_c}{R_c + R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{11}} h_{21}$$

➤ L'impédance d'entrée



$$z_e = \frac{v_e}{i_e}$$

$$v_e = h_{11} i_b \quad (5)$$

$$i_b = \frac{R_B}{R_B + h_{11}} i_e \Rightarrow i_e = \frac{R_B + h_{11}}{R_B} i_b \quad (6)$$

$$\frac{i_e}{v_e} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11}} = R_B // h_{11}$$

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

➤ L'impédance de sortie

$$z_s = \left. \frac{V_s}{i_s} \right|_{e_g=0}$$

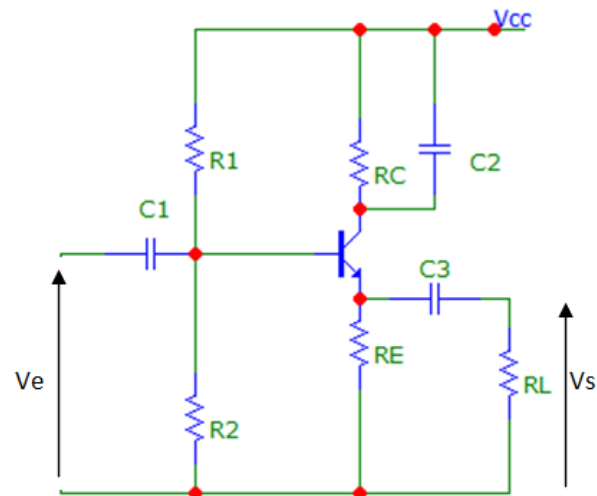
$$z_s = \frac{v_s}{i_s} \text{ avec } \begin{cases} R_L & \text{débranchée} \\ v_e = 0 \end{cases}$$

$$v_e = 0 \Rightarrow i_e = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow h_{21} i_b = 0 \Rightarrow$$

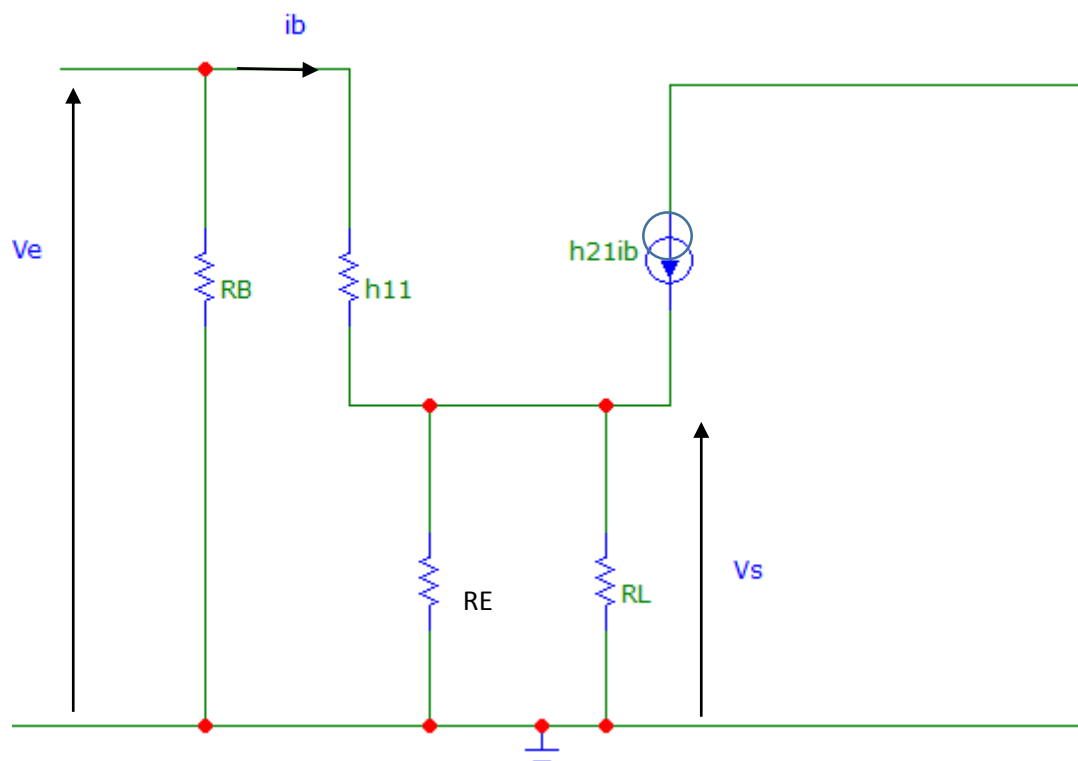
$$z_s = R_c$$

12. Etude du montage collecteur commun

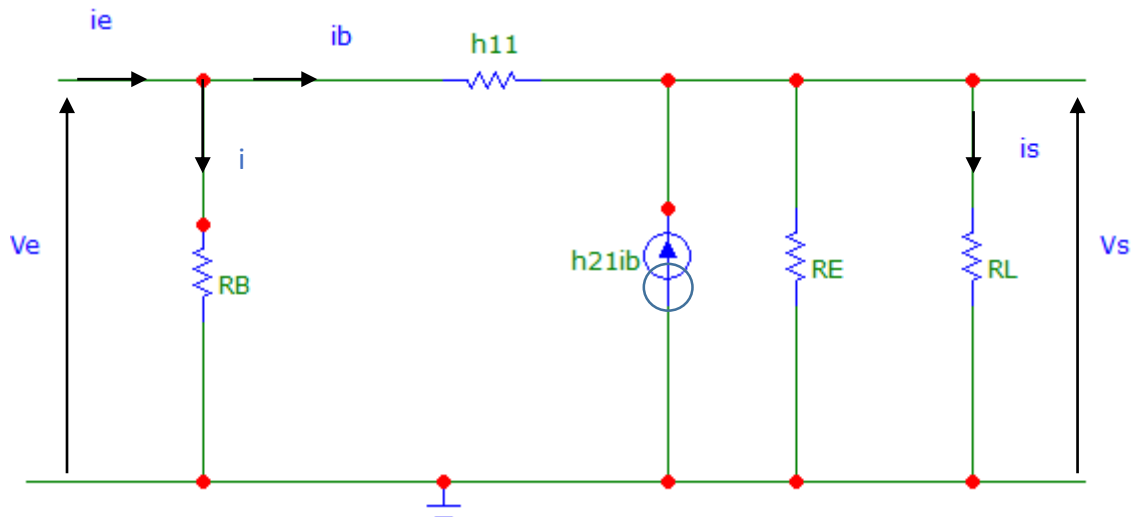
➤ Montage



➤ Le schéma équivalent en alternatif :



On pose $R_B = R1 // R2$



➤ Le gain en tension du montage : $G_v = \frac{V_s}{V_e}$

$$V_s = (R_E // R_L)(1 + h_{21})i_b \quad (1)$$

$$V_e = h_{11}i_b + V_s = [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]i_b \quad (2)$$

L'équation (1)/(2) donne :

$$G_v = \frac{(R_E // R_L)(1 + h_{21})}{h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})}$$

➤ L'impédance d'entrée :

$$i_e = i + i_b = \frac{V_e}{R_B} + i_b \quad (3)$$

$$\text{De l'équation (2)} \Rightarrow i_b = \frac{V_e}{h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})} \quad (4)$$

(4) dans (3)

$$i_e = \frac{V_e}{R_B} + \frac{V_e}{h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})}$$

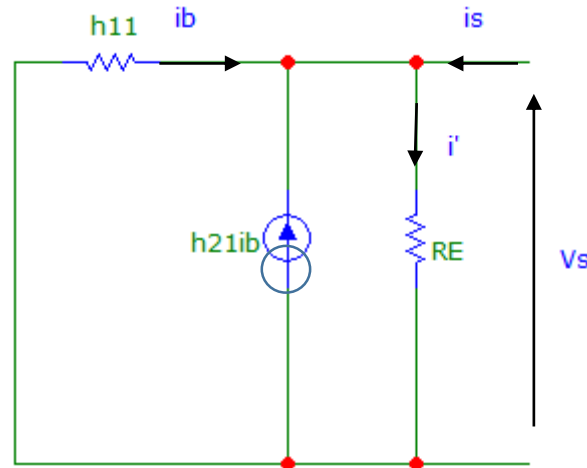
$$\frac{i_e}{V_e} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})}$$

Donc

$$Z_e = R_B // [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]$$

➤ L'impédance de sortie

$$z_s = \left. \frac{V_s}{i_s} \right|_{V_e(t)=0} \text{ et } R_L \text{ débranchée (voir la figure ci-dessous)}$$



Débrancher la charge

Court-circuité l'entrée V_e

$$i_s = i' - (1 + h_{21})i_b = \frac{V_s}{R_E} - (1 + h_{21})i_b \quad (5)$$

$$V_s = -h_{11}i_b \quad (6)$$

On remplace l'équation 5 dans l'équation 6 on obtient :

$$i_s = \frac{V_s}{R_E} + \frac{V_s}{h_{11}}(1 + h_{21})$$

$$\frac{i_s}{V_s} = \frac{1}{z_s} = \frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{21})}{h_{11}}$$

$$Z_s = R_E // (h_{11}/(1 + h_{21}))$$

➤ Le gain en courant du montage : $G_i = \frac{i_s}{i_e} = \frac{i_s}{i_b} \cdot \frac{i_b}{i_e}$

En utilisant le diviseur de courant :

$$i_s = \frac{R_E}{R_E + R_L}(1 + h_{21})i_b \Rightarrow \frac{i_s}{i_b} = \frac{R_E}{R_E + R_L}(1 + h_{21}) \quad (7)$$

Il faut chercher $i_e = f(i_b)$

$$\frac{1}{z_e} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})} \text{ (voir la section } Z_e)$$

$$V_e = h_{11}i_b + (1 + h_{21})(R_E // R_L)i_b \Rightarrow \frac{V_e}{i_b} = h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})$$

$$V_e = z_e i_e \Rightarrow i_e = \frac{V_e}{z_e} = [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})] \cdot i_b / z_e$$

$$\frac{i_e}{i_b} = [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})] / z_e \Rightarrow$$

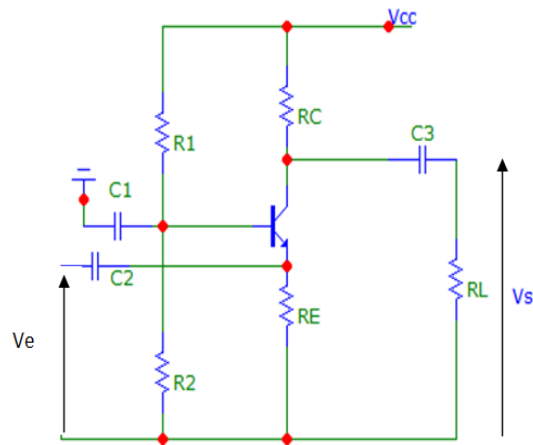
$$\frac{i_e}{i_b} = \frac{[h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]}{R_B // [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]} \quad (8)$$

La multiplication de l'éq (7) et (8) donne :

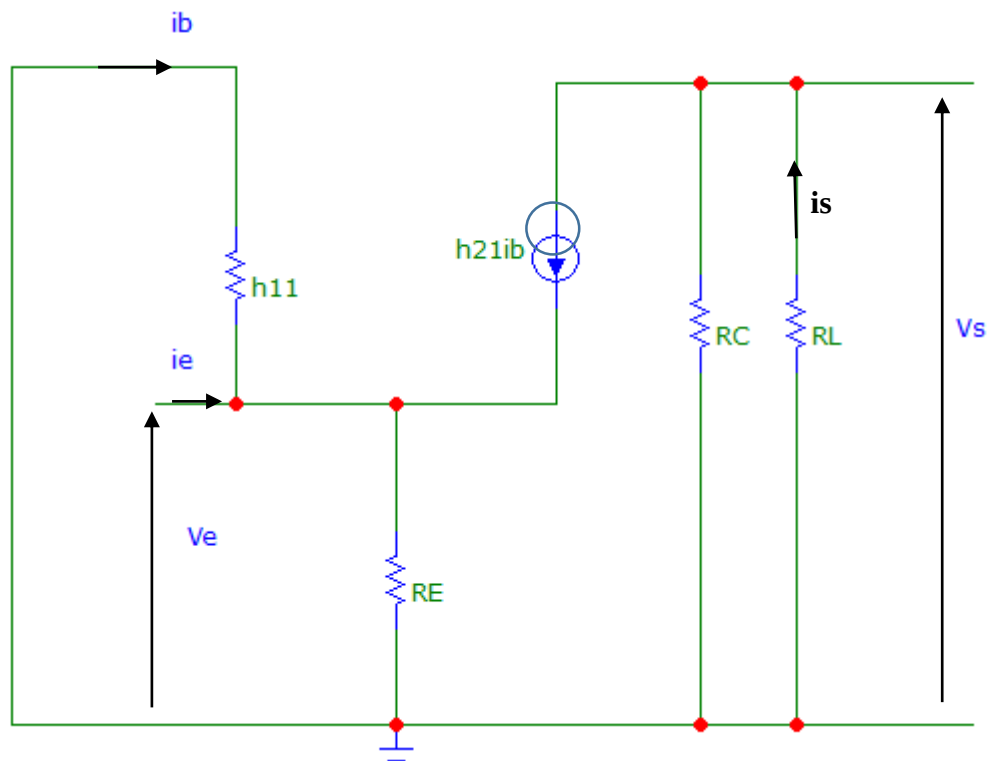
$$G_i = \frac{R_E(1 + h_{21})}{R_E + R_L} \cdot \frac{R_B // [h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]}{[h_{11} + (R_E // R_L)(1 + h_{21})]}$$

1. Etude du montage base commune

➤ Montage



➤ Le schéma équivalent en alternatif



➤ Le gain en tension du montage : $G_v = \frac{V_s}{V_e}$

$$v_s = -(R_c // R_L) h_{21} i_b$$

$$v_e = -h_{11} i_b \Rightarrow$$

$$G_v = h_{21} \frac{(R_c // R_L)}{h_{11}}$$

➤ Le gain en courant du montage : $G_i = \frac{i_s}{i_e}$

$$v_e = R_E (i_e + i_b (1 + h_{21})) \quad (1)$$

$$v_e = -h_{11} i_b \quad (2)$$

On remplace l'équation (2) dans (1), on obtient :

$$i_e = -i_b \left(\frac{h_{11}}{R_E} + 1 + h_{21} \right) \quad (3)$$

Le diviseur de courant :

$$i_s = \frac{-R_c}{R_c + R_L} h_{21} i_b \quad (4)$$

$$l'eq(4)/l'eq(3) = G_i = \frac{R_c h_{21}}{R_c + R_L} \cdot \frac{R_E}{h_{11} + R_E (1 + h_{21})}$$

➤ L'impédance d'entrée $z_e = \frac{v_e}{i_e} = ?$

$$v_e = R_E (i_e + i_b (1 + h_{21})) \quad (5)$$

$$v_e = -h_{11} i_b \Rightarrow i_b = -\frac{v_e}{h_{11}} \quad (6)$$

L'équation (5) dans (6), on obtient :

$$i_e = \frac{v_e}{R_E} - i_b (1 + h_{21}) \text{ avec } v_e = -h_{11} i_b$$

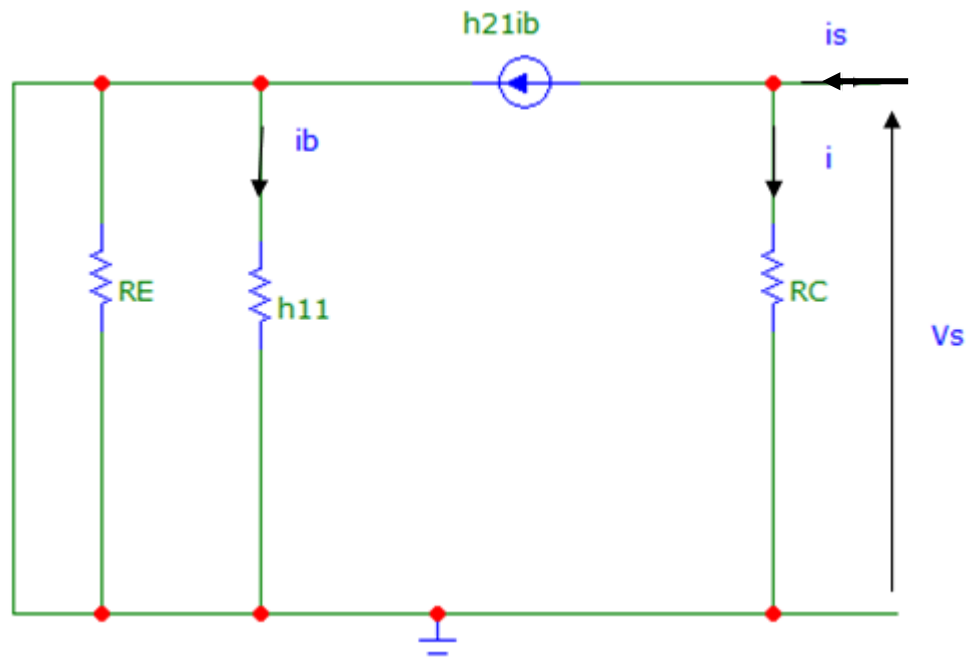
$$\text{Alors : } v_e \left(1 + \frac{R_E}{h_{11}} (1 + h_{21}) \right) = R_E i_e$$

$$\frac{i_e}{v_e} = \frac{1}{z_e} = \frac{1}{R_E} + \frac{(1 + h_{21})}{h_{11}} = \frac{1}{R_E} + \frac{1}{h_{11}/(1 + h_{21})} \Rightarrow$$

$$z_e = R_E // (h_{11}/(1 + h_{21}))$$

➤ L'impédance de sortie

$$z_s = -\left. \frac{v_s}{i_s} \right|_{V_e=0} \text{ et } R_L \text{ débranchée (voir la figure ci-dessous)}$$



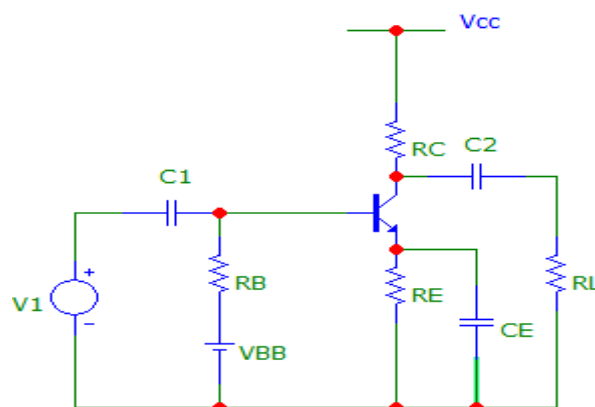
$$i_s = \frac{V_s}{R_c} + h_{21}i_b \text{ puisque } h_{11}i_b = 0 \Rightarrow i_b = 0 \text{ alors}$$

$$\frac{V_s}{i_s} = R_c \Rightarrow$$

$$z_s = R_c$$

Exemple d'application

Soit le circuit de la figure ci-dessous :

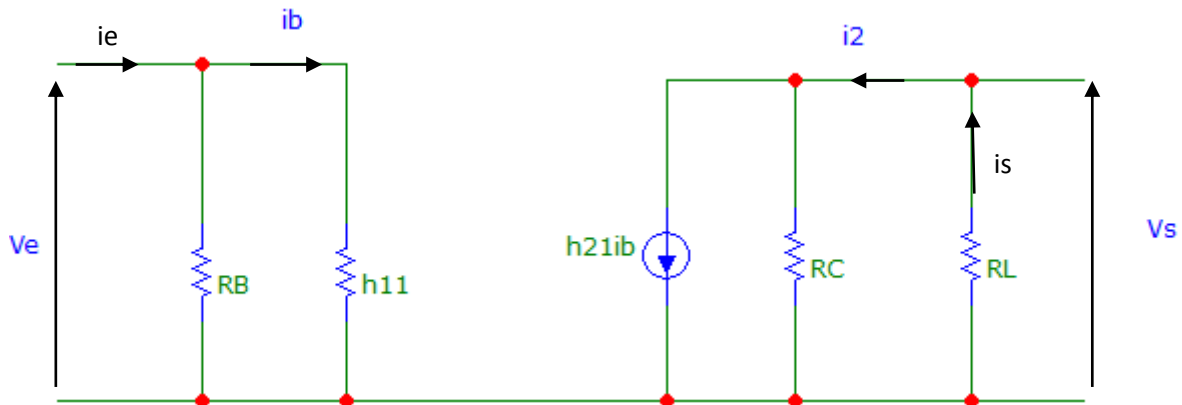


1. Représenter le schéma équivalent du transistor simplifié seul.
2. Etablir le schéma équivalent petit signaux basses fréquences de l'étage complet.
3. Calculer l'amplification en tension A_v , l'amplification en courant A_i ainsi que les impédances d'entrée Z_e et de sortie Z_s de l'étage.
4. CE est débranché, refaire les mêmes questions.

Solution

1. Le schéma équivalent en alternatif

Les condensateurs C_1 , C_2 et C_E sont remplacés par des court circuits

1. Le gain en tension du montage : $G_V = \frac{v_s}{v_e}$

$$v_s = -h_{21} \cdot \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} i_b \text{ et } v_e = h_{11} i_b \Rightarrow$$

$$G_V = \frac{v_s}{v_e} = -h_{21} \frac{R_C R_L}{(R_C + R_L) h_{11}}$$

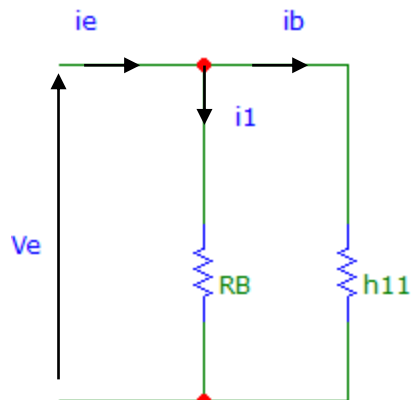
2. Le gain en courant du montage : $A_i = \frac{i_s}{i_e}$

$$v_s = -R_L i_s = -\frac{R_C R_L}{R_C + R_L} h_{21} i_b \Rightarrow i_s = \frac{R_C}{R_C + R_L} h_{21} i_b \text{ avec}$$

$$i_b = \frac{R_B}{R_B + h_{11}} i_e \Rightarrow i_e = \frac{R_B + h_{11}}{R_B} i_b$$

Alors :

$$A_i = \frac{i_s}{i_e} = \frac{R_C}{R_C + R_L} \cdot \frac{R_B}{R_B + h_{11}} h_{21}$$

3. L'impédance d'entrée Z_e 

$$z_e = \frac{v_e}{i_e}$$

$$v_e = h_{11}i_b$$

$$i_e = i_1 + i_b = \frac{v_e}{R_B} + \frac{v_e}{h_{11}}$$

$$\frac{i_e}{v_e} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11}} = R_B // h_{11}$$

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

4. L'impédance de sortie

$$z_s = \frac{v_2}{i_2} \text{ avec } \begin{cases} R_L & \text{déconnectée} \\ v_e = 0 \end{cases}$$

$$v_e = 0 \Rightarrow i_1 = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow \beta i_b = 0 \Rightarrow$$

$$z_s = R_c$$