

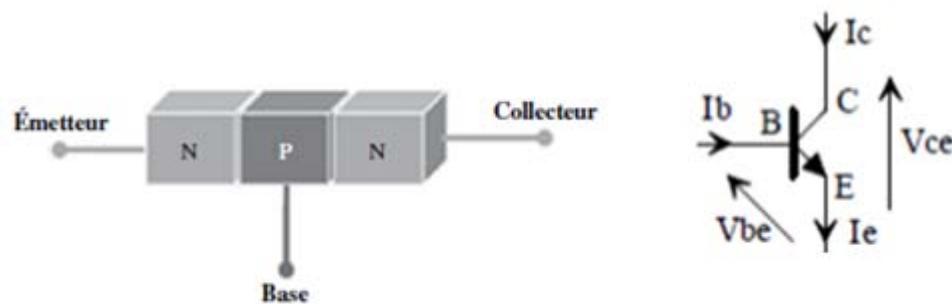
Chapitre 2 : Amplificateurs de puissance

1. Introduction

Un amplificateur est un quadripôle permettant d'augmenter soit la valeur de la tension $v_e(t)$, soit l'intensité du courant $i_e(t)$, soit la quantité de la puissance $p_e(t)$ provenant d'un appareil générateur de signal. Nous nous limiterons dans ce qui suit à l'étude d'amplificateur de puissance de base, réalisés par de transistor bipolaire.

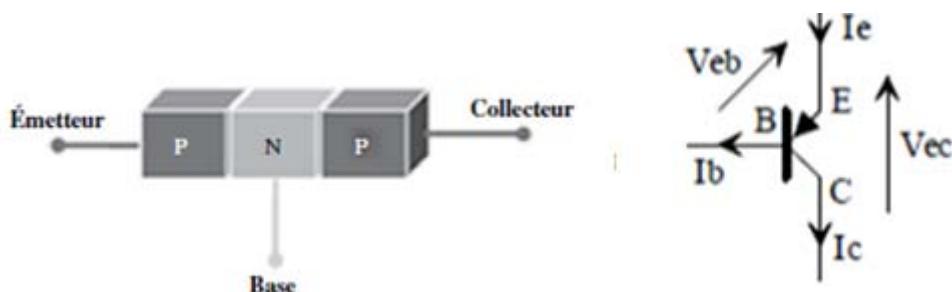
2. Généralités sur les transistors bipolaires

Le transistor bipolaire comporte trois entrée-sorties, sa base (B), son émetteur (E) et son collecteur (C). Il existe deux types de transistors bipolaires, PNP et NPN. Le transistor NPN est décrit sur la figure ci-dessous :



La flèche dans le symbole indique le sens du courant émetteur, les courants de base et de collecteur sont ici entrants.

De la même façon le transistor PNP est décrit et symbolise comme suit :



La flèche dans le symbole indique le sens du courant émetteurs, les courants de base et de collecteur sont ici sortants.

2.1. Courant et tension du transistor

En prenant comme modèle la configuration du circuit de polarisation illustré à la figure ci contre :

IB : Courant CC à la base

IE : Courant CC à l'émetteur

IC : Courant CC au collecteur

VBE : tension de base par rapport à l'émetteur

VCB : tension du collecteur par rapport à la base

VCE : tension du collecteur par rapport à l'émetteur

VCC : établit une polarisation inverse sur la jonction base-collecteur.

VBB : établit une polarisation directe sur la jonction base-émetteur.

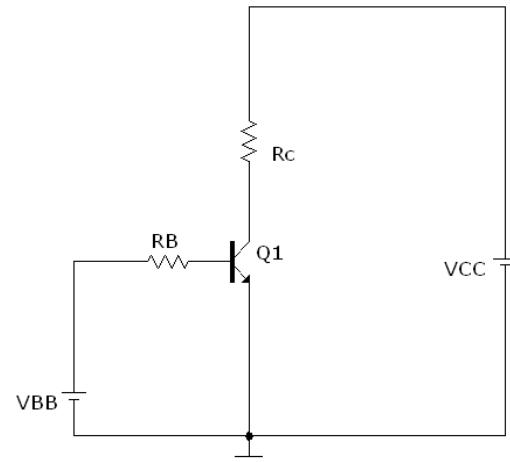


Figure 1

- ✓ Lorsque la jonction base émetteur est sous polarisation directe \Leftrightarrow la tension à ses bornes égale à la valeur d'une barrière de potentiel (tension du seuil), d'où $VBE=0.7V$.
- ✓ Le rapport entre le courant collecteur IC et le courant IB est appelé le gain β (betat).

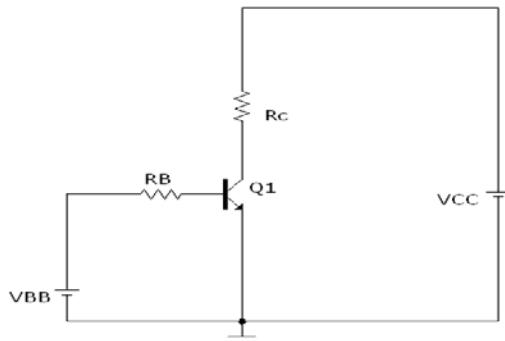
$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

- ✓ La tension aux bornes de la jonction collecteur base sous polarisation inverse est : $V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$

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

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

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

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

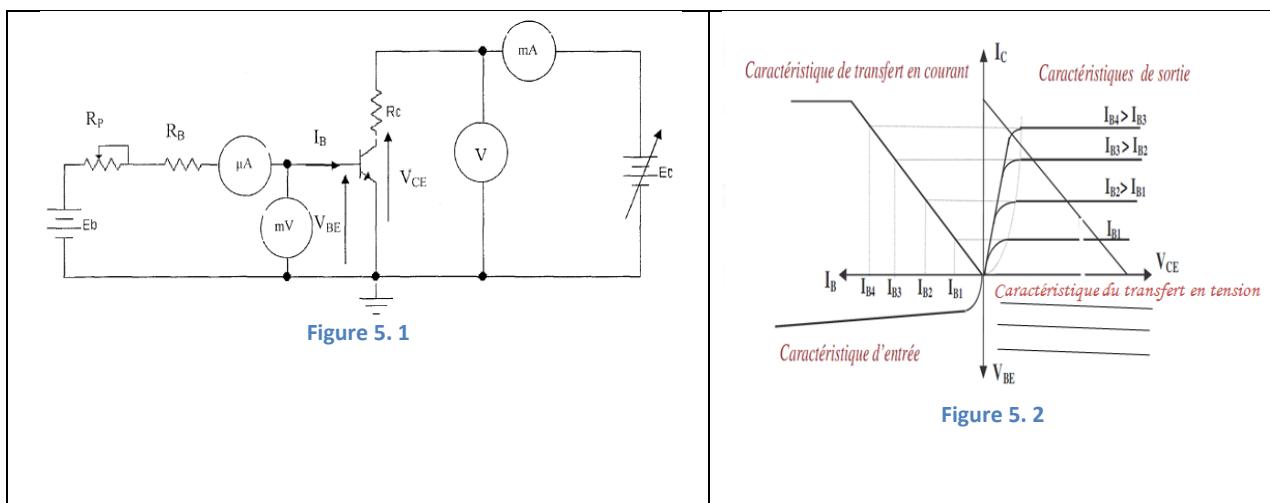
$$I_E = I_C + I_B = 150(430\mu A) = 64.5mA + 430\mu A = 64.9mA$$

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

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

2.2. 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.



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

C'est le réseau $I_C = f(V_{CE})$ à $I_B = \text{Cte}$. Les courbes $I_C = f(V_{CE})$ pour différents 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} .
- 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.
- V_{CE} intermédiaires

➤ 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.

➤ Caractéristiques du gain en courant I_C/I_B

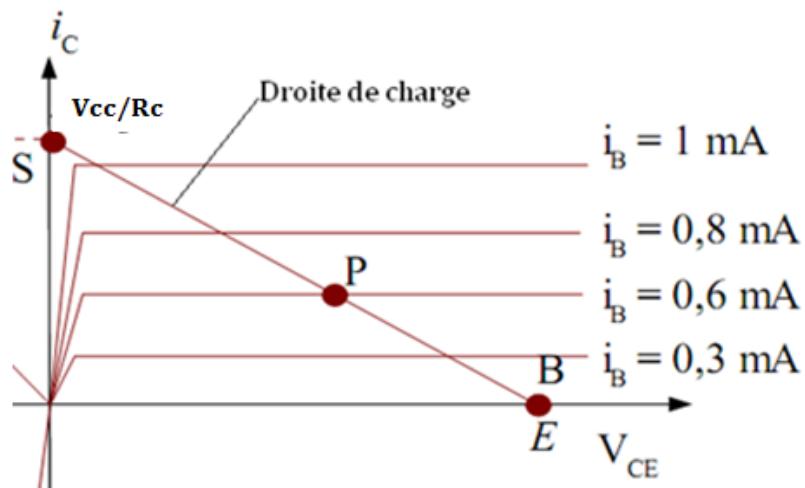
Réseau de transfert en courant, la courbe est linéaire et passe par le point $I_B = 0$ et I_{CEO} . La courbe $I_C = f(I_B)$

➤ 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.

2.3. Droite de charge

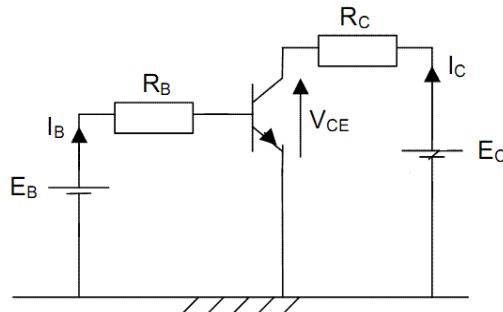
La droite de charge est celle dont l'équation relie le courant de sortie à la tension de sortie. $I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{V_{CE}}{R_C}$



2.4. Circuits de polarisation d'un transistor bipolaire

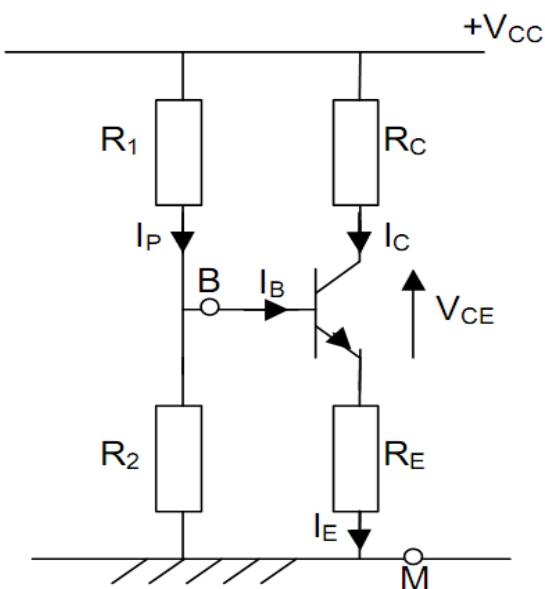
Polariser un transistor, ça revient à définir les grandeurs continues (statiques) I_B , I_C , V_{CE} et V_{BE} . La connaissance de valeur de ces paramètres permet de fixer un point de fonctionnement (repos) Q .

➤ Polarisation par courant de base imposé



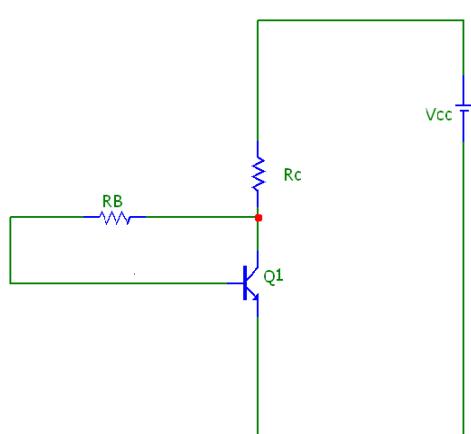
➤ Polarisation par pont de base

- 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 ?.

➤ Polarisation par résistance base-collecteur



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

Figure 2-2

2.5. Utilisations et applications

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

2.5.1. 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 ».

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

(C1 et C2) et de découplage (CE) comme le montre la figure ci-dessous (amplificateur en émetteur commun).

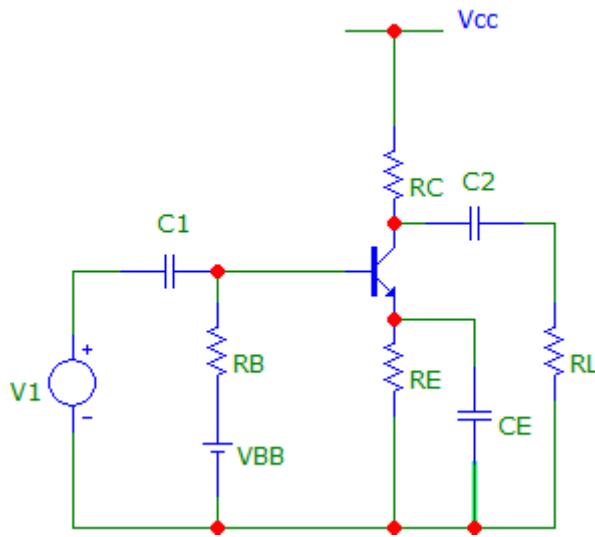
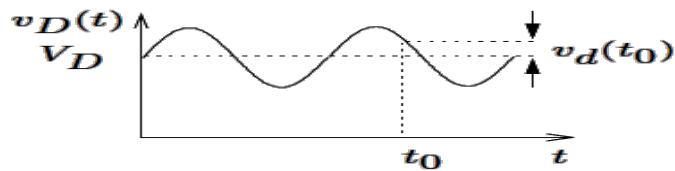


Figure 5.3

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

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 :

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

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

Remarque :

- Les grandeurs continues, notées en majuscules, (V_{BE} , IC ,) définissent le point de fonctionnement statique.
- Les grandeurs dynamiques, notées en minuscules, (v_{be} , ic ) 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 ($\Delta V_{BE} \ll V_{BE}$, $\Delta I_C \ll I_C$ )

a) Modèle du transistor petit signal

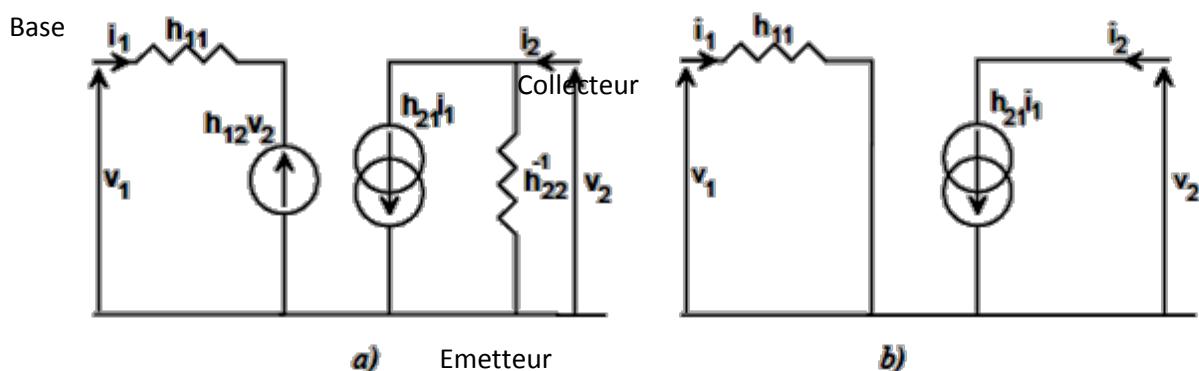


Figure 5.4: Schémas équivalents petits signaux en basse fréquence a) : Schéma complet ; b) Schéma simplifié

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 $Z_s = \frac{v_2}{i_2}$

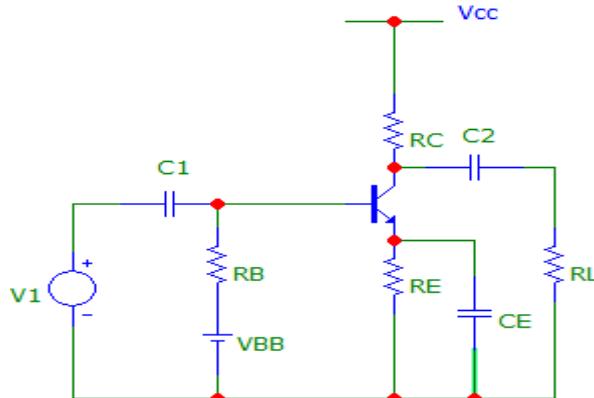
Remarque :

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.

b) Exemple d'application

Soit le circuit de la figure ci dessous :

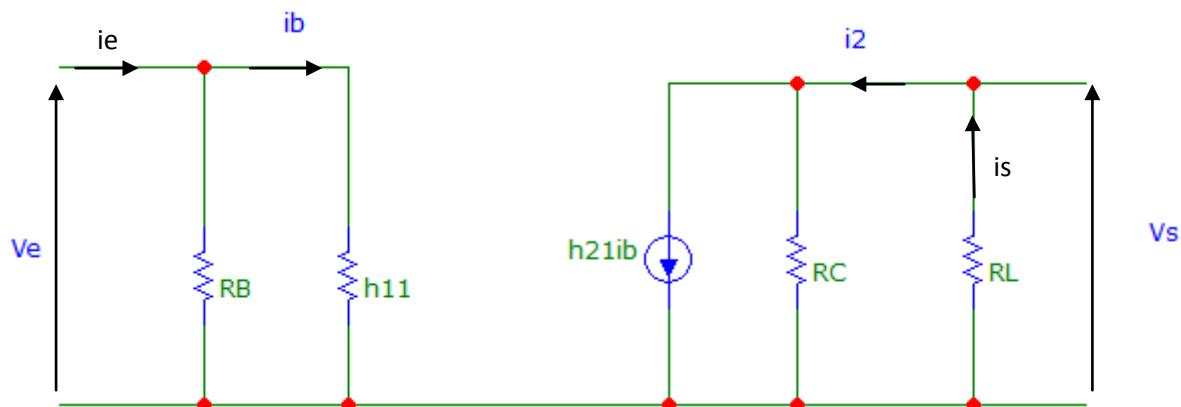


1. Représenter le schéma équivalent du transistor simplifié seul.
2. Etablir le schéma équivalent petit signaux basses fréquences de l'étage complet.
3. Calculer l'amplification en tension A_V , l'amplification en courant A_i ainsi que les impédances d'entrée Z_e et de sortie Z_s de l'étage.
4. CE est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



$$1. \text{ Le gain en tension du montage : } G_V = \frac{V_s}{V_e}$$

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

$$G_V = \frac{v_s}{v_1} = -h_{21} \frac{R_c R_L}{(R_C + R_L) h_{11}}$$

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

$$v_s = -R_L i_s = -\frac{R_c R_L}{R_c + R_L} h_{21} i_b \Rightarrow$$

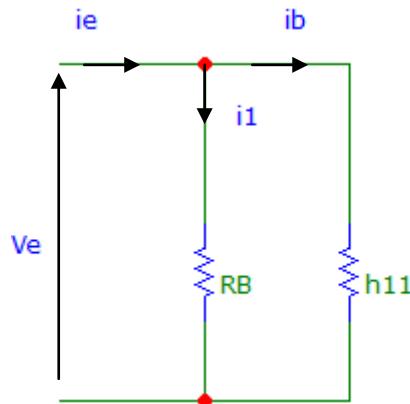
$$i_s = \frac{R_c}{R_c + R_L} h_{21} i_b \text{ avec}$$

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

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



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

$$v_e = h_{11} i_b$$

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

$$\frac{i_e}{v_2} = \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11}} = R_B // h_{11}$$

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

4. L'impédance de sortie

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

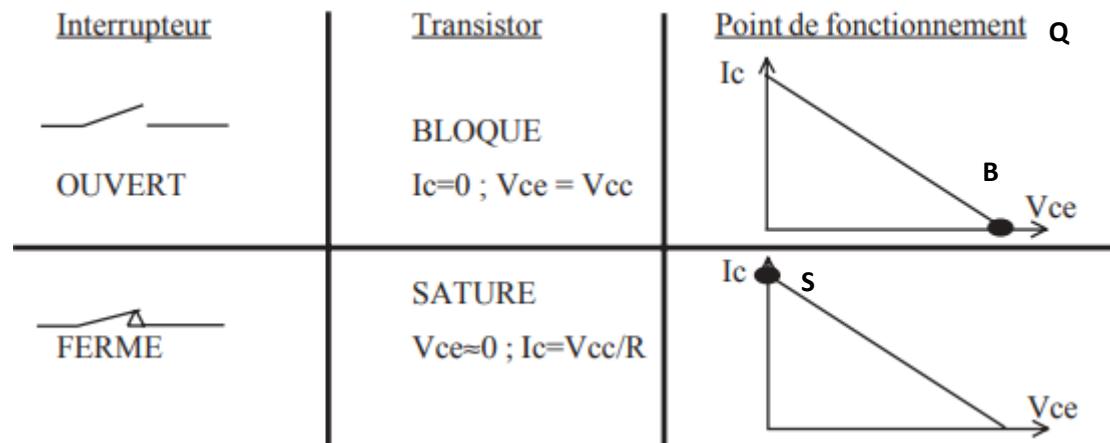
$$v_e = 0 \Rightarrow i_1 = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow \beta i_b = 0 \Rightarrow$$

$$z_s = R_c$$

2.5.2. Transistors bipolaires en régime de commutation

Le transistor se comporte comme un interrupteur entre C et E commandé par la base. En réalité sa polarisation ne lui permet que deux modes de fonctionnement par opposition au fonctionnement en régime linéaire (amplification).

- Le régime de blocage (B),
- Le régime de saturation (S).

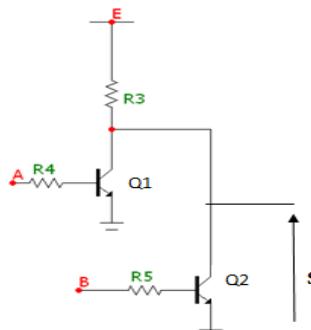


- ✓ Transistor bloqué si ($V_{be}=0$) I_b est nul $\Rightarrow I_c=0$ Transistor bloqué \Leftrightarrow interrupteur ouvert ;
- ✓ $V_{be}=0.7V \Leftrightarrow$ Interrupteur fermé ; le transistor est saturé: $I_b > I_c/B_{min}$ ($V_{cesat}=0V$).

a) Exercice d'application

On considère les deux transistors Q1 et Q2 fonctionnent en mode commutation.

- Analyser le fonctionnement du circuit de la figure ci-dessous, et déduire la fonction logique réalisée.



Solution

Analyse du fonctionnement :

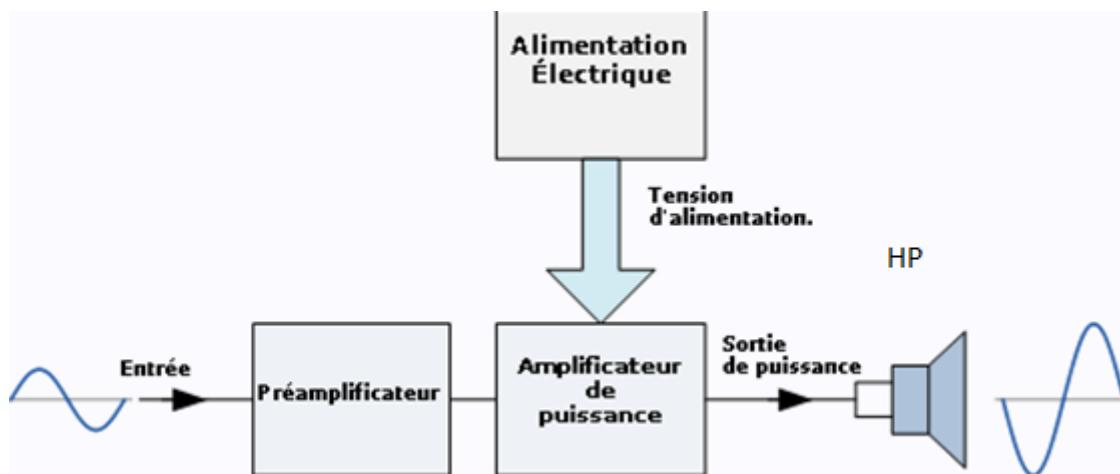
- Si $V_A=V_B=0V$ les deux transistors sont bloqués $\Rightarrow S=E$.
- Si l'une des tensions d'entrée (ou les deux) vaut E, le transistor correspond se sature $\Rightarrow S=0$.
- $S = \overline{A + B}$

B	A	S
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

La fonction logique réalisée : Nor

3. Amplificateurs de puissance

- ✓ Les amplificateurs de puissance sont souvent utilisés pour fournir une puissance à des charges de faible valeurs (un haut parleur possède une résistance de 8 Ohms, une antenne de transmission présente une résistance de 300 Ohms).
- ✓ La fonction principale des amplificateurs de puissance est de fournir un signal de sortie avec un bon rendement \Rightarrow limiter au maximum la puissance dissipée dans les composants du circuit. C à d Le maximum de la puissance fournie par l'alimentation doit être dissipé par la charge (haut parleur, moteur, ...).
- ✓ L'amplificateur de puissance constitue le dernier étage d'une chaîne amplificatrice.

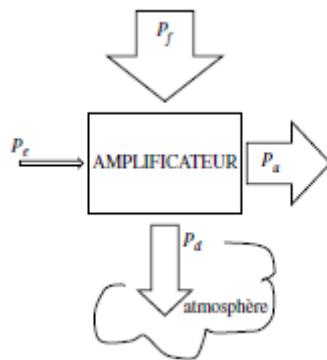


- ✓ On peut utiliser un amplificateur à transistor bipolaire ou bien des transistors à effet de champ.

4. Caractéristique d'un amplificateur de puissance

- P_f constitue la puissance fournie à l'amplificateur par les alimentations.
- P_u est la puissance utile recueillie sur la charge.
- P_d est la puissance dissipée dans les composants constituant l'amplificateur. Elle est perdue dans l'atmosphère sous forme de chaleur et il faut la minimiser.

La puissance dissipée par le transistor quand il n'y a pas de signal appliqué sur l'amplificateur, la p_d à la polarisation au point de fonctionnement est donné par $p_d = V_{CEQ} I_{CQ}$



- P_e représente la puissance amenée au montage par le signal d'entrée. Cas idéal : $P_A + P_e = P_s$
- Pour comparer les performances des amplificateurs de puissance, on utilise la formule du rendement suivante :

$$\eta = \frac{P_s}{P_A}$$

5. Classes de fonctionnement

Soit un transistor et sa droite de charge dynamique (AC). Selon la position du point de repos, on peut distinguer différentes classes de fonctionnement.

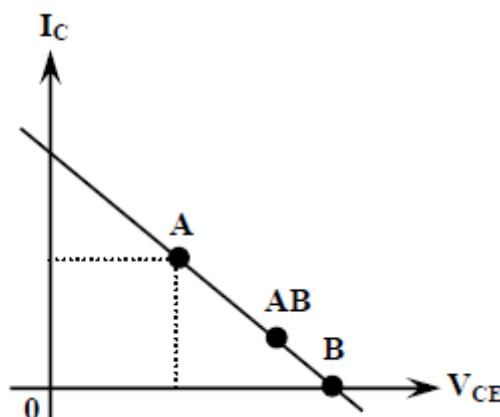


Figure 2. 1 : Point de fonctionnement

1) Amplificateurs de puissance classe A

- On a besoin d'un seul transistor pour réaliser un étage amplificateur de signaux alternatifs
- Le transistor utilisé fonctionne dans la partie linéaire de ses caractéristiques
- La position du point de repos sur la droite de charge (idéalement au milieu) permet une excursion importante du courant collecteur sans distorsion
- Inconvénient : dissipation importante au repos

2) Amplificateurs de puissance classe B

L'amplificateur est constitué d'un étage de sortie comportant deux transistors complémentaires. Le point de repos se situe à la limite du blocage de chaque transistor. Pour pouvoir amplifier les deux alternances d'un signal sinusoïdal, il faut que l'un des transistors amplifie les alternances positives et le second les alternances négatives. Les composants actifs conduisent durant une demi-période du signal d'entrée.

Il existe des amplificateurs de puissance classe B à émetteurs suiveurs ou collecteur commun, à émetteurs commun et à transformateurs.

3) Amplificateurs Push-Pull

L'amplificateur est constitué d'un étage de sortie comportant deux transistors complémentaires. C'est la structure de base de la sortie d'un amplificateur classe B, modifiée au niveau de la polarisation. Le point de repos se situe alors très proche de la limite du blocage des transistors. C'est-à-dire entre la classe A et la classe B, mais plus proche de la classe B.

4) Amplificateurs de puissance classe C

L'étage de sortie est constitué d'un seul transistor. Le point de repos se situe largement dans la région bloquée des caractéristiques de ce dernier. Seules les crêtes des alternances positives du signal d'entrée feront apparaître un signal de sortie. Les composants actifs conduisent durant moins d'une demi-période du signal d'entrée.