

# Transistors bipolaires

## Sommaire

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>80</b>
<b>4.2</b>	<b>Définition</b>	<b>80</b>
<b>4.3</b>	<b>Notation des grandeurs électriques</b>	<b>81</b>
<b>4.4</b>	<b>Caractéristiques d'un transistor <i>NPN</i></b>	<b>82</b>
4.4.1	Caractéristique de sortie	83
4.4.2	Caractéristique d'entrée	83
4.4.3	Caractéristique de transfert direct	83
4.4.4	Caractéristique de transfert inverse	83
<b>4.5</b>	<b>Différents types de circuits de polarisation d'un transistor</b>	<b>85</b>
4.5.1	Polarisation par deux sources de tension	85
4.5.2	Polarisation par une résistance de base	89
4.5.3	Polarisation par résistance entre base et collecteur	90
4.5.4	Polarisation par pont diviseur	91
<b>4.6</b>	<b>Transistor en régime dynamique</b>	<b>93</b>
4.6.1	Schéma équivalent d'un transistor en alternatif	94
4.6.2	Montage amplificateur émetteur commun	95
4.6.3	Montage amplificateur collecteur commun	98
4.6.4	Montage amplificateur base commune	102
<b>4.7</b>	<b>Amplificateur à plusieurs étages</b>	<b>104</b>
4.7.1	Gain en tension	105
4.7.2	Impédance d'entrée	105
4.7.3	Impédance de sortie	105
<b>4.8</b>	<b>Transistor en commutation</b>	<b>106</b>
<b>4.9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>109</b>

## 4.1 Introduction

Le transistor est l'élément de base de tous les composants électroniques allant du petit amplificateur jusqu'aux circuits intégrés. C'est la réunion de deux diodes, l'une est polarisée en directe et l'autre en inverse pour assurer le fonctionnement normal du transistor. Il est dit bipolaire parce que la conduction électrique est réalisée par les deux types de porteurs de charge : les électrons et les trous. Une étude statique est faite pour déterminer le type de fonctionnement du transistor à partir de la position du point de repos. L'étude dynamique est caractérisée par quatre paramètres : le gain en tension, le gain en courant, l'impédance d'entrée et l'impédance de sortie. Les valeurs de ces grandeurs déterminent les caractéristiques du transistor et par suite son application.

Dans ce chapitre, on présente d'abord une vue générale sur les transistors. Ensuite, on étudie le transistor *NPN* dans le régime statique et le régime dynamique. Enfin, on aborde le transistor *NPN* en commutation.

## 4.2 Définition

Un transistor bipolaire à jonction (*BJT*) est constitué d'un semi-conducteur (principalement le silicium) dopé pour obtenir deux jonctions disposées en série et de sens opposé. Il existe donc deux types fondamentaux de transistors bipolaires :

- Transistor *NPN* dans lequel une mince couche de type *P* est comprise entre deux zones de type *N* (figure 4.1 (a)) ;
- Transistor *PNP* dans lequel une mince couche de type *N* est comprise entre deux zones de type *P* (figure 4.1 (b)).

Les trois électrodes d'un transistor bipolaire se nomment :

- Base (B) : zone faiblement dopée et de taille très faible par rapport aux deux autres.
- Collecteur (C) : zone très dopée et d'une taille d'environ 1,5

fois plus grande que l'émetteur.

- Émetteur (E) : repéré par la flèche, zone très dopée (Zone extrinsèque).

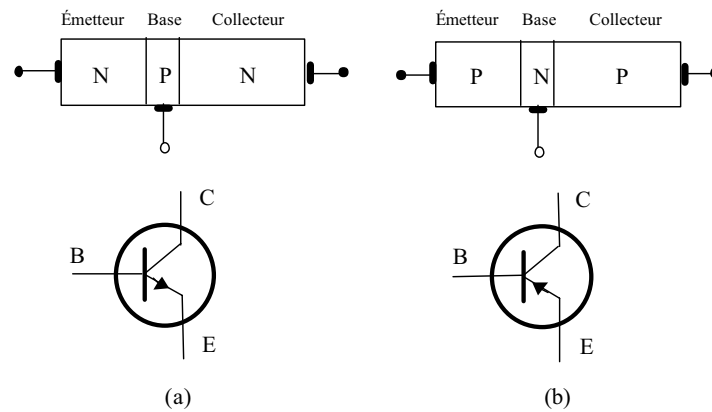


FIGURE 4.1: Représentations schématiques et symboles des transistors bipolaires.

**Remarque** : le reste du chapitre sera consacré uniquement à l'étude d'un transistor de type *NPN*.

### 4.3 Notation des grandeurs électriques

La figure 4.2 représente la notation des grandeurs électriques d'un transistor *NPN*.

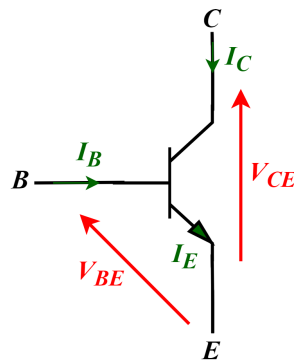


FIGURE 4.2: Grandeurs électriques d'un transistor *NPN*.

$I_B$  : Courant de base.

$I_C$  : Courant de collecteur.

$I_E$  : Courant d'émetteur.

$V_{CE}$  : Tension entre le collecteur et l'émetteur.

$V_{BE}$  : Tension entre la base et l'émetteur.

$V_{BE} = (0.6 \div 0.7)V$  : pour les transistors au silicium.

$V_{BE} = (0.2 \div 0.3)V$  : pour les transistors au germanium.

D'une part, la loi des nœud permet d'écrire :

$$I_E = I_C + I_B \quad (4.1)$$

D'autre part, il existe une relation entre courant de base et courant de collecteur due à l'effet transistor. Cette relation s'écrit :

$$I_C = \beta I_B \quad (4.2)$$

Avec :

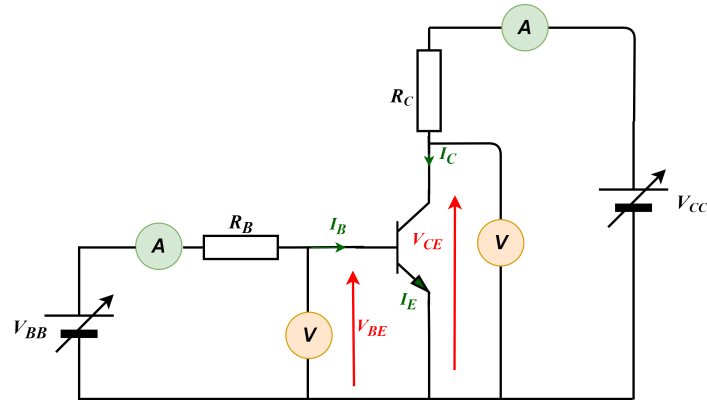
$\beta$  est le gain en courant du transistor. Il est parfois aussi appelé coefficient d'amplification statique en courant. Il varie entre quelques dizaines à quelques centaines.

Dans les ouvrages anglophones,  $\beta$  est souvent noté  $h_{21}$  ou  $h_{fe}$ .

## 4.4 Caractéristiques d'un transistor *NPN*

Les caractéristiques sont les courbes qui représentent les relations entre les courants et les tensions du transistor. Elles permettent de délimiter les régions de fonctionnement du transistor et de déterminer le point de fonctionnement optimal ainsi que les paramètres du transistor.

Pour procéder au relevé des caractéristiques on utilise le montage de la figure 4.3.

FIGURE 4.3: Montage pour relever les caractéristiques d'un transistor *NPN*.

#### 4.4.1 Caractéristique de sortie

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

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

#### 4.4.2 Caractéristique d'entrée

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

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

#### 4.4.3 Caractéristique de transfert direct

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

#### 4.4.4 Caractéristique de transfert inverse

La caractéristique de transfert inverse du transistor est définie par la relation  $V_{BE} = f(V_{CE})$  avec  $I_B = cte$ . Cette courbe n'est pas représentée sur la figure suivante.

On peut assembler les caractéristiques statiques dans la figure suivantes :

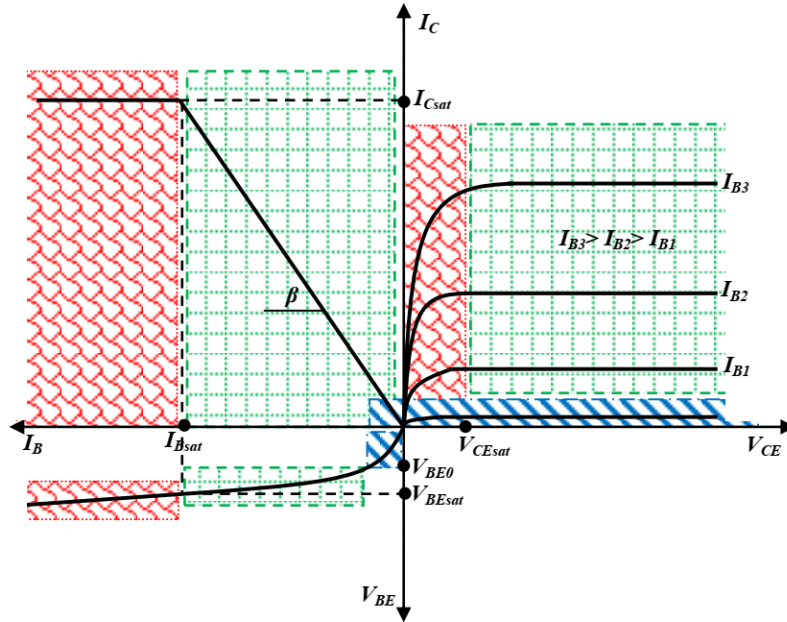


FIGURE 4.4: Caractéristiques statique d'un transistor *NPN*.

Sur ces caractéristiques, on distingue trois zones :

- **Zone active ou amplification (zone verte)** : Dans ce cas le transistor est alors, le plus souvent, utilisé dans un montage amplificateur petits signaux. D'après les équations 4.1 et 4.2 on obtient :

$$I_E = (\beta + 1)I_B \quad (4.3)$$

$$I_E = \frac{(\beta + 1)}{\beta} I_B \quad (4.4)$$

- **Zone de saturation (zone rouge)** : Il faut assurer un courant de base suffisant qui dépend de :
  - La valeur de la tension appliquée en entrée (sur la base).

- La valeur de la résistance (ou des résistances) de base qui permet de fixer le courant.

$$I_C < \beta I_B \quad (4.5)$$

$$V_{CE} = V_{CEsat} \quad (4.6)$$

$V_{CEsat}$  est de l'ordre de  $0.3V$  à  $0.4V$ . En pratique, on prendra donc  $V_{CEsat} \simeq 0$

— **Zone de blocage (zone bleue) :**

Il faut assurer un courant de base nul.

$$I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_E = 0 \quad (4.7)$$

$$V_{BE} < V_{BE0} \quad (4.8)$$

## **4.5 Différents types de circuits de polarisation d'un transistor**

La polarisation est une étape très importante, elle nous permet de choisir le point de fonctionnement ou bien le régime de fonctionnement du transistor. Il existe différents types de circuits de polarisation du transistor on peut citer :

### **4.5.1 Polarisation par deux sources de tension**

Dans cette polarisation on utilise deux sources de tension comme illustré dans la figure 4.5.

#### **4.5.1.1 Droite d'attaque statique**

C'est l'équation qui relie le courant d'entrée  $I_B$  à la tension d'entrée  $V_{BE}$ , ( $I_B = f(V_{BE})$ ).

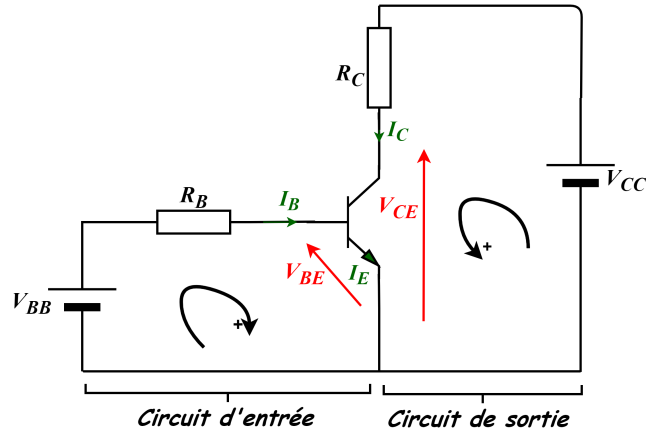


FIGURE 4.5: Polarisation d'un transistor par deux sources de tension.

A partir de la figure 4.5, on utilise la maille d'entrée pour obtenir l'équation de la droite d'attaque.

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} = 0 \quad (4.9)$$

$$I_B = -\frac{1}{R_B} V_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_B} \quad (4.10)$$

#### 4.5.1.2 Droite de charge statique

C'est l'équation qui relie le courant de sortie  $I_C$  à la tension de sortie  $V_{CE}$ .

A partir de la figure 4.5, on utilise la maille de sortie pour obtenir l'équation de la droite de charge.

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0 \quad (4.11)$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (4.12)$$



## 4.5.1.3 Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement "Q" du transistor est l'intersection entre la droite d'attaque avec la caractéristique d'entrée d'une part et l'intersection de la droite de charge avec la caractéristique de sortie d'autre part (figure 4.6).

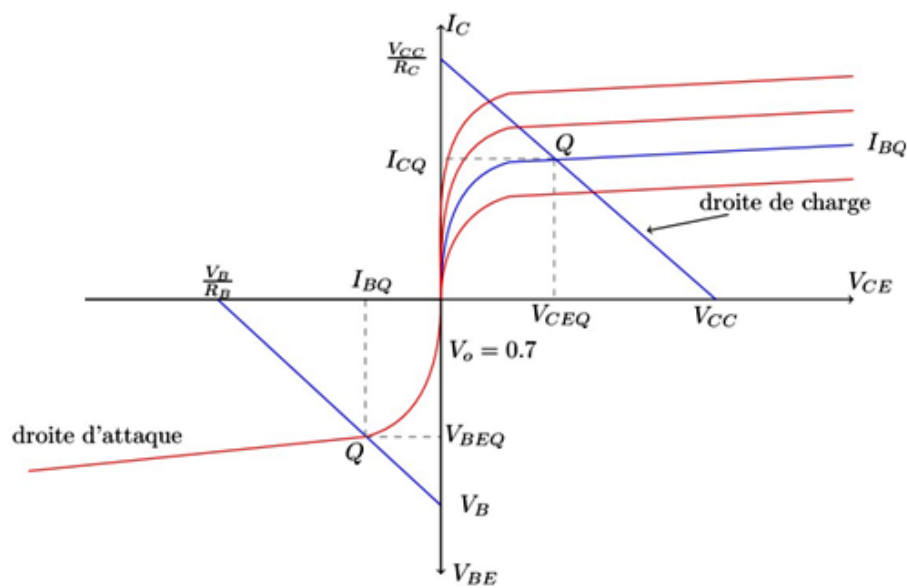


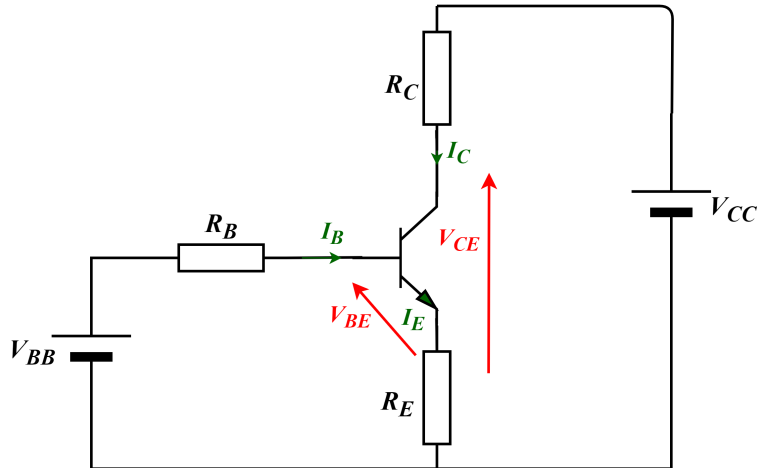
FIGURE 4.6: Point de fonctionnement pour le transistor bipolaire.

## Exemple

On considère le montage suivant avec un transistor *NPN* de gain en courant statique  $\beta = 199$ .

On donne  $R_B = 200k\Omega$ ,  $R_C = R_E = 1k\Omega$ ,  $V_{BB} = 8V$ ,  $V_{CC} = 30V$

- Déterminer les équations de la droite d'attaque et de la droite de charge.

FIGURE 4.7: Exemple d'application d'un transistor *NPN*.**solution**

- L'équation de la droite d'attaque :

On utilise la maille d'entrée pour obtenir cette équation.

$$V_{BB} - R_B I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0$$

On a :

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

$$V_{BB} - (R_B + (\beta + 1) R_E) I_B - V_{BE} = 0$$

$$I_B = -\frac{1}{R_B + (\beta + 1) R_E} V_{BE} + \frac{V_{BB}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

$$I_B(mA) = -\frac{1}{400} V_{BE} + \frac{8}{400}$$

$$I_B(\mu A) = -\frac{5}{2} V_{BE} + 20$$

- L'équation de la droite de charge :

On utilise la maille de sortie pour obtenir cette équation.

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

On a :

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

$$V_{CC} - (R_C + R_E) I_C - V_{CE} = 0$$

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

$$I_C(mA) = -\frac{1}{2} V_{CE} + 15$$

#### 4.5.2 Polarisation par une résistance de base

Dans ce cas le circuit d'entrée est polarisé par la source  $V_{CC}$  à l'aide de la résistance  $R_B$  comme représenté dans la figure 4.8.

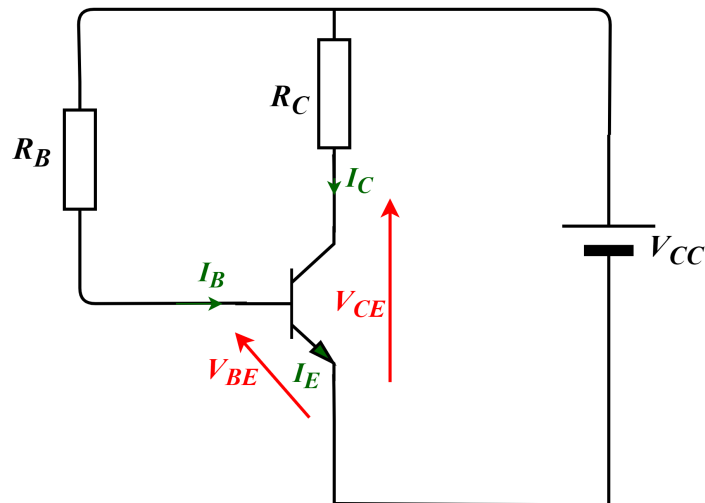


FIGURE 4.8: Polarisation par résistance de base.

— Droite d'attaque statique :

Pour déterminer cette équation on applique la loi des mailles sur la maille extérieure comme suit :

$$V_{cc} - R_B I_B - V_{BE} = 0 \quad (4.13)$$

$$I_B = -\frac{1}{R_B} V_{BE} + \frac{V_{CC}}{R_B} \quad (4.14)$$

— Droite de charge statique :

Pour la maille de sortie, on peut écrire :

$$V_{CC} - R_C I_C - V_{CE} = 0 \quad (4.15)$$

$$I_C = -\frac{1}{R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C} \quad (4.16)$$

Ce montage est sensible à la dérive thermique. Cette polarisation ne doit jamais être employée pour un transistor utilisé comme amplificateur (Il est tolérable en commutation).

### 4.5.3 Polarisation par résistance entre base et collecteur

Dans ce cas la résistance  $R_B$  est placée entre base et collecteur.

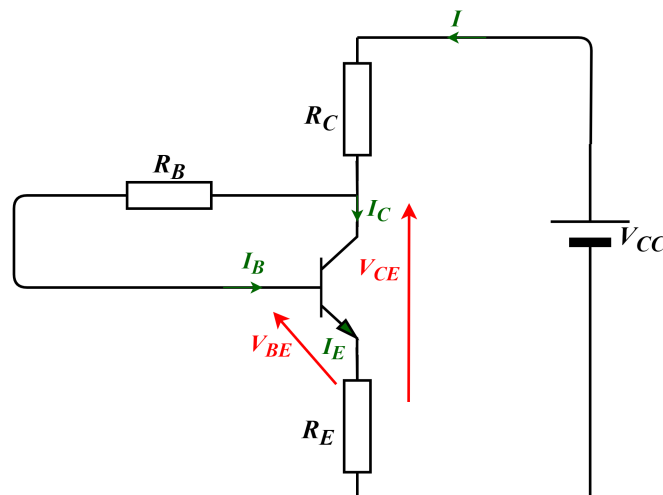


FIGURE 4.9: Polarisation par résistance entre base et collecteur.

#### 4.5. Différents types de circuits de polarisation d'un transistor 91

— Droite d'attaque statique :

L'addition des tensions le long de la maille de la base donne :

$$V_{cc} - R_C I - R_B I_B - V_{BE} = 0 \quad (4.17)$$

$$V_{cc} - R_C(I_C + I_B) - R_B I_B - V_{BE} = 0 \quad (4.18)$$

$$V_{cc} - (\beta R_C + R_B) I_B - V_{BE} = 0 \quad (4.19)$$

$$I_B = -\frac{1}{\beta R_C + R_B} V_{BE} + \frac{V_{CC}}{\beta R_C + R_B} \quad (4.20)$$

— Droite de charge statique :

L'addition des tensions le long de la maille du collecteur donne :

$$V_{CC} - R_C(I_C + I_B) - V_{CE} = 0 \quad (4.21)$$

On a :

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

$$V_{CC} - R_C I_C \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) - V_{CE} = 0 \quad (4.22)$$

$$I_C = -\frac{1}{\frac{\beta+1}{\beta} R_C} V_{CE} + \frac{V_{CC}}{\frac{\beta+1}{\beta} R_C} \quad (4.23)$$

##### 4.5.4 Polarisation par pont diviseur

La base est polarisée par un pont constitué de deux résistances  $R_{B1}$  et  $R_{B2}$  (figure 4.10).

Pour faciliter le calcul, on applique le théorème de Thévenin au circuit d'entrée entre les deux points  $A$  et  $B$ , on obtient le schéma équivalent (figure 4.11), ce qui permet de ramener le problème à une polarisation par une résistance de base.

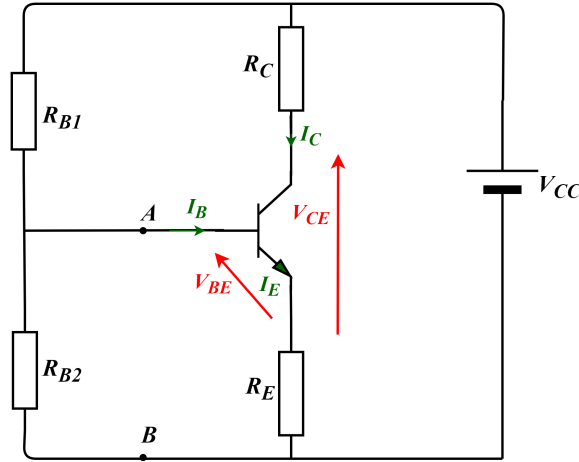


FIGURE 4.10: Polarisation par pont diviseur.

— Tension de Thévenin :

$$V_{th} = V_{R_{B2}} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} \quad (4.24)$$

— Résistance de Thévenin :

$$R_{th} = R_{B1} // R_{B2} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (4.25)$$

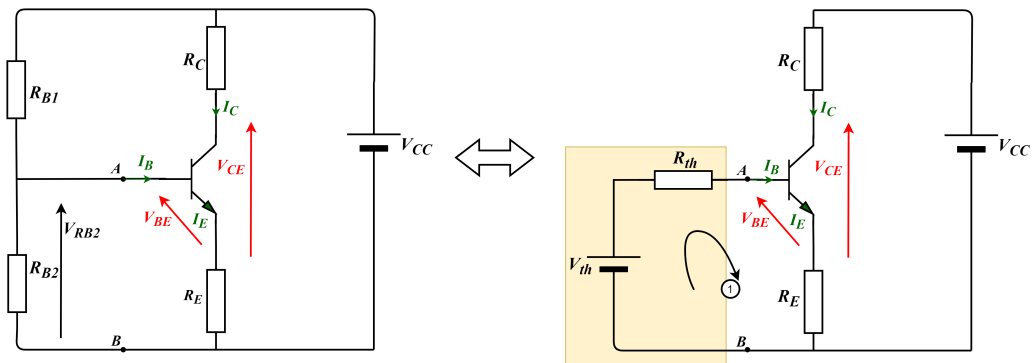


FIGURE 4.11: Circuit simplifié par l'utilisation du théorème de Thévenin.

— Droite d'attaque statique :

On applique la loi des mailles dans la maille (1), on obtient :

$$V_{th} - R_{th}I_B - V_{BE} - R_E I_E = 0 \quad (4.26)$$

$$V_{th} - (R_{th} + R_E(\beta + 1))IB - V_{BE} = 0 \quad (4.27)$$

$$I_B = -\frac{1}{R_{th} + R_E(\beta + 1)}V_{BE} + \frac{V_{th}}{R_{th} + R_E(\beta + 1)} \quad (4.28)$$

## 4.6 Transistor en régime dynamique

L'étude d'un circuit amplificateur se subdivise en deux :

- Etude statique qui comprend la polarisation du transistor, la droite de charge statique et le calcul du point de fonctionnement.
- Etude dynamique qui comprend le calcul du gain en tension, gain en courant, impédance d'entrée et impédance de sortie.

On prend comme exemple le montage émetteur commun tel qu'il est présenté sur la figure 4.12. Les grandeurs électriques (tension et courant) qui existent aux différentes bornes du transistor sont constituées de deux composantes : une composante continue due au circuit de polarisation et une composante alternative due au signal utile.

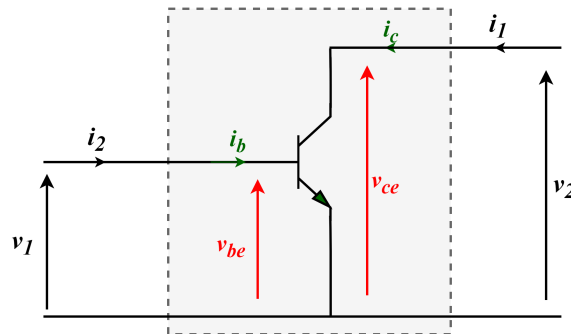


FIGURE 4.12: Transistor et ses grandeurs dynamiques principales.

### 4.6.1 Schéma équivalent d'un transistor en alternatif

On considère le transistor comme un quadripôle définie par ses paramètres hybrides comme suit :

$$\begin{cases} v_{be} = h_{11}i_b + h_{12}v_{ce} \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}v_{ce} \end{cases} \quad (4.29)$$

Avec

- $h_{11} = \frac{v_{be}}{i_b}|_{v_{ce}=0}$  : Impédance d'entrée du transistor ;
- $h_{12} = \frac{v_{be}}{v_{ce}}|_{i_b=0}$  : Rapport de transfert inverse du transistor ;
- $h_{21} = \frac{i_c}{i_b}|_{v_{ce}=0}$  : Amplification en courant du transistor ;
- $h_{22} = \frac{i_c}{v_{ce}}|_{i_b=0}$  : Admittance de sortie du transistor.

On peut tracer le schéma équivalent du transistor en régime dynamique petits signaux à basses fréquences.

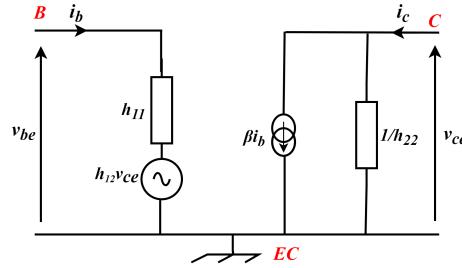


FIGURE 4.13: Schéma équivalent en régime dynamique du transistor.

Les termes  $h_{12}$  et  $h_{22}$  étant très faibles, on les néglige pour obtenir le schéma équivalent simplifié ci-dessous.

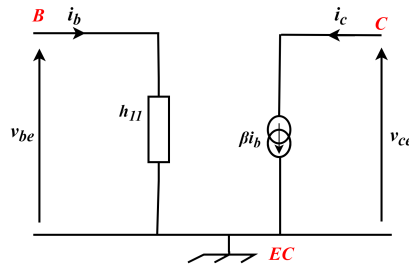


FIGURE 4.14: Schéma équivalent simplifié du transistor.



## 4.6.2 Montage amplificateur émetteur commun

### 4.6.2.1 Schéma du montage

La figure 4.15 représente un amplificateur émetteur commun.

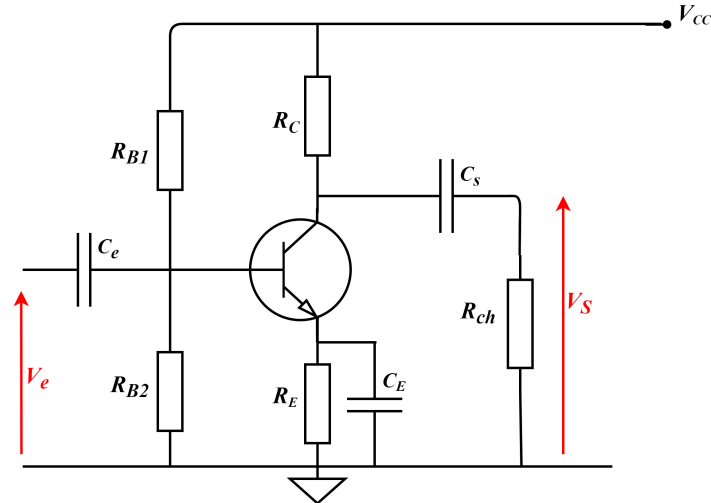


FIGURE 4.15: Amplificateur émetteur commun.

**Etude statique :** En continu, toutes les capacités ( $C_e$ ,  $C_s$  et  $C_E$ ) sont des circuits ouverts, donc on sépare  $R_{ch}$  et la source  $V_e$  (on ne garde que le montage pont diviseur comme indiqué dans la figure 4.10). Le rôle de cette étude est de :

- Fixer le point de fonctionnement statique ;
- Déterminer les droites de charge et d'attaque ;
- Fixer les éléments de polarisation (résistances, alimentation).

**Etude dynamique :** Pour l'étude dynamique, il faut suivre les étapes suivantes :

- Court-circuiter les sources de tension continue et laisser l'excitation alternative  $V_e(t)$  ;
- Les condensateurs de liaison  $C_e$ ,  $C_s$  et de découplage  $C_E$  seront remplacés, en alternatif, par des court-circuits ;
- Remplacer le transistor par son schéma équivalent en alternatif et ajouter les autres éléments.

#### 4.6.2.2 Schéma équivalent

La figure 4.16 représente le schéma équivalent d'un amplificateur émetteur commun.

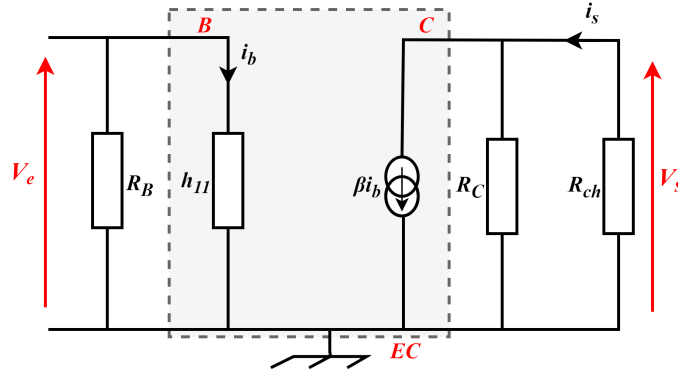


FIGURE 4.16: Schéma équivalent de l'amplificateur émetteur commun.

Avec

$$R_B = R_{B1} // R_{B2} = \frac{R_{B1} R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \quad (4.30)$$

#### 4.6.2.3 Gain en tension

Le gain en tension  $G_v$  est le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée :

$$G_v = \frac{V_s}{V_e} \quad (4.31)$$

— Gain de tension en charge :

$$\begin{cases} V_e = h_{11} i_b \\ V_s = -(R_{ch} // R_C) \beta i_b \end{cases} \quad (4.32)$$

$$G_v = -\frac{\beta (R_{ch} // R_C)}{h_{11}} \quad (4.33)$$

— Gain en tension à vide (la charge débranchée) :

$$G_{v0} = \frac{V_{s0}}{V_e} \quad (4.34)$$

$$\begin{cases} V_e = h_{11}i_b \\ V_{s0} = -R_C\beta i_b \end{cases} \quad (4.35)$$

$$G_{v0} = \frac{-\beta R_C}{h_{11}} \quad (4.36)$$

#### 4.6.2.4 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée  $Z_e$  c'est l'impédance vue entre les bornes d'entrées de l'amplificateur. Elle est défini par :

$$Z_e = \frac{V_e}{i_e} \quad (4.37)$$

D'après le schéma de la figure 4.16, on a :

$$i_e = \frac{V_e}{R_B} + i_b \quad (4.38)$$

$$i_e = \frac{V_e}{R_B} + \frac{V_e}{h_{11}} \Rightarrow \frac{V_e}{i_e} = R_B // h_{11} \quad (4.39)$$

$$Z_e = \frac{R_B h_{11}}{R_B + h_{11}} \quad (4.40)$$

#### 4.6.2.5 Impédance de sortie

L'impédance de sortie  $Z_s$  c'est l'impédance vue entre les bornes de la sortie de l'amplificateur.

Pour déterminer l'impédance de sortie il faut :

- Débrancher la résistance de charge et la remplace par une source de tension  $v_0$
- Court-circuiter les sources de tension et ouvrir les sources de courant.

L'impédance de sortie est défini par la relation suivante :

$$Z_s = \frac{V_0}{i_0} |_{V_e=0} \quad (4.41)$$

La figure 4.17 représente le schéma utilisé pour déterminer l'impédance de sortie.

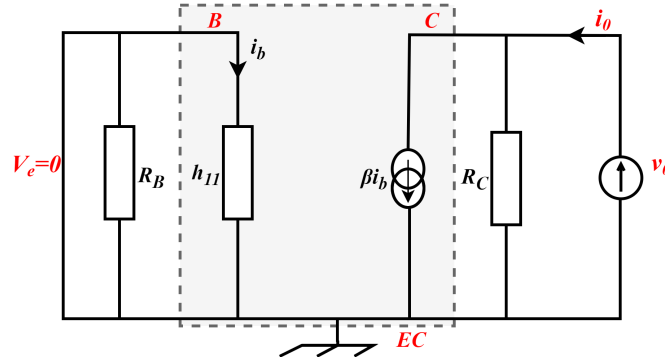


FIGURE 4.17: Schéma pour déterminer l'impédance de sortie du montage (EC).

D'après le circuit de sortie, on a :

$$i_0 = \frac{v_0}{R_C} + \beta i_b \quad (4.42)$$

D'après le circuit d'entrée, on a :

$$h_{11} i_b = 0 \Rightarrow i_b = 0 \quad (4.43)$$

Il résulte que :

$$\frac{v_0}{i_0} = R_C \quad (4.44)$$

$$Z_s = R_C \quad (4.45)$$

### 4.6.3 Montage amplificateur collecteur commun

#### 4.6.3.1 Schéma du montage

Dans ce cas l'entrée est appliquée à la base, la sortie est prélevée au niveau de l'émetteur.

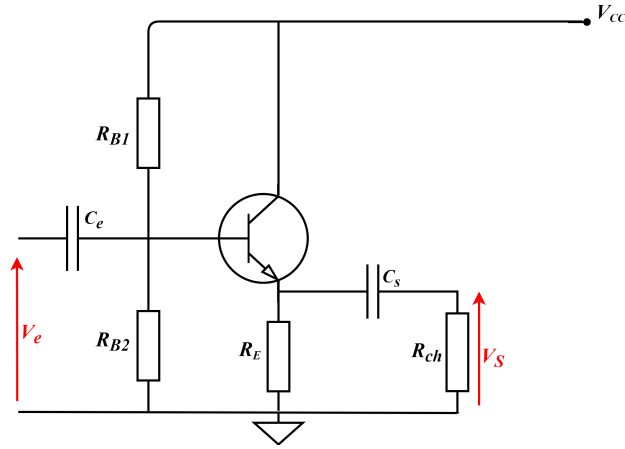


FIGURE 4.18: amplificateur collecteur commun.

#### 4.6.3.2 Schéma équivalent

Le schéma équivalent est représenté par la figure 4.25.

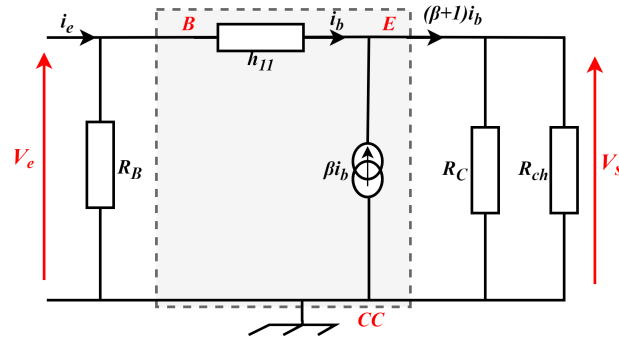


FIGURE 4.19: Schéma équivalent de l'amplificateur collecteur commun.

#### 4.6.3.3 Gain en tension

$$\begin{cases} V_e = h_{11}i_b + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)i_b \\ V_s = (R_E // R_{ch})(\beta + 1)i_b \end{cases} \quad (4.46)$$

$$\begin{cases} V_e = (h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1))i_b \\ V_s = (R_E // R_{ch})(\beta + 1)i_b \end{cases} \quad (4.47)$$

$$G_v = \frac{(R_E // R_{ch})(\beta + 1)}{h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)} \quad (4.48)$$

$$h_{11} \ll (R_E // R_{ch})(\beta + 1)$$

On obtient :

$$G_v \simeq 1 \quad (4.49)$$

#### 4.6.3.4 Impédance d'entrée

D'après le schéma de la figure 4.19, on a :

$$i_e = \frac{V_e}{R_B} + i_b \quad (4.50)$$

D'après l'équation 4.47 on peut écrire :

$$i_b = \frac{V_e}{h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)} \quad (4.51)$$

En remplaçant l'équation 4.51 dans l'équation 4.50, on obtient :

$$i_e = \frac{V_e}{R_B} + \frac{V_e}{h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)} \quad (4.52)$$

$$i_e = V_e \left( \frac{1}{R_B} + \frac{1}{h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)} \right) \quad (4.53)$$

$$\frac{V_e}{i_e} = R_B // (h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)) \quad (4.54)$$

$$Z_e = R_B // (h_{11} + (R_E // R_{ch})(\beta + 1)) \quad (4.55)$$

#### 4.6.3.5 Impédance de sortie

Pour déterminer l'impédance de sortie on utilise le schéma suivant :

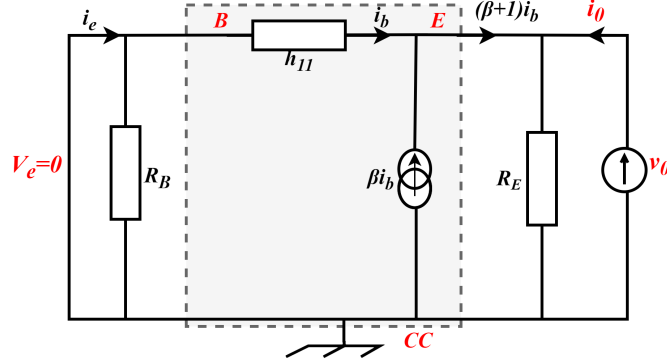


FIGURE 4.20: Schéma pour déterminer l'impédance de sortie du montage (CC).

$$i_0 = \frac{v_0}{R_E} - (\beta + 1)i_b \quad (4.56)$$

D'après la maille extérieur, on a :

$$v_0 + h_{11}i_b = 0 \Rightarrow i_b = -\frac{v_0}{h_{11}} \quad (4.57)$$

Il résulte que :

$$i_0 = \frac{v_0}{R_E} + (\beta + 1)\frac{v_0}{h_{11}} \quad (4.58)$$

$$\frac{i_0}{v_0} = \frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{h_{11}} \quad (4.59)$$

Enfin :

$$\frac{v_0}{i_0} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1}{\frac{h_{11}}{\beta+1}}} \quad (4.60)$$

$$Z_s = R_E // \left( \frac{h_{11}}{\beta + 1} \right) \quad (4.61)$$

### 4.6.4 Montage amplificateur base commune

#### 4.6.4.1 Schéma du montage

Pour un montage base commune (BC), l'excitation se fait par l'émetteur et la sortie est prélevée au niveau du collecteur.

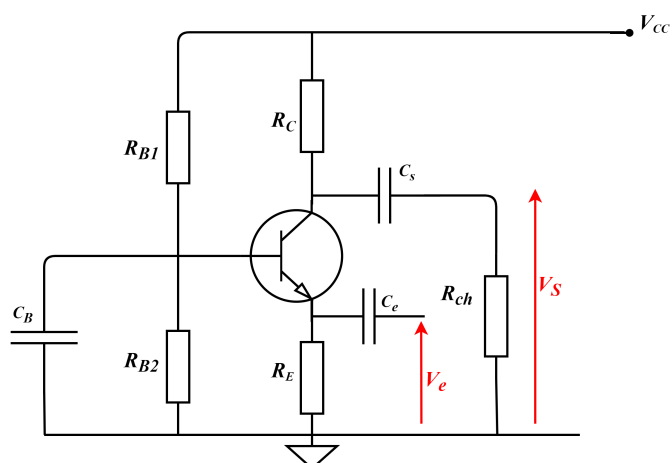


FIGURE 4.21: amplificateur base commune.

#### 4.6.4.2 Schéma équivalent

La figure 4.22 représente le schéma équivalent du montage base commune.

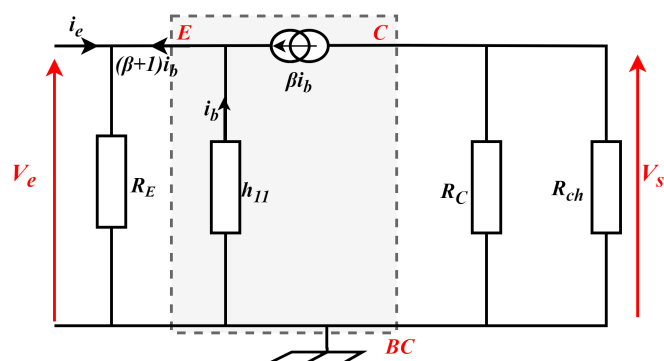


FIGURE 4.22: Schéma équivalent de l'amplificateur base commune.



## 4.6.4.3 Gain en tension

$$\begin{cases} V_e = -h_{11}i_b \\ V_s = -(R_C//R_{ch})\beta i_b \end{cases} \quad (4.62)$$

$$G_v = \frac{(R_C//R_{ch})\beta}{h_{11}} \quad (4.63)$$

## 4.6.4.4 Impédance d'entrée

D'après le schéma de la figure 4.22, on a :

$$i_e = \frac{V_e}{R_E} - (\beta + 1)i_b \quad (4.64)$$

D'après l'équation 4.62, on obtient :

$$i_b = -\frac{V_e}{h_{11}} \quad (4.65)$$

En remplaçant l'équation 4.65 dans l'équation 4.64, on obtient :

$$i_e = \frac{V_e}{R_E} + (\beta + 1)\frac{V_e}{h_{11}} \quad (4.66)$$

$$\frac{i_e}{V_e} = \frac{1}{R_E} + \frac{\beta + 1}{h_{11}} \quad (4.67)$$

$$\frac{V_e}{i_e} = \frac{1}{\frac{1}{R_E} + \frac{1}{\frac{h_{11}}{\beta+1}}} \quad (4.68)$$

Finalement,  $Z_e$  est donnée par :

$$Z_e = R_E // \frac{h_{11}}{\beta + 1} \simeq \frac{h_{11}}{\beta + 1} \quad (4.69)$$

## 4.6.4.5 Impédance de sortie

Pour déterminer l'impédance de sortie  $Z_s$ , on utilise la figure suivante.

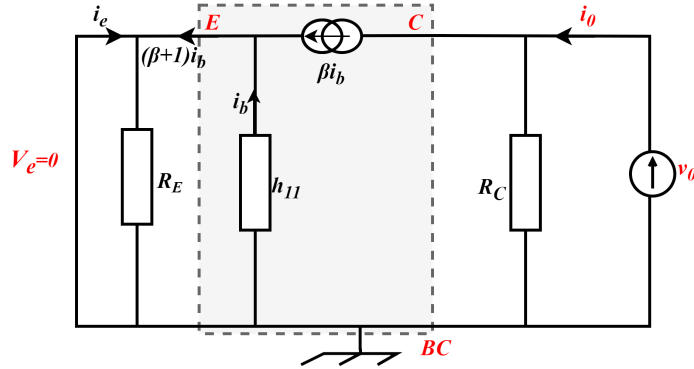


FIGURE 4.23: Schéma pour déterminer l'impédance de sortie du montage (BC).

D'après la loi des nœuds, on obtient :

$$i_0 = \frac{v_0}{R_C} + \beta i_b \quad (4.70)$$

D'autre part, on a :

$$V_e = -h_{11}i_b = 0 \Rightarrow i_b = 0 \quad (4.71)$$

En replaçant l'équation 4.71 dans l'équation 4.70, on obtient :

$$\frac{i_0}{v_0} = \frac{1}{R_C} \quad (4.72)$$

Donc :

$$Z_s = R_C \quad (4.73)$$

## 4.7 Amplificateur à plusieurs étages

Dans de nombreux amplificateurs, on cherche à obtenir un grand gain, une impédance d'entrée élevée (afin de ne pas perturber la source du signal) et une impédance de sortie faible pour agir sur l'actionneur final (haut-parleur, moteur d'asservissement ...). Un amplificateur à un seul étage ne permet pas, en général, de réaliser ces objectifs. On sera amené à associer plusieurs étages en cascade. La figure 4.24 représente un amplification à deux étages.

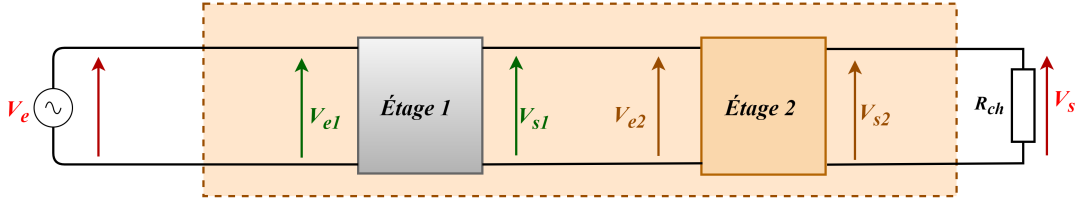


FIGURE 4.24: Amplification à deux étages.

#### 4.7.1 Gain en tension

$$G_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_s}{V_{s1}} \cdot \frac{V_{s1}}{V_e} \quad (4.74)$$

D'après le schéma de la figure 4.24, on a :

$$V_e = V_{e1}, V_{s1} = V_{e2}, V_s = V_{s2}$$

L'équation 4.74 devient :

$$G_v = \frac{V_s}{V_e} = \frac{V_{s2}}{V_{e2}} \cdot \frac{V_{s1}}{V_{e1}} = G_{v2} \cdot G_{v1} \quad (4.75)$$

#### 4.7.2 Impédance d'entrée

L'impédance d'entrée de l'ensemble est celle du premier étage.

$$Z_e = Z_{e1} \quad (4.76)$$

#### 4.7.3 Impédance de sortie

L'impédance de sortie de l'ensemble est celle du dernier étage.

$$Z_s = Z_{s2} \quad (4.77)$$

Il existe différentes manières de liaisons des étages entre eux dans l'amplificateur : liaison par condensateur de couplage, liaison par transformateur ou liaison directe comme le montage Darlington.

## 4.8 Transistor en commutation

On dit qu'un transistor fonctionne en commutation, lorsqu'il passe de l'état saturé à l'état bloqué ou inversement. Le mode de fonctionnement de ce dernier s'apparente à un interrupteur commandé électriquement. La commande étant la base et l'interrupteur étant entre le collecteur et l'émetteur. Ainsi il peut commander une LED, un relais, un moteur, etc... On considère généralement le circuit de sortie du transistor comme un interrupteur qui est commandé par le circuit d'entrée.

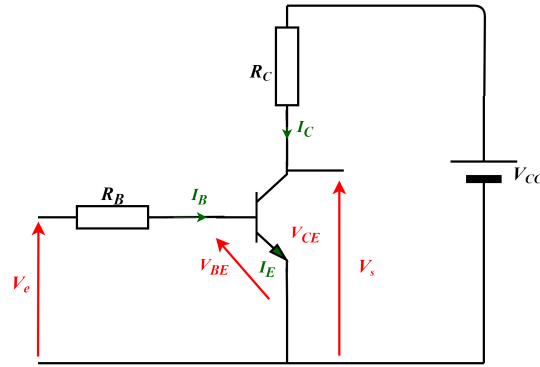


FIGURE 4.25: Transistor *NPN* en commutation.

- On dit qu'un transistor est bloqué lorsque ses courants sont nuls.

$$I_B = I_C = I_E = 0 \quad (4.78)$$

$$V_s = V_{CC} \quad (4.79)$$

- On dit qu'un transistor est saturé lorsque son  $V_{CE}$  est égale  $V_{CEsat}$  et que son courant de base réel est inférieur au courant de base défini par la polarisation du transistor.

$$I_C < \beta I_B \quad (4.80)$$

$$V_s = V_{CEsat} \simeq 0 \quad (4.81)$$

### Exemple

Calculer la tension de sortie  $V_s$  pour  $S$  ouvert et fermé. On donne :  $V_{CC} = 5V$ ,  $R_C = 200\Omega$ ,  $R_{B1} = R_{B2} = 20K\Omega$ ,  $\beta = 200$ ,  $V_{BE0} = V_{BEsat} = 0.7V$ ,  $V_{CEsat} = 0.2V$ .

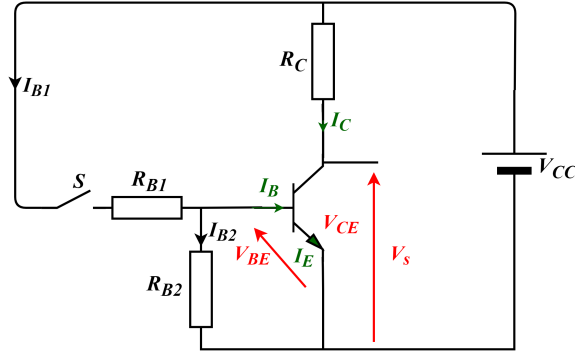


FIGURE 4.26: Exemple d'application du transistor en commutation.

### Solution

— Interrupteur ouvert :

La figure 4.27 illustre le circuit pour  $S$  ouvert.

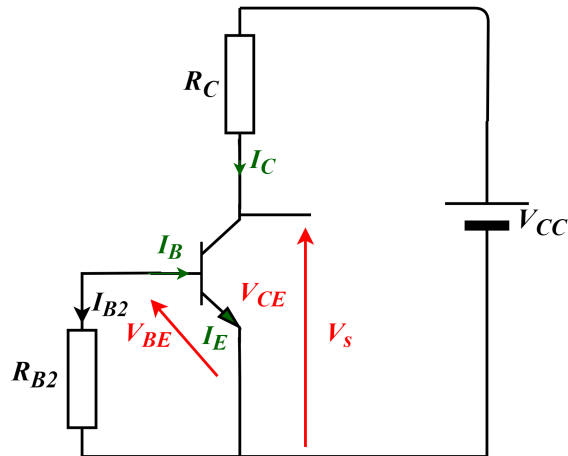


FIGURE 4.27: Circuit simplifié pour  $S$  ouvert.

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

Le courant  $I_{B1}$  est nul, donc :  $I_{B2} = -I_B$ .

$$\begin{aligned} R_{B2}I_{B2} - V_{BE} &= 0 \Rightarrow V_{BE} = R_{B2}I_{B2} = -R_{B2}I_B \\ \Rightarrow V_{BE}(I_B = 0) &= 0 < (V_{BE0} = 0.7V) \end{aligned}$$

Donc le transistor est bloqué  $\Rightarrow$

$$I_B = I_C = I_E = 0$$

$$V_s = V_{CC}$$

— Interrupteur fermé :

La figure 4.28 représente le circuit pour  $S$  fermé.

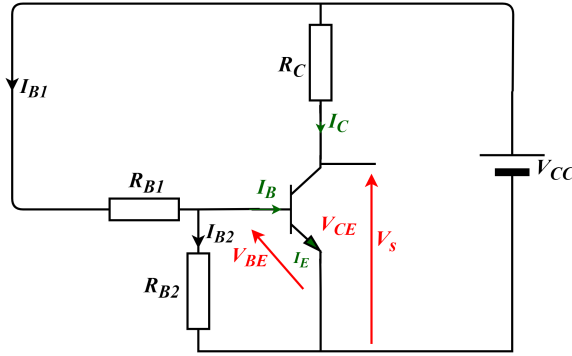


FIGURE 4.28: Circuit simplifié pour  $S$  fermé.

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

Le courant  $I_B$  est nul, donc :  $I_{B1} = I_{B2}$ .

$$V_{BE} = V_{RB2} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC} = 2.5V$$

On remarque que :  $V_{BE}(I_B = 0) > V_{BE0} \Rightarrow$  le transistor est soit saturé soit amplificateur.

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

$$I_C < \beta I_B$$

Calcul  $I_C$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C} = 24mA$$

Calcul  $I_B$

$$\begin{aligned} I_B &= I_{B1} - I_{B2} \\ I_{B2} &= \frac{V_{BEsat}}{R_{B2}} = 35\mu A \\ I_{B1} &= \frac{V_{CC} - V_{BEsat}}{R_{B1}} = 215\mu A \end{aligned}$$

$$\Rightarrow I_B = 180 = 0.18mA$$

On remarque que :

$$(I_C = 24mA) < (\beta I_B = 36mA)$$

Donc le transistor est saturé.

Il résulte que :

$$V_s = V_{CEsat} = 0.2V \simeq 0V$$

## 4.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'abord les deux types du transistor bipolaire *PNP* et *NPN*. Ensuite, nous avons étudié le transistor *NPN* dans le régime statique (qui comprend la polarisation, la droite de charge statique et le calcul du point de fonctionnement) et dans le régime dynamique (qui comprend le calcul du gain en tension, gain en courant, impédance d'entrée et impédance de sortie). Enfin, nous avons vu le transistor dans les circuits de commutation.