

# Chapitre 4 : 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 BJT

- ✓ 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.

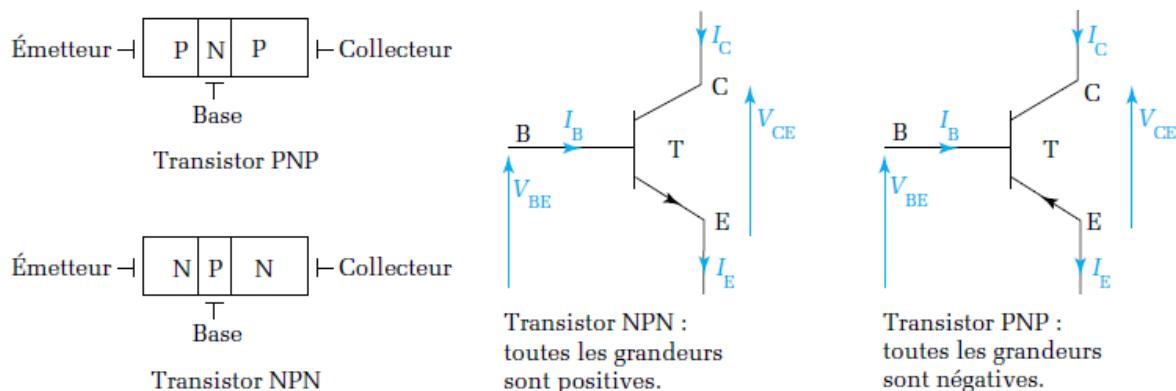


Figure 5.1

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  $\beta$  (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 :  $VB > VE$ .
- ✓ La jonction BC est polarisée en inverse :  $VB < VC$ .
- ✓ **Conditions :**  $\Leftrightarrow VC > VB > VE$
- ✓ On dit dans ce cas que le transistor est polarisé normalement.

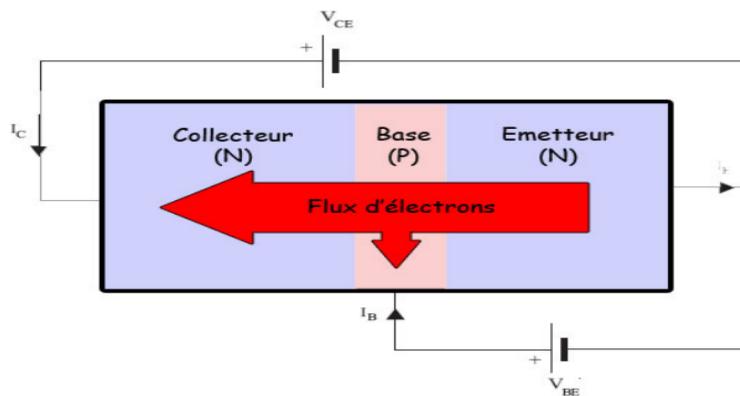


Figure 5. 2 : Polarisation d'un transistor

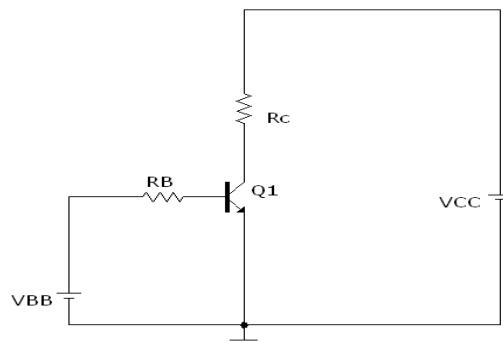
- ✓ *L'effet transistor* consiste à injecter des porteurs d'un émetteur très dopé vers une base assez mince, où ils deviennent minoritaires et grâce au champ inverse intense, ils sont collectés vers la région du collecteur.
- ✓ Environ 99% des électrons libres partent de l'émetteur atteignent le collecteur (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 ( $i_b \approx 0, i_b \approx 0$  et  $i_c \approx 0, i_c \approx 0$ ). 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.

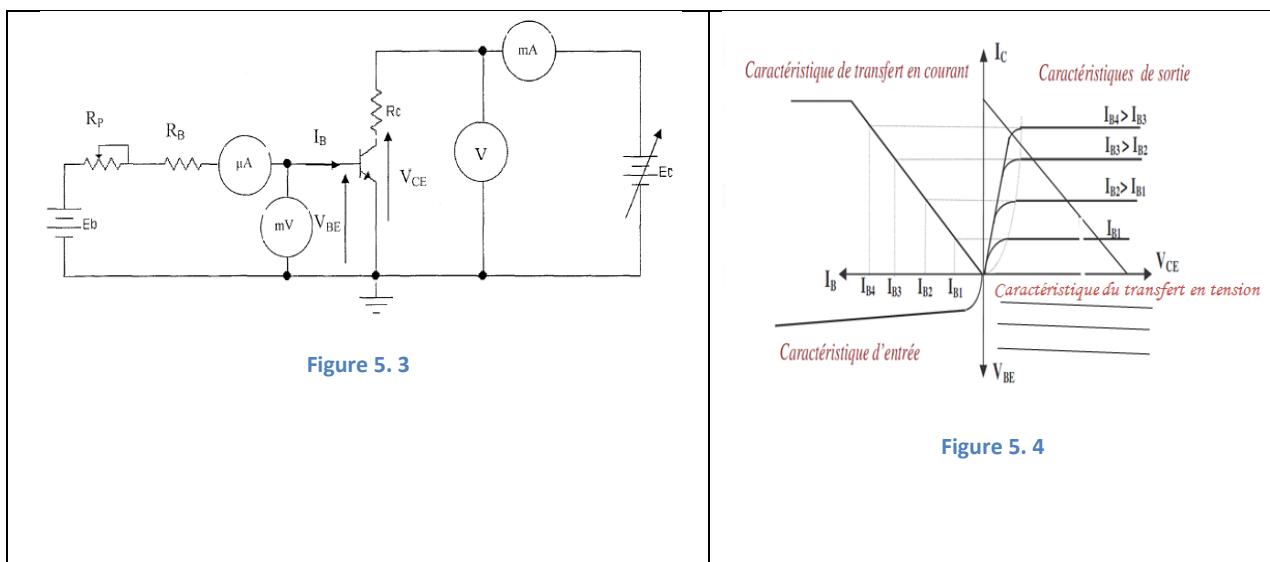
$I_B > 0$  et  $V_{BE} \approx 0.7V$  et la tension  $V_{CE} \approx 0$ .

✓ 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.



### ➤ 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  $I_C = f(I_B)$

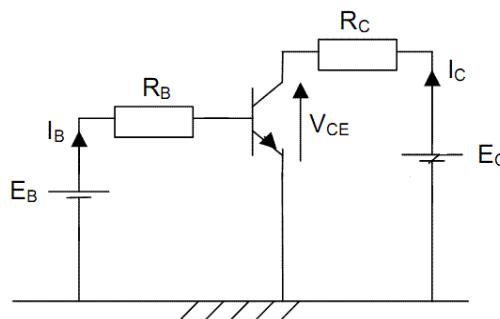
### ➤ Caractéristiques de transfert de tension

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.

## 7. Circuits de polarisation d'un transistor bipolaire

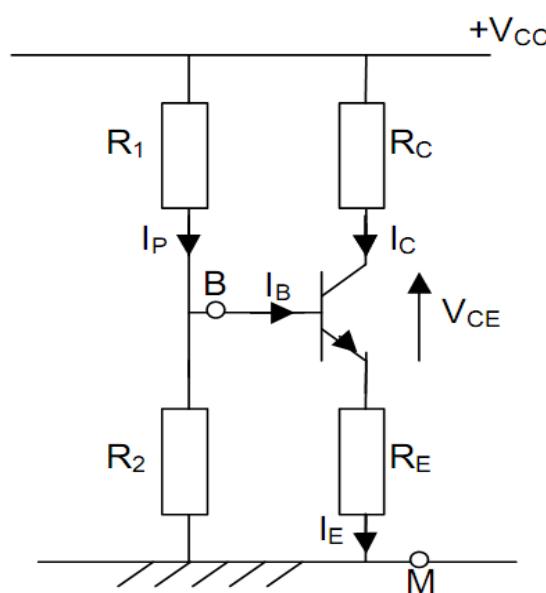
Polariser un transistor, ça revient à définir les grandeurs continues (statiques)  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$  et  $V_{BE}$ . La connaissance de valeur de ces paramètres permet de fixer un point de fonctionnement (repos)  $Q$ .

### ➤ Polarisation par courant de base imposé



### ➤ Polarisation par pont de base

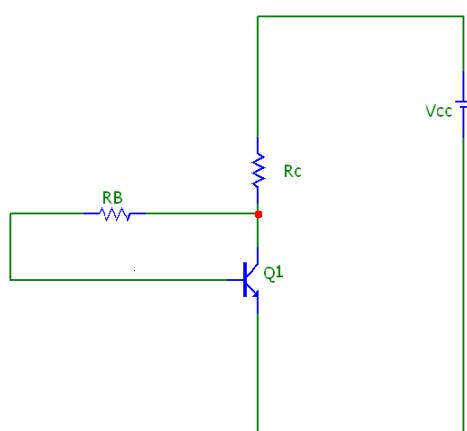
- Dans cette configuration on économise une alimentation.
- Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont choisies de sorte que le courant  $I_B$  soit négligeable devant le courant traversant ces résistances.



$\beta=100$ ,  $V_{CC}=10V$  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**



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

$$V_{BE}=0.6V.$$

$$R_C=?; R_B=?.$$

Figure 7-1

## 8. Gamme d'utilisation des transistors

Les transistors BF (pour les signaux à basse fréquence) sont conçus pour fonctionner à des vitesses modérées, comme dans le monde de l'automatisme, l'audio et la vidéo.

**Exemple :** BC109 classé dans la catégorie BF petite puissance capable de travailler jusqu'à plus de 150MHz

Pour les transistors HF (pour signaux à haute fréquence), dans ce cas le transistor travaille à des vitesses élevées, comme un transistor en commutation (tout ou rien)

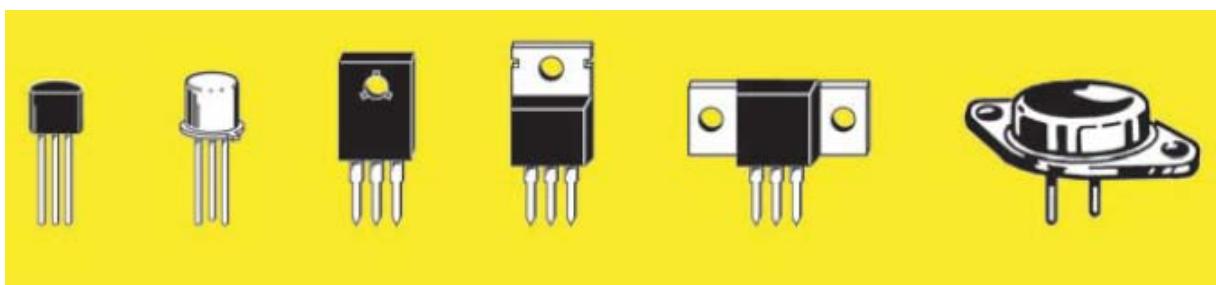


Figure 5.5

Les transistors peuvent avoir des formes et des dimensions différentes. Les plus petits sont utilisés dans les pré amplifications et les plus grands dans les amplificateurs de puissance. Plus les transistors sont gros, plus ils pourront dissiper une puissance importante.

Un fabricant peut placer les pattes dans l'ordre E, B, C, un autre dans l'ordre E, C, B, tandis qu'un troisième les placera dans l'ordre C, B, E.

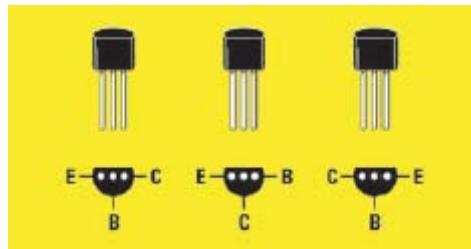


Figure 5.6 : Les trois configurations des pattes

Pour éviter de lire la disposition des pattes en sens inverse, on trouve toujours une référence sur le corps des ces composants.

Les petits transistors plastiques se repèrent facilement grâce à leur corps en demi-lune, tandis que les petits transistors métalliques se distinguent par un ergot placé à côté de la patte E.

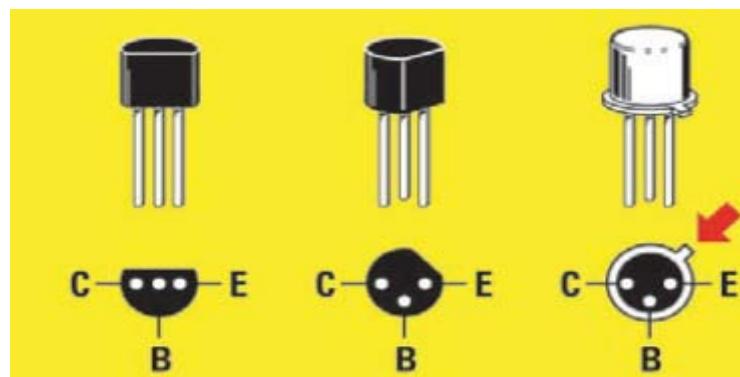


Figure 5.7 : Pour différencier les pattes E, B et C

La référence des transistors plastiques de puissance moyenne est une surface métallique placée d'un seul côté du corps.

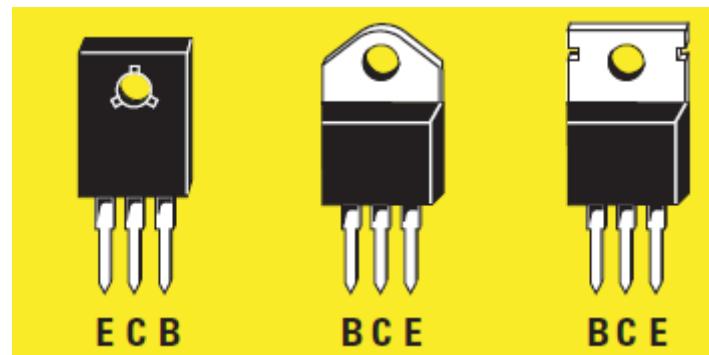


Figure 5.8 : Dans les transistors de moyenne puissance, on prend comme référence la partie métallique toujours placée derrière leur corps

Sur les transistors métalliques de puissance, les deux pattes E et B sont toujours disposées plus vers le bas par rapport à la ligne centrale du corps, la patte E sur la gauche et la patte B sur la droite. La patte C est toujours reliée au corps métallique du transistor.

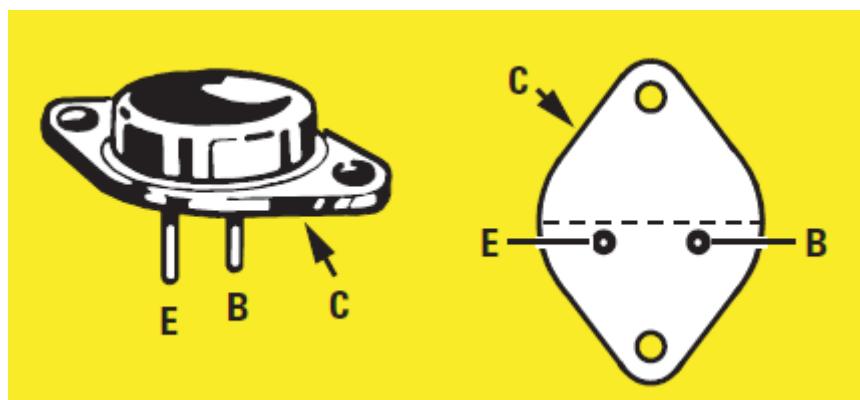


Figure 5.9 : Dans les transistors de puissance, les pattes E et B se trouvent sous la ligne centrale et le collecteur est relié au corps en métal

## 9. Boîtiers des transistors bipolaires de puissance

Les boîtiers des transistors bipolaires de puissance sont prévus pour être montés sur radiateur. Le boîtier est relié au collecteur. Voici les principaux :

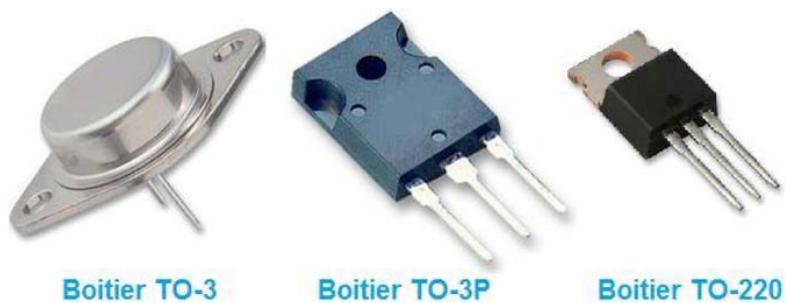


Figure 5. 10 : Transistors bipolaires de puissance : boîtiers TO-3, TO247 et TO220

Sans radiateur, la dissipation d'un transistor en boîtier TO247 est de 3W seulement. Dans certains cas, il peut être intéressant de choisir un boîtier plus grand (TO247 au lieu de TO220) pour éviter le montage sur un petit radiateur nécessaire à un boîtier plus petit. Cela simplifie le montage et la réalisation.

## 10. Différents boîtiers du transistor: T01, T03, T05, T092, T0220

La forme et les dimensions de ce composant sont variables. Sur tous les schémas électriques, le transistor est représenté avec le même symbole graphique.

Les transistors sont présentés dans des boîtiers très divers. Pour les petites **puissances**, on rencontre des boîtiers en plastique (**TO-92**) ou en **métal** (**TO-18, TO-39...**). Les transistors de plus fortes puissances utilisent souvent des gros boîtiers métalliques (**TO-3**) ou plutôt, pour les composants plus récents, des boîtiers en **plastique** avec un petit dissipateur métallique (**TO-220**).

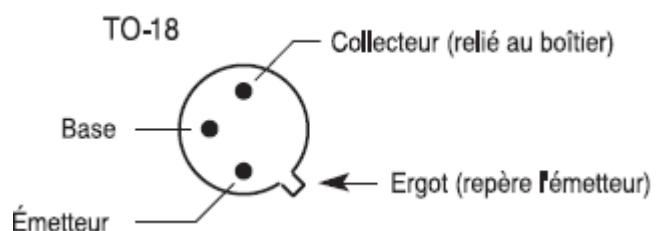
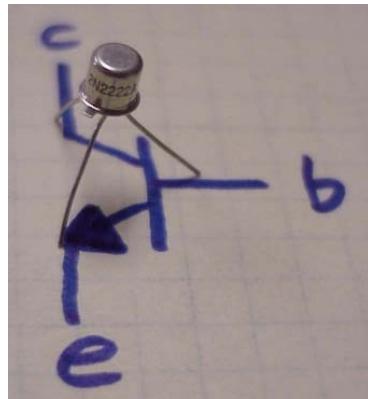


Figure 5.11 : Brochage du transistor 2N2222 (vue de dessous).

L'ergot permet de repérer l'émetteur. Le collecteur est relié électriquement au boîtier.



## 11. Utilisations et applications

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

## 12. 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 ».

### 12.1. 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 (CE) comme le montre la figure ci-dessous (amplificateur en émetteur commun).

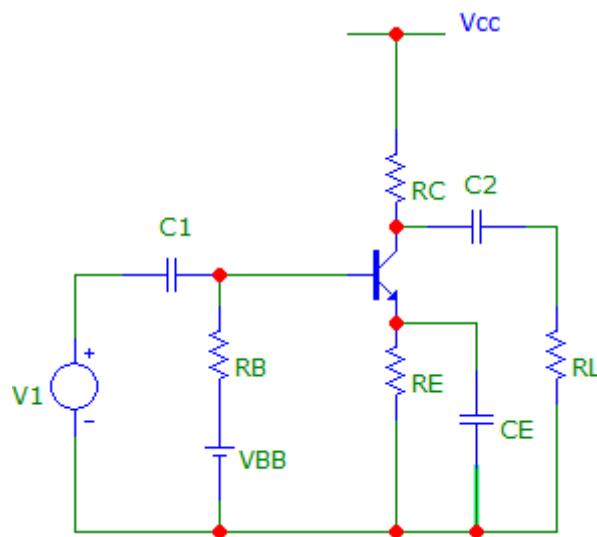
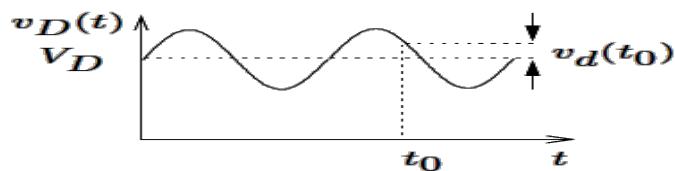


Figure 5. 12

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 ( $\Delta V_{BE} \ll V_{BE}$ ,  $\Delta I_C \ll I_C$  ....)

## 12.2. Modèle du transistor petit signal

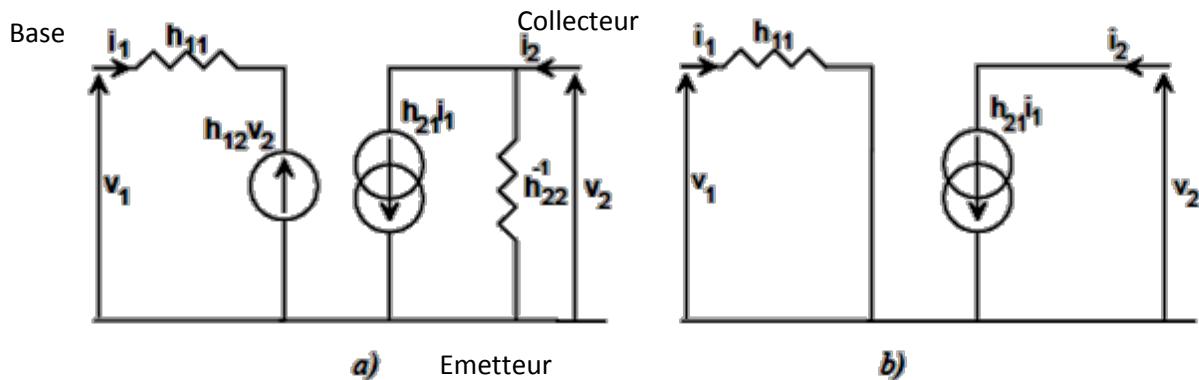


Figure 5. 13: Schémas équivalents petits signaux en basse fréquence a) : Schéma complet ; b) Schéma simplifié

$h_{11}$  : 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 :

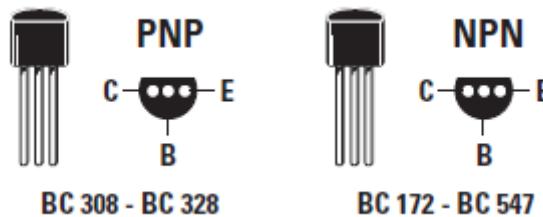
- ✓ Les condensateurs C sont remplacés par des courts circuits à la fréquence du signal.
- ✓ La source CC est remplacée par la mise à la terre.

### 12.3. Transistors bipolaires en régime de commutation

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:  $I_b > I_c/B_{min}$  ( $V_{cesat}=0V$ ).

### 13. Test : Repérage des pattes du transistor



Pour le test avec un multimètre simple, on peut comparer un transistor ordinaire à deux diodes reliées ensemble.

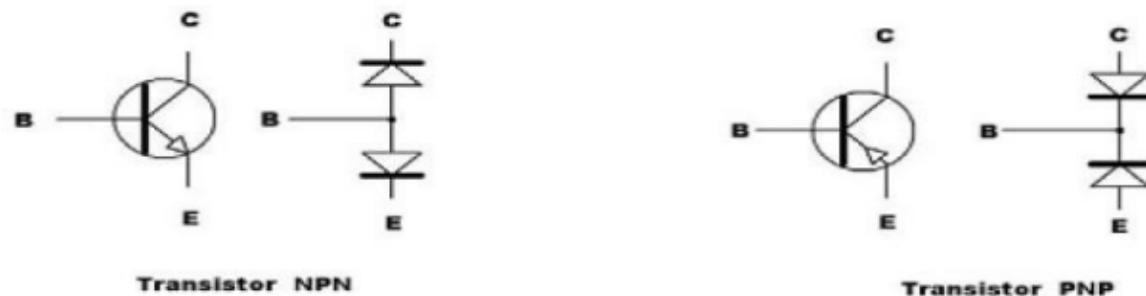


Figure 5. 14

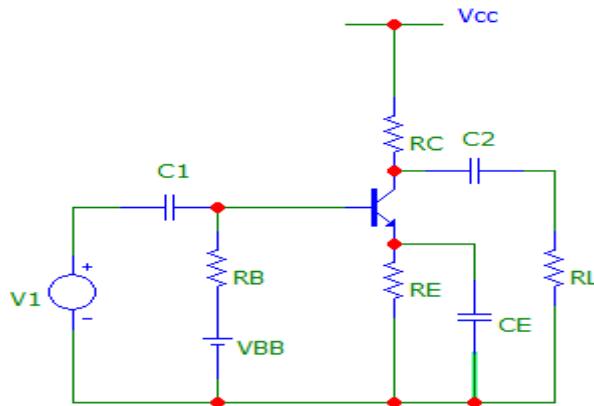
Il suffit de positionner un des fils du multimètre sur la base du transistor, et ensuite de mesurer avec les deux autres électrodes (émetteur et collecteur). Si le transistor est du type NPN, le courant va passer quand le fil rouge du multimètre est sur la base, et que le fil noir est en contact avec l'émetteur et ensuite le collecteur. Si le transistor est du type PNP, ce sera l'inverse (fil rouge inversé avec le fil noir). L'émetteur étant plus dopé que le collecteur, il correspond à l'électrode qui affiche la plus grande valeur.

Une dernière mesure entre collecteur et émetteur (dans les deux sens) devra monter un courant nul dans les deux sens.

## Exercices avec solution

### Exercice 1

Soit le circuit de la figure ci dessous :

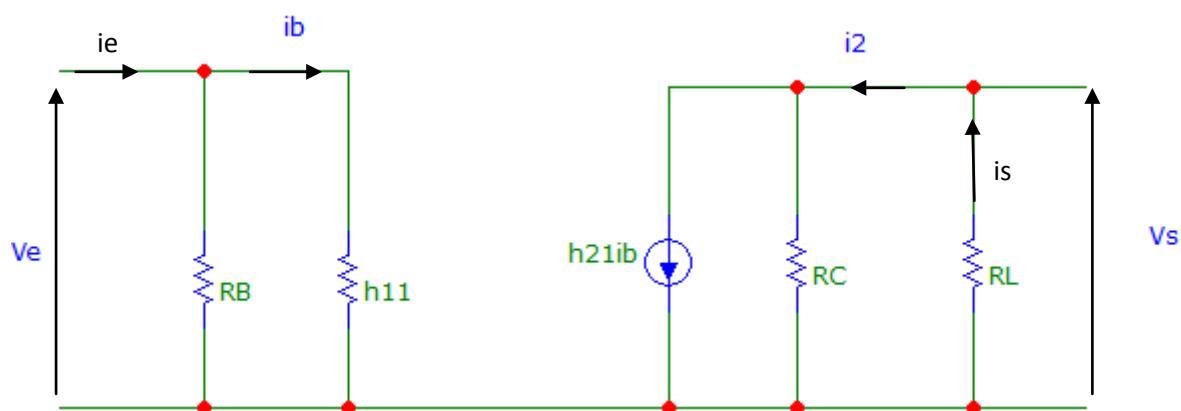


1. Représenter le schéma équivalent du transistor simplifié seul.
2. Etablir le schéma équivalent petit signaux basses fréquences de l'étage complet.
3. Calculer l'amplification en tension **Av**, l'amplification en courant **Ai** ainsi que les impédances d'entrée **Ze** et de sortie **Zs** de l'étage.
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 :  $G_V = \frac{V_s}{V_e}$

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

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

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

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

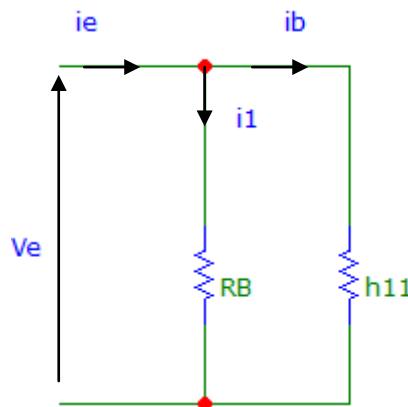
$$i_s = \frac{R_C}{R_C + R_L} h_{21} i_b \text{ avec}$$

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

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



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

$$v_e = h_{11} i_b$$

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

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

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

4. L'impédance de sortie

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

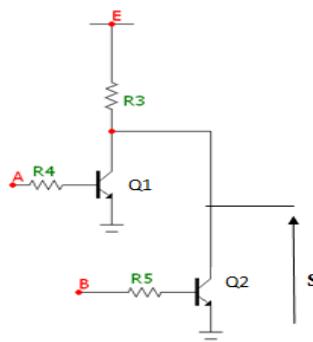
$$v_e = 0 \Rightarrow i_1 = 0 \Rightarrow i_b = 0 \Rightarrow \beta i_b = 0 \Rightarrow$$

$$z_s = R_c$$

### Exercice 2

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 bloquées  $\Rightarrow S = E$ .
- 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