

Chapitre 4

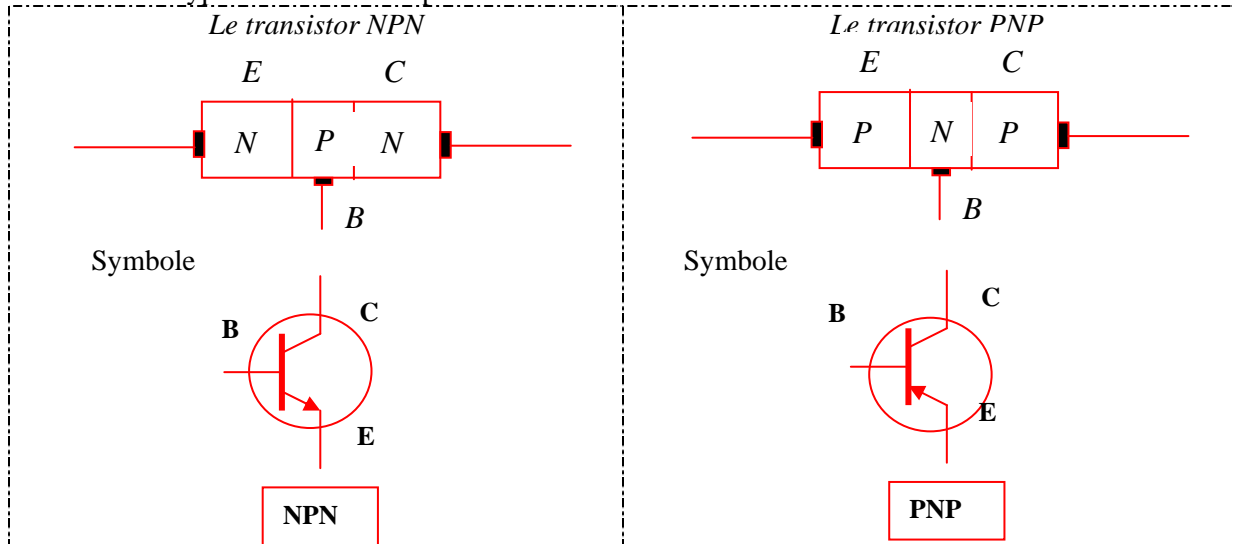
Le transistor bipolaire

En associant judicieusement deux jonctions, il est possible de commander les caractéristiques électriques d'une jonction (courant-tension) en agissant sur le courant de l'autre jonction. Cette découverte due à Bardeen, Brattain et Shockley en 1951 a ouvert à l'électronique un champ d'application immense dans tous les secteurs.

1. Définition

Le **transistor bipolaire** (communément appelé "transistor à jonction") est construit avec des couches de semiconducteurs de type P ou N assemblées de façon à former deux jonctions P-N dos-à-dos.

Il existe deux types de transistor bipolaire:



N.B. La flèche indique le sens réel du courant électrique.

De point de vue physique, le fonctionnement des deux transistors est rigoureusement le même. Nous étudierons par la suite le transistor NPN. Le raisonnement est identique pour le transistor PNP: il suffit de permuter le rôle des électrons et des trous.

Les trois bornes s'appellent respectivement:

- ◆ **L'émetteur (E)**, région de type N, qui est fortement dopée. Son rôle est d'émettre les électrons (majoritaires dans l'émetteur). Sa dimension est inférieure à celle du collecteur.
- ◆ **La base (B)**, région de type P, faiblement dopée et qui a une faible épaisseur ($\approx 1\mu\text{m}$) devant la longueur de diffusion des porteurs minoritaires (électrons) dans cette région. Elle transmet au collecteur la plus part des électrons venant de l'émetteur.
- ◆ **Le collecteur (C)**, région de type N moyennement dopée. Le collecteur recueille les électrons qui lui viennent de la base d'où son nom. C'est la plus grande des trois régions dopées.

2. Le transistor bipolaire non polarisé

En absence de tension appliquée, comme pour une seule jonction P-N (cf. chapitre 2), il se crée au niveau des deux jonctions émetteur-base et base-collecteur des zones de charges d'espace. Comme le dopage de l'émetteur est supérieur à celui du collecteur, sa charge positive est supérieure à celle du collecteur.

A l'équilibre, les barrières énergétiques imposées par les jonctions émetteur-base et base-collecteur empêchent toute diffusion de porteurs libres. Le courant dans le transistor est globalement nul.

3. Transistor bipolaire sous polarisation

3.1. Modes de fonctionnement d'un transistor bipolaire

Selon la polarité des tensions appliquées aux jonctions émetteur-base et base-collecteur, on obtient des comportements différents du transistor. On distingue quatre modes (ou régimes) de fonctionnement du transistor:

- ◆ **Mode de fonctionnement normal** : la jonction E-B est polarisée en direct et la jonction B-C en inverse. Ce mode est utilisé en amplification et pour tracer les caractéristiques du transistor.

- ◆ **Mode de fonctionnement bloqué** : les jonctions E-B et B-C sont polarisées en inverse. Le transistor est équivalent à un circuit ouvert.
- ◆ **Mode de fonctionnement saturé** : les jonctions E-B et B-C sont polarisées en direct. Le transistor est équivalent à un circuit fermé.
- ◆ **Mode de fonctionnement inverse** : la jonction E-B est polarisée en inverse et la jonction B-C en direct. Ce mode est très peu utilisé.

3.2. Montages de base

Quand on branche un transistor, il y a trois montages possibles pour qu'il y ait une des pattes commune à l'entrée et à la sortie :

- ◆ **Montage émetteur commun** : la patte commune est l'émetteur. L'entrée est la base et la sortie est le collecteur.
- ◆ **Montage base commune** : la patte commune est la base. L'entrée est l'émetteur et la sortie est le collecteur.
- ◆ **Montage collecteur commun** : la patte commune est le collecteur. L'entrée est la base et la sortie est l'émetteur.

3.3. L'effet transistor

3.3.1 Etude expérimentale (Montage base commune en mode de fonctionnement normal)

Appliquons entre l'émetteur et la base une d.d.p. continue V_{BE} de l'ordre de 1 volt tel que la jonction N-P émetteur-base soit polarisée en direct ($V_{BE} > 0$). Et appliquons entre la base et le collecteur une tension V_{BC} d'une dizaine de volt tel que la jonction base-collecteur soit polarisée en inverse ($V_{BC} < 0$)-figure 1-

Dans ce montage, la base constitue la référence commune aux circuits d'entrée (circuit émetteur-base) et de sortie (circuit collecteur-base). Ce montage est appelé *base commune*.

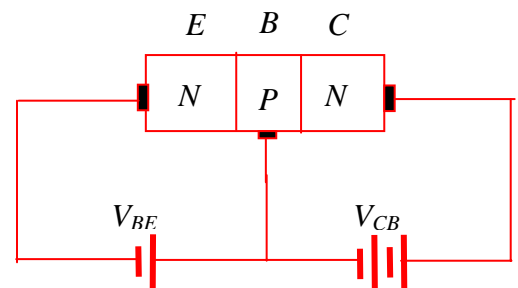


Figure 1

3.3.2 Analyse du circuit

La jonction base-émetteur étant polarisée en direct: les électrons majoritaires de l'émetteur diffusent facilement vers la base. De même, les trous majoritaires de la base vont diffuser vers l'émetteur.

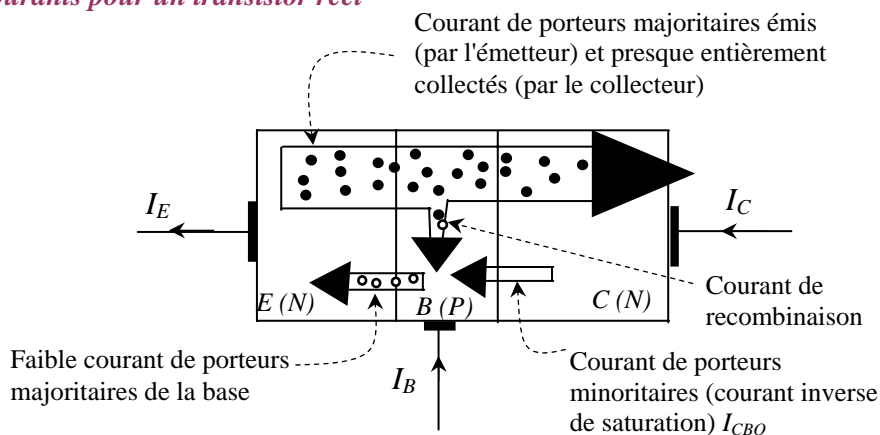
Les électrons injectés de l'émetteur vers la base deviennent minoritaires. Certains d'entre eux vont se recombiner avec les trous majoritaires de la base. Mais comme la base est très faiblement dopée et son épaisseur est faible devant la longueur de diffusion des électrons injectés par l'émetteur, ces derniers auront peu de chance de rencontrer les trous majoritaires de la base. Seule une faible portion de ces électrons va subir des recombinaison avec les trous de la base.

Les électrons émis par l'émetteur arrivent à proximité de la jonction base-collecteur (polarisée en inverse) sont accélérés vers le collecteur par un champ dirigé du collecteur vers la base.

En conclusion, la presque totalité des électrons "émis" par l'émetteur est collectée par le collecteur.

Bilan des courants pour un transistor réel

Figure 2



Remarque:

Il faut noter qu'au courant précédent se superpose un courant inverse de saturation dû aux porteurs minoritaires de la base et du collecteur I_{CBO} , mais l'intensité correspondante reste très faible.

3.3.3. Définition de l'effet transistor

Le transistor permet, avec une faible tension (V_{BE} de l'ordre de 1 volt) d'injecter un courant donnée (courant d'émetteur) dans un circuit de faible résistance (jonction émetteur-base polarisée en direct) et de transférer ce même courant dans un circuit de grande résistance (jonction base-collecteur en inverse) : c'est l'**effet transistor**.

Remarque: la nomination "transistor bipolaire" provient du fait que les porteurs de charge intervenant dans son fonctionnement sont les électrons (majoritaires du l'émetteur et du collecteur) et les trous (minoritaires dans la base). *Le transistor bipolaire fait intervenir deux types de porteurs de charges.*

3.4. Relations fondamentales**3.4.1. Montage base commune** (gain en courant en base commune)

Reprenons le montage "**base commune**" de la figure 3 .

Bilan des courants en régime stationnaire:

- ◆ $I_E = I_B + I_C$
- ◆ $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$

Où I_{CBO} est le courant inverse de saturation de la jonction B-C (appelé aussi *courant de fuite à émetteur ouvert* $I_E=0$).

Dans la pratique, I_{CBO} est un courant très faible.

En première approximation, $I_C = \alpha I_E$ avec $0,98 < \alpha < 0,99$.

Le coefficient $\alpha = \frac{I_C}{I_E}$ est appelé le "**gain en courant en base commune**".

3.4.2. Montage émetteur commun (gain en courant en émetteur commun)

Dans la pratique, le montage le plus fréquemment utilisé est le montage en "émetteur commun"-figure 4-(à noter que l'émetteur est commun à l'entrée et à la sortie).

Bilan des courants en régime stationnaire:

- ◆ $I_E = I_B + I_C$
- ◆ $I_C = \beta I_B + I_{CEO}$

Où I_{CEO} est le courant de fuite à base ouverte.

On déduit des équations ci-dessus:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ et } I_{CEO} = (\beta + 1) I_{CBO}$$

Comme α est voisin de l'unité, le coefficient β est dans la pratique compris entre 20 et 900.

Dans la pratique, le courant I_{CEO} est faible et I_C est proportionnel à I_B pour $V_{CE} = \text{constante}$:

Le coefficient $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ est appelé "**gain en courant en émetteur commun**".

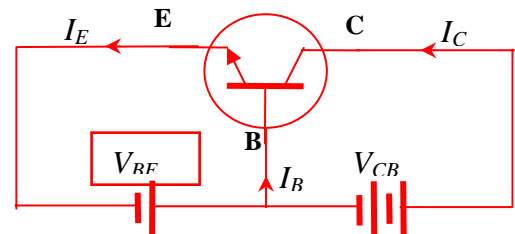


Figure 3

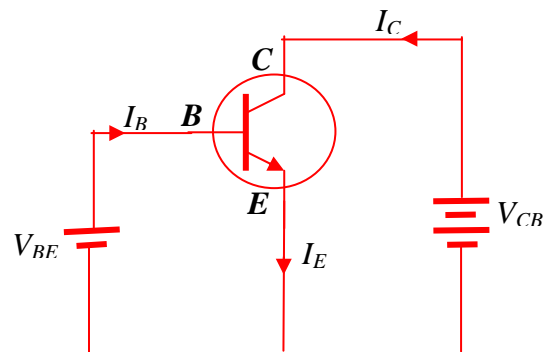


Figure 4

3.5. Réseaux des caractéristiques du transistor bipolaire

Déterminer l'état de fonctionnement d'un transistor bipolaire nécessite la connaissance de six variables:

- ◆ Trois courants: I_B , I_E , I_C ;
- ◆ Trois tensions: V_{CE} , V_{BE} , V_{CB} .

Pour le tracer des caractéristiques, le montage le plus utilisé dans la pratique est le montage à "émetteur commun".-figure 5-

Les conditions de fonctionnement normal du transistor sont tel que:

$$\begin{cases} V_{BE} > 0 & \text{jonction B - E polarisée en direct} \\ V_{BC} < 0 & \text{jonction B - C polarisée en inverse.} \end{cases}$$

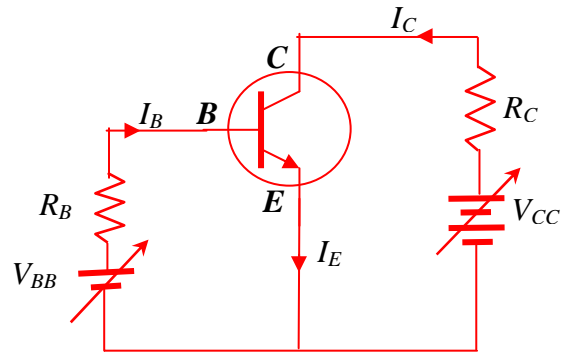


Figure 5

Dans ce montage:

- ◆ la jonction B-E est polarisée en direct à l'aide du générateur de tension V_{BB} à travers la résistance R_B , grande devant la résistance d'entrée du transistor. V_{BE} est de l'ordre de 0,7volt pour un transistor au silicium.
- ◆ Le collecteur est polarisé par la résistance R_C (à l'aide du générateur V_{CC}) de telle manière que la tension du collecteur soit supérieure à la tension de la base (jonction B-C polarisée en inverse).

3.5.1 Caractéristique d'entrée $I_B=f(V_{BE})$

Elle est donnée par la relation $I_B=f(V_{BE})$ à V_{CE} constante. C'est pratiquement la caractéristique d'une diode en polarisation directe. Cette caractéristique dépend très peu de V_{CE} . -figure 6-

On la donne en général pour une seule valeur de V_{CE} . En fonctionnement normal, V_{BE} est d'environ 0,7V pour un transistor au silicium. I_B est généralement inférieur au mA.

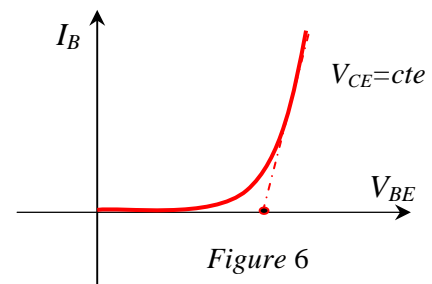


Figure 6

3.5.2 Caractéristique de sortie $I_C=f(V_{CE})$

Elle est définie par la relation $I_C=f(V_{CE})$ à I_B constant. -figure 7-

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

On distingue trois zones:

- Une zone importante où le courant I_C dépend de I_B ($I_C \approx \beta I_B$) et qui varie très peu avec V_{CE} . Cette caractéristique est celle d'un générateur de courant (de résistance interne très grande) utilisé en tant que récepteur.

- La zone des faibles tension V_{CE} (0 à quelque volts). On l'appelle zone de saturation. Quand la tension C-B diminue pour devenir très faible, la jonction C-B cesse d'être polarisée en inverse et l'effet transistor décroît rapidement. A la limite, la jonction C-B devient polarisée en direct: le transistor est équivalent à deux diodes en parallèles.

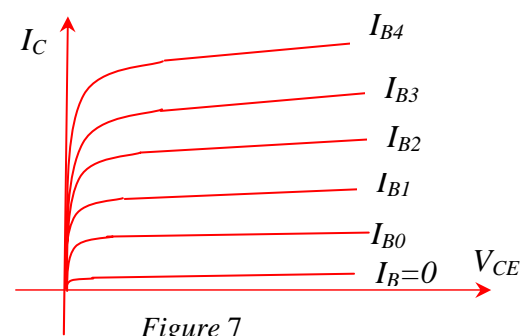


Figure 7

Remarque: Lorsque la tension V_{CE} devient supérieure à la tension d'avalanche de la jonction C-B, le courant I_C augmente très rapidement. Le transistor se chauffe et risque d'être endommagé.

3.5.3 Caractéristique de transfert en courant $I_C=f(I_B)$

Elle est donnée par la relation $I_C=f(I_B)$ à V_{CE} constante. Elle se déduit de la caractéristique précédente.-et dépend très V_{CE} -figure 8-

Le courant du collecteur I_C est proportionnel à I_B : $I_C \approx \beta I_B$

β dépend du type de transistor : 0 à 10 pour les transistors de grosse puissance, 30 à 80 de moyenne puissance et de 100 à 150 pour les transistors de signal (faible puissance).

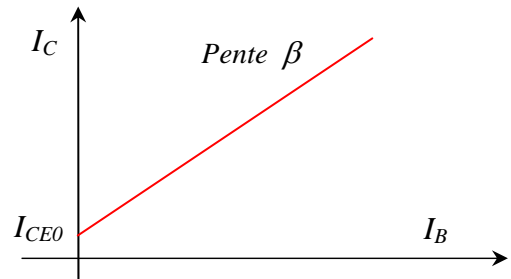


Figure 8

3.5.4 Caractéristique de transfert en tension $V_{BE}=f(V_{CE})$

Elle est donnée par la relation $V_{BE}=f(V_{CE})$ à I_B constant -figure 9-

Par suite de la faible influence de la tension de sortie V_{CE} sur la tension d'entrée V_{BE} , les caractéristiques de transfert en tensions sont presque horizontales.

Cette caractéristique est souvent ignorée par les constructeurs.

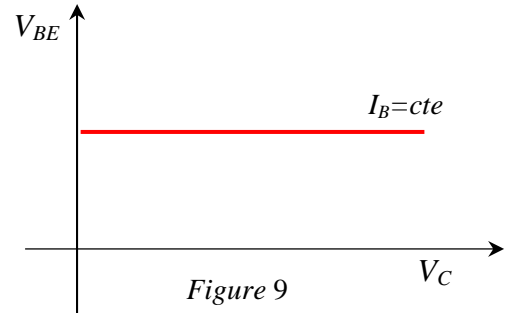


Figure 9

Remarque: limites et choix d'utilisation d'un transistor bipolaire

Le transistor bipolaire pourra fonctionner sans destruction à l'intérieur d'un domaine d'utilisation bien déterminé. Le choix du transistor (au premier ordre) se fera en considérant les paramètres suivants:

- ◆ V_{CEmax} que peut supporter le transistor;
- ◆ Le courant maximum du collecteur I_{Cmax} .
- ◆ La puissance maximale ($P_{max}=V_{CE} I_C$) que le transistor aura à dissiper (choix du radiateur);
- ◆ Le gain en courant β .