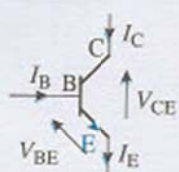


7.1 PRÉSENTATION

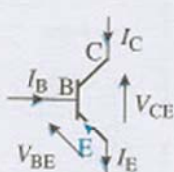
■ Les transistors bipolaires sont des éléments à 3 bornes

- Une borne appelée Base : B.
- Une borne appelée Émetteur : E.
- Une borne appelée Collecteur : C.

■ Symboles



Transistor NPN



Transistor PNP

- La flèche repère toujours l'Émetteur :
- la flèche est entrante pour un PNP ;
 - la flèche est sortante pour un NPN.

7.2 FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement des 2 types de transistors (NPN et PNP) est analogue : le courant I_B commande la jonction C-E.

■ Signes des paramètres

- Dans un transistor bipolaire, le courant Collecteur → Émetteur ne peut transiter que dans le sens indiqué par la flèche de l'émetteur.

Ceci entraîne pour notre représentation (voir symboles) :

- I_C et I_E positifs pour un NPN ;
- I_C et I_E négatifs pour un PNP.
- La commande de la jonction CE par I_B se fera :
 - par I_B positif pour un NPN ;
 - par I_B négatif pour un PNP.
- Pour les tensions :
 - V_{CE} et V_{BE} seront positives pour un NPN ;
 - V_{CE} et V_{BE} seront négatives pour un PNP.

■ Étude des régimes de fonctionnement

Le transistor est un élément pouvant être commandé. En effet, selon la valeur du courant injecté sur sa base (I_B), le régime de fonctionnement du transistor sera différent. Pour étudier le transistor, il faut donc dissocier deux montages :

- le montage sur la base du transistor : commande ;
- le montage sur la jonction CE : commandé.

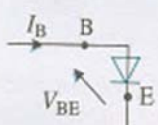
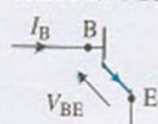
Afin d'étudier les régimes de fonctionnement du transistor, nous allons, dans un premier temps, isoler la jonction B → E, puis la jonction C → E. Dans les deux cas, nous donnerons les schémas électriques équivalents de ces deux jonctions, selon le régime de fonctionnement.

Jonction Base/Émetteur

Cette jonction est en fait une jonction NP ou PN pour respectivement un transistor type PNP ou NPN.

Le schéma équivalent de cette jonction est donc celui d'une diode.

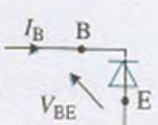
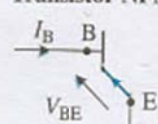
Transistor NPN



La jonction BE sera passante uniquement si $I_B > 0$, ce qui entraîne $V_{BE} = V_{seuil}$, c'est-à-dire typiquement 0,7 volts (pour un transistor au silicium).

Si $V_{BE} < V_{seuil}$, la jonction BE sera bloquée et $I_B = 0$. Ce qui entraîne le blocage total du transistor.

Transistor PNP



La jonction BE sera passante uniquement si $I_B < 0$, ce qui entraîne $V_{BE} = -V_{seuil}$, c'est-à-dire typiquement -0,7 volts (pour un transistor au silicium).

Si $V_{BE} > -V_{seuil}$, la jonction BE sera bloquée et $I_B = 0$. Ce qui entraîne le total blocage du transistor.

Exemple pour un transistor NPN

Pour savoir si la jonction base émetteur d'un transistor NPN est passante ou bloquée, il suffit d'écrire $V_{BE} = V_{seuil}$, puis de déterminer la valeur de I_B par la loi de la maille côté jonction BE.

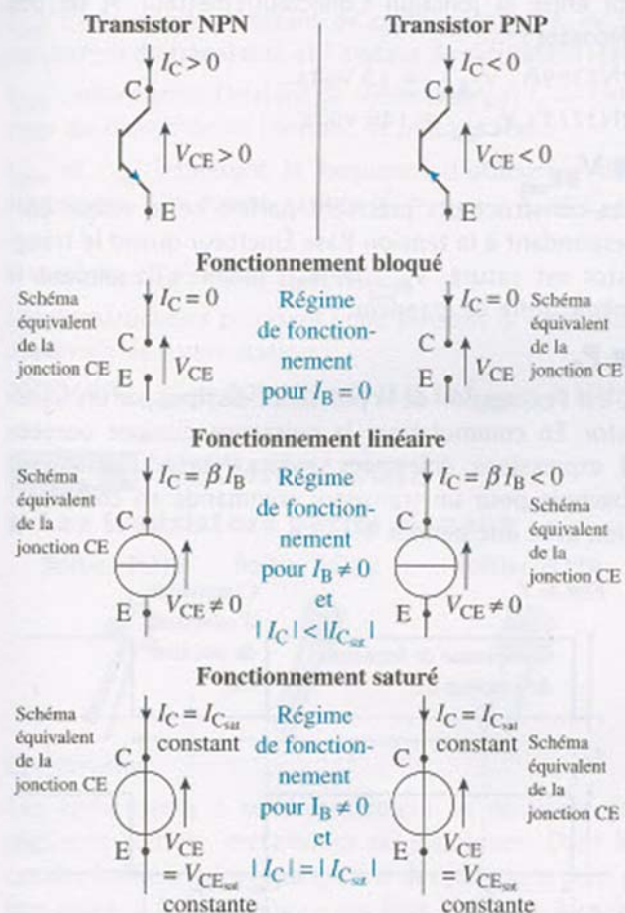
Si $I_B > 0$, alors la jonction est passante ; $V_{BE} = V_{seuil}$.

Si $I_B < 0$ alors la jonction est bloquée ; I_B ne peut être que nul et $V_{BE} < V_{seuil}$.

Jonction Collecteur/Émetteur

Cette jonction est en fait une jonction NPN ou PNP commandée par le courant I_B de la jonction Base Émetteur.

Les schémas équivalents de cette jonction dépendent donc du courant I_B :



- $V_{CE_{sat}}$ et β sont des données constructeur.
- $V_{CE_{sat}}$ est une tension très petite.
- $I_{C_{sat}}$ est le courant maximum pouvant circuler dans le circuit comprenant la jonction CE (avec $V_{CE} = V_{CE_{sat}}$).
- En régime de fonctionnement linéaire ou bloqué, la valeur de la tension V_{CE} est déterminée en établissant la loi de la maille comprenant la tension V_{CE} .
- V_{CE} , I_C , $V_{CE_{sat}}$ et $I_{C_{sat}}$ sont des grandeurs négatives dans le cas d'un transistor type PNP.

Relation de courant

Comme tout courant entrant doit ressortir (loi des nœuds) :

$$I_E = I_C + I_B$$

Relation de tension

La loi des mailles pouvant toujours être appliquée :

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$

Fonctionnement en commutation

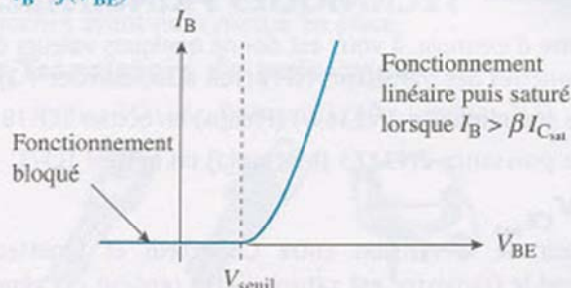
En travaillant en fonctionnement bloqué ou saturé uniquement, le transistor permet bien de commander un « interrupteur » (jonction CE), par un courant (I_B).

On dira alors, travailler en régime de commutation :

- $I_B = 0 \Rightarrow$ jonction CE ouverte et $I_C = 0 \Rightarrow$ Interrupteur ouvert.
- $I_B > \beta \cdot I_{C_{sat}} \Rightarrow V_{CE} = V_{CE_{sat}}$ (proche de 0) et $I_C = I_{C_{sat}} \Rightarrow$ Interrupteur fermé.

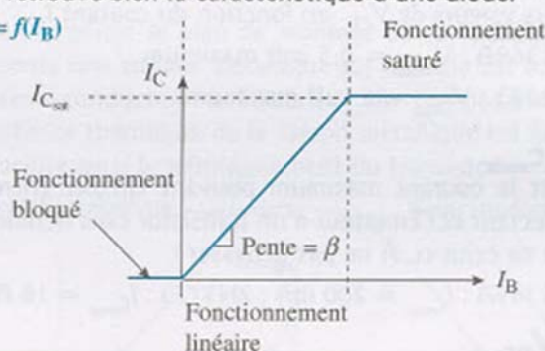
■ Caractéristique de transfert

$$I_B = f(V_{BE})$$



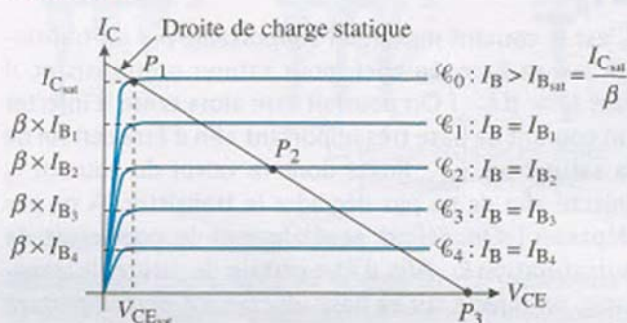
On retrouve bien la caractéristique d'une diode.

$$I_C = f(I_B)$$



On a $I_C = \beta \cdot I_B$ en fonctionnement linéaire, $I_C = 0$ en régime bloqué et $I_C = I_{C_{sat}}$ = Constante en régime de saturation.

$$I_C = f(V_{CE})$$



On a $I_C = \beta \cdot I_B$ en fonctionnement linéaire, $I_C = 0$ en régime bloqué et $I_C = I_{C_{sat}}$ = Constante en régime de saturation.

L'équation de la droite de charge est trouvée en écrivant la loi des mailles côté jonction CE. C'est la droite d'équation $I_C = f(V_{CE})$.

Chaque courbe \mathcal{C}_i du réseau du transistor correspond à une valeur précise de I_B . Ainsi, en connaissant la valeur de I_B , on sait que le point de fonctionnement P_i est l'intersection de la droite de charge et de la courbe \mathcal{C}_i concernée. On connaît donc ainsi la valeur de I_C et V_{CE} .

• Point de fonctionnement en P_1 : $I_C = I_{C_{sat}} = I_{C_{max}}$ et $V_{CE} = V_{CE_{sat}}$; régime saturé.

• Point de fonctionnement en P_2 : $I_C = \beta \times I_{B1}$; régime linéaire.

• Point de fonctionnement en P_3 : $I_C = I_B = 0$; régime bloqué.

Il suffit de donner à I_B les bonnes valeurs pour passer du point P_1 à P_3 (commutation commandée).

7.3 CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES PRINCIPALES

À titre d'exemple, il vous est donné quelques valeurs de paramètres des transistors NPN (voir aussi exercice 7.2) :

- de commutation 2N2369A (Philips) en boîtier TO-18 ;
- de puissance 2N3773 (Motorola) en boîtier TO-3.

■ $V_{CE_{sat}}$

Valeur de la tension entre Collecteur et Émetteur quand le transistor est saturé. Cette tension est généralement faible. Les constructeurs peuvent donner plusieurs valeurs de $V_{CE_{sat}}$ en fonction du courant I_C .

2N2369A : $V_{CE_{sat}} = 0,5$ volt maximum.

2N3773 : $V_{CE_{sat}} = 1$ volt maximum.

■ $I_{C_{max}}$

C'est le courant maximum pouvant circuler entre le Collecteur et l'Émetteur d'un transistor sans détérioration de celui-ci. À ne pas dépasser !

2N2369A : $I_{C_{max}} = 200$ mA ; 2N3773 : $I_{C_{max}} = 16$ A.

■ V_{BE}

Lorsque la jonction Base Émetteur est passante, la tension V_{BE} est équivalente à une tension de seuil d'une diode. Typiquement : $0,5 \text{ V} < V_{BE} < 1 \text{ V}$. C'est la valeur limite de V_{BE} qui permet de débloquent le transistor.

■ $I_{B_{max}}$

C'est le courant maximum supportable par un transistor sur sa Base. En effet, pour saturer un transistor, il faut $I_B > \beta \cdot I_{C_{sat}}$. On pourrait être alors tenté d'injecter un courant de base très important afin d'être certain de la saturation. $I_{B_{max}}$ limite donc la valeur du courant I_B injecté afin de ne pas dégrader le transistor. À ne pas dépasser ! On définit généralement le coefficient de sursaturation k_s . Afin d'être certain de saturer le transistor, on injecte sur sa base un courant plus important que $I_{C_{sat}}/\beta$:

$$I_B = \frac{k_s I_{C_{sat}}}{\beta} \quad (\text{typiquement } k_s > 3).$$

■ $V_{BE_{invmax}}$

Tension inverse maximum supportable entre Base et Émetteur, lorsque le transistor est bloqué. À ne pas dépasser !

■ β

β est le rapport I_C/I_B en régime de fonctionnement linéaire. β n'est pas une valeur fixe. Un constructeur donne une plage de valeur. β est censé être compris dans cette plage.

Pour étudier un montage à transistor en commutation, il faut raisonner avec $\beta = \beta_{min}$ et avec $\beta = \beta_{max}$ pour être sûr d'avoir le fonctionnement souhaité avec un transistor ayant un β compris entre β_{min} et β_{max} .

2N2369A : $40 < \beta < 120$; 2N3773 : $15 < \beta < 60$.

→ Les constructeurs notent généralement ce paramètre H_{FE} .

■ $V_{CE_{max}}$

C'est la tension maximale supportable par un transistor entre la jonction Collecteur/Émetteur. À ne pas dépasser !

2N2369A : $V_{CE_{max}} = 15$ volts.

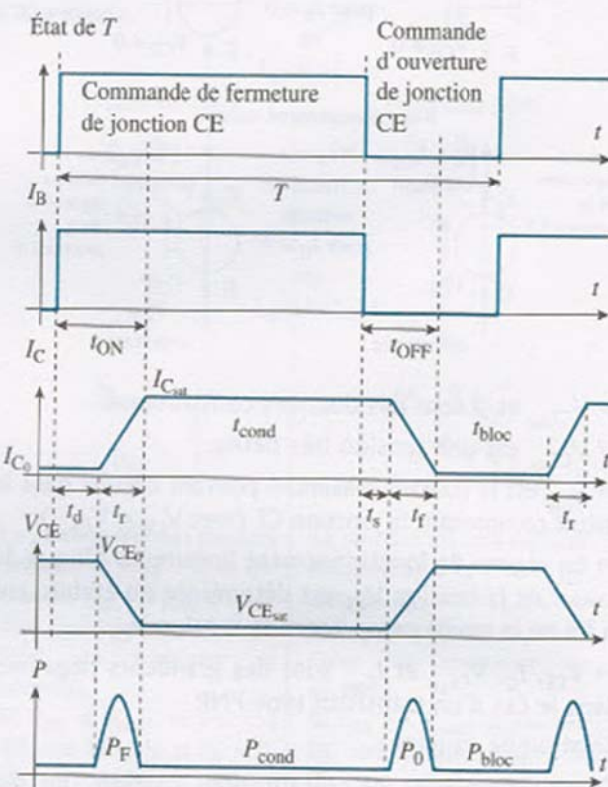
2N3773 : $V_{CE_{max}} = 140$ volts.

■ $V_{BE_{sat}}$

Les constructeurs précisent parfois cette valeur correspondant à la tension Base Émetteur quand le transistor est saturé. $V_{BE_{sat}} > V_{BE}$, même s'ils gardent le même ordre de grandeur.

■ P_D

C'est l'expression de la puissance dissipée par un transistor. En commutation, la puissance dissipée possède 4 expressions différentes, selon l'état du transistor. Exemple pour un transistor commandé en commutation avec une période T .



- À la fermeture, on a : $P_F = V_{CE_0} \cdot I_{C_{sat}} \cdot t_f/6T$.
- À l'ouverture, on a : $P_0 = V_{CE_0} \cdot I_{C_{sat}} \cdot t_r/6T$.
- Pendant la phase de conduction, on a :

$$P_{cond} = V_{CE_{sat}} \cdot I_{C_{sat}} \cdot t_{cond}/T.$$

- Pendant la phase de blocage, on a :

$$P_{bloc} = V_{CE_0} \cdot I_{C_0} \cdot t_{bloc}/T.$$

$$P_{totale} = P_0 + P_F + P_{cond} + P_{bloc}.$$

Le calcul de la puissance dissipée permet par la suite de dimensionner le dissipateur thermique (radiateur) à adjoindre au transistor afin de limiter la température des jonctions. Les constructeurs précisent la puissance maximale dissipable.

2N2369A : $P_{max} = 360$ mW. 2N3773 : $P_{max} = 150$ W.



■ t_{ON}/t_{OFF}

Ce sont les temps de commutation :

t_{ON}^* : retard entre l'instant de commande par I_B de la saturation du transistor, et l'instant de saturation réel.

t_{OFF}^* : retard entre l'instant de commande par I_B du blocage du transistor, et l'instant de blocage réel.

t_{ON} et t_{OFF} limiteront la fréquence d'utilisation des transistors. On donne parfois $t_d^* = t_{ON} - t_r^*$ et $t_s^* = t_{OFF} - t_f^*$.

* Voir chronogrammes ci-dessus.

Les constructeurs précisent généralement la fréquence maximale de commutation :

2N2369A : $f_{max} = 500$ MHz. 2N3773 : $f_{max} = 8$ MHz.

7.4 TECHNOLOGIE

■ Les transistors petits signaux

Boîtier TO18 Boîtier TO92 Boîtier TO39



Constitution

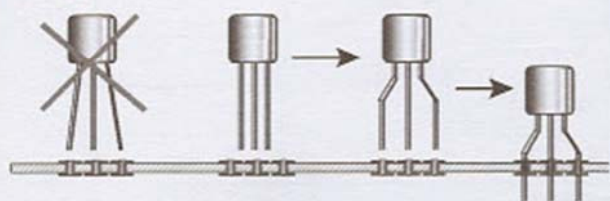
Ces composants à semi-conducteur se déclinent en plusieurs boîtiers, métalliques ou plastiques. Dans le cas des boîtiers métalliques, l'une des jonctions peut y être reliée, il faudra dans ce cas faire attention lors de l'utilisation à ne pas produire de court-circuit entre ces éléments. Les modèles en boîtiers métalliques sont plus onéreux que ceux en boîtiers plastiques, en contrepartie ils ont une résistance thermique plus basse, leur dissipation thermique sera meilleure. Des dissipateurs thermiques peuvent être adjoints aux composants à boîtiers métalliques.

Les boîtiers plastiques sont plus économiques.

Brochage des transistors

Un fabricant dispose de six façons de câbler un transistor dans un boîtier à trois broches. Aucun standard n'existe, on ne peut pas dire qu'un transistor en boîtier TO92 aura son émetteur sur telle ou telle broche. La seule solution pour s'assurer du branchement adéquat d'un transistor est donc de se reporter à la documentation du fabricant ou à un répertoire général des transistors.

Montage



Chacune des broches du composant ayant sa propre fonctionnalité, le sens de montage doit respecter l'implantation prévue.

Très souvent un transistor est implanté à des dimensions supérieures aux siennes, il faut donc reformer ses broches avant de le mettre en place.

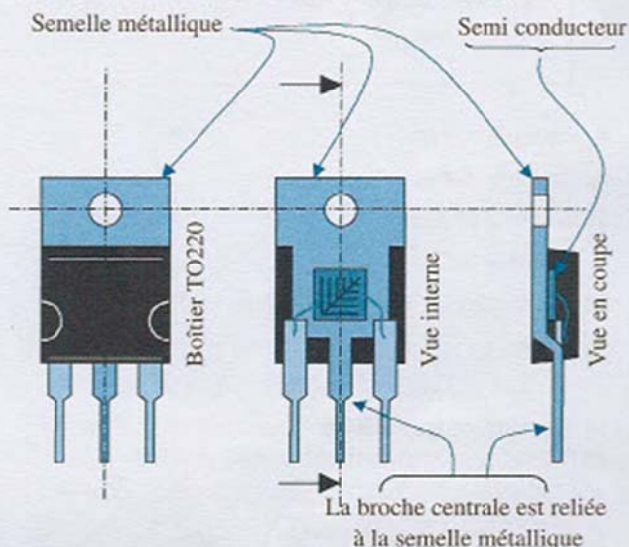
■ Transistors de puissance

Boîtier TO126 Boîtier TO220 Boîtier TO3



Constitution

Sauf exception, le plan de montage de ces transistors présente une surface métallique sur laquelle est soudé le semi-conducteur à l'intérieur du composant. La résistance thermique de la liaison métallique est faible et facilite ainsi le refroidissement du transistor.



Montage/Résistance thermique/Température

Résistance thermique et température maximale : ce sont les paramètres qui permettent de dimensionner le dissipateur thermique qui peut être nécessaire pour certains montages à forte puissance.

Montage : voir chapitre refroidisseur thermique pour le montage des transistors de puissance sur les dissipateurs thermiques.

NOTIONS IMPORTANTES

- Savoir reconnaître un PNP ou un NPN, donner le nom aux broches et aussi le signe de I_B , I_C , V_{CE} et V_{BE} .
- Les schémas équivalents du transistor en fonction du régime de fonctionnement.
- La relation $I_C = \beta \times I_B$ valable uniquement en linéaire.
- Savoir définir et déterminer la saturation et le blocage d'un transistor.
- La forme des caractéristiques de transfert.
- La définition des paramètres techniques $V_{CE_{sat}}$, β , $V_{CE_{max}}$, P_D , $I_{C_{max}}$, $I_{B_{max}}$, $V_{BE_{irrmax}}$.
- La définition et l'application du coefficient de sursaturation.
- La différence entre un transistor de signal et un transistor de puissance.