

Les Transistors : rappels essentiels



Quatre modes de fonctionnement (dont un inutile)

Modèles analytiques pour le mode actif direct (utile pour l'amplification)

Trois courbes intéressantes et les modèles mathématiques

Application numérique avec l'exemple le plus basique

Rappel notion de droite de charge et exploitation avec le transistor

1

Comme la diode, le transistor est un composant non linéaire. Nous suivrons une méthodologie similaire pour l'analyser:

- Observation
- Explication
- Exploitation

Les 4 modes de fonctionnement portent les noms suivants: 1) Actif direct ou linéaire, 2) actif inverse (pas utilisé), 3) bloqué et 4) saturé

Le mode intéressant dans le cadre de l'amplification est le mode actif direct.

Nous développerons un **modèle exploitable (modèle linéaire)** pour les calculs de l'amplification à partir de 3 courbes associées au transistor.

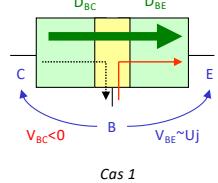
Pour les variations, le modèle du transistor s'apparente à un quadripôle avec une résistance d'entrée R_{IN} , une résistance de sortie R_{OUT} et l'un des quatre éléments de transformation (gain en tension, gain en courant, transimpédance et transadmittance).

Ces trois composants seront extraits directement depuis l'interprétation graphique de trois courbes.

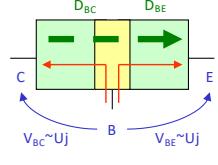
1

Observation de quatre modes de fonctionnement

Il faut admettre!

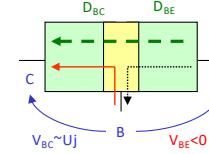


Cas 1

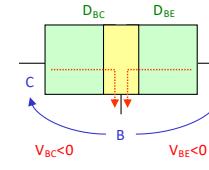


Cas 3

Cas	D _{BE}	D _{BC}
1	Conduit V _{BE} ~ Uj	Bloquée V _{BC} <0
2	Bloquée V _{BE} <0	Conduit V _{BC} ~ Uj
3	Conduit V _{BE} ~ Uj	Conduit V _{BC} ~ Uj
4	Bloquée V _{BE} <0	Bloquée V _{BC} <0



Cas 2



Cas 4

2

L'image d'un bipolaire équivalent à deux diodes tête-bêches doit être nuancée, car si l'on met bien quatre cas en évidence, le comportement complet ne sera pas identique à celui de deux diodes, mais spécifique à un transistor. Nous verrons par la suite qu'un transistor peut jouer le rôle de deux diodes, mais avec deux diodes, il est impossible de réaliser un transistor.

1er cas: Imaginons que V_{BC} < Uj (la diode D_{BC} est bloquée) et V_{BE} ~ Uj (la diode D_{BE} est passante). On observe naturellement un courant entre la base et l'émetteur de faible valeur. **Sous l'effet transistor**, on observe un courant beaucoup plus élevé entre C et E, contraire à ce que nous avons imaginé avec deux diodes tête-bêche.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BC} est V_{BC} < 0, car si V_{BC} > 0 ce phénomène est différent

2ème cas: Imaginons que V_{BC} ~ Uj (la diode D_{BC} est passante) et V_{BE} < Uj (la diode D_{BE} est bloquée). Apparemment, c'est le contraire du cas 1 qui devrait se produire. En fait le courant entre E et C est beaucoup plus faible. Les performances sont dégradées.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BE} est V_{BE} < 0, car si V_{BE} > 0 ce phénomène est différent

3ème cas: Imaginons que V_{BC} ~ Uj (la diode D_{BC} est passante) et V_{BE} > 0 (la diode D_{BE} est aussi passante). Les deux diodes doivent conduire. Mais que ce passe-t-il réellement entre C et E. Chaque diode qui conduit implique un courant entre C et E, respectivement entre E et C. En fait le phénomène mis en évidence dans le cas 1 est beaucoup plus significatif que dans le cas 2. Le courant CE obtenu est cependant moins important que dans le cas 1.

4ème cas: Imaginons que V_{BC} < Uj (la diode D_{BC} est bloquée) et V_{BE} < Uj (la diode D_{BE} est aussi bloquée). Les deux diodes sont bloquées et on ne voit pas de courant entre C et E. Comme pour la diode simple, on observe de très faibles courants (courant de « porteurs minoritaires ») de l'ordre de 10⁻¹⁰ A à 10⁻²⁰ selon les transistors et leurs polarisations.

Remarque: Dans la réalité, la condition pour D_{BE} est V_{BE} < 0, et la condition pour D_{BC} est V_{BC} < 0

Classification des modes de fonctionnement

MODE	JONCTION EB	JONCTION BC	UTILISATION
	DIRECT	INVERSE	
ACTIF DIRECT			
MODE	DIRECT	INVERSE	CIRCUITS
NORMAL			LINEAIRES
ACTIF			PERFORMANCES
INVERSE	INVERSE	DIRECT	DEGRADEES
SATURE	DIRECT	DIRECT	LOGIQUE
BLOQUE	INVERSE	INVERSE	LOGIQUE

3

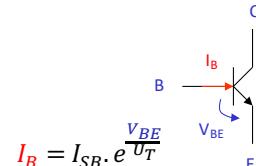
Le tableau suivant, résume les 4 cas que nous avons observés précédemment.

- Le premier cas est exploité en analogique pour les circuits linéaires (amplification par exemple). C'est dans ce mode que nous allons travailler dans la suite de ce chapitre.
- Le second cas n'est quasiment jamais exploité ni en analogique ni en logique.
- Les deux derniers sont utilisés en logique pour réaliser le "0" et le "1"

Modèle élémentaire du bipolaire pour le mode actif direct

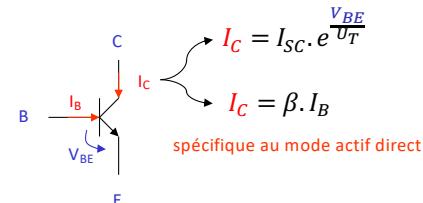
Source de courant commandée

Comportement de la diode D_{BE}



pas spécifique au mode actif direct

Observation du courant I_C



Conséquences: Bipolaire assimilé à une source de courant (courant de collecteur)

- commandée par un faible courant (courant de base).
- commandée par une tension (tension base - émetteur)

4

Nous partons toujours du principe que le transistor est dans le **mode actif direct** ou normal.

Si nous considérons la diode D_{BE} , le comportement de son courant I_B est conforme aux prévisions décrites par une loi exponentielle en fonction de V_{BE} .

Si nous analysons le courant I_C , nous observerons qu'il aussi exponentiel en fonction de V_{BE} . Mais les valeurs de I_C sont beaucoup plus élevées que I_B . Entre I_B et I_C (pour un même V_{BE}) il y a un facteur qui, en première approximation, semble constant.

Ces deux observations complémentaires indiquent que le courant I_C du transistor bipolaire est contrôlé par la diode D_{BE} .

Nous savons qu'il existe une relation entre le courant d'une diode et la tension à ses bornes (via une loi exponentielle). Cela signifie qu'en ayant une grandeur nous avons l'autre et réciproquement.

En d'autres termes, sachant que la diode D_{BE} contrôle le courant I_C , nous pouvons dire que le courant I_C est soit contrôlé en tension (V_{BE} de la diode D_{BE}) soit en courant (I_B de la diode D_{BE}).

Nous verrons que le courant I_C obtenu permet d'assimiler le transistor à une source de courant commandée (commandée par une tension ou un courant).

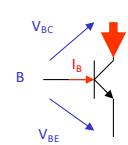
Remarques sur la source de courant I_C

Source de courant => mode normal d'utilisation

- $V_{BC} < 0$ et $V_{BE} > 0$
- Courant de base de valeur << courant de collecteur

Relation entre I_C et I_B : le gain en courant β du transistor.

$$I_C = \beta \cdot I_B \text{ ou } I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad \text{avec } \beta = \text{quelques dizaines à quelques centaines}$$



Gain du Bipolaire: Bip. idéal: gain en courant infini, ou courant de base nul.

Les gains en courant des PNP << à ceux des NPN.

Sens des courants: Celui de la flèche identifiant l'émetteur. Indique si I_B est entrant ou sortant

$$\text{Relation entre les 3 courants } I_E = I_C + I_B \text{ or } I_B \text{ négligeable } \Rightarrow I_E \approx I_C$$

$$\text{Relation entre } I_C \text{ et } V_{BE} \quad I_C = I_{SC} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

I_S courant inverse de saturation. fA à pA.
Quand NPN conduit, V_{BE} est positive; $U_j=0.7V$.

5

Ce type de contrôle est utilisable lorsque le transistor est dans le mode normal de fonctionnement ($V_{BE} > 0$, $V_{BC} < 0$).

Un faible courant injecté dans la base du transistor se traduit par un courant I_C (entre collecteur et émetteur) beaucoup plus élevé. Lorsque le courant I_B est connu, il est possible de prévoir le courant I_C que l'on va obtenir, car il existe un facteur de proportionnalité appelé β .

Selon la construction du bipolaire, le β peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines.

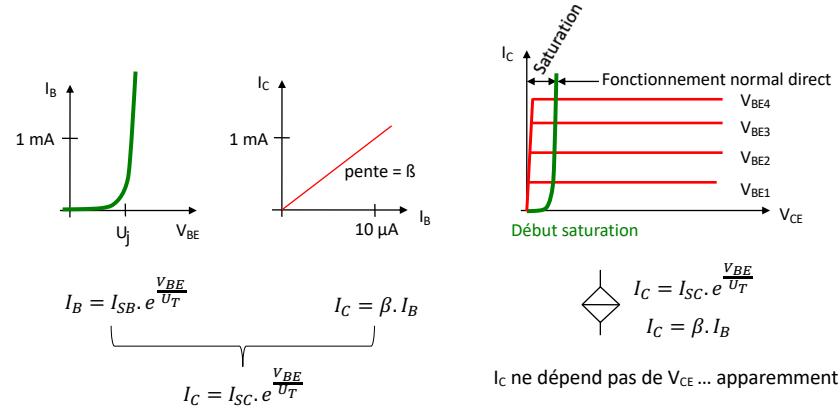
Ce facteur β n'est malheureusement pas stable. Le constructeur nous donne sa valeur typique. En fonction de la température, cette valeur peut évoluer de manière très significative.

Quelques remarques complémentaires:

- le β d'un PNP est inférieur à celui d'un NPN. Nous reparlerons de la mobilité des porteurs pour justifier cette situation.
Dans les exercices, on prendra souvent β infini, non pas pour générer un courant I_C infini, mais pour pouvoir négliger I_B dans les calculs.
- Le sens du courant I_C est identifié à partir de la flèche entrante (NPN) ou sortante (PNP) de l'émetteur.
- Il est possible d'appliquer les lois de Kirchhoff, en particulier la loi des nœuds. Le transistor bipolaire ayant 3 nœuds (B, C et E), alors si l'on connaît les courants circulant dans deux nœuds, celui du troisième est donc facile à déduire et alors $I_E = I_C + I_B$.
Comme I_B est négligeable devant I_C , il est possible de considérer $I_E = I_C$.
- Nous avons vu qu'il est possible de contrôler le courant I_C à partir de la tension V_{BE} . Intuitivement, nous dirions que si $I_C = \beta I_B$ et $I_B = I_{SB} \exp(V_{BE}/U_T)$ (comportement d'une diode), alors $I_C = \beta \cdot I_{SB} \exp(V_{BE}/U_T)$ ou $I_C = I_{SC} \exp(V_{BE}/U_T)$

Le courant I_S est très faible et le courant I_C devient significatif lorsque $V_{BE} \sim U_j = 0.7V$

Les courbes à exploiter



6

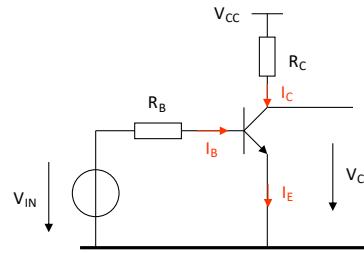
Au cours des chapitres précédents, nous avons pu analyser le comportement du bipolaire à partir:

- d'un certain nombre de lois exploitables lorsque le bipolaire est dans le mode normal de fonctionnement
- de l'observation d'un certain nombre de courbes caractéristiques:

$$I_C = f(V_{BE}), I_C = f(I_B), I_C = f(V_{CE})$$

Les observations montrent que le paramètre I_C dépend de plusieurs paramètres. Il y a donc une interaction entre plusieurs paramètres que nous décrirons ultérieurement de manière graphique.

Exercice Basique



On donne :

- $V_{CC} = 15V$, $R_B = 200 k\Omega$, $R_C = 2 k\Omega$, $\beta = 200$
- V_{IN} variable de 0 à 15V

Calculer toutes les grandeurs (V et I) du circuit pour

- $V_{IN} = 0V$
- $V_{IN} = 2V$
- $V_{IN} = 15V$

Dessiner de manière intuitive $V_{OUT} = V_C = f(V_{IN})$

Interpréter les résultats

7

Les cas analysés sont innombrables et permettent d'exploiter la recette de cuisine proposée précédemment.

L'état des transistors dépend de l'ensemble des paramètres suivants:

- Valeurs des résistances
- Valeurs des tensions V_{IN} et V_{CC}
- Valeur du β du transistor

Les valeurs numériques proposées correspondent à trois situations différentes impliquant des modes de fonctionnement spécifiques du transistor.

- Cas 1 : $V_{IN} = 0$
Le transistor est bloqué car $V_{IN} < U_J$. Dans ce cas il n'y a pas de courants. $I_B = 0$ et $I_C = 0$. $V_C = V_{CC}$.

- Cas 2 : $V_{IN} = 2V$
Le transistor est "probablement" en mode actif direct. Cette hypothèse doit toujours être vérifiée.

$$I_B = \frac{V_{IN}-U_J}{R_B} = 6.5\mu A \text{ et } I_C = \beta \cdot I_B = 1.3 mA \text{ enfin } V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12.4 V. V_C > V_{BE} \text{ on est donc bien en mode actif direct.}$$

- Cas 3 : $V_{IN} = 15V$
Le transistor est "probablement" en mode saturé. Cette hypothèse doit être vérifiée après les calculs.

Si le transistor est saturé, la tension V_{CE} vaut environ 0 (le transistor est équivalent à un court-circuit).

$$\text{On en déduit } I_C = \frac{V_{CC}-0}{R_C} = 7.5mA \text{ en revanche, le comportement de la diode D}_{BE} \text{ ne change pas. } I_B = \frac{V_{IN}-U_J}{R_B} = 71.5\mu A$$

Si le transistor était en mode actif direct, on aurait eu $I_C = \beta \cdot I_B = 14.3 mA$ et cela aurait donné $V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = -13.6 V$ ce qui est évidemment impossible.

7