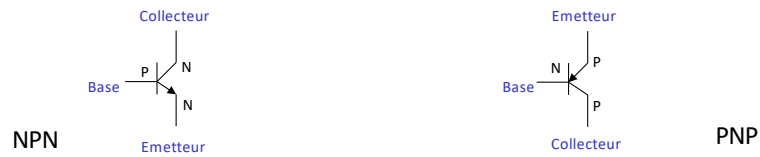


## Les Transistors : rappels essentiels



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.

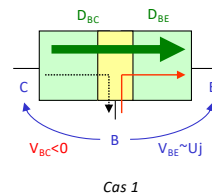
Nous développerons un **modèle exploitable (modèle linéaire)** pour les calculs de l'amplification à partir de 3 courbes associées au transistor.

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).

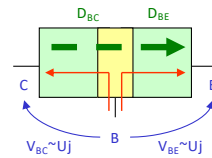
Ces trois composants seront extraits directement depuis l'interprétation graphique de trois courbes.

## Observation de quatre modes de fonctionnement

Il faut admettre!

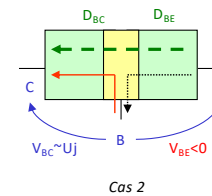


Cas 1

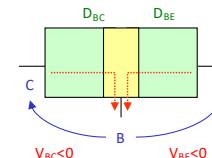


Cas 3

| Cas | $D_{BE}$                     | $D_{BC}$                     |
|-----|------------------------------|------------------------------|
| 1   | Conduit<br>$V_{BE} \sim U_j$ | Bloquée<br>$V_{BC} < 0$      |
| 2   | Bloquée<br>$V_{BE} < 0$      | Conduit<br>$V_{BC} \sim U_j$ |
| 3   | Conduit<br>$V_{BE} \sim U_j$ | Conduit<br>$V_{BC} \sim U_j$ |
| 4   | Bloquée<br>$V_{BE} < 0$      | Bloquée<br>$V_{BC} < 0$      |



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  $V_{BC} < U_j$  (la diode  $D_{BC}$  est bloquée) et  $V_{BE} \sim U_j$  (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 déjà différent**

2ème cas: Imaginons que  $V_{BC} \sim U_j$  (la diode  $D_{BC}$  est passante) et  $V_{BE} < U_j$  (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  $V_{BC} \sim U_j$  (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  $V_{BC} < U_j$  (la diode  $D_{BC}$  est bloquée) et  $V_{BE} < U_j$  (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

Rappel cours diode :

- Mode **inverse** = bloqué  
(tension de diode généralement négative)
- Mode **direct** = passant  
(tension de diode vaut  $U_j$ )

| MODE         | JONCTION<br>EB | JONCTION<br>BC | UTILISATION  |
|--------------|----------------|----------------|--------------|
| ACTIF DIRECT |                |                | CIRCUITS     |
| MODE         | DIRECT         | INVERSE        | LINEAIRES    |
| NORMAL       |                |                |              |
| ACTIF        |                |                | PERFORMANCES |
| INVERSE      | INVERSE        | DIRECT         | DEGRADEES    |
| SATURE       | DIRECT         | DIRECT         | LOGIQUE      |
| BLOQUE       | INVERSE        | INVERSE        | LOGIQUE      |

3

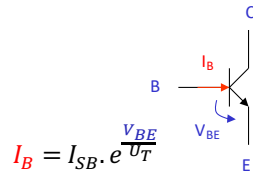
Le tableau suivant, résume les 4 cas que nous avons observés précédemment.

- 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**

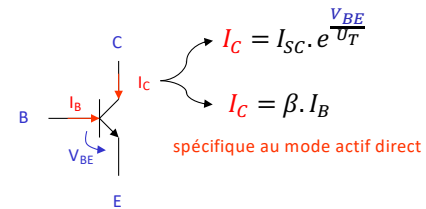
Source de courant commandée

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.

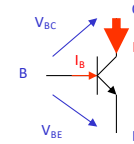
En d'autres termes, sachant que la diode  $D_{BE}$  contrôle le courant  $I_C$ , nous pouvons dire que le courant  $I_C$  est soit contrôlé en tension ( $V_{BE}$  de la diode  $D_{BE}$ ) soit en courant ( $I_B$  de la diode  $D_{BE}$ ).

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  $\ll$  courant de collecteur



Relation entre  $I_C$  et  $I_B$  : le gain en courant  $\beta$  du transistor.

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

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

Les gains en courant des PNP  $\ll$  à ceux des NPN.

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

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

Relation entre  $I_C$  et  $V_{BE}$

$$I_C = I_{SC} \cdot e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

$I_C$  courant inverse de saturation. fA à pA.

Quand NPN conduit,  $V_{BE}$  est positive;  $U_T = 0.7V$ .

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  $\beta$ .

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

Ce facteur  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$  infini, non pas pour générer un courant  $I_C$  infini, mais pour pouvoir négliger  $I_B$  dans les calculs.

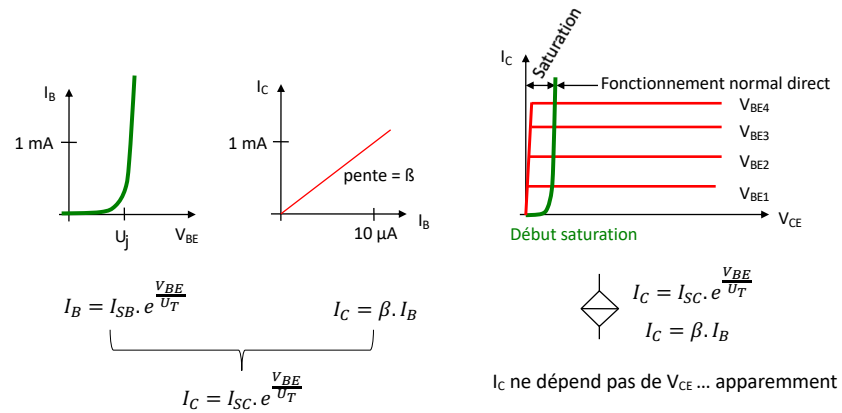
- Le sens du courant  $I_C$  est identifié à partir de la flèche entrante (NPN) ou sortante (PNP) de l'émetteur.
- Il est possible d'appliquer les lois de Kircchoff, en particulier la loi des nœuds. Le transistor bipolaire ayant 3 nœuds (B, C et E), alors si l'on connaît les courants circulant dans deux 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  $I_E \approx I_C$ .

- 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  $V_{BE} \sim U_T = 0.7V$

## Les courbes à exploiter



6

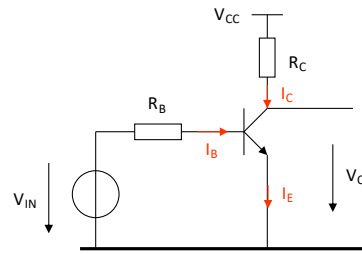
Au cours des chapitres précédents, nous avons pu analyser le comportement du bipolaire à partir:

- 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 décrivons ultérieurement de manière graphique.

## Exercice Basique



On donne :

- $V_{CC} = 15V$ ,  $R_B = 200\text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 2\text{ k}\Omega$ ,  $\beta = 200$
- $V_{IN}$  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

**A faire en exercices avec simulation (mode DC sweep)**

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  $\beta$  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.  
 $I_B = \frac{V_{IN} - U_j}{R_B} = 6,5\mu A$  et  $I_C = \beta \cdot I_B = 1,3\text{ mA}$  enfin  $V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = 12,4\text{ V}$ .  $V_C > V_B$  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).  
On en déduit  $I_C = \frac{V_{CC} - 0}{R_C} = 7,5\text{ mA}$  en revanche, le comportement de la diode D<sub>ae</sub> 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  $I_C = \beta \cdot I_B = 14,3\text{ mA}$  et cela aurait donné  $V_C = V_{CC} - R_C \cdot I_C = -13,6\text{ V}$  ce qui est évidemment impossible.