

COURS 1 : Le transistor bipolaire

Ce cours n'est qu'un résumé du fonctionnement du transistor bipolaire, vous y trouverez tout ce que vous devez savoir pour utiliser les transistors bipolaires dans les circuits amplificateurs et amplificateurs intégrés

1. Le Transistor

Les transistors sont des semi-conducteurs avec trois contacts. Ils servent à l'amplification ou à la commutation de signaux. On distingue le transistor bipolaire et le transistor à effet de champs.

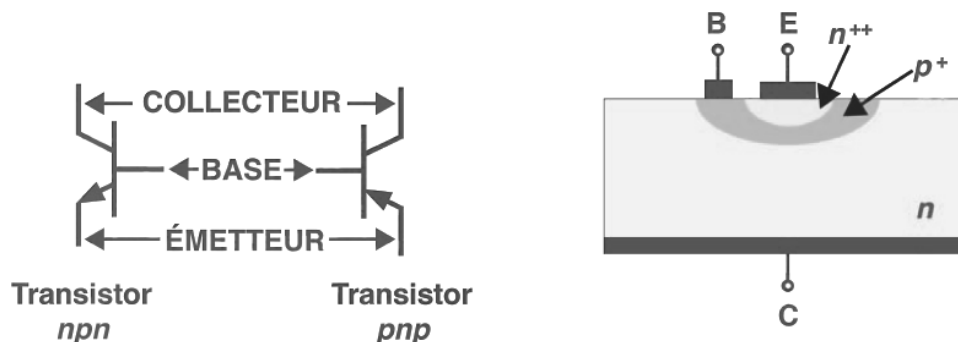
2. Symboles et description

2.1. Transistors *npn* et *pnp*

Un transistor bipolaire est constitué de trois zones contiguës : l'émetteur, la base et le collecteur.

Transistor *npn* : base dopée *p*, émetteur et collecteur dopés *n*.

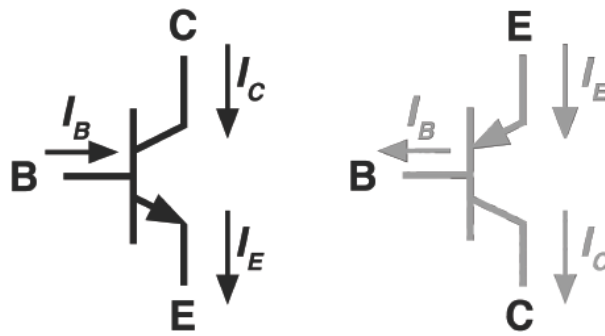
Transistor *pnp* : base dopée *n*, émetteur et collecteur dopés *p*.



2.2 Sens conventionnel du courant :

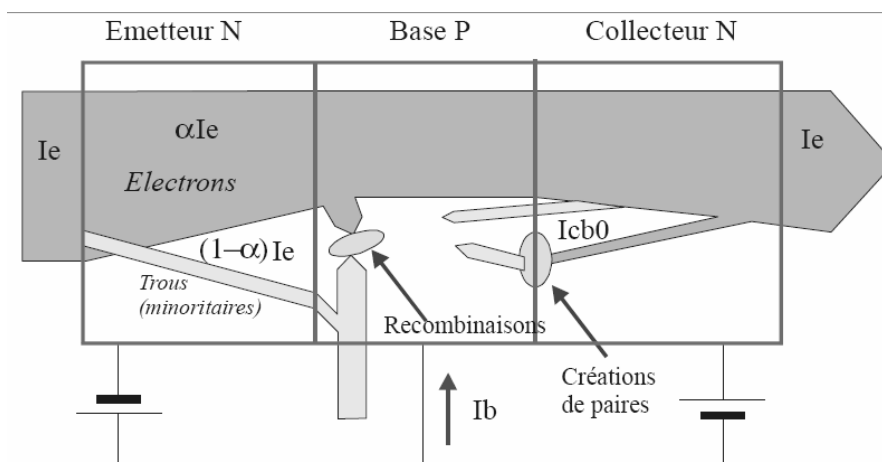
transistors *npn* : courants de collecteur et d'émetteur positifs du collecteur vers l'émetteur ;
courant de base positif en direction de la base.

transistors *pnp* : courants de collecteur et d'émetteur positifs de l'émetteur vers le collecteur ;
courant de base positif en direction du circuit extérieur.



2.3 Effet transistor

Dans son fonctionnement normal, la jonction base émetteur est polarisée en direct et la jonction collecteur base est polarisée en inverse. Prenons l'exemple d'un transistor NPN.



La jonction collecteur base est polarisée en inverse, elle est donc bloquée à la fuite près due à I_{cb0} (courant inverse de la jonction équivalent au courant de Collecteur dans un montage Base commune, l'émetteur étant en l'air « Open »).

Si la jonction émetteur base est polarisée en direct, les électrons majoritaires dans la zone N passent de cette zone dans la zone médiane P où ils sont de même espèce que les minoritaires. Ces électrons de type minoritaires, mais très nombreux, vont pouvoir franchir la deuxième jonction en polarisation inverse (pôle - à P et pôle + à N). Ils auront ainsi traversé entièrement le transistor. Le courant qui traverse la jonction base collecteur est pratiquement indépendant de la tension base collecteur, mais il dépend de la tension base émetteur dont la valeur minimale doit être supérieure à la tension qui s'oppose au franchissement de la zone de jonction par les porteurs majoritaires (apparition d'un courant significatif sur la caractéristique en direct d'une diode).

Quand les électrons de l'émetteur d'un NPN arrivent dans la base, ils y rencontrent des trous,

majoritaires dans cette base et ils comblent au passage certains trous, ce qui fait disparaître ces trous et les électrons qui les ont comblés, car ces derniers ont cessé d'être libres. Il manque un certain nombre d'électrons dans le courant qui traverse le collecteur. Aussi, le courant de collecteur est-il très légèrement inférieur au courant d'émetteur. Ce courant qui manque dans le collecteur constitue le courant de base. En effet, pour remplacer les trous disparus dans la base, le pôle positif du générateur qui alimente la jonction base émetteur va extraire un nombre égal d'électrons de la base pour y créer un nombre égal de trous. Tout ce passe donc comme si le courant d'électrons de l'émetteur se partageait entre le collecteur et la base, répondant ainsi à l'équation :

$$I_E = I_B + I_C$$

Le pourcentage de porteurs perdus dans la base demeure pratiquement constant pour un transistor donné, mais varie d'un transistor à un autre (dispersion sur le composant). Le rapport I_C / I_E , désigné par α_0 , peut être considéré comme la probabilité qu'un électron, en provenance de l'émetteur, a de disparaître dans la base. Si $\alpha_0 = 0.99$, tout électron partant de l'émetteur a une chance sur 100 ($\beta_0 + 1$) de disparaître dans la base, les 99 (β_0) autres électrons arriveront dans le collecteur, d'où la relation

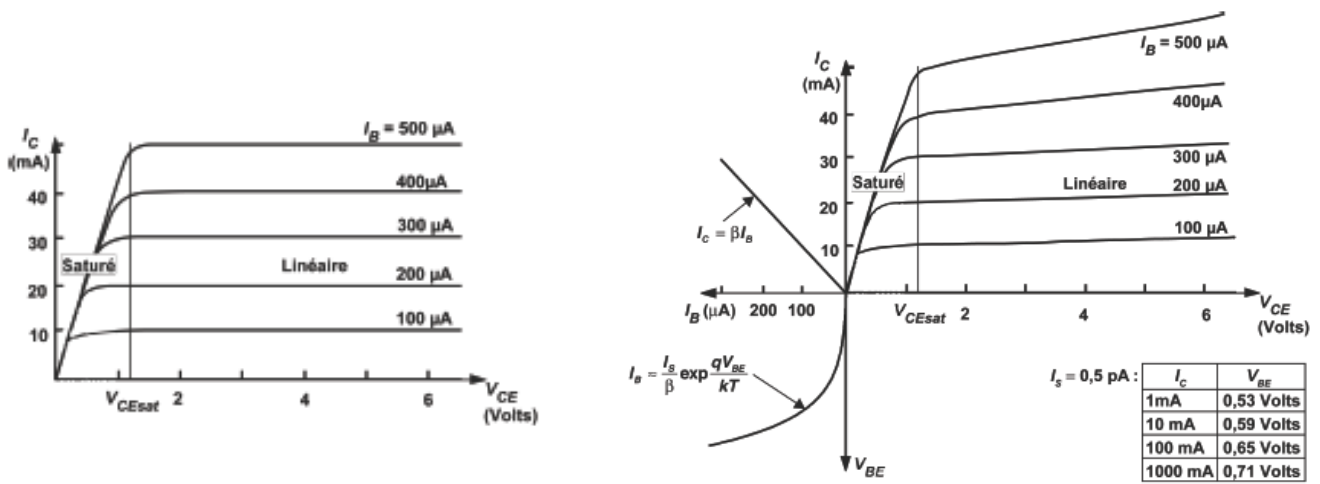
$$\alpha_0 = \frac{\beta_0}{\beta_0 + 1} \quad \text{et} \quad \beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

Pour obtenir ce phénomène, il est nécessaire d'avoir une épaisseur de base **très mince**, car la durée de vie des électrons est très courte. La quasi-totalité de ces porteurs sera alors absorbée par le collecteur. **C'est l'effet transistor** qui s'écrit :

$$I_C = \alpha_0 I_E + I_{CBO} \quad \text{ou} \quad I_C = \beta_0 I_B + I_{CEO} \quad \text{avec} \quad I_{CEO} = (\beta_0 + 1) I_{CBO}$$

2.4 Réseaux de caractéristiques

On utilise le plus souvent les caractéristiques $I_C(V_{CE})$ représentées sur la Figure de gauche, mais il peut être utile de considérer les caractéristiques complètes « 4-quadrants » représentées sur la Figure de droite.



Plan d'entrée $I_B (V_{BE})$: Le réseau d'entrée correspond aux variations de I_B dues aux variations de V_{BE} , la tension V_{CE} demeurant constante. La tension V_{CE} agit peu sur le courant de base. En examinant la caractéristique d'entrée, on fait deux constatations importantes. D'une part, le courant de base ne prend naissance que pour une tension V_{BE} supérieure à environ 0.4 V pour un transistor au silicium. D'autre part, le courant de base n'est pas proportionnel à la tension V_{BE} . La courbure de la caractéristique d'entrée d'un transistor bipolaire est le principal défaut de ce type de transistor et la principale cause de distorsion qu'il apporte aux signaux qu'il amplifie.

Plan de transfert direct $I_C (I_B)$: Le réseau de transfert de courant qui donne les variations de I_C en fonction des variations de I_B , V_{CE} restant constante, peut se réduire à une caractéristique, car les courants dépendent de V_{BE} mais peu de V_{CE} . Le rapport entre les variations des courants I_C et I_B (β dynamique) étant peu différent du rapport entre les courants $\beta_0 = I_{C0}/I_{B0}$ (statique).

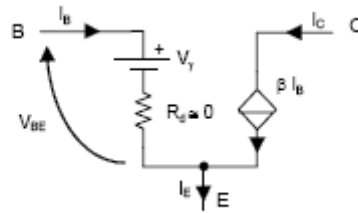
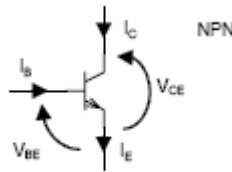
Plan de sortie $I_C (V_{CE})$: Le réseau de sortie donne les variations de I_C en fonction de celles de V_{CE} , le courant d'entrée I_B restant constant. Toutes les caractéristiques semblent issues d'une courbe, sensiblement droite et verticale. C'est la courbe de saturation qui donne la tension V_{CEsat} , valeur minimale de V_{CE} correspondant à un I_C donné. La pente de cette courbe donne l'inverse de la résistance de saturation qui est la valeur minimale de la résistance opposée par le transistor au passage du courant.

3. Modèles du transistor

3.1 Régime continu

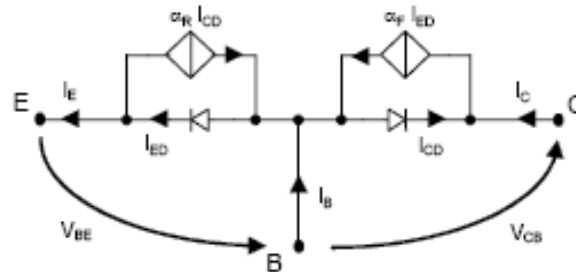
Le transistor étant dans son mode actif direct (voir le tableau plus loin), la diode base-émetteur est représentée par le modèle linéarisé au sein duquel la résistance statique est négligée et l'effet transistor par une source de courant contrôlée par le courant traversant la diode.

$$\begin{cases} I_E = I_B + I_C \\ I_C = \beta I_B \\ |V_{BE}| \cong 0.6 \text{ à } 0.7 \text{ V} \end{cases}$$



3.2 Régime pseudo continu (forts signaux)

Le schéma d'Ebers-Moll est le modèle mathématique non linéaire utilisé dans l'étude du régime pseudo continu. Dans ce schéma, les diodes représentent les jonctions d'un transistor de type NPN et les deux sources dépendantes le couplage entre les jonctions.



Equations des diodes \rightarrow
$$\begin{cases} I_{ED} = I_{ES} \left(e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \\ I_{CD} = I_{CS} \left(e^{\frac{V_{CB}}{U_T}} - 1 \right) \end{cases}$$

Equations d'Ebers-Moll \rightarrow
$$\begin{cases} I_E = I_{ES} \left(e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) - \alpha_R I_{CS} \left(e^{\frac{V_{CB}}{U_T}} - 1 \right) \\ I_B = I_E - I_C \\ I_C = -I_{CS} \left(e^{\frac{V_{CB}}{U_T}} - 1 \right) + \alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \end{cases}$$

Chaque jonction peut être polarisée en direct et en inverse, d'où quatre modes de fonctionnement :

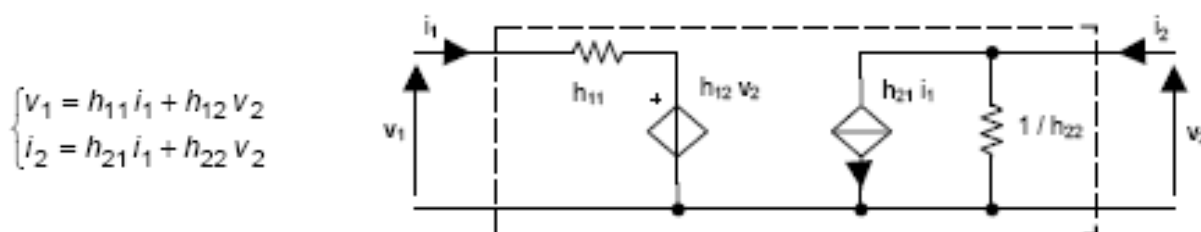
mode	Polarisation E/B	Polarisation C/B
Actif direct	Directe	Inverse
Blocage	Inverse	Inverse
Saturation	Directe	Directe
Actif inverse	Inverse	Directe

Le transistor sera utilisé le plus souvent dans le mode actif direct ($V_{BE} > 0$ et $V_{CB} > 0$). Le courant de fuite de la jonction en inverse étant négligeable devant le courant direct de la jonction base-émetteur et $V_{BE} \gg U_T$, les équations s'écrivent :

$$\begin{cases} I_E \cong I_{ES} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} + \alpha_R I_{CS} \cong I_{ES} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \\ I_C \cong I_{CS} + \alpha_F I_{ES} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \cong \alpha_F I_{ES} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \Rightarrow \frac{I_C}{I_B} \cong \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} = \beta_F \cong \beta \\ I_B \cong (1 - \alpha_F) I_{ES} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} \end{cases}$$

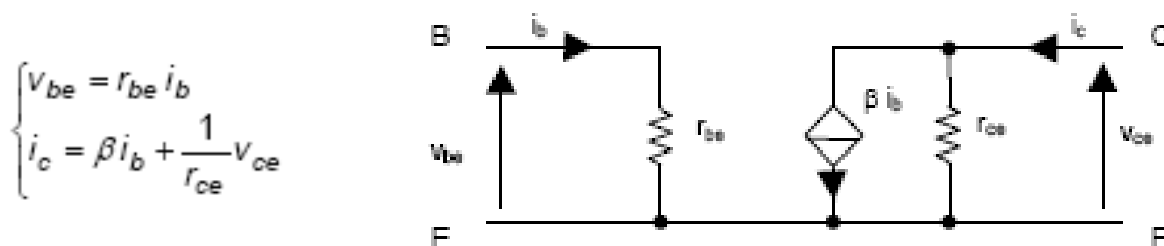
3.3 Régime dynamique aux faibles signaux

Le schéma équivalent en dynamique du transistor se base sur des paramètres quadripôles. La figure montre l'exemple du schéma équivalent d'un transistor en montage émetteur commun exprimé avec les paramètres h.



Les paramètres h_{ij} sont chacun issu d'un quadrant des caractéristiques statiques du transistor et leur valeur correspond à la tangente au point de polarisation (approche linéaire).

Pour un transistor émetteur commun on trouve le schéma équivalent dynamique en petit signal :



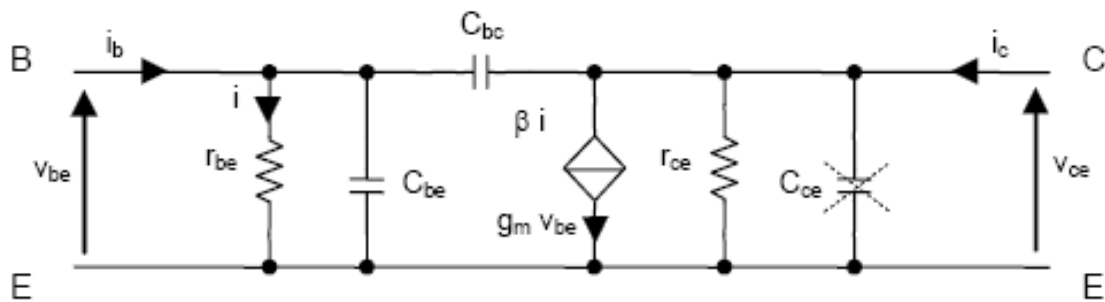
Avec :

$$r_{BE} = \left. \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} \right|_{U_{CE}=\text{const}} = U_T / I_{B0}$$

$$r_{CE} = \left. \frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right|_{U_{BE}=\text{const}} \quad r_{CE} = \left. \frac{\partial U_{CE}}{\partial I_C} \right|_{I_B=\text{const}} \rightarrow 1/r_{ce} = I_{C0}/V_A \quad V_A : \text{tension d'early}$$

$$\beta = \left. \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \right|_{U_{CE}=\text{const}} = \beta = I_C / I_B$$

Pour des fréquences élevées, cette simplification n'est plus valable et le schéma est à améliorer avec des éléments parasites (capacités).



Références :

1. Electronique des dispositifs cours par **Sylvain geronimi** université Paul Sabatier
2. Electronique Analogique Markus Liniger 2000/01.
3. Electronique des circuits intégrés, circuits en technologie bipolaire, document de synthèse,