



# CHAPITRE 4

## TRANSISTORS BIPOLAIRE



# Chapitre 4 Transistor bipolaire A Jonction

## IV.1 Introduction

Il existe deux familles de transistors

- ✓ Transistor bipolaire à jonction TBJ ;
- ✓ Transistor unipolaire (transistor à effet de champ MOSFET).

Les transistors bipolaires sont des éléments électroniques actifs. Ils sont constitués de trois couches semi-conductrices. Ils ont trois accès : Base(B), Collecteur(C) et Emetteur(E). L'invention du transistor au laboratoire BELL en 1947 a été créé par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley.

Le transistor bipolaire a deux fonctions :

**Amplification** : un faible courant en entrée permet de générer un fort courant en sortie.

**Commutation** : le transistor se transforme en un interrupteur commandé avec deux états (ouvert, fermé).

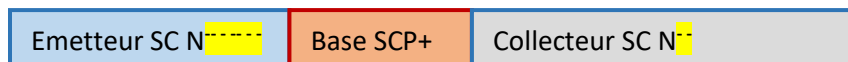
Applications :

- Interrupteur commandé essentiel dans l'électronique numérique ;
- Amplificateur (de courant, de tension ou de puissance) ;
- Stabilisateur de tension qui protège les appareils électriques sensible aux fluctuations de tension ;
- Onduleur qui transforme un signal continue en un signal alternatif ;
- Alimentation à découpage
- Modulation de signal
- Electronique numérique comme les portes logique, stockage des données en mémoire...

### Construction d'un transistor bipolaire à jonction

Ce type de transistor est constitué de trois couches de semi-conducteur soit dopé **NPN** ou **PNP**. Selon type de dopage (NPN ou PNP il faut respecter quelques conditions. Pour un transistor bipolaire NPN :

a) Disposition



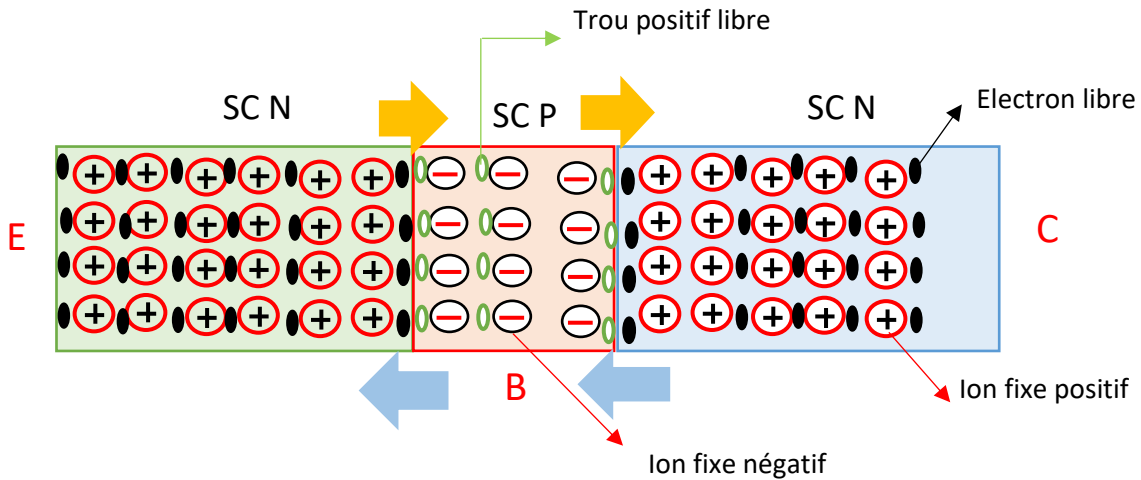
b) Le dopage avec des ions négatifs de l'émetteur est **fortement plus élevé** que le dopage du collecteur.

c) La base est plus mince que l'émetteur et le collecteur.

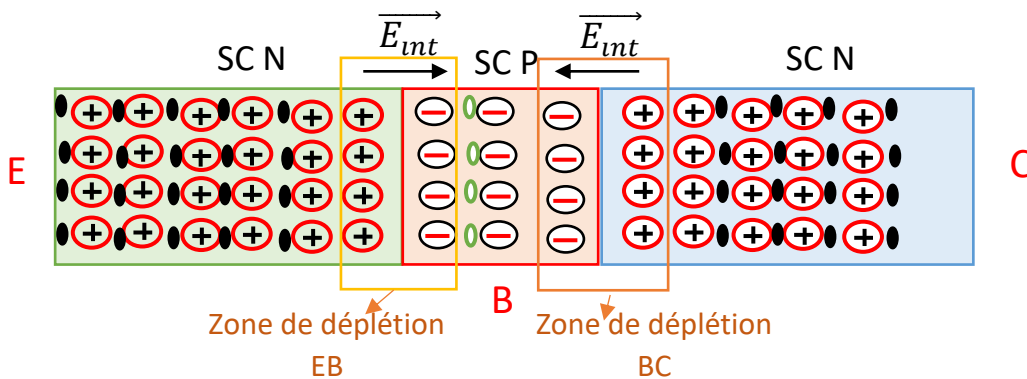
d) La dimension du collecteur est plus grande que la dimension de l'émetteur.

## Fonctionnement d'un transistor NPN

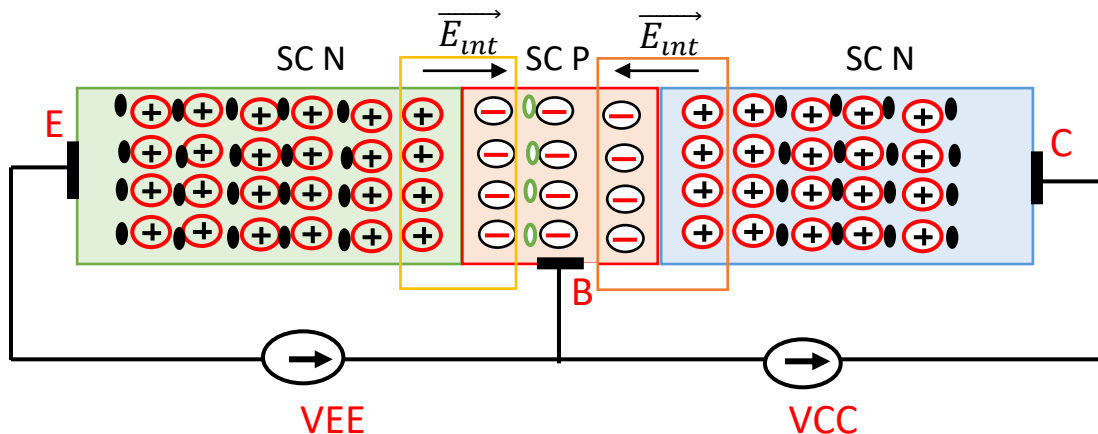
Lorsqu'on met les 3 semi-conducteur en contact un phénomène de diffusion de charges apparaît.



Un phénomène de recombinaison de charges (électron-trou) est déclenché, ce qui produira deux zones d'ions fixes appelée zones de déplétions.



Dès que l'équilibre thermodynamique est atteint il n'y a plus de circulation de charges. Pour faire fonctionner le transistor il faut polariser la jonction BE en directe et la jonction BC en inverse

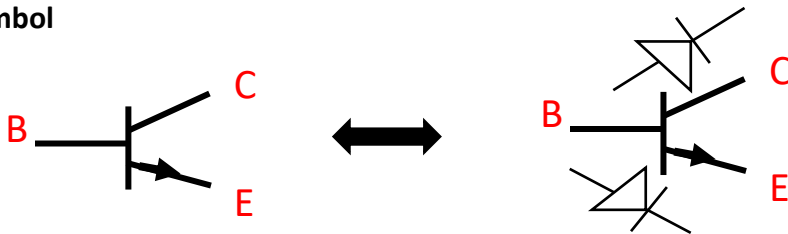


En polarisant la jonction BE dans le sens direct des électrons vont circuler de l'émetteur vers la base. La base étant mince un petit nombre d'électrons va sortir de la base vers la source pour fermer la maille mais le plus grand nombre va être attiré par le collecteur car la jonction BC est polarisée en inverse.

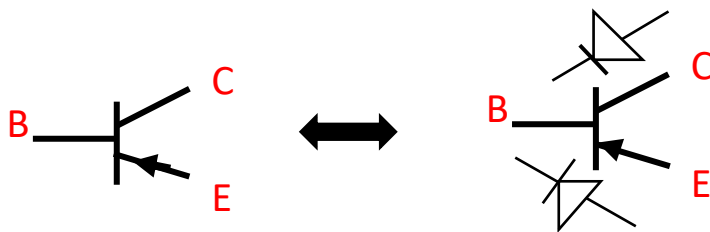
### Résumé

Les électrons parvenus sur l'émetteur se recombinant avec les trous présents tandis qu'autant d'électrons sont fournis à la base par la source reliée entre cette base et l'émetteur. Au même temps, la même source attire un nombre égal d'électrons de l'émetteur dans lequel il se forme de nouveaux trous remplaçant ceux qui ont disparu à cause de la recombinaison. Mais la jonction collecteur-base étant polarisée en inverse, elle empêche les porteurs majoritaires d'avancer et favorise le passage des porteurs minoritaires, ainsi les trous parvenus sur la base se trouvent forcés de traverser la jonction collecteur-base et rejoignent ainsi le collecteur. En réalité, tous les trous provenant de l'émetteur n'atteignent pas le collecteur car une petite partie d'entre eux se recombinent avec les électrons présents dans la base. Cela participe à former le courant de base désigné par  $I_B$ . Plusieurs conditions sont prises pour rendre le courant de collecteur égal le plus possible au courant d'émetteur : il faut réduire le phénomène de recombinaison au niveau de la base en rétrécissant la base et en le dopant faiblement. Ainsi, le nombre d'électrons libres présents dans la base se trouve réduit.

### Symbol



Transistor bipolaire NPN la flèche est sortante de l'émetteur

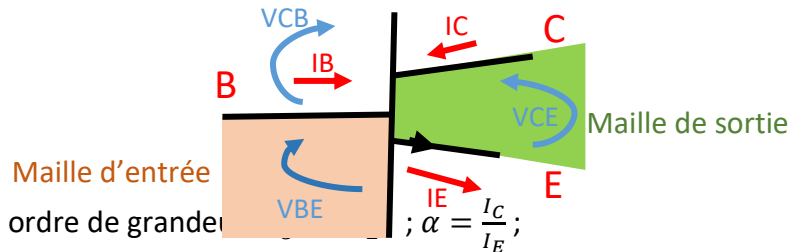


Transistor bipolaire PNP la flèche est entrante dans l'émetteur

## Grandeurs du transistor

Le transistor bipolaire comporte trois accès. Il est caractérisé par six grandeurs électriques :

- Trois courants  $I_B$ ,  $I_C$  et  $I_E$  ;
- Trois tensions  $V_{BC}$ ,  $V_{CE}$  et  $V_{BE}$



- ❖ Les courants  $I_C$  et  $I_E$  sont de même ordre de grandeur

$\alpha$  est un réel  $0 \leq \alpha \leq 1$  ; C'est un coefficient qui représente la diffusion des électrons à travers la jonction NPN. Pour un transistor classique  $\alpha > 0.99$  .pour un transistor de puissance  $\alpha > 0.95$

- ❖ Le courant  $I_C$  est amplifié par rapport au courant  $I_B$  :  $I_C = \beta I_B$  ;  $\beta$  représente le gain en courant . c'est un réel est un réel  $50 \leq \beta \leq 20000$

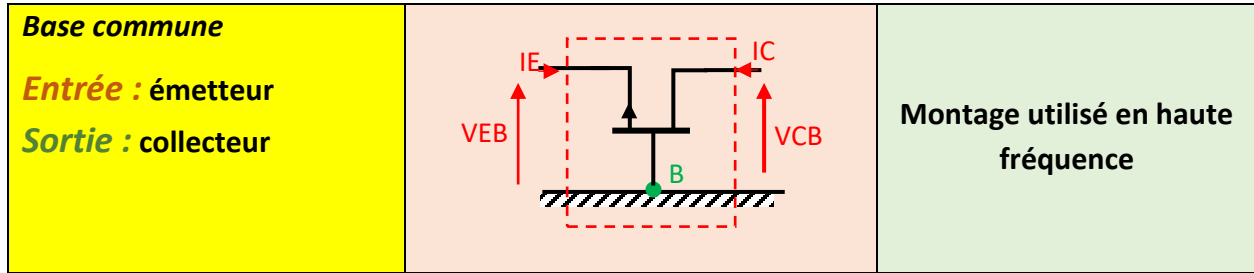
D'après la loi des nœuds :  $I_E = I_C + I_B \Rightarrow \frac{I_C}{\alpha} = I_E = I_C + I_B$ ; donc  $I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B = \beta I_B$

Ce qui nous donne :  $\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$

## Montage du transistors bipolaire NPN

Il existe 3 types de montages de base. Pour chaque montage, on peut représenter le transistor par un quadripôle (maille d'entrée et maille de sortie) comme indiqué dans le tableau suivant :

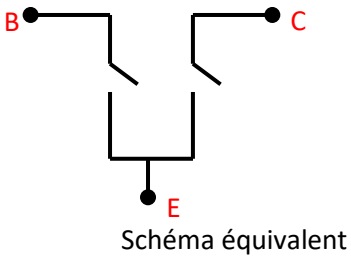
Montage	Schéma équivalent	Objectif d'utilisation
<b>Emetteur commun</b> <b>Entrée :</b> base <b>Sortie :</b> collecteur		Montage utilisé en Amplification
<b>Collecteur commun</b> <b>Entrée :</b> base <b>Sortie :</b> émetteur		Montage utilisé en adaptation d'impédance



**Etats de fonctionnement du transistor**

Le transistor possède trois états de fonctionnement (mode de fonctionnement). Par exemple, pour un montage émetteur commun :

**a) Etat bloqué :**

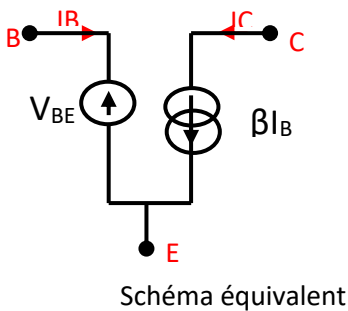


$$I_B = 0 ;$$

$$I_C = 0 ;$$

$$V_{CE} = V_{CC}$$

**b) Etat linéaire (mode amplification, état actif) :**

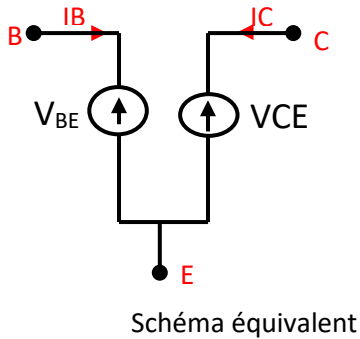


$$V_{BE} = 0.7V ;$$

$$0.3V < V_{CE} < V_{CC} ;$$

$$I_C = \beta I_B$$

**c) Etat saturé :**



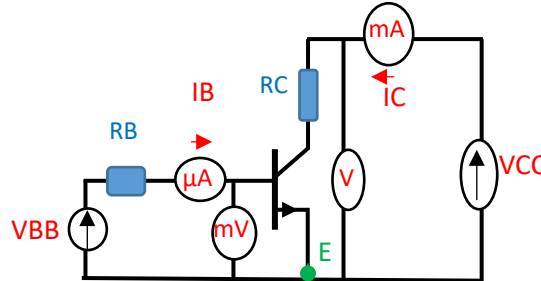
$$V_{BE} = 0.7V ;$$

$$V_{CE} = 0.2V ;$$

$$I_C = I_{Csat} \neq \beta I_B$$

## Caractéristiques statiques du transistor bipolaire

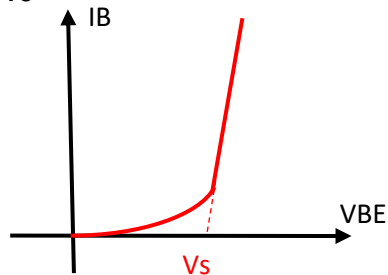
Six grandeurs électriques caractérisent le transistor :  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $I_E$ ,  $V_{CE}$ ,  $V_{BE}$  et  $V_{BC}$ . Pour les définir, on peut utiliser le montage émetteur commun. Les paramètres d'entrée  $I_B$  et  $V_{BE}$  sont maintenus constants et on fait varier  $V_{CE}$  en mesurant  $I_C$ .



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

Nous remarquons deux états pour le transistor :

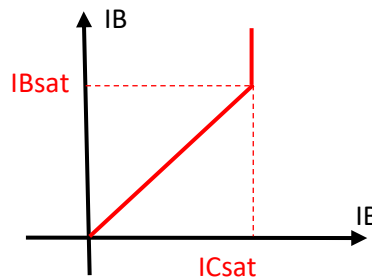
- Le transistor bloqué si  $V_{BE} < V_s$  ; les courants  $I_C$ ,  $I_B$  et  $I_E=0$
- Le transistor passant si  $V_{BE} \geq V_s$



### 2) Caractéristique de transfert $I_B=f(I_C)$

Nous remarquons deux états pour le transistor :

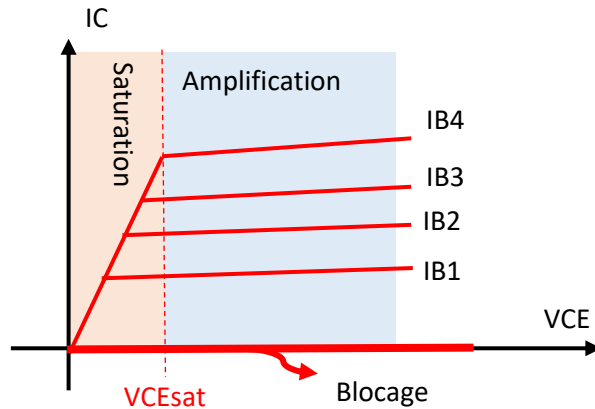
- Le transistor est un amplificateur si  $I_C \leq I_{Csat}$ . La caractéristique est une droite oblique  $I_C = \beta I_B$
- Le transistor est saturé si  $I_B > I_{Bsat}$ . La caractéristique est une droite verticale.  $I_C$  ne peut pas dépasser la valeur  $I_{Csat}$



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

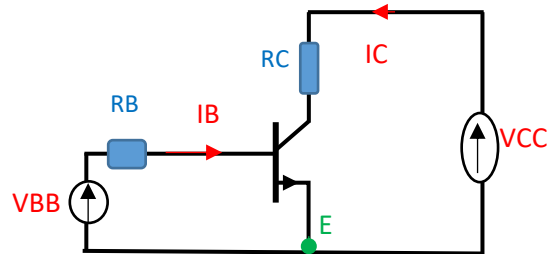
On peut remarquer que pour une valeur fixée de  $I_B$ , on distingue quatre états pour le transistor :

- Le transistor bloqué :  $I_B=0$  donc  $I_C=0$ ,  $V_{CE}=V_{CC}$
- Le transistor saturé :  $V_{CE} < V_{CEsat}$  ;  $I_C$  varie linéairement avec  $V_{CE}$ .  $I_C$  ne peut pas dépasser la valeur  $I_{Csat}$
- Le transistor est en mode amplification :  $V_{CE} \geq V_{CEsat}$  et  $I_C \leq I_{Csat}$ . La caractéristique est une droite légèrement oblique



## Polarisation du transistor

Pour faire fonctionner un transistor, il faut l'alimenter par une ou plusieurs sources continue. Cette opération est appelée polarisation du transistor. Les différents modes de fonctionnement (bloqué, saturé ou amplificateur) sont définis par les grandeurs  $I_C$ ,  $I_B$ ,  $I_E$ ,  $V_{CE}$  et  $V_{BE}$  qui sont fixés par le montage de polarisation.



Montage de polarisation de base.

## Droite de charge statique et Droite d'attaque statique

D'après la loi des mailles appliquée sur le circuit ci-dessus, on a :

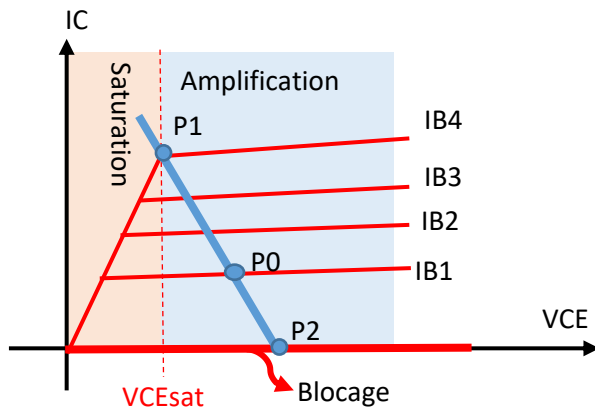
- **La droite de charge** :  $V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$  **maille de sortie**
- **La droite d'attaque** :  $V_{BE} = V_{BB} - R_B I_B$  **maille d'entrée**



Sur la caractéristique  $I_C = f(V_{CE})$  du transistor, on trace la droite de charge statique, le point d'intersection entre la droite de charge et les caractéristiques du transistor nous donne le point de fonctionnement (P0, P1 ou P2) du montage ou point de polarisation.

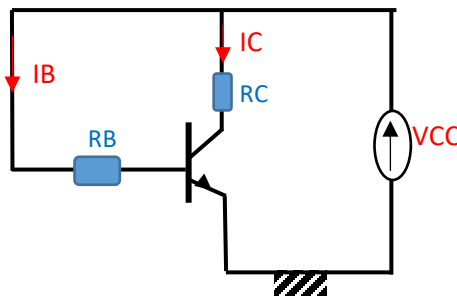
Ce sont les éléments extérieurs au transistor qui vont fixer ce point de fonctionnement :

- P0 : le transistor fonctionne dans la zone linéaire.
- P1 : le transistor est saturé.
- P2 : le transistor est bloqué.



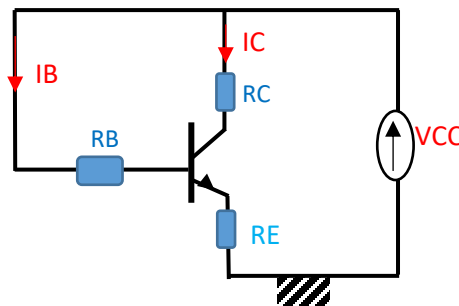
Il existe plusieurs types de polarisation suivant le besoin des applications désirées.

- 1) Polarisation par résistance de base appelée aussi polarisation fixe. Ce mode de polarisation est utilisé en commutation.



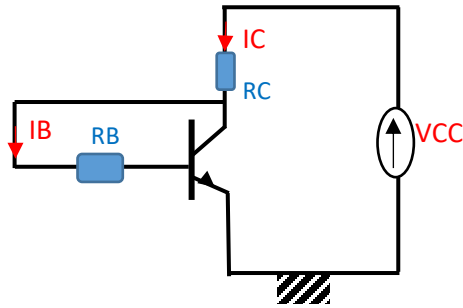
Montage de polarisation par résistance de de base.

- 2) Polarisation par réaction d'émetteur. La résistance  $R_E$  permet de compenser les variations de  $\beta$ .



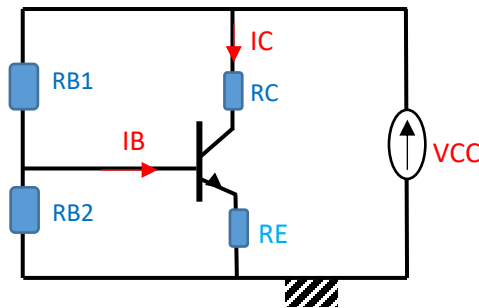
Montage de polarisation par réactance d'émetteur.

3) Polarisation par réaction de collecteur.



Montage de polarisation par réactance de collecteur.

4) Polarisation par pont de base et résistance d'émetteur. C'est le montage le plus utilisé en amplification car il est stable vis à vis de la température.



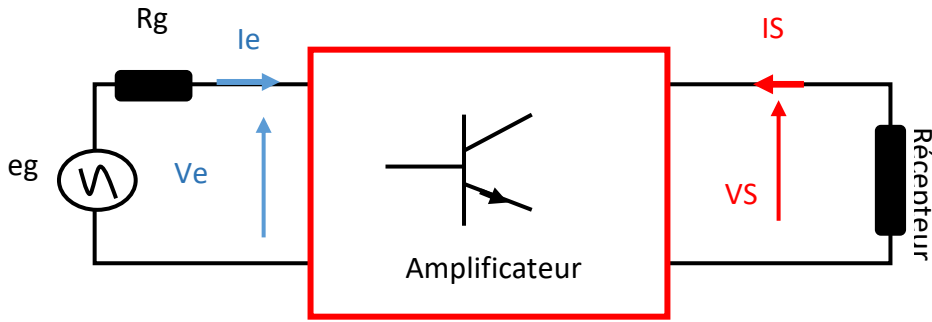
Montage de polarisation par Pont de base et résistance d'émetteur.

## Le transistor bipolaire en régime dynamique

### Introduction

L'amplification électrique est une nécessité lorsque la puissance d'un générateur est insuffisante pour alimenter un récepteur électrique donné. L'amplification de la puissance passe par l'amplification de la tension ou l'amplification du courant ou les deux grandeurs simultanément. Dans le cas de générateurs de petits signaux (faibles amplitudes), nous pouvons utiliser des montages d'amplification à base de transistors.

L'étude d'amplificateur à base de transistors consiste à analyser le fonctionnement dynamique de transistors polarisés en mode linéaire lorsqu'on applique de petits signaux à l'une ou plusieurs de ses grandeurs électriques.



### Etude dynamique du transistor

Pour analyser le fonctionnement de transistor en petits signaux alternatifs, nous devons suivre les étapes Suivantes :

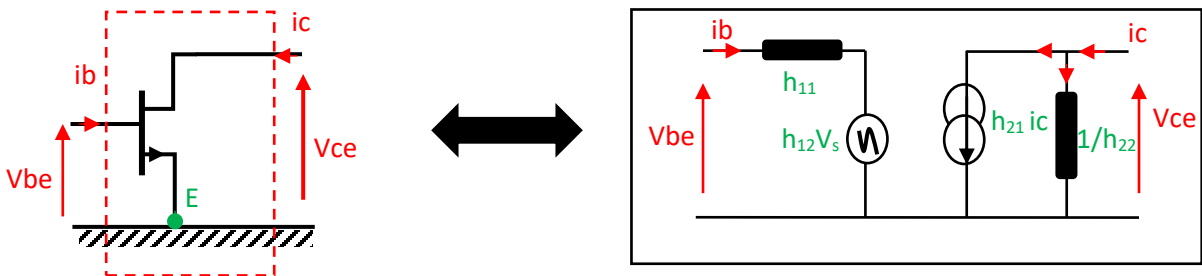
**Etape I :** Déterminer le point de fonctionnement en régime continu (DC) de transistor. Polarisation de transistor en régime statique.

**Etape II :** Etablir le circuit équivalent de l'amplificateur en remplaçant le transistor par son modèle "petites signaux", en annulant toutes les sources DC et en court-circuitant tous les condensateurs de faible impédance à la fréquence du signal.

**Etape III :** Analyser le Circuit équivalent "petites signaux" pour déterminer les caractéristiques de l'amplificateur : gain en tension sans et avec charge, résistance d'entrée, résistance de sortie.

### Paramètres petites signaux d'un transistor

Le transistor peut être assimilé à un quadripôle linéaire de schéma équivalent suivant, en prenant l'exemple d'un montage émetteur commun :



$$\begin{cases} V_{be} = h_{11}i_b + h_{12}V_{ce} \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}V_{ce} \end{cases}$$

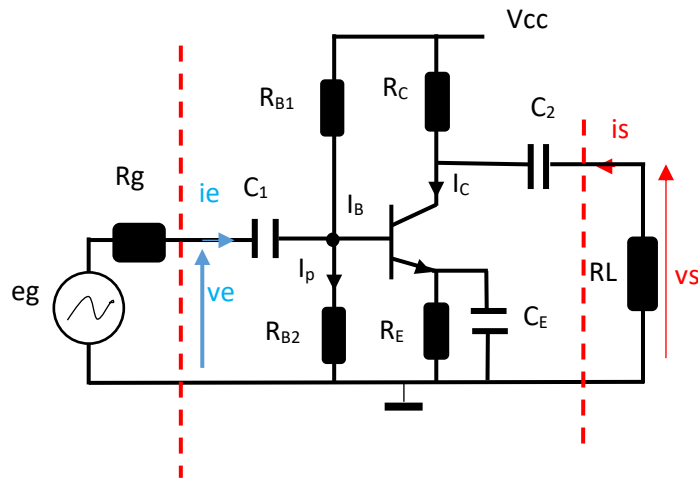
$$h_{11} = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} ; h_{12} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce} = 0} ; h_{22} = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b = 0}$$

Symbole	Désignation	valeur
$h_{11}$	Résistance d'entrée base /émetteur	$\frac{V_T}{I_B}$ ; $V_T = 26mV$
$h_{12}$	Réaction (Gain)en tension	0.1 à 1%
$h_{21}$	Gain en courant	20 à 500
$1/h_{22}$	Résistance de sortie collecteur/émetteur	10 à 100 K $\Omega$

### Exemple

Soit le montage émetteur commun (EC) inverseur suivant :



Les condensateurs  $C_1$  et  $C_2$  sont des condensateurs dits de liaison. Ils évitent que les courants continus de polarisation circulent éventuellement dans les parties qui précèdent ou suivent l'amplificateur. Ils sont choisis de façon à ce que :

- En régime dynamique, leurs impédances soient très faibles à la fréquence de travail : on les assimile alors à des court-circuit.
- En continu, ils ont une très grande impédance : on les assimile alors à des circuits ouverts.
- Pour cela, on choisit les capacités  $C_1$  et  $C_2$  assez grande pour que les signaux d'une fréquence donnée  $f_{min}$  passent à travers les condensateurs sans être trop affaiblis.

Le condensateur  $C_E$  est un condensateur de découplage. Il sert à lier l'émetteur à la masse par rapport aux signaux, sans changer la polarisation du transistor. Le module de son impédance doit être assez petit aux fréquences supérieures à une fréquence déterminée  $f_{min}$ .

Les résistances servent à polariser le transistor dans la zone linéaire de ses caractéristiques, ainsi qu'à assurer les paramètres dynamiques du montage.

Tout d'abord, on va évaluer la capacité du montage à amplifier le signal d'entrée. La caractéristique représentative de cette fonction est le gain en tension  $A_v$ , qui est le rapport entre les tensions de sortie et d'entrée. Ce gain peut être défini de deux manières :

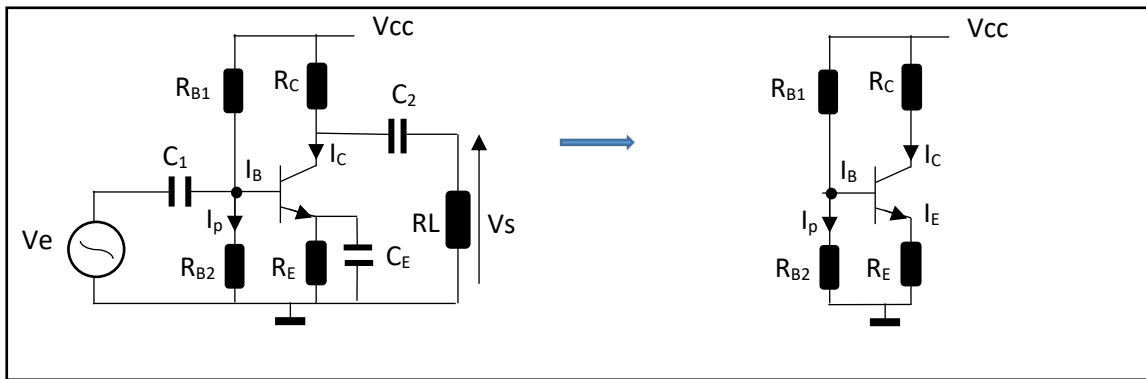
- Le gain à vide, c'est à dire sans charge connectée en sortie du montage.
- Le gain en charge, avec la charge connectée.

Ensuite, il faut regarder en quoi le montage peut s'interfacer avec la source d'entrée sans la perturber ; il doit rester le plus neutre possible vis à vis de cette source, surtout s'il s'agit d'un capteur de mesure ! La grandeur représentative est l'impédance d'entrée.

Même chose vis à vis de la charge branchée en sortie du montage, qui va utiliser le signal amplifié. Il va falloir regarder dans quelle mesure l'étage à transistor n'est pas perturbé par cette charge. La grandeur représentative est l'impédance de sortie.

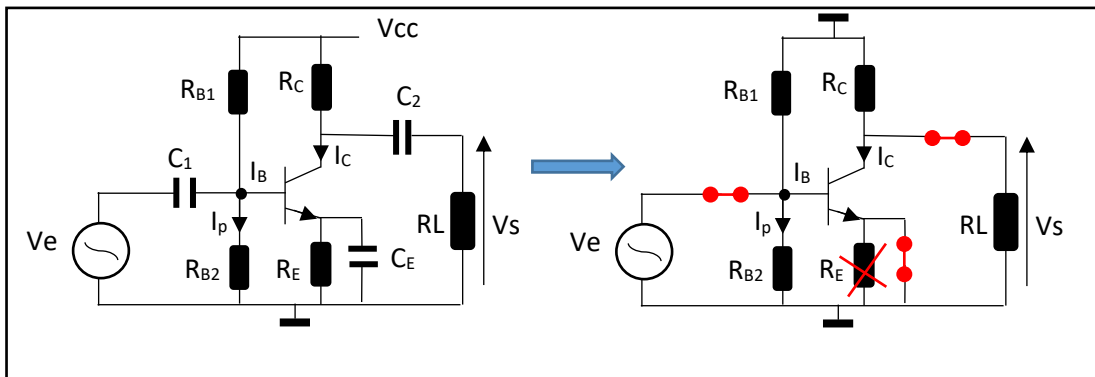
Nous allons calculer ces trois paramètres. On pourrait y rajouter le gain en courant  $A_i$  qui est le rapport des courants de sortie et d'entrée, et aussi le gain en puissance. En amplification petits signaux, ces paramètres sont peu utilisés.

- 1) Partie statique :  $C_1, C_2$  et  $C_E$  sont remplacées par des interrupteur ouvert, comme indiqué sur la figure:



La partie statique consiste à définir le point de fonctionnement  $V_{CE0}$ ,  $I_{C0}$ ,  $V_{BE0}$  et  $I_{B0}$  : en utilisant les mailles de sortie et d'entrée

- 2) Partie dynamique : :  $C_1, C_2$  et  $C_E$  sont remplacées par des court-circuit, la source de tension continue est mise à la terre



La détermination des gains et des impédances d'entrée et de sortie serait plus simplifiée, si on remplace le montage par son circuit équivalent. Le transistor peut être remplacé par un quadripôle :



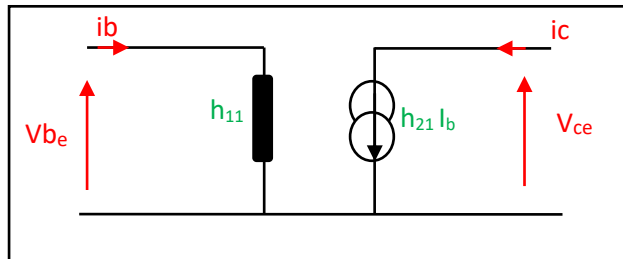
Matrice Hybride (en alternatif) représentant le transistor en dynamique :

$$\begin{cases} V_{be} = h_{11}i_b + h_{12}V_{ce} \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}V_{ce} \end{cases}$$

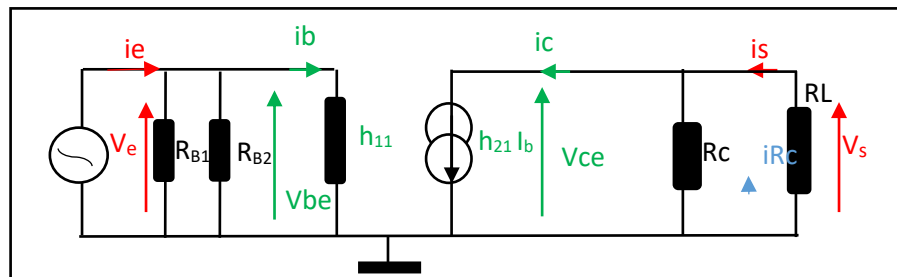
- ☞  $h_{11}$  Résistance d'entrée (base, émetteur) qui est l'impédance d'entrée du transistor. Sa valeur dépend du transistor ( $\beta$ ) et du point de fonctionnement statique:  $h_{11} = \frac{26\beta}{I_E}$
- ☞  $h_{21} = \beta$  Gain de courant
- ☞  $\frac{1}{h_{22}}$  Résistance de sortie (collecteur, émetteur), très grande valeur on la remplace parfois par un circuit ouvert
- ☞  $h_{12} \approx 0$  Réaction en tension qui est négligeable dans le mode amplification.

D'après ces approximations, on obtient le schéma équivalent simplifié du transistor :

$$\begin{cases} V_{be} = h_{11}i_b \\ i_c = h_{21}i_b + h_{22}V_{ce} \end{cases}$$



Nous remarquons que  $R_{B1}$  est en parallèle à  $R_{B2}$  et  $R_C$  est en parallèle à  $R_L$ . Le schéma équivalent de tous le circuit :



❖ **Gain en tension**

$A_V = \frac{V_s}{V_e}$ ;  $V_e = h_{11}i_b$ ;  $R_c$  est en parallèle avec  $R_L$ ; donc on peut les regrouper  $R_{eq} = \frac{R_c R_L}{R_c + R_L}$  donc le courant qui va circuler dans  $R_{eq}$  est  $i_c$ , alors c'est  $i_c = h_{21}i_b$  ce qui donne :  $V_s = -\beta R_{eq}i_b$

$A_V = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{\beta R_{eq}}{h_{11}}$  c'est un amplificateur inverseur car le gain est négatif.

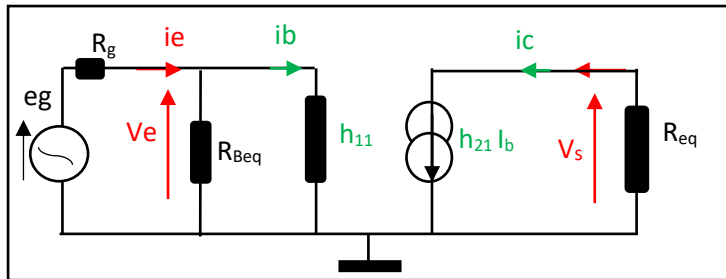
❖ **Le gain en tension  $A_{VC}$**

$$A_{VC} = \frac{V_s}{e_g} = \frac{V_e}{e_g} \frac{V_s}{V_e}$$

$R_{B1}$  est en parallèle avec  $R_{B2}$ ; donc on peut les regrouper  $R_{Beq} = \frac{R_{B1}R_{B2}}{R_{B1}+R_{B2}}$

$$V_e = \frac{R_{Beq}h_{11}}{h_{11}+R_{Beq}} i_e ; e_g = (R_g + \frac{R_{Beq}h_{11}}{h_{11}+R_{Beq}}) i_e$$

$$A_{VC} = -\frac{R_{Beq}h_{11}}{R_g(h_{11}+R_{Beq})+h_{11}} \frac{h_{21}R_{eq}}{h_{11}} = -\frac{\beta R_{Beq}R_{eq}}{R_g(h_{11}+R_{Beq})+h_{11}}$$



❖ **Le gain en courant  $A_i$**

$A_i = \frac{i_s}{i_e}$ ;  $i_b = \frac{R_{Beq}}{R_{Beq}+h_{11}} i_e \Rightarrow i_e = \frac{R_{Beq}+h_{11}}{R_{Beq}} i_b$ ; diviseur de courant

$$i_s = \frac{R_c}{R_c+R_L} i_c = \frac{\beta R_c}{R_c+R_L} i_b \Rightarrow A_i = \frac{i_s}{i_e} = \frac{\beta R_c}{R_c+R_L} \frac{R_{Beq}}{R_{Beq}+h_{11}}$$

❖ **Les impédances d'entrée  $Z_e$  et de sortie  $Z_s$**

$$V_e = \frac{R_{Beq}h_{11}}{h_{11}+R_{Beq}} i_e \Rightarrow Z_e = \frac{V_e}{i_e} = \frac{R_{Beq}h_{11}}{h_{11}+R_{Beq}}$$

$$Z_s = \frac{V_s}{i_s}; e_g = 0 \text{ et sans la charge donc } Z_s = Z_c$$

Pour évaluer les grandeurs du transistor, il faut superposer les résultats des deux régimes : statique et dynamique.

$$\begin{aligned} V_{EB} &= V_{EB0} + V_{eb} \\ V_{EC} &= V_{EC0} + V_{ec} \\ I_B &= I_{B0} + i_b \\ I_C &= I_{C0} + i_c \end{aligned}$$