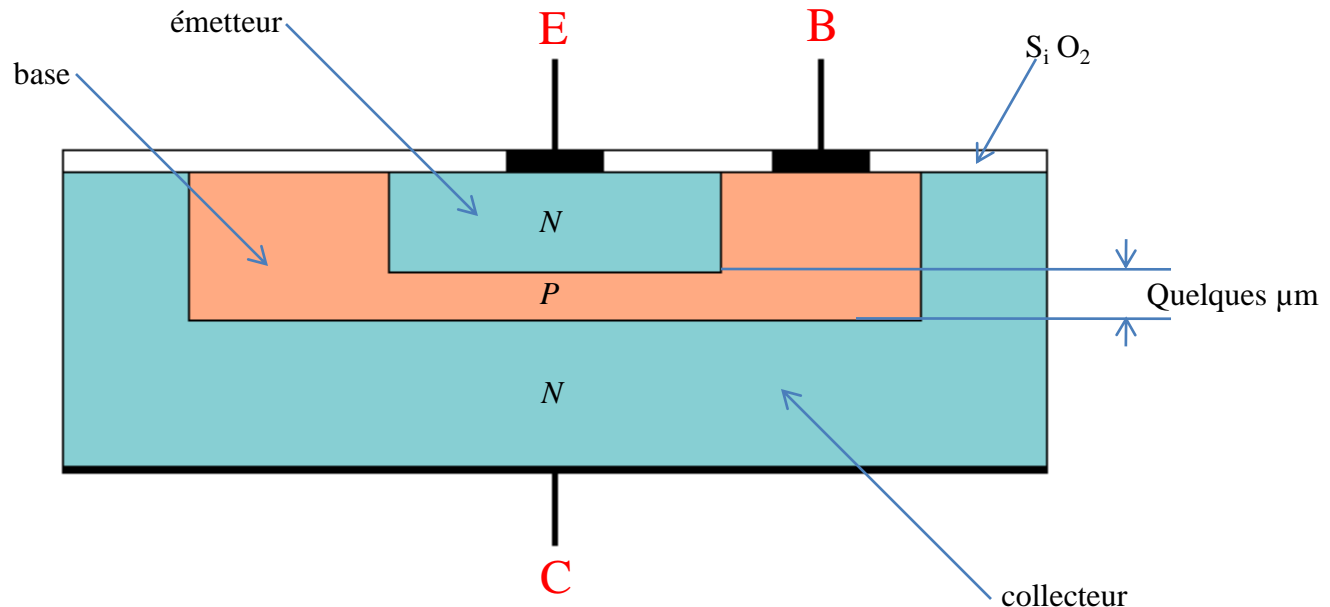


# Les transistors bipolaires

## 1.1 Constitution

- a) Un transistor bipolaire est constitué d'une puce de semi-conducteur (silicium en général) comportant trois zones dopées successivement *NPN* ou *PNP*, donc présentant **deux jonctions PN ayant des sens passants opposés**.

la figure ci-dessous montre un transistor bipolaire *NPN de type PLANAR*.



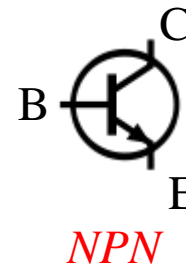
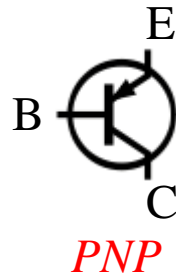
# Les transistors bipolaires

b) La couche, appelée **base**, comprise entre les deux jonction est:

- extrêmement mince (quelques  $\mu\text{m}$ ),
- moins dopée que les deux autres zones (les majoritaires y sont relativement peu nombreux).

La zone constituée par le *substrat* est appelée **collecteur**; la 3<sup>ème</sup> zone porte le nom d'**émetteur**.

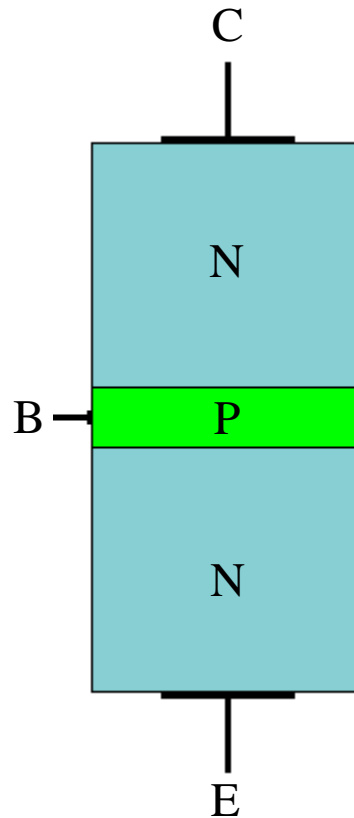
c) Un transistor bipolaire est donc un composant à trois électrodes reliées respectivement aux trois zones de la pastille; il est conventionnellement représenté par l'un des deux schémas de la figure suivante.



La flèche indique le sens passant de la jonction émetteur-base, c'est-à-dire celui allant de P vers N : elle permet de distinguer les transistors *NPN* des transistors *PNP*

# Les transistors bipolaires

d) Les transistors NPN étant les plus nombreux, nous adopterons généralement ce type de composant dans nos montages; de plus nous raisonnerons sur le modèle simple de la figure suivante:



# Les transistors bipolaires

## 1.2 Principe de fonctionnement

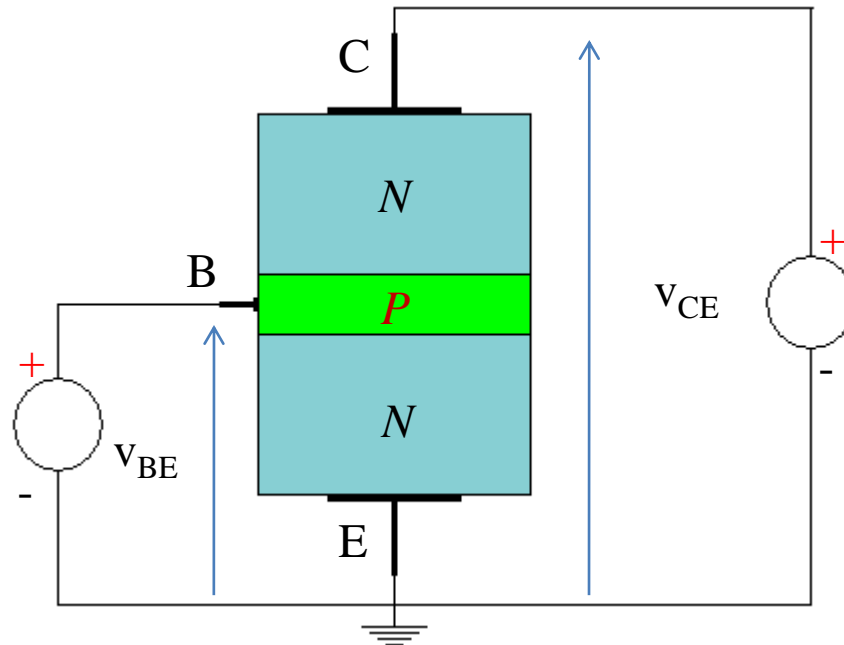
On appelle fonctionnement normal d'un transistor bipolaire celui pour lequel :

- La jonction *EB* (émetteur-base) est polarisée en sens direct,
- La jonction *CB* (collecteur-base) est polarisée en sens inverse,

C'est ce fonctionnement que nous allons étudier dans cette partie. Pour cela, nous raisonnerons sur un transistor bipolaire *NPN* polarisé par deux générateurs tels que

$$v_{BE} > 0 \quad \text{et} \quad v_{CE} > v_{BE}$$

La figure ci-dessous montre la polarisation du transistor



# Les transistors bipolaires

## 1.2 Principe de fonctionnement

### a) Diffusion des minoritaire à travers la base

Les électrons majoritaire de  $E$  (émetteur) diffuse à travers la jonction  $EB$  polarisée en sens direct; il deviennent alors minoritaire puisque  $B$  (base) est de type  $P$ .

Ces électrons relativement nombreux au voisinage de la jonction  $EB$ , diffusent jusqu'à la jonction  $CB$ .

Au cours de cette diffusion

Quelques électrons se recombinent avec les trous majoritaires de  $B$ .

Les plus nombreux atteignent la jonction  $CB$  très proche (l'épaisseur de la base vaut quelques  $\mu\text{m}$ ).

Cette jonction ( $CB$ ) polarisée en inverse, est le siège d'un champ  $E_d$  intense (voir chapitre jonction  $PN$ ) dirigé de  $C$  vers  $B$  : les électrons qui à partir de  $B$  pénètrent dans la zone de transition correspondante sont propulsés dans  $C$ .

Comme la base est extrêmement mince et peu dopée, le plus grand nombre d'électrons issus de  $E$  atteint  $C$ .

# Les transistors bipolaires

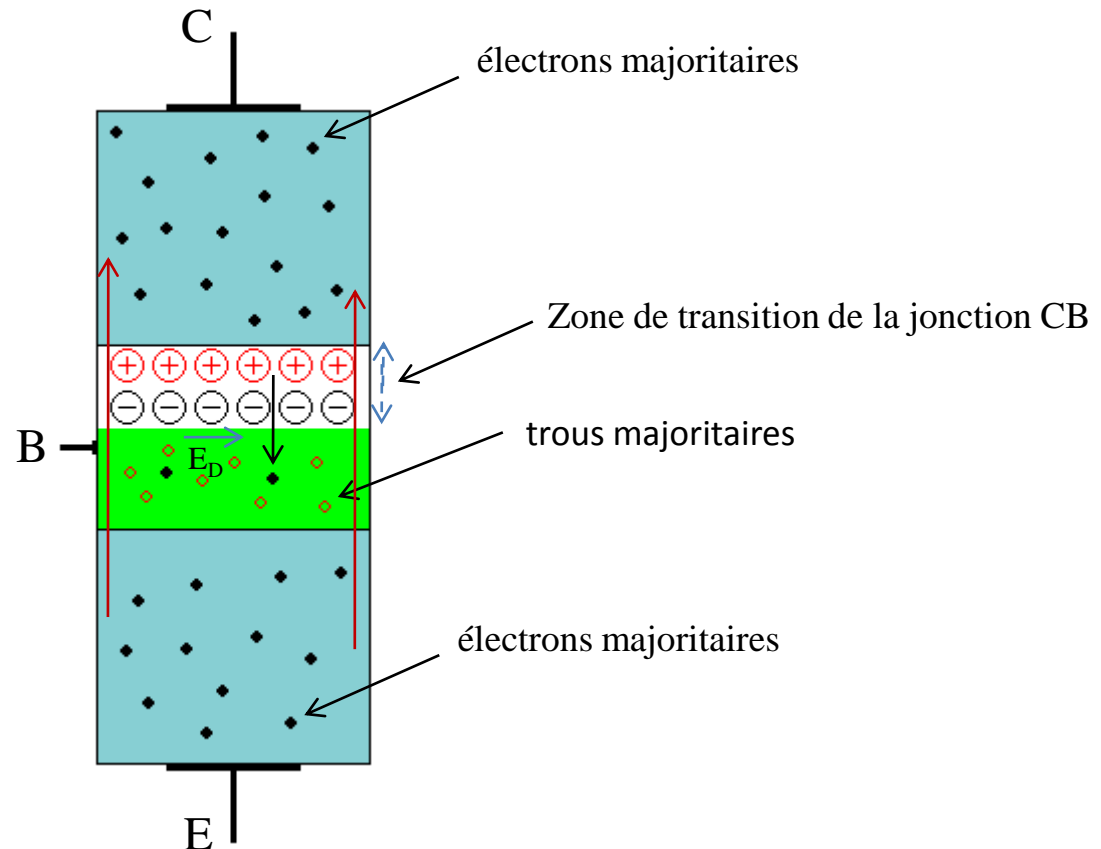
## b) Courant d'émetteur, de collecteur et de base

1 Le courant d'émetteur  $i_E$  (c'est-à-dire celui circulant dans le fil relié à E) est pratiquement constitué par le flux des électrons injectés depuis E dans B.

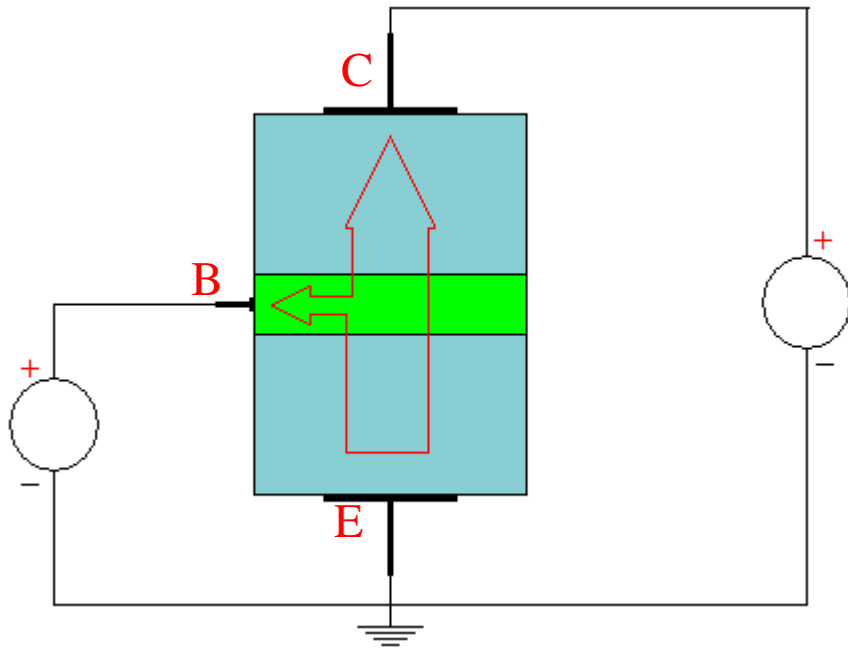
Le courant de collecteur  $i_C$  est dû au flux des électrons passant de B en C.

La proportion des recombinaison dans B étant très faible, on a:

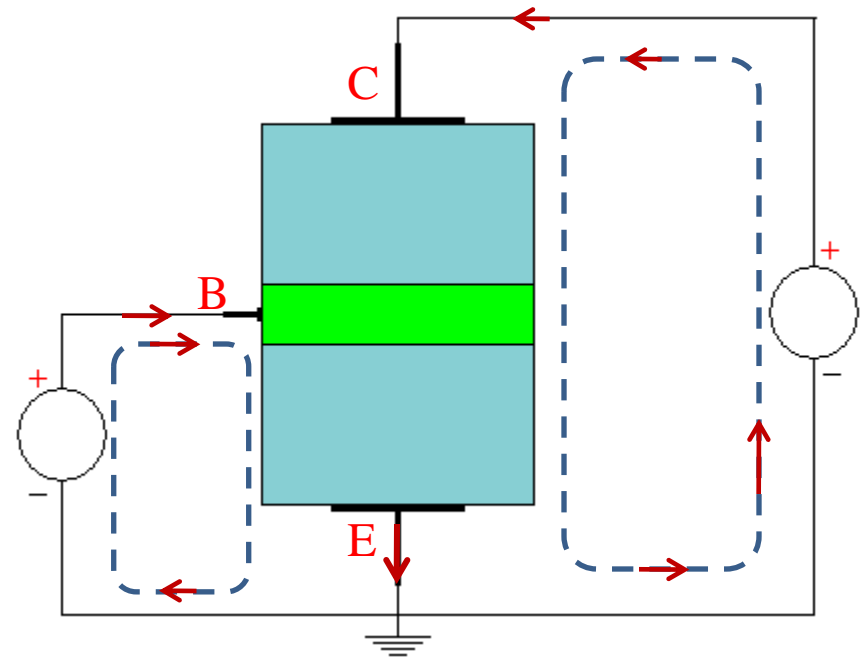
$$i_C \approx i_E$$



# Les transistors bipolaires



Déplacement des électrons



Circulations des courants

# Les transistors bipolaires

Bien que la jonction CB soit polarisée en inverse, elle est traversée par un courant relativement important, pratiquement le courant direct de la jonction EB; cela résulte du fait que les deux jonctions appartiennent à un même cristal et sont très proches l'une de l'autre.

2 le courant de base est dû essentiellement à la recombinaison dans la base de quelques électrons issus de E: tout se passe comme si les électrons qui ne se retrouvent pas dans  $i_C$  constituaient le courant  $i_B$

3 le courant  $i_B$  circulant le long de la maille 1

Le courant  $i_C$  circulant le long de la maille 2

Par conséquent :

$$i_E = i_C + i_B \quad \text{avec} \quad i_B \ll i_C$$

## c) Effet transistor

1 en fonctionnement normal la proportion d'électrons se recombinant dans la base dépend de l'épaisseur du dopage de cette zone : c'est donc une **constante** pour un transistor donné est il en est de même du rapport  $i_B/i_E$ , c'est-à-dire pratiquement du rapport  $i_B/i_C$

L'inverse de ce rapport constant, soit  $i_C/i_B$ , est lui-même constant: il est représenté par la lettre  $\beta$  (beta) et porte le nom d'amplification statique  $i_C/i_B = \beta$



# Les transistors bipolaires

---

Pour un transistor bipolaire en fonctionnement normal, le courant de collecteur  $i_C$  est lié au courant de base  $i_B$  par la relation :  $i_C = \beta i_B$

En injectant un courant  $i_B$  très faible dans la base, on peut commander un courant de collecteur  $i_C$  beaucoup plus intense

$\beta$  pouvant atteindre des valeurs supérieures à 100.

C'est l'effet transistor

# Les transistors bipolaires

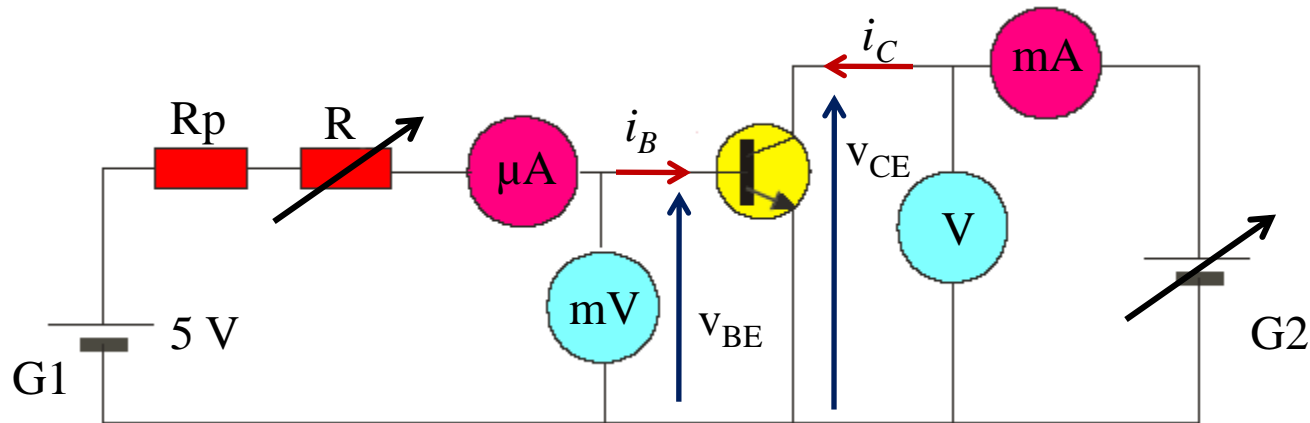
## Caractéristiques statiques

Le fonctionnement d'un transistor bipolaire est caractérisé par *quatre grandeurs*:

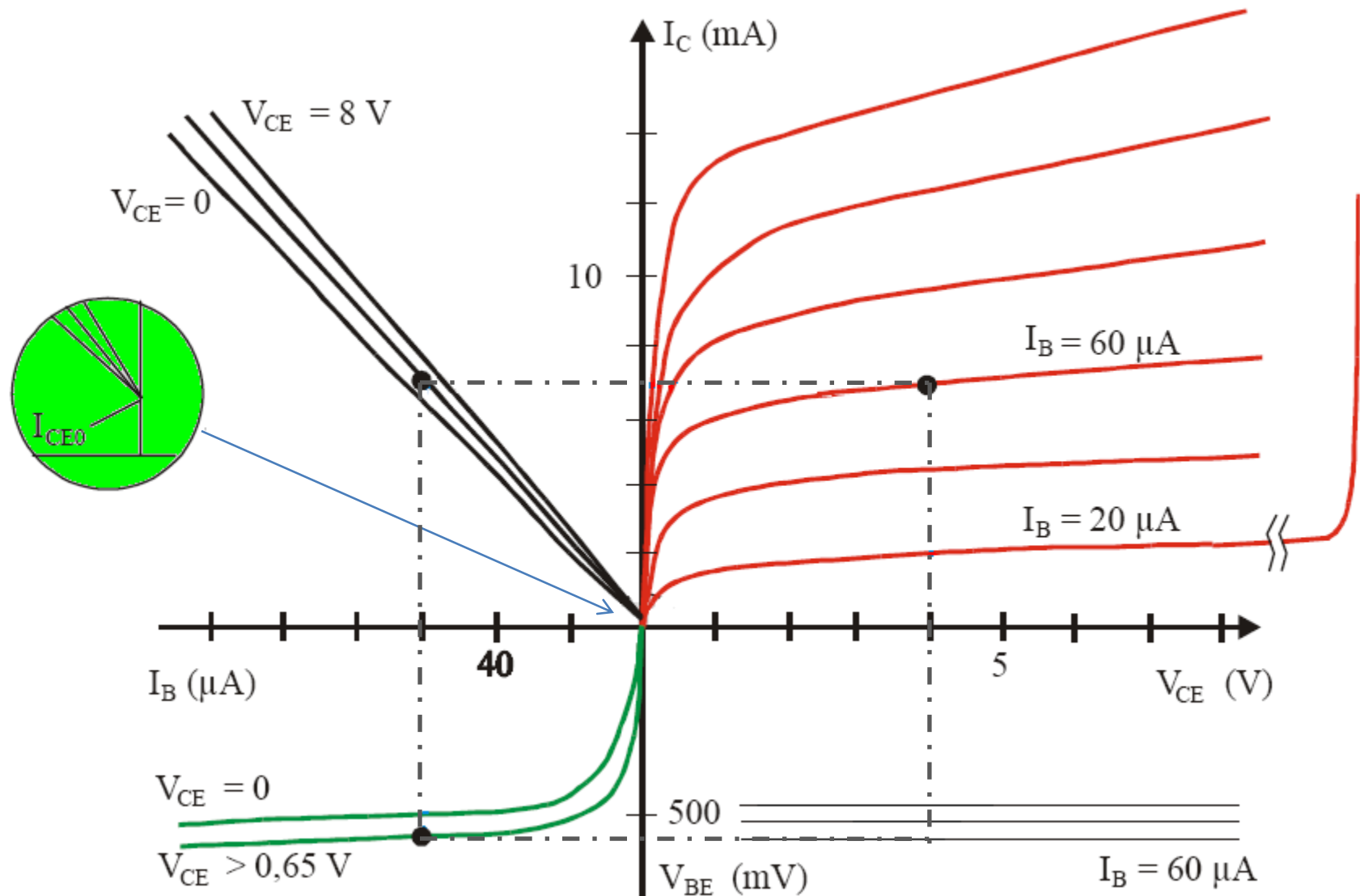
Entre  $B$  et  $E$ , la d.d.p  $v_{BE}$  et le courant  $i_B$ ,

Entre  $C$  et  $E$ , la d.d.p  $v_{CE}$  et le courant  $i_C$

Le montage utilisé pour déterminer le réseau de caractéristiques est le suivant;



# Les transistors bipolaires



# Les transistors bipolaires

---

## Caractéristique d'entrée

C'est  $i_B = f(V_{BE})$  avec  $V_{CE} = \text{cte}$  (coefficient  $H_{11}^{-1}$ ).

## Caractéristique de transfert en courant

C'est  $i_C = f(i_B)$  avec  $V_{CE} = \text{cte}$  (coefficient  $H_{21}$ ).

## Caractéristique de sortie

C'est  $i_C = f(V_{CE})$  avec  $i_B = \text{cte}$  (coefficient  $H_{22}$ ).

## Caractéristique de transfert en tension

$V_{BE} = f(V_{CE})$  avec  $i_B = \text{cte}$  (coefficient  $H_{12}$ ).

# Les transistors bipolaires

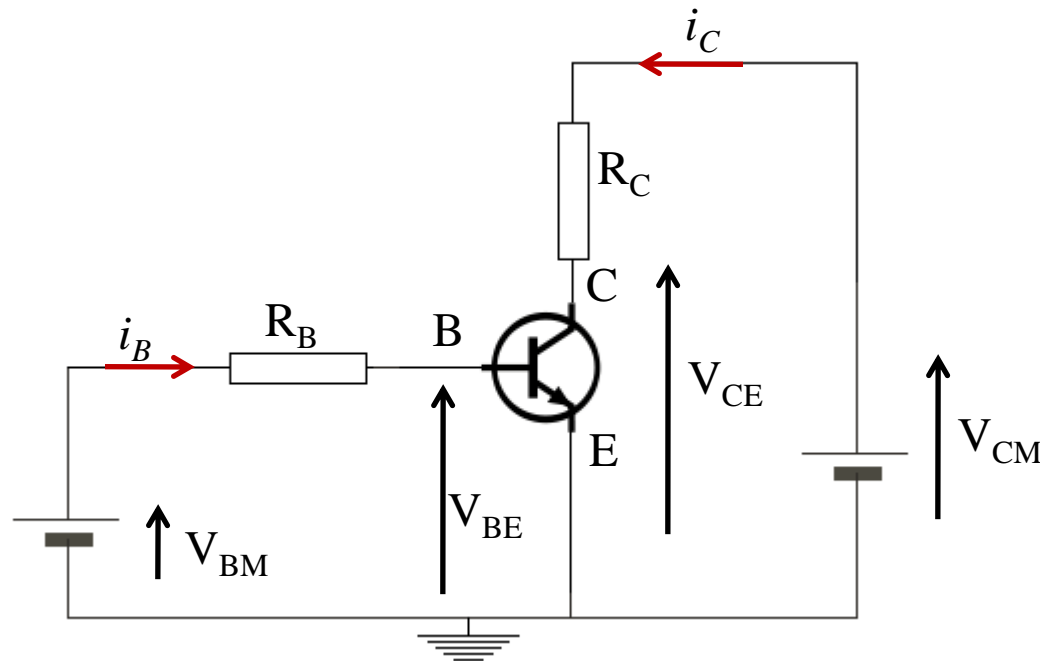
## Effet Early

D'après le réseau de caractéristiques de sortie, on remarque que le courant croît avec la tension de sortie  $V_{CE}$ . En réalité, le courant  $i_C = \beta i_B + i_{CE0} + k \cdot V_{CE}$ . Plus la tension  $V_{CE}$  croît, plus la zone où se recombinent les électrons et les trous devient étroite. Cette dépendance du courant avec la tension de sortie s'appelle *l'Effet Early*. Les prolongements des parties rectilignes des caractéristiques vers les  $V_{CE}$  négatifs coupent l'axe  $V_{CE}$  au point  $V_{CE} = V_{early} \approx (-50 \text{ à } -100 \text{ V})$ .

# Les transistors bipolaires

## Point de fonctionnement d'un transistor bipolaire

Le montage ci-dessous représente le montage usuel pour la polarisation d'un transistor bipolaire. En régime constant : un générateur de f.e.m.  $V_{BM}$  et une résistance  $R_B$ , d'une part, un générateur de f.e.m  $V_{CM}$  et une résistance  $R_C$  d'autre part, représentent les éléments des générateurs de Thévenin équivalents branchés respectivement entre la base et la masse, et entre le collecteur et la masse



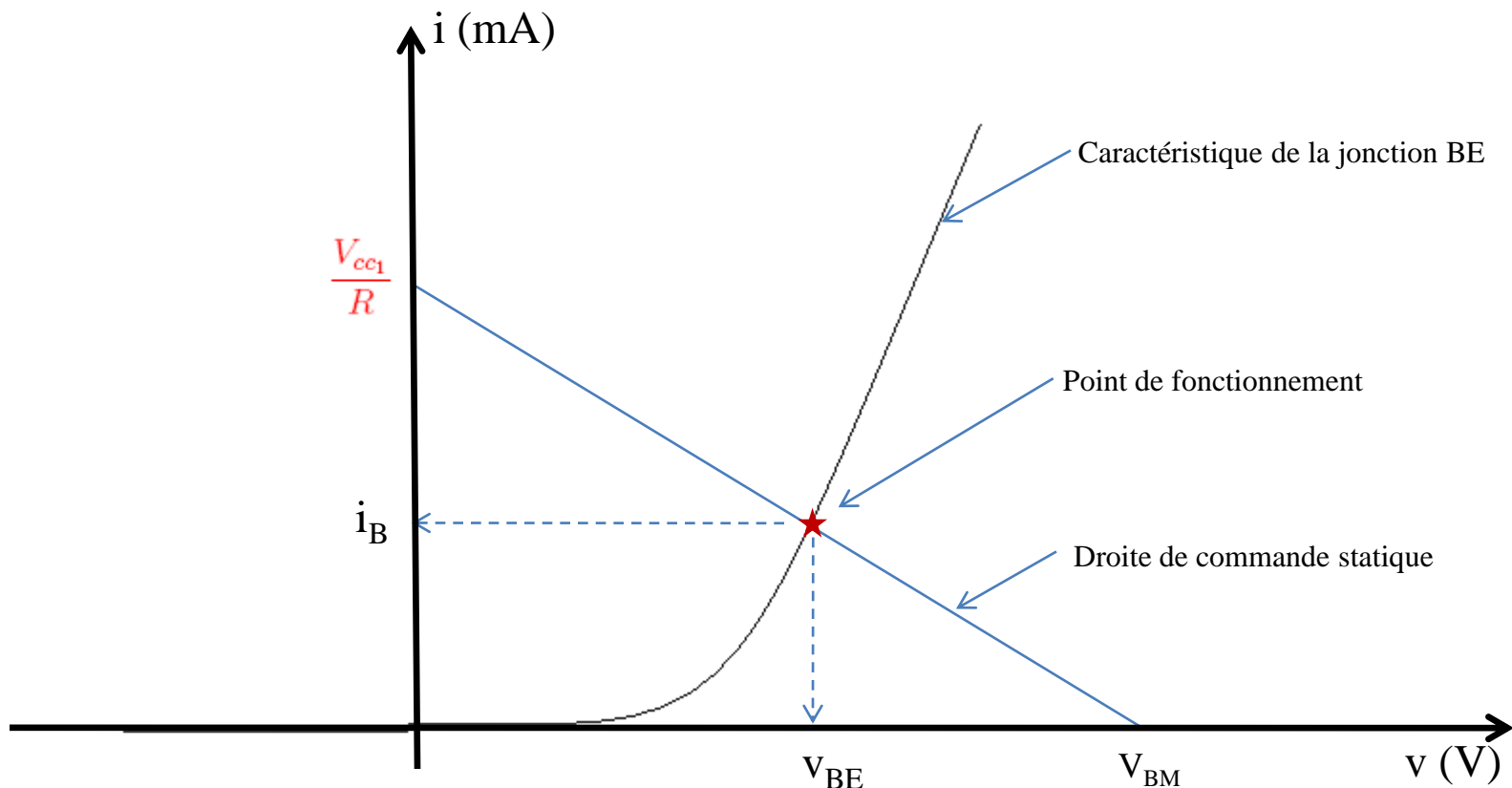
# Les transistors bipolaires

## Point de fonctionnement d'un transistor bipolaire

a) Circuit de base

En appliquant la loi des mailles on obtient :  $v_{BE} = V_{BM} - R_B i_B$

Dans le plan  $(v_{BE}, i_B)$  cette relation imposée par  $V_{BM}$  et  $R_B$  du circuit de base se traduit par une droite dite *droite de commande statique* (droite de charge)



# Les transistors bipolaires

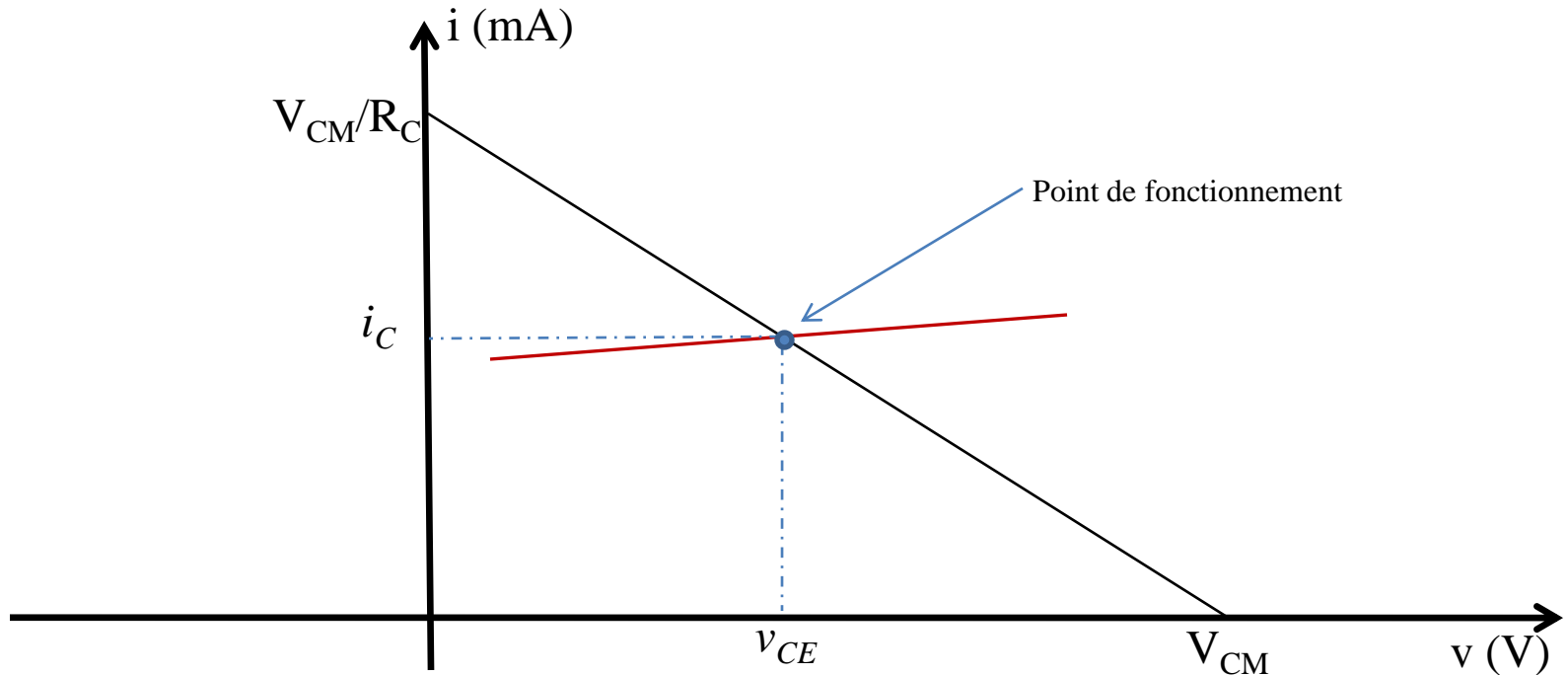
Dans ces conditions, le courant de base est tel que  $i_B = (V_{BM} - v_{BE})/R_B$

## b) Circuit du collecteur

En appliquant la loi des mailles en sortie, la tension  $v_{CE}$  s'exprime comme suit:

$$v_{CE} = V_{CM} - R_C i_C$$

Dans le plan  $(v_{CE}, i_C)$  cette relation imposée par  $V_{CM}$  et  $R_C$  du circuit du collecteur se traduit par une droite dite *droite de charge statique*.





# Les transistors bipolaires

Connaissant la valeur de  $\beta$  et ayant déterminé la valeur du courant  $i_B$  et sachant que  $i_C = \beta i_B$

$$v_{CE} = V_{CM} - R_C i_C$$

## Circuit équivalent d'un transistor

En regardant les caractéristiques du transistor, on remarque qu'il y a des zones où son comportement est pratiquement linéaire. En choisissant le point de fonctionnement dans ces zones linéaires, les variations des grandeurs d'entrée et de sortie peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{BE} \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_B \\ v_{CE} \end{bmatrix}$$

Cette matrice possède des paramètres hybrides  $h_{ij}$  qui sont les dérivées des paramètres  $H_{ij}$  autour du point de fonctionnement.

# Les transistors bipolaires

$h_{11} = v_{BE}/i_B$  : représente la résistance d'entrée du transistor, qui n'est autre que la pente de la caractéristique d'entrée. Il est défini aussi avec l'expression suivante :

$$h_{11} \approx 26 \frac{\beta}{I_C} \quad (h_{11} \text{ en } \Omega, I_C \text{ en mA})$$

$h_{21} = i_C/i_B$  : c'est le gain en courant du transistor, il est très proche de  $\beta$  qui est la pente de la caractéristique de transfert en courant.

$h_{22} = i_C/v_{CE}$  : c'est l'admittance de sortie du transistor, elle est en général faible et correspond à la pente des caractéristiques du réseau de sortie ;  $h_{22}$  est fonction du courant collecteur ;  $h_{22}^{-1}$

est de l'ordre de 20 k $\Omega$  pour des courants collecteurs de l'ordre de quelques milliampères.

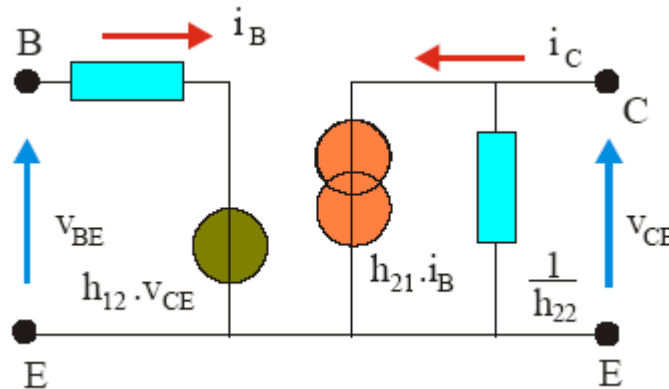
$h_{22} = v_{BE}/v_{CE}$  : C'est la pente des caractéristiques du réseau de transfert en tension. Ce paramètre étant voisin de zéro (typiquement  $10^{-5}$  à  $10^{-6}$ ) sera toujours négligé.

# Les transistors bipolaires

## Schéma équivalent simplifié

En fait, il existe des capacités entre les électrodes d'un transistor. Ces capacités sont faibles et présentent en basse fréquence des impédances si grandes que l'on peut négliger leurs effets. Par contre en haute fréquence, les impédances de ces capacités parasites modifient le fonctionnement du transistor.

Si on néglige les capacités entre les électrodes, on obtient le schéma équivalent suivant, valable uniquement en basse fréquence, qui est la traduction graphique du modèle hybride du transistor. Il relie donc les variations des grandeurs d'entrée et de sortie.



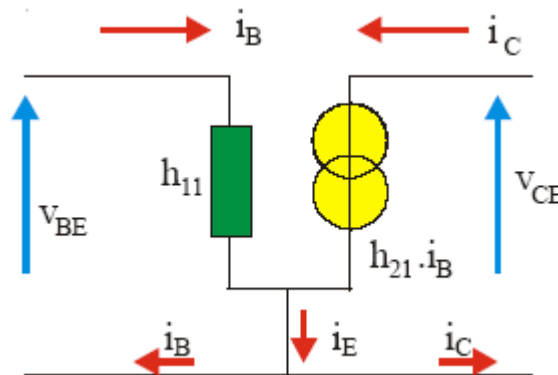
# Les transistors bipolaires

## Schéma équivalent simplifié

On suppose que le transistor est placé à son point de fonctionnement, dans la zone linéaire des caractéristiques, par application de potentiels continus convenables sur les trois électrodes.

Cette opération se nomme la **polarisation** du transistor. Comme  $h_{12}$  est voisin de 0 et que  $h_{22}$  est petit, on peut encore simplifier le schéma. Dans ce modèle, le transistor se ramène à un circuit d'entrée qui est la résistance  $h_{11}$  et à un circuit de sortie constitué par un générateur de courant  $i_C = \beta i_B$ .

*Les variations du courant de sortie sont égales à fois celles du courant d'entrée.*



# Les transistors bipolaires

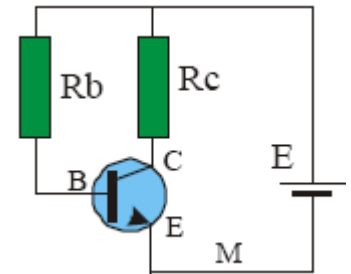
## Polarisation d'un transistor

Le montage de polarisation vu précédemment possède un inconvénient; il nécessite deux sources de tension. En pratique, les transistors sont polarisés en utilisant une seule source de tension continue. Il existe plusieurs montages de polarisation.

### Polarisation par résistance de base

Le montage de polarisation est simple et utilise une seule source de tension. Cependant ce dernier est sensible à la dérive thermique. En effet :  $I_C = \beta I_B + I_{CE0}$ . Un accroissement du courant  $I_C$  entraîne une élévation de température de la jonction BC et un accroissement de  $I_{CE0}$  et par suite de  $I_C$ .

Ce type de polarisation ne devrait ***jamais être employé pour un transistor utilisé en amplificateur***. Mais ce montage est tolérable pour un transistor utilisé en commutation.



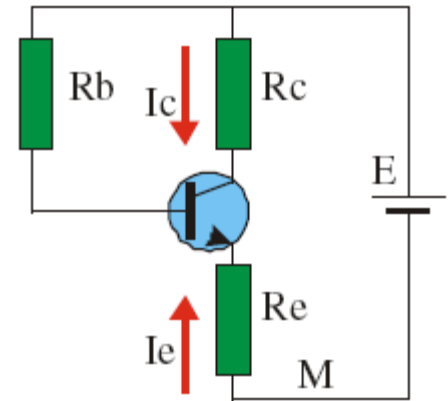
# Les transistors bipolaires

## Polarisation par réaction d'émetteur

L'introduction d'une résistance entre l'émetteur et la masse est une façon de compenser les variations de  $\beta$ . Si le gain augmente,  $I_C$  et donc  $I_E$  augmentent. Le potentiel d'émetteur ( $V_{EM} = R_E \cdot I_C$ ) croît ainsi que le potentiel de base ( $V_{BE} \gg 0,65 \text{ V}$ ) ce qui diminue ainsi le courant base puisque  $I_B = (E - V_{BM})/R_B$ .

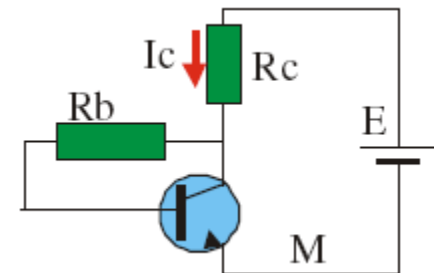
Le mot « **réaction** » signifie qu'une grandeur de sortie ( $I_C$ ) fait varier une grandeur d'entrée ( $I_B$ ).

L'élément de réaction (commun à l'entrée et à la sortie) est ici la résistance d'émetteur.



## Polarisation par réaction de collecteur

Si le gain augmente,  $I_C$  augmente donc  $V_{CE}$  diminue (en effet  $V_{CE} = E - R_C \cdot I_C$ ) ainsi que la différence de potentiel aux bornes de la résistance de base. Le courant base diminue et contrebalance l'accroissement du gain. Cette méthode, bien que meilleure que la précédente, n'est pas très satisfaisante.



# Les transistors bipolaires

## Polarisation par pont de base et résistance d'émetteur

Pour rendre indépendant le courant collecteur des variations du gain, on utilise un diviseur de tension nommé « pont de base ».

Le pont diviseur maintient constant  $V_{BM}$  à condition que les variations du courant base puissent être négligées devant le courant  $I_1$  qui circule dans les résistances du pont de base.

$$V_{BM} = R_2 \cdot I_1$$

$$V_{BM} = V_{BE} + V_{EM} \text{ et } V_{BE} \approx (0,65 \text{ V}).$$

$$I_E = V_{EM} / R_E = (R_2 \cdot I_1 - 0,65) / R_E$$

Mais comme  $I_B \ll I_C$

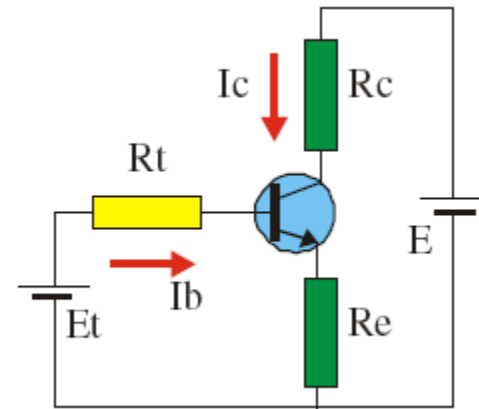
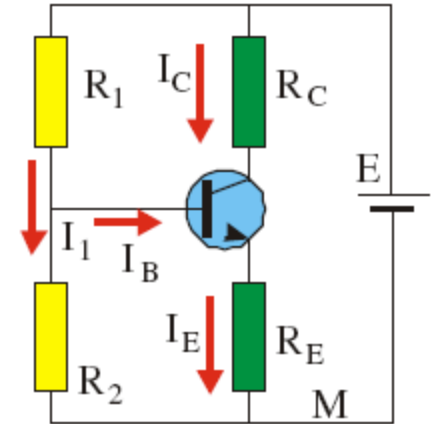
on a :  $I_C \approx I_E$

La valeur de  $I_C$  est indépendante du gain.

En imposant le potentiel de la base, on impose le potentiel de l'émetteur donc le courant d'émetteur et donc le courant de collecteur.

En remplaçant E, R1 et R2 par le générateur de Thévenin

$$\text{équivalent, on tire : } E_T = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad ; \quad R_T = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$



$$\text{Soit : } V_{BM} = E_T - R_T \cdot I_B$$

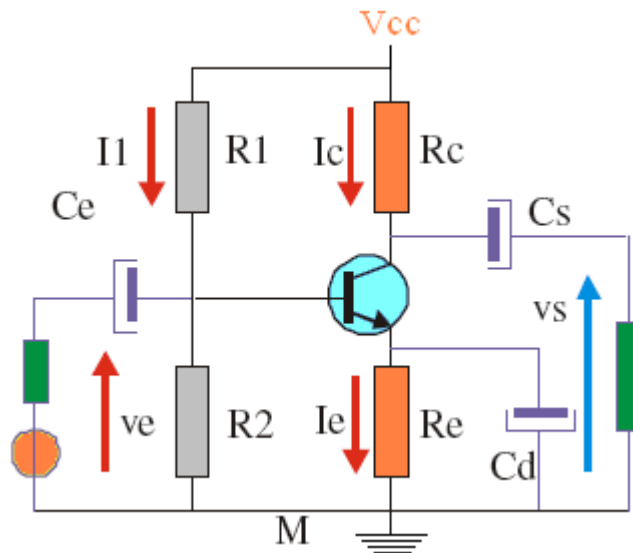
$$\text{Si } I_B \ll I_1 \text{ alors } V_{BM} = E_T$$

# Les transistors bipolaires

## Montage Emmeteur Commun

Le transistor est placé, par la polarisation, dans une zone où ses caractéristiques sont linéaires ( $I_{B_F}$ ,  $V_{BE_F}$ ,  $I_{C_F}$  et  $V_{CE_F}$ ). On applique sur sa base un signal variable qui va provoquer des variations  $i_B$  du courant base  $I_{B_F}$ . Ces variations sont amplifiées par le transistor et son courant de sortie  $I_C$  présente des variations  $i_C$  par rapport à la valeur au repos  $I_{C_F}$ . Le générateur continu E permet la polarisation. C'est aussi lui qui fournira l'énergie nécessaire à l'amplification du signal.

Le montage adéquat est celui qui utilise une polarisation par pont de base et une résistance d'émetteur.





# Les transistors bipolaires

## Montage Emmeteur Commun

CE et CS sont des *condensateurs de liaison*. Leur rôle est de permettre le passage des signaux d'entrée et de sortie sans que les potentiels continus présents sur la base et le collecteur du transistor influent sur le fonctionnement du générateur et de l'étage suivant. Leur impédance infinie en continu doit être très faible en régime variable. On utilise des condensateurs polarisés de forte valeur ( $> 50\mu\text{F}$ ) pour que leurs impédances restent très faibles même pour les basses fréquences.

La résistance d'émetteur  $R_E$  est nécessaire pour polariser correctement le transistor, mais sa présence diminue beaucoup le gain en régime variable. On place, en parallèle à cette résistance, un condensateur de forte valeur (CD) qui se comporte comme un court-circuit en alternatif et comme une impédance infinie en continu. CD est un *condensateur de découplage*. Ce montage est nommé:

« *émetteur commun découplé* ».

# Les transistors bipolaires

## Montage Emmeteur Commun

La tension de repos entre le collecteur et l'émetteur est choisie pour obtenir  $V_{CE_F} = V_{cc}/2$ . Ce choix sera justifié ultérieurement. Les valeurs des résistances du montage sont calculées pour obtenir le point de fonctionnement choisi. La valeur du courant de collecteur  $I_{C_F}$  est choisie en fonction de l'application envisagée (et des étages qui peuvent suivre).

Pour la droite de charge, on a :  $V_{CE} = V_{cc} - R_C.I_C + R_E.I_E$ .

Comme  $I_B \ll I_C$ , cette relation s'écrit :

$$V_{CE} = V_{cc} - (R_C + R_E).I_C$$