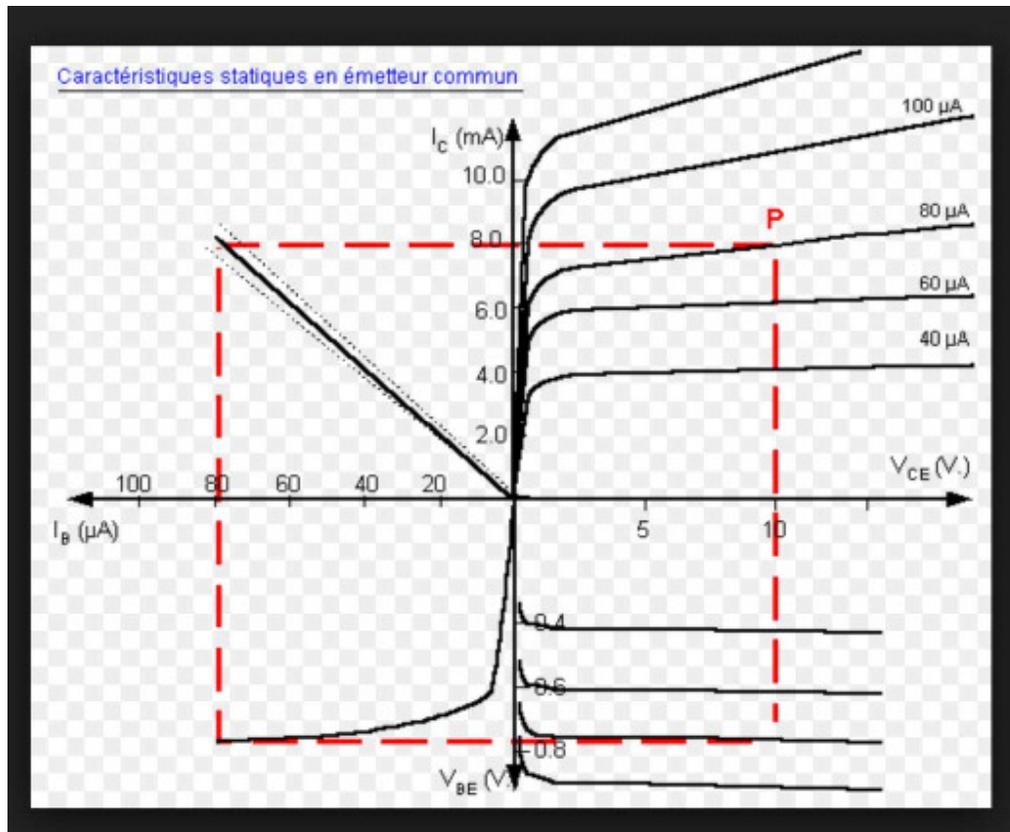


Chap 4: TRANSISTOR BIPOLAIRE EN REGIME STATIQUE

1 *Fonctionnement en statique (en émetteur commun)*

- Le transistor qui est un composant à trois bornes est utilisé en tant que quadripôle amplificateur.
 - Dans la plupart des applications , une de ses des bornes est commune à l'entrée et à la sortie.
 - On a donc trois possibilités de montages de transistor le montage émetteur commun, le montage base commune et le montage collecteur Commun
 - L'étude sera abordée dans un premier temps en courant continu : c'est le régime statique, ou de polarisation.
-
- Parmi les trois montages fondamentaux, le montage dit en émetteur commun est de loin le plus utilisé.
 - Avec cette configuration, les grandeurs d'entrée sont le courant de base I_B et le potentiel de celle-ci par rapport à celui de l'émetteur V_{BE} . Les variables de sortie sont le courant collecteur I_C et le potentiel entre le collecteur et l'émetteur V_{CE} .

1.1 Courbes caractéristiques d'un transistor



Réseau de caractéristiques d'un transistor bipolaire NPN.

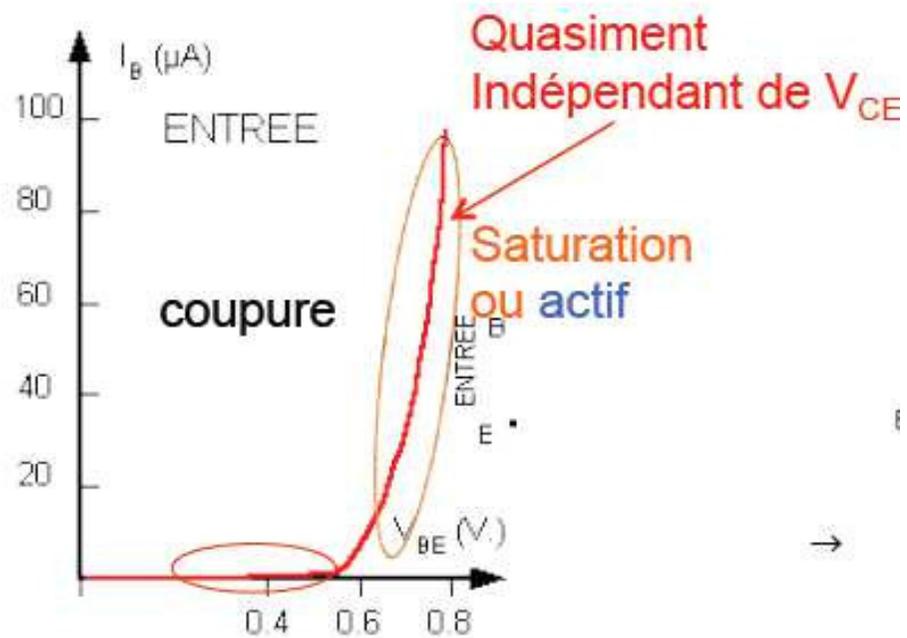
➤ Caractéristique d'entrée $I_B = f(V_{BE})$ à $U_{CE} = \text{Cte}$

Dès que la tension entre collecteur et émetteur dépasse 0,7 volt, la jonction base-collecteur devient polarisée en inverse et le transistor est en fonctionnement normal.

La caractéristique d'entrée est une caractéristique de diode en direct à allure exponentielle.

$$I_B = I_S \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) \approx I_S \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} \right)$$

Le réseau d'entrée $I_B = f(V_{BE})$ se réduit dans la pratique à une seule courbe, toutes les courbes étant confondues.



Jnct BE bloquante Jnct BE passante

➤ Caractéristiques de transfert $I_C = f(I_B)$ à $V_{CE} = \text{Cte}$

La caractéristique $I_C = f(I_B)$ ne passe pas par l'origine, mais par I_{CE0} , qui est très proche de l'origine.

Elle présente une légère courbure pour des courants du collecteur très faibles et tend vers une droite dès que le courant I_C dépasse quelques centaines de mA.

En réalité, le gain en courant β_{CC} croit légèrement avec la tension V_{CE} car la largeur de la zone de déplétion de la jonction base - collecteur augmente aussi.

D'autre part, le gain en courant augmente avec le courant I_C avant de baisser de nouveau pour des courants de collecteur assez élevés.

➤ Caractéristiques de sortie $I_C = f(V_{CE})$ à $I_B = \text{Cte}$

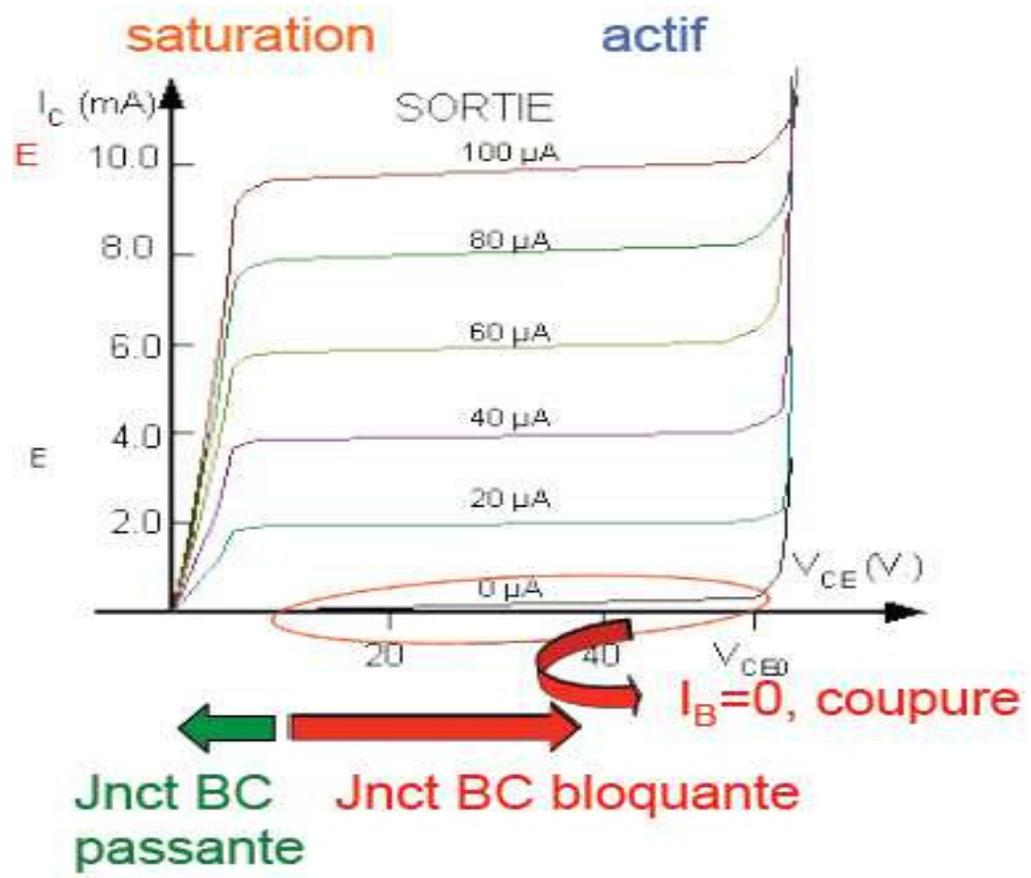
Dès que la tension V_{CE} devient suffisamment positive pour que les deux jonctions soient normalement polarisées, on a :

$$I_C = \beta_{CC} I_B + I_{CE0}$$

Les caractéristiques $I_C = f(V_{CE})$ sont limitées par deux zones proches des axes qu'il n'est pas possible d'utiliser

- ✓ une zone (ou caractéristique) de saturation qui est proche de l'axe des courants I_C . Cette zone correspond au cas où les deux jonctions sont polarisées en direct ;
- ✓ une zone (ou caractéristique) de blocage qui est proche de l'axe des tensions V_{CE} et obtenue pour un courant de base nul I_B . Il n'est pas possible d'avoir I_B négatif à cause de la jonction base émetteur.

Dans ces deux zones, on sort du régime de fonctionnement normal du transistor et il faut toujours vérifier (sauf dans le cas de la commutation), que l'on est éloigné de ces régions dans le montage étudié.



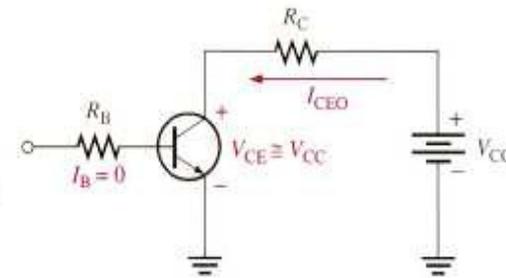
➤ Caractéristiques $V_{BE} = f(V_{CE})$ à $I_B = \text{Cte}$

Les caractéristiques $V_{BE} = f(V_{CE})$ à $I_B = \text{Cte}$ présentent peu d'intérêt et se présentent sous forme de droites pratiquement horizontales. La tension base-émetteur ne dépend pratiquement pas de la tension entre collecteur et émetteur dès que cette tension dépasse 1 volt.

1.2 Blocage et saturation d un transistor

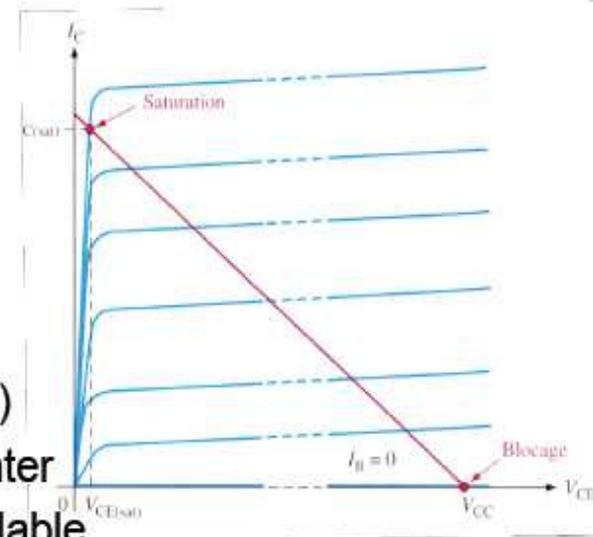
■ Le Blocage

- Le transistor est en blocage quand $I_B = 0$
- Il n'existe qu'un courant de fuite
- Ce courant de fuite est causé par l'effet thermique
- Ce courant de fuite est en général négligé
- $V_{CE} \sim V_{CC}$
- Les deux jctns sont en polarisation inverse



■ La saturation

- Lorsque jctn B-E passe en polarisation directe et que le courant $I_B \nearrow$, $I_C \nearrow$: $I_C = \beta_{CC} I_B$
- $V_{CE} \searrow$ car la tension aux bornes de $R_C \nearrow$
- Lorsque V_{CE} atteint sa valeur de saturation ($V_{CE(sat)}$) la jctn B-C passe en pol. directe et I_C cesse d'augmenter
- Au point de saturation $I_C = \beta_{CC} I_B$ n'est plus valable
- $V_{CE(sat)}$ est de quelques dixièmes de volt pour le Si



- La région de la droite située entre le point de blocage et de saturation est appelée *région linéaire*.
- Idéalement dans cette région, le signal de sortie est une reproduction linéaire de l'entrée

1.3 LIMITE DE FONCTIONNEMENT D UN TRANSISTOR

Le transistor étant constitué de deux jonctions, il est possible de déterminer les limites d'utilisation de celui-ci à partir de celle de la diode.

C'est-à-dire le courant maximum dans une jonction ainsi que la tension inverse maximale qu'on peut utiliser sans avoir de claquage.

➤ Tensions de claquage

Nous avons vu l'existence des courants de fuites I_{CE0} (en base commune et émetteur ouvert) et I_{CB0} (en émetteur commun et base ouverte).

Si on augmente exagérément les tensions, les courants de fuites augmentent par effet avalanche et peuvent être la cause de la destruction de transistor par échauffement.

Ces tensions à ne pas dépasser sont données par le constructeur et sont généralement notées BV_{CE0} et BV_{CB0} (BV est l'abréviation de *Breakdown Voltage*).

➤ Courant maximum

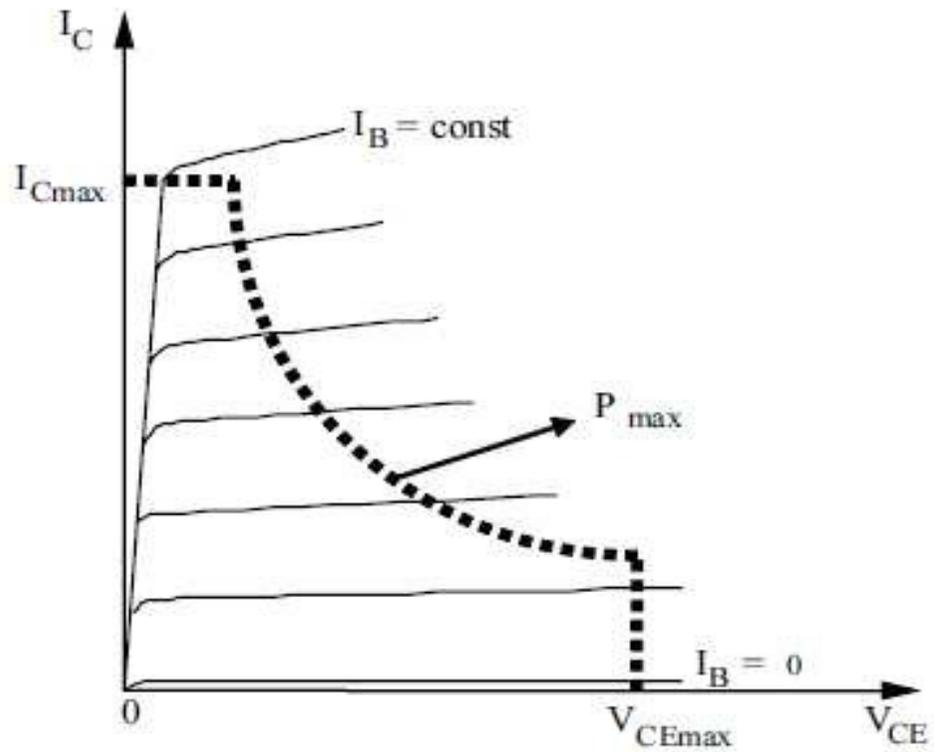
Le courant maximum du collecteur doit rester inférieur à une certaine valeur I_{cmax} sous peine de destruction du transistor.

➤ Puissance maximum

La puissance dissipée par un transistor au repos est donnée par la formule suivante :

$$P = V_{BE} I_B + V_{CE} I_C \approx V_{CE} I_C < P_{\max}$$

Cette puissance est limitée à cause de l'échauffement du transistor. La température maximale de la jonction ne doit pas dépasser 200 °C dans le cas du silicium.



Zone de fonctionnement d'un transistor.

2 Polarisation d'un transistor NPN

2.1 Définition

Polariser un transistor c'est lui fixer un ensemble de valeurs caractérisant son état de fonctionnement. Or l'état d'un transistor sera défini par la connaissance de trois courants I_C , I_E et I_B d'une part, et de trois tensions V_{CE} , V_{CB} et V_{BE} d'autre part.

Si le point opérationnel (appelé point Q) n'est pas bien choisi, le transistor peut passer en saturation ou en blocage → distorsion du signal de sortie.

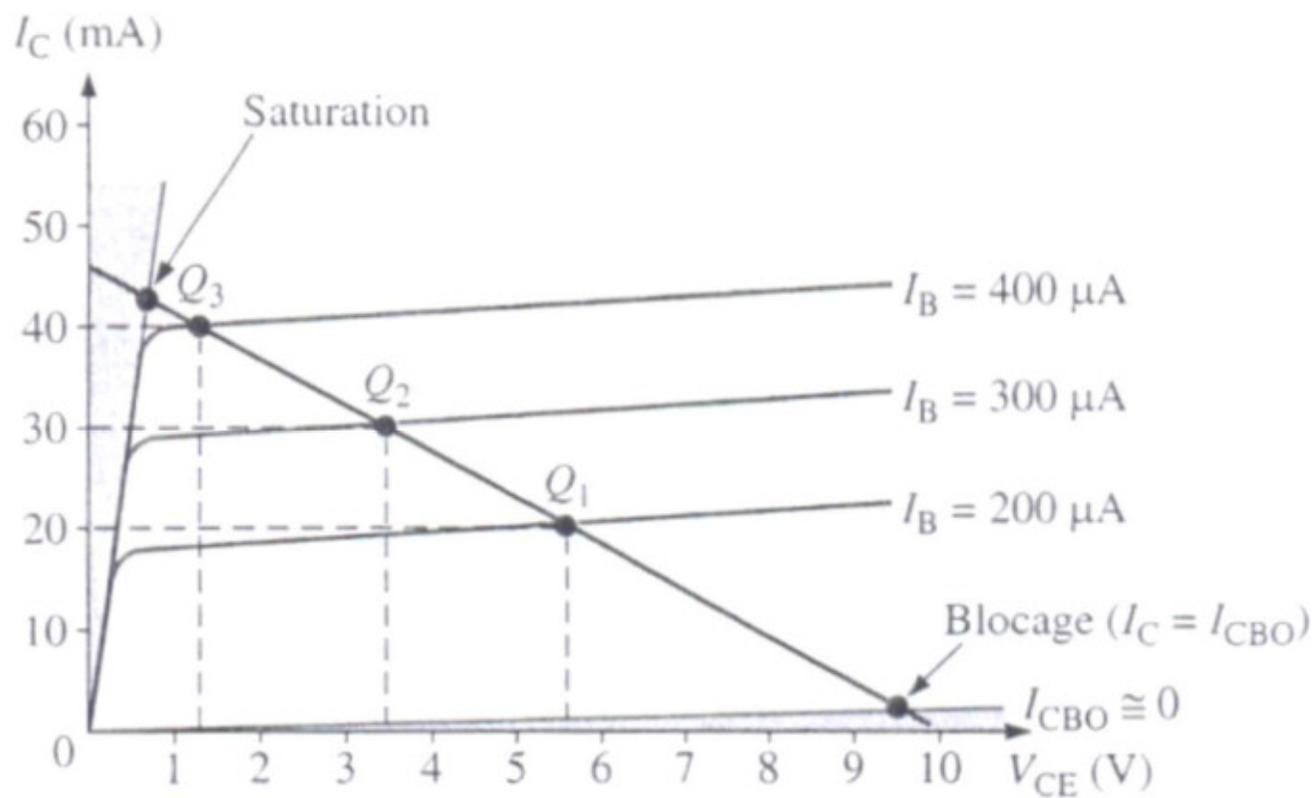
Q est aussi appelé le point de fonctionnement ou le point de repos

Q vient de l'anglais quiescent point, également appelé bias point

Un amplificateur est un dispositif qui augmente l'amplitude d'un signal et est un dispositif linéaire. Le principe consiste à appliquer un petit signal alternatif à l'entrée d'un transistor et à recueillir un plus grand signal alternatif de même fréquence. Les amplificateurs sont essentiels pour les récepteurs radio, les téléviseurs et les autres appareillages de communication.

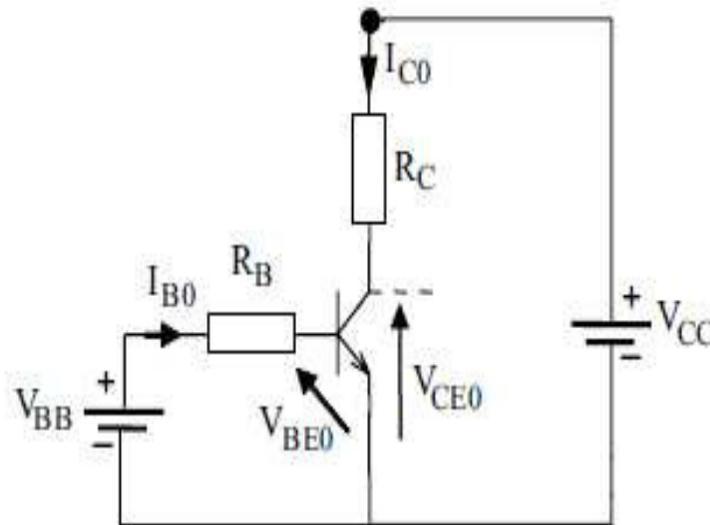
Avant d'appliquer un signal alternatif à un transistor, il faut déterminer un point Q de fonctionnement près du point milieu de la droite de charge statique. Le signal alternatif d'entrée produit des fluctuations au dessus et au-dessous de ce point Q.

Pour que le dispositif demeure linéaire, la diode émetteur doit rester en polarisation directe et la diode collecteur doit rester en polarisation inverse. Autrement dit, les fluctuations du courant et de la tension ne doivent pas saturer le transistor ni le bloquer.



2.2 Schéma de principe de la polarisation

On utilise la notation avec des indices « 0 » pour préciser qu'il s'agit bien du point de repos. Pour cela on doit connaître les quatre variables citées précédemment : il s'agit d'une part des deux courants I_{C0} et I_{B0} et d'autre part des deux tensions V_{CE0} et V_{BE0} .



Le transistor nous permet de disposer de deux équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_C = f(V_{CE}, I_B) \\ V_{BE} = f(V_{CE}, I_B) \end{array} \right.$$

Les deux autres équations seront données par le circuit d'entrée et par le circuit de sortie :

L'équation donnée par le circuit d'entrée est l'équation d'une droite appelée **la droite d'attaque statique du transistor**.

$$V_{BB} = R_B I_{B0} + V_{BE0}$$

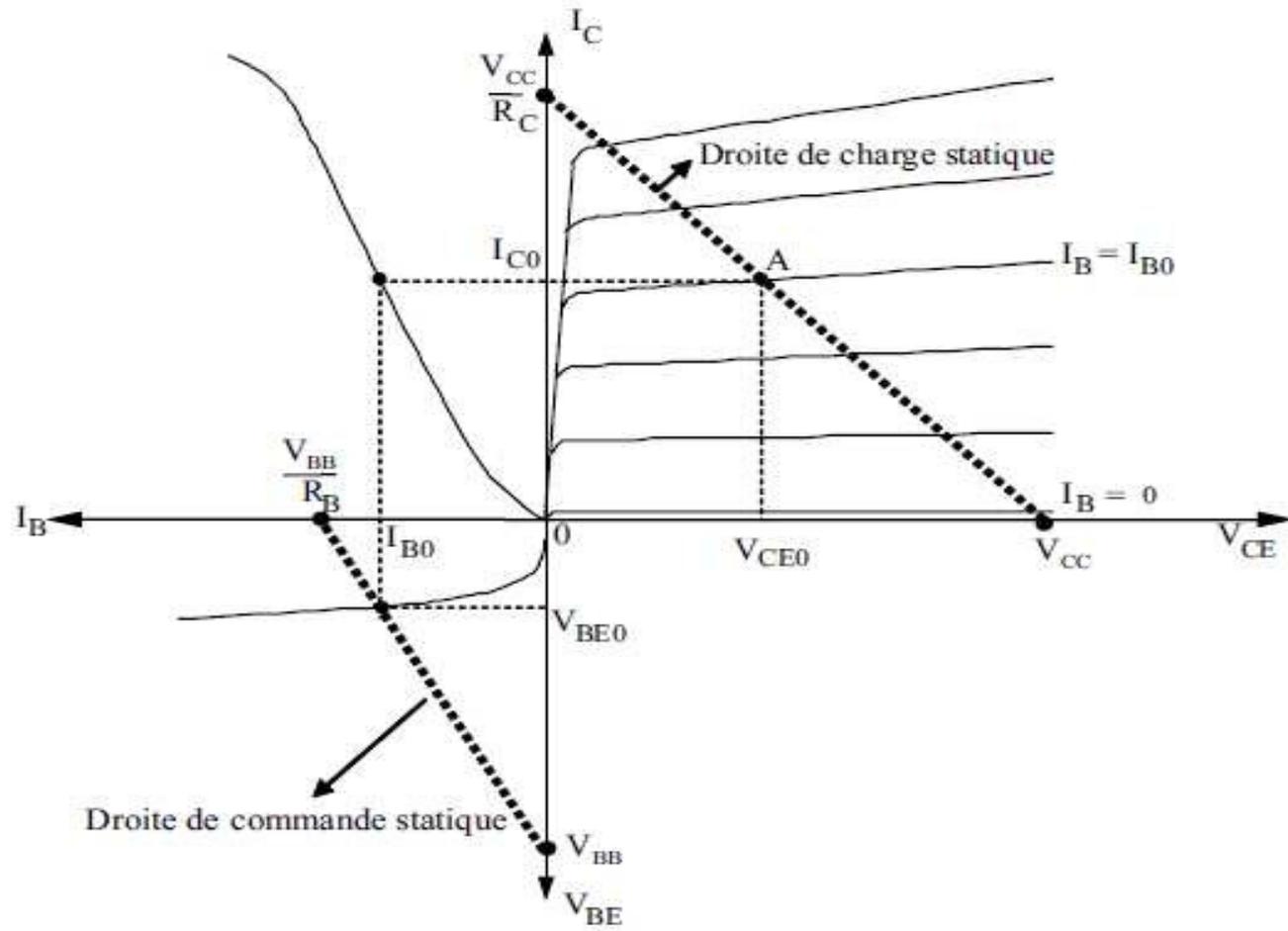
Cette droite permet de fixer le courant I_{B0} du transistor.

Le point de fonctionnement à l'entrée (I_{B0} , V_{BE0}) doit satisfaire à la fois l'équation du transistor et l'équation du circuit d'entrée ce qui nous permet de placer ce point à l'intersection des deux caractéristiques.

Le circuit de sortie fournit aussi l'équation d'une droite appelée **la droite de charge statique** :

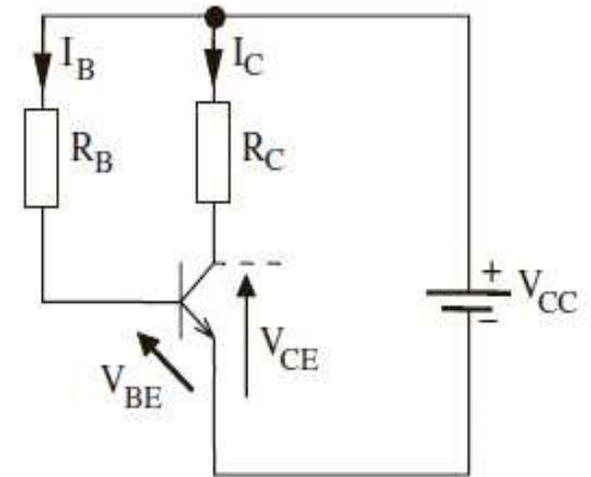
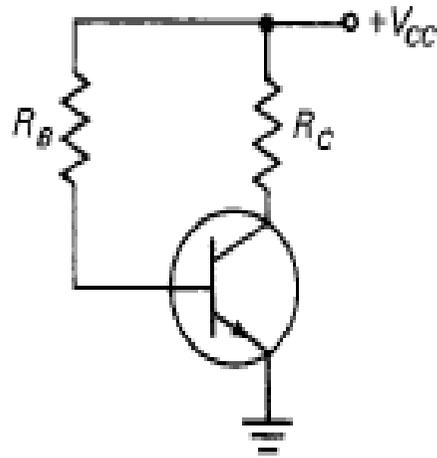
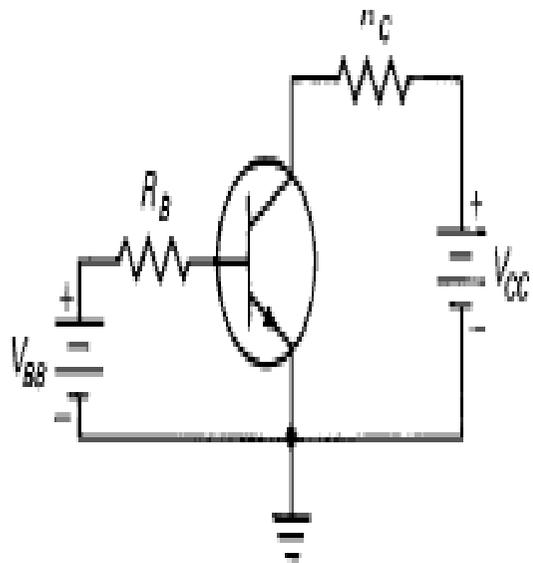
$$V_{CC} = R_C I_{C0} + V_{CE0}$$

L'intersection de cette droite avec la caractéristique $I_C = f(V_{CE})$ pour le courant I_{B0} déterminé déjà par le circuit d'entrée, donne le point de fonctionnement en sortie (I_{C0}, V_{CE0}).



3 Circuits de polarisation

3.1 Polarisation par résistance de base



Équations des mailles d'entrée et de sortie :

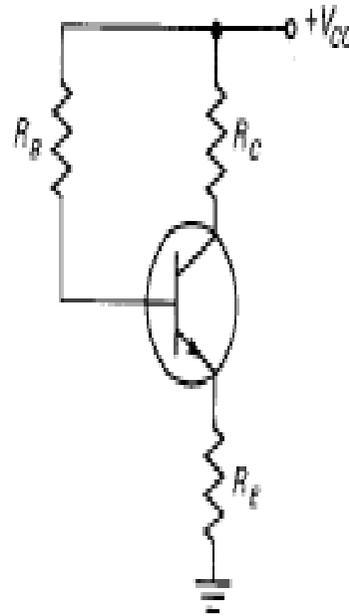
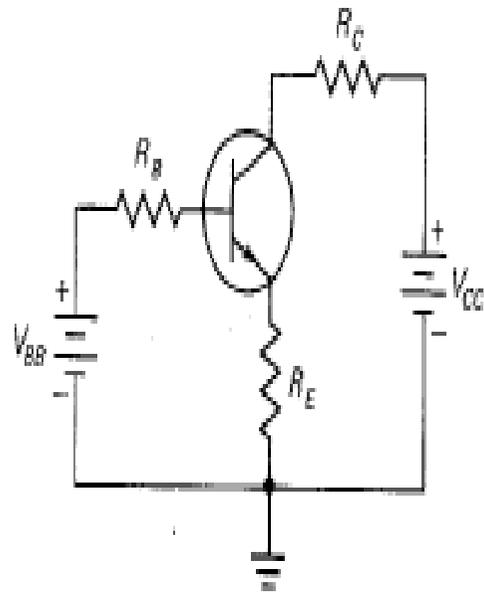
$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} ; \quad V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$I_{C0} \approx \beta I_{B0} = \beta \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_B}$$

Les dispersions de β sont grandes (par exemple β varie entre 50 et 300 pour le transistor (2N2222)). En plus, β dépend de la température. Le point de fonctionnement est donc instable ce qui représente le principal inconvénient de ce montage.

On utilise surtout la polarisation de base dans les circuits numériques. Dans ces circuits, le transistor commute entre le blocage et la saturation. Dans ce cas, on surmonte les variations de β par la saturation .

3.2 Polarisation par réaction d'émetteur.



L'addition des tensions le long de la maille de la base donne

$$V_{BE} + I_E R_E - V_{CC} + I_B R_B = 0$$

La maille du collecteur nous donne

$$V_{CE} + I_E R_E - V_{CC} + I_C R_C = 0$$

On voit maintenant que l'ordonnée à l'origine de la droite de charge représente un courant de saturation égal à $V_{CC}/(R_C + R_E)$

Effet de β

Or $I_E \cong I_C$ et $I_B = I_C / \beta_{CC}$; donc l'équation ci-dessus devient :
$$I_C \cong \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta_{CC}}}$$

On utilise la polarisation par réaction d'émetteur pour masquer la variation de β .

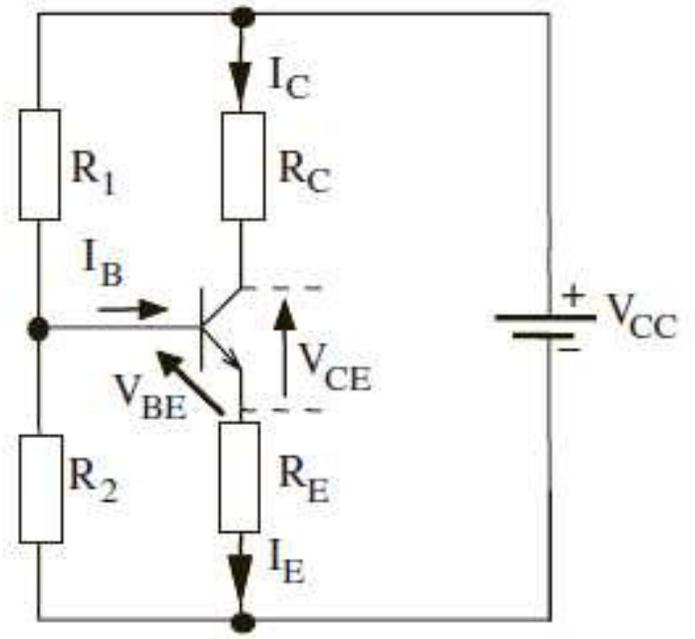
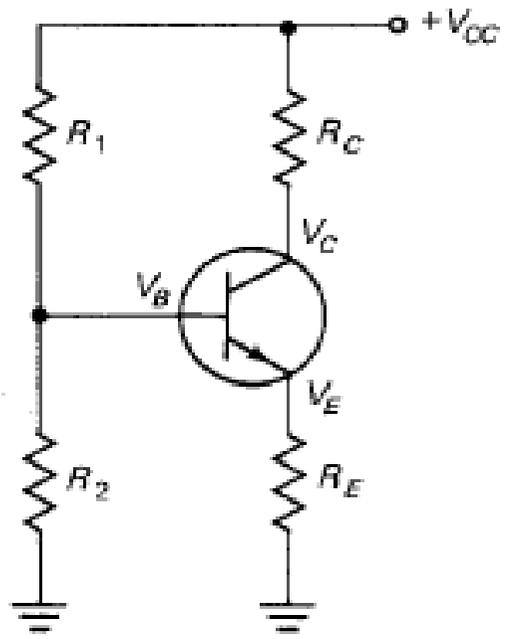
Pour cela, prendre la résistance R_E beaucoup plus grande que R_B / β .

Mais pratiquement, si l'on prend la résistance R_E suffisamment grande pour masquer l'effet de β , on sature le transistor.

Donc, la polarisation par réaction d'émetteur est presque aussi sensible à la variation de β que la polarisation de base.

La polarisation par réaction d'émetteur n'est donc pas la forme de polarisation préférée, aussi éviterons-nous de l'utiliser.

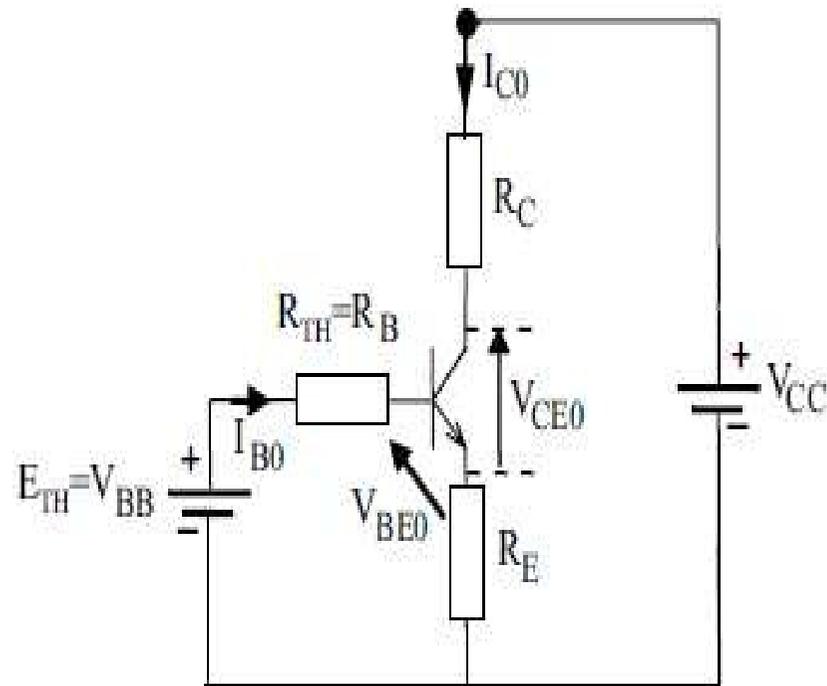
3.3 Polarisation par résistance de base



On utilise le théorème de Thévenin appliqué au pont diviseur de tension constitué de R_1 , de R_2 et de la tension d'alimentation continue V_{CC} :

On note :
$$E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = k V_{CC} \quad \text{avec : } k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Et :
$$R_{TH} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



Transformation par Thévenin de la polarisation par pont résistif et résistance d'émetteur.

Les équations des mailles sont :

$$E_{TH} = I_{BO}R_{TH} + V_{BE0} + I_{EO}R_E \quad \text{et} \quad V_{CE0} = V_{CC} - I_{CO}R_C - I_{EO}R_E$$

On utilise les simplifications suivantes :

$$I_{BO} \approx \frac{I_{CO}}{\beta}, \quad I_{EO} = I_{CO} + I_{CBO} \approx I_{CO}$$

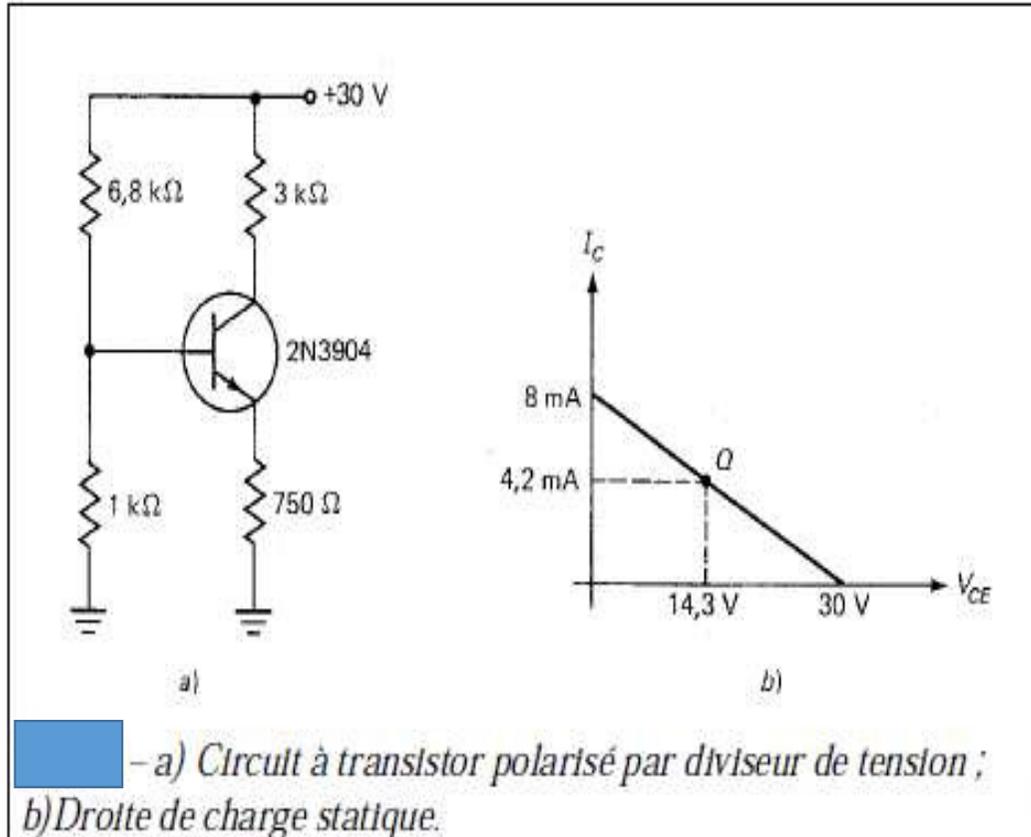
$$\text{Il vient : } I_{CO} \approx \beta \frac{V_{CC} - V_{BE0}}{R_{TH} + \beta R_E} \quad \text{et} \quad V_{CE0} \approx V_{CC} - (R_C + R_E) I_{CO}$$

Contrairement à la polarisation par une seule résistance de base, pour cette polarisation, le courant I_{C0} dépend d'autant moins de β et de ses variations que la résistance équivalente R_{TH} est petite par rapport à βR_E . Il en est de même pour la tension V_{CE0} qui dépend du courant I_{C0} .

Pour stabiliser le point de fonctionnement, on prend :

$$R_{TH} \ll \beta R_E$$

Exemple



Cette valeur représente l'ordonnée à l'origine de la droite de charge statique.

La tension de Thévenin produite par le diviseur soutenu, de tension égale :

$$V_{TH} = \frac{1000}{6800 + 1000} 30 \text{ V} = 3,85 \text{ V}$$

Le courant émetteur égale :

$$I_E \cong \frac{3,85 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{750 \Omega} = 4,2 \text{ mA} \cong I_C$$

La tension collecteur égale :

$$V_C = 30 \text{ V} - (4,2 \text{ mA}) (3 \text{ k}\Omega) = 17,4 \text{ V}$$

La tension émetteur égale :

$$V_E = 3,85 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,15 \text{ V}$$

D'où la tension collecteur-émetteur égale :

$$V_{CE} = V_C - V_E = 17,4 \text{ V} - 3,15 \text{ V} = 14,3 \text{ V}$$

La figure b représente la droite de charge statique et le point Q.

Visiblement, le point Q est près du point milieu de la droite de charge statique.