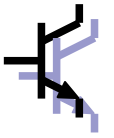
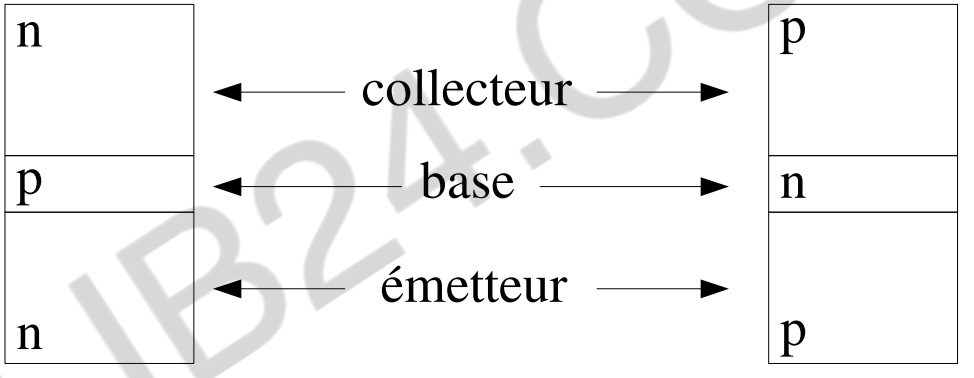
TRANSISTOR BIPOLAIRE

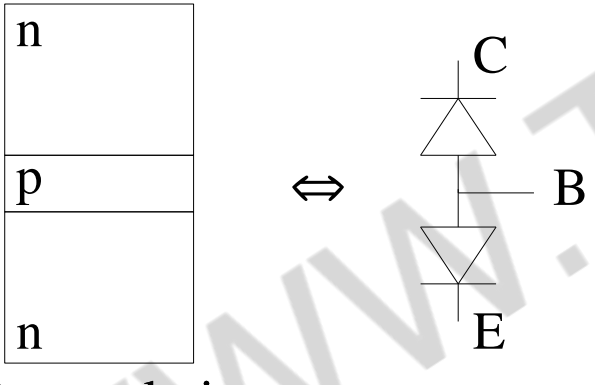


I – Introduction

I.1 – Constitution

Le transistor bipolaire est réalisé dans un monocristal comportant trois zones de dopage différentes.





On reconnaît deux jonctions PN que l'on peut considérer comme deux diodes lorsque le transistor n'est pas polarisé.

Pour polariser correctement un transistor, il faut que :

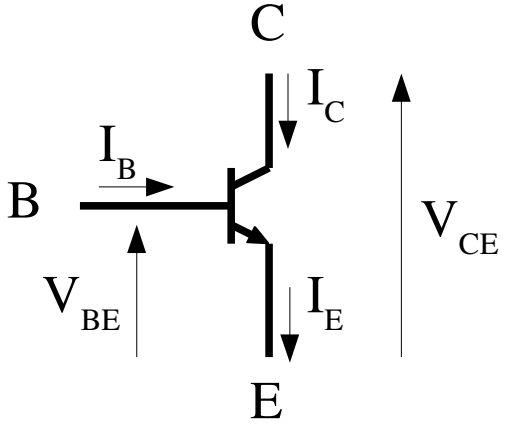
- la jonction entre B et E soit polarisée dans le sens direct,
- la jonction entre C et B soit polarisée dans le sens inverse.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

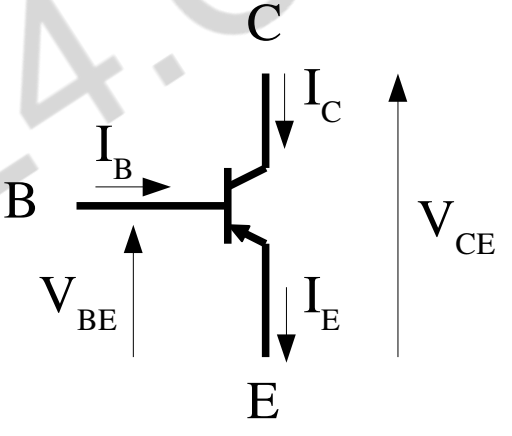
I.2 – Symboles, tensions et courants

NPN



L'émetteur est repéré par la flèche qui symbolise le sens réel du courant

PNP



grandeurs positives

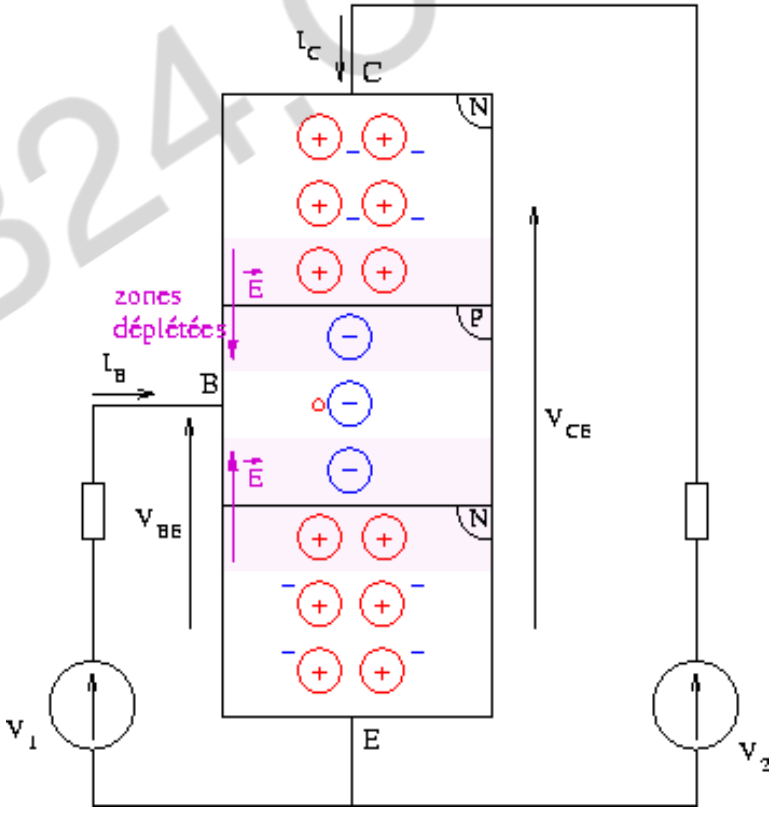
grandeurs négatives

Loi de Kirchhoff appliquée au transistor bipolaire : $\mathbf{I_E = I_C + I_B}$

WWW.TALIB24.COM

I.3 – Le transistor NPN polarisé

Remarques :
- la base est faiblement dopée
- la base est très fine



- $0 < V_1 < V_{seuil}$ de la jonction PN

La jonction BE est polarisée en directe mais n'est pas passante ⇒ $I_B = 0$.

Il faut $V_2 > V_1$ pour polariser correctement le transistor.

⇒ la jonction BC est polarisée en inverse,

⇒ I_C = courant inverse = $I_{CEo} \approx 0$.

WWW.TALIB24.COM

I.3 – Le transistor NPN polarisé

- $V_1 > V_{seuil}$ de la jonction PN

La jonction BE est passante

$$\Rightarrow I_B > 0, \text{ et } V_{BE} \approx 0{,}6 \text{ V}.$$

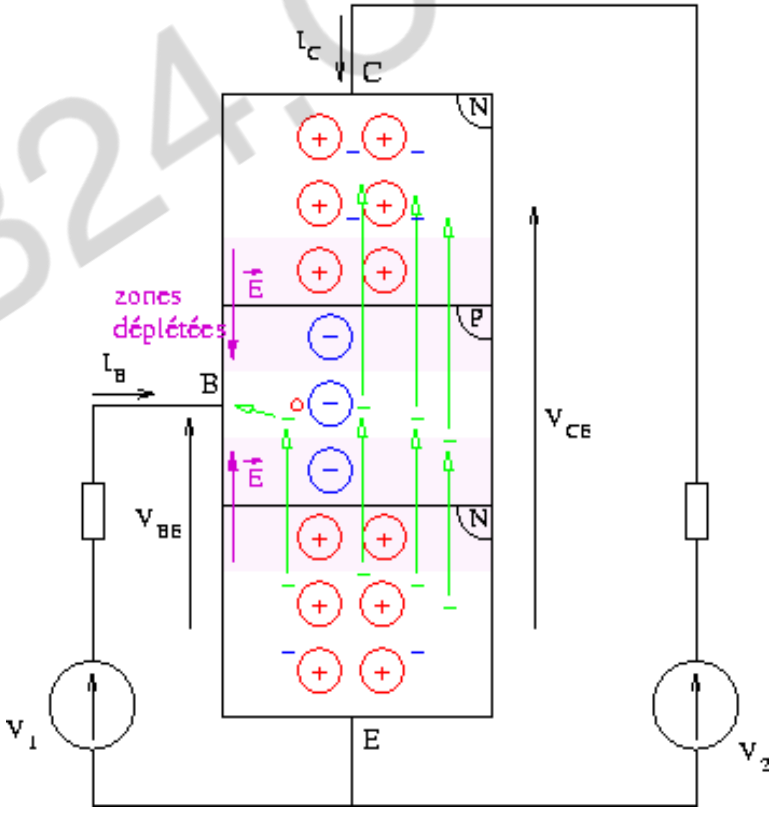
Ce courant est constitué d'un flux d'électrons allant de l'émetteur vers la base.

Les électrons arrivant dans la base peuvent rester libres longtemps avant d'être piégés.

La base étant fine, ils arrivent à la 2ème jonction et passent dans le collecteur.

La majorité des électrons injectés par l'émetteur traversent la base et se retrouvent dans le collecteur.

Remarques :
- la base est faiblement dopée
- la base est très fine



Il en résulte un courant positif I_C de valeur bien supérieure à I_B.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

Lorsque le transistor est polarisé correctement, on peut définir plusieurs rapports de courants statiques (courants continus), notamment :

- alpha statique

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_C}{I_C + I_B} \approx 1 \; car \; I_B \ll I_C$$

$$\alpha_{DC} > \begin{array}{l} 0{,}99 \; transitors \; classiques \\ 0{,}95 \; transistors \; de \; puissance \end{array}$$

- bêta statique

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} \qquad \begin{array}{l} 100 < \beta_{DC} < 300 \; transitors \; classiques \\ 20 < \beta_{DC} < 100 \; transistors \; de \; puissance \end{array}$$

β_{DC} est aussi appelé gain en courant du transistor.

Ce gain est à l'origine de nombreuses applications

WWW.TALIB24.COM

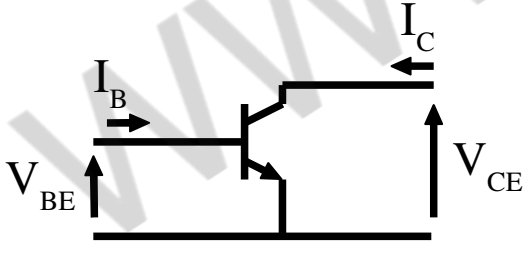
I.4 – Le transistor considéré comme un quadripôle

Le transistor ayant trois électrodes, l'une d'elles sera commune à l'entrée et à la sortie. Il en résulte trois montages principaux.

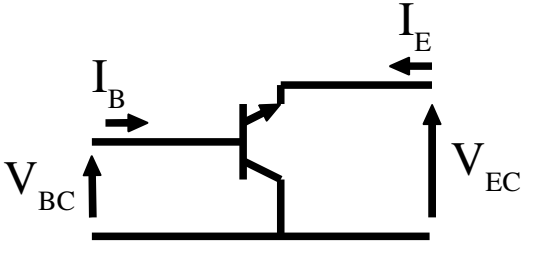
Montage	entrée	sortie
émetteur commun	base	collecteur
collecteur commun	base	émetteur
base commune	émetteur	collecteur

Les montages correspondant à une permutation entrée-sortie sont sans intérêt car ils ne permettent pas de gain.

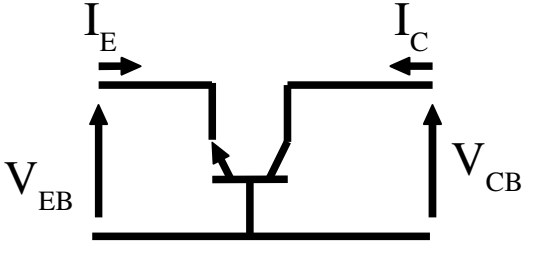
EC



CC



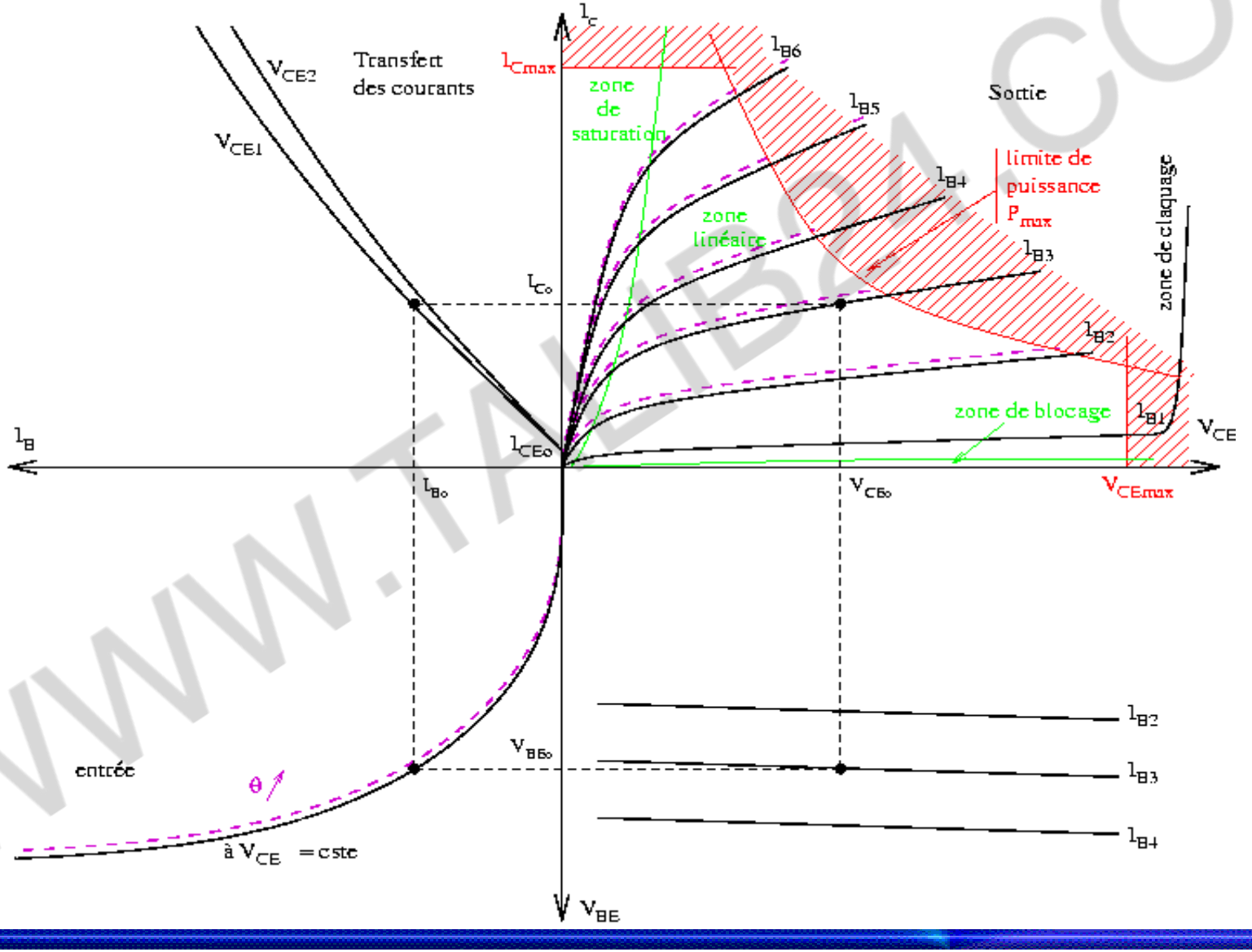
BC



WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

I.5 – Réseau de caractéristiques (montage émetteur commun)



WWW.TAHIBA.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

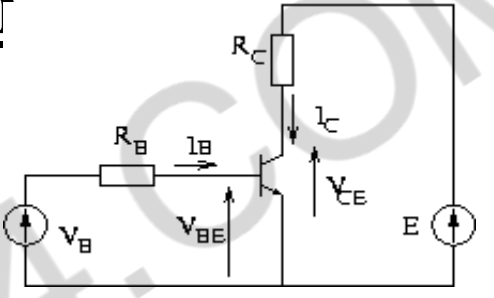
Remarques :

- NPN → grandeurs positives ; PNP → grandeurs négatives.
- V_{BE} ne dépend pratiquement pas de V_{CE} , le réseau d'entrée ne comporte qu'une seule courbe.
- I_C dépend faiblement de V_{CE} , le réseau de transfert ne comporte souvent qu'une seule courbe.
- La puissance dissipée par un transistor est limitée à P_{max}.
- Le réseau de caractéristiques est donné pour une température définie.
- Il existe une dispersion des caractéristiques pour des transistors de mêmes références.
- Ordres de grandeurs : V_{BE} : 0.2 à 0,7 V ; V_{CE} : 1 à qq 100 V ; I_C : mA à A ; I_B : µA.
- Le point de fonctionnement peut être porté sur le réseau.

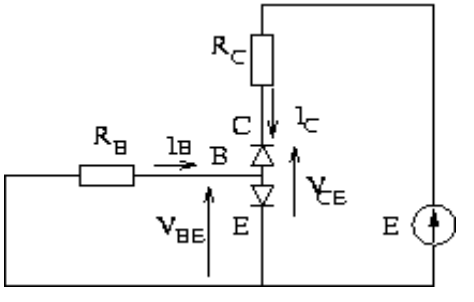
WWW.TALIB24.COM

II – Le transistor en commutation

II.1 – Région de blocage



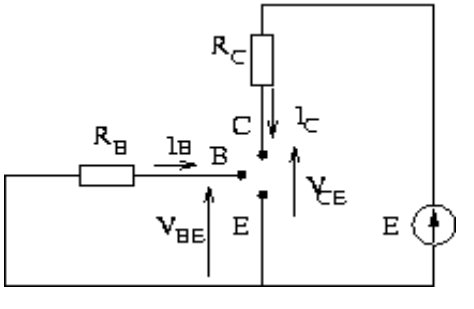
Pour $V_B = 0$, $V_{BE} = 0$ et $I_B = 0 \Rightarrow I_C = \beta I_B = 0$



La jonction CB est polarisée en inverse.

Il existe donc un faible courant de fuite I_{CEo}.

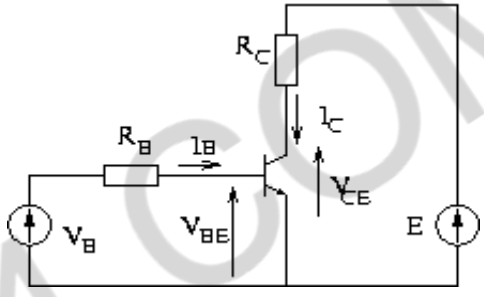
En pratique ce courant est négligé et on considère le transistor comme un circuit ouvert.



On dit que le transistor est bloqué.

WWW.TALIB24.COM

II.3 – Région de saturation



Pour $V_B > V_{seuil}$ de la jonction PN, on a :

$$V_B = R_B I_B + V_{BE} \quad \Rightarrow \quad I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B}$$

Lorsque $V_B >> V_{BE}$, on peut négliger V_{BE} , d'où : $I_B = \frac{V_B}{R_B} \Rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \frac{V_B}{R_B}$

Par ailleurs, $E = R_C I_C + V_{CE}$, d'où : $I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C} = \beta \frac{V_B}{R_B}$

Si R_B ↘, I_B ↗ donc I_C ↗ et V_{CE} ↘. Lorsque $V_{CE} = 0$, $I_C = \frac{E}{R_C} = I_{Cmax}$

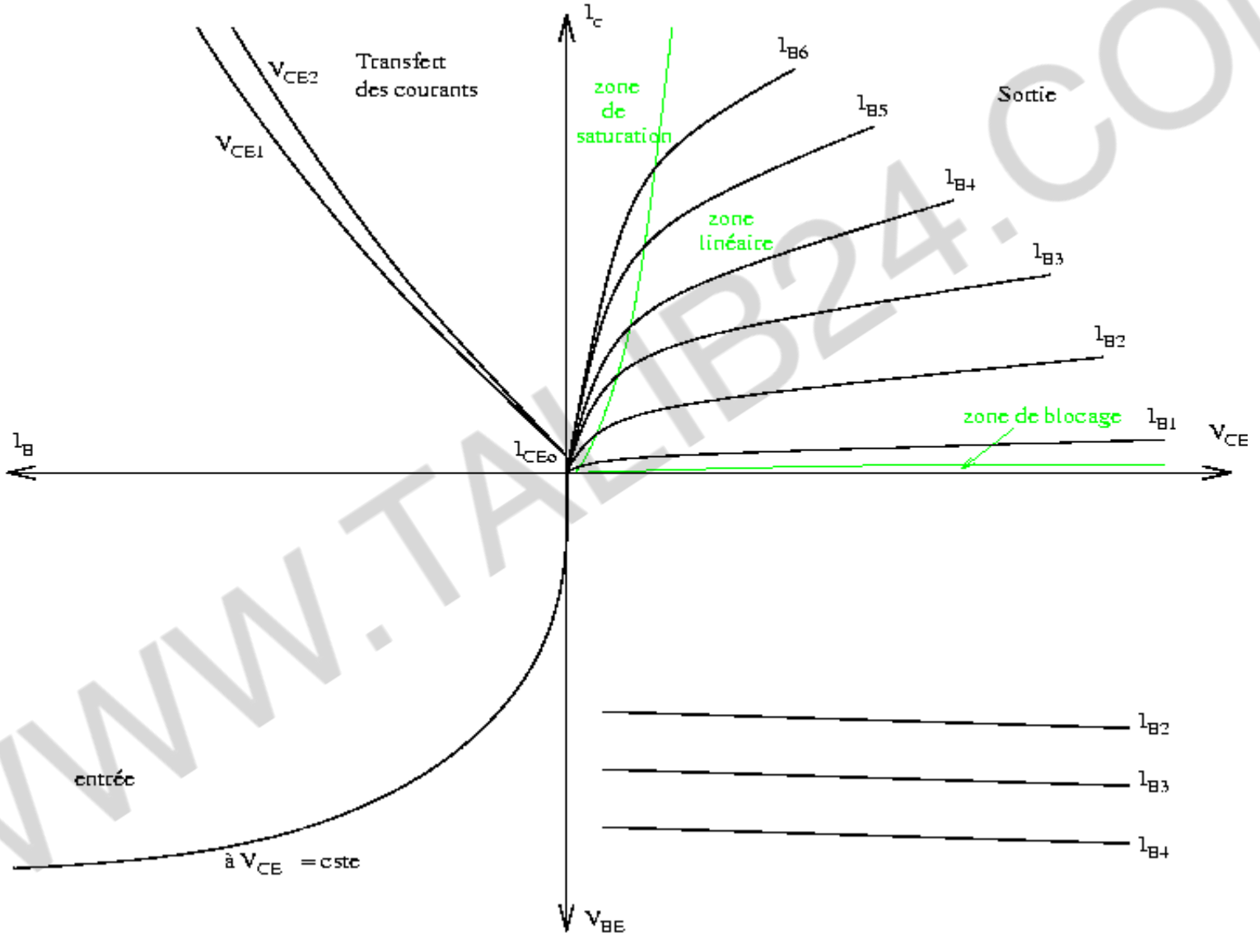
Si R_B ↘ encore, $I_C = I_{Cmax}$ mais $I_B = \frac{V_B}{R_B} > \frac{I_{Cmax}}{\beta}$ et la relation $I_C = \beta I_B$ n'est plus vérifiée.

Le transistor est saturé : $V_{CE} = V_{CEsat} = 0{,}2$ à $0{,}4$ V et $I_C \approx E / R_C$.

Si $\beta I_B >> I_C$, le transistor est saturé.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



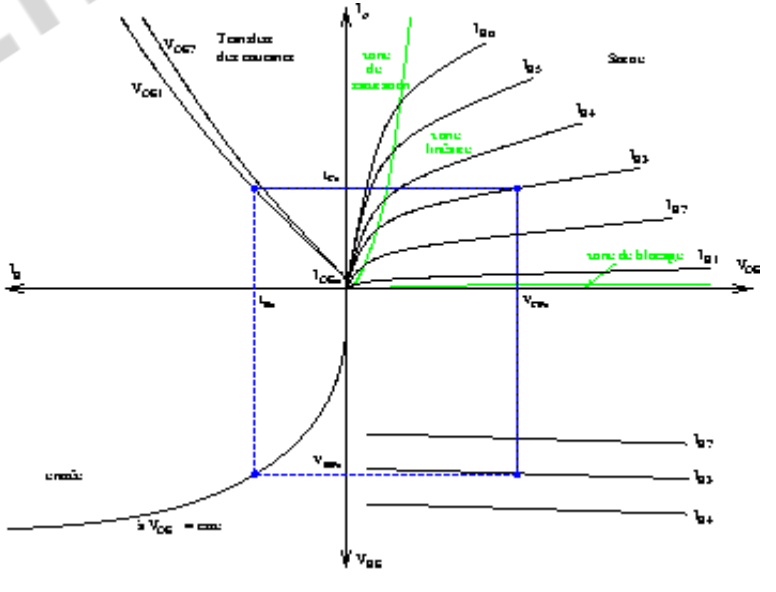
WWW.TALIB24.COM

III – Polarisation du transistor (zone linéaire)

Polariser un transistor consiste à définir son état de fonctionnement par l'adjonction de sources de tension continues et de résistances .

Cet état de conduction est caractérisé par un point dans chacun des quadrants du réseau de caractéristiques, ce point est appelé point de fonctionnement ou point de repos.

Le point de fonctionnement caractérise deux variables indépendantes du transistor : I_C et V_{CE} . Il doit être choisi dans la zone linéaire, mais en dehors des zones interdites et doit être peut sensible aux variations de température.

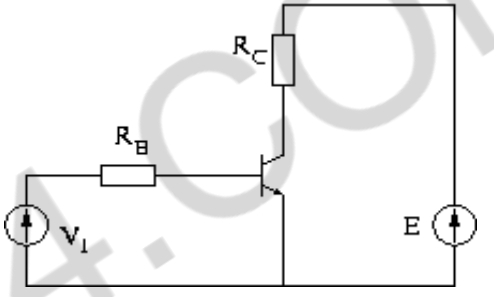


WWW.TALIB24.COM

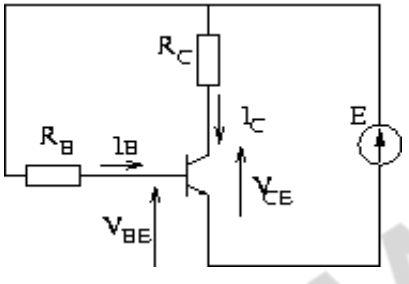
TRANSISTOR BIPOLAIRE

III.1 – Polarisation à deux sources de tension

C'est un montage peu utilisé car il nécessite deux sources.



III.2 – Polarisation à une source de tension



$$\begin{cases} E = R_B I_B + V_{BE} & (1) \\ E = R_C I_C + V_{CE} & (2) \\ I_C = \beta I_B & (3) \end{cases}$$

$$(1) \Rightarrow I_B = \frac{E - V_{BE}}{R_B} \qquad (3) \Rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \frac{E - V_{BE}}{R_B}$$

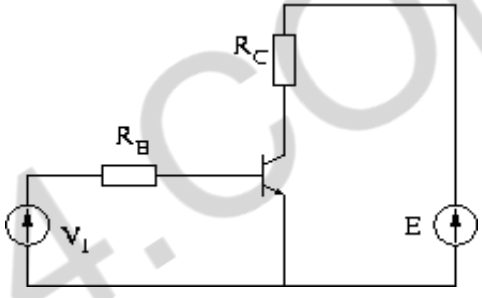
$$(2) \Rightarrow V_{CE} = E - R_C I_C = E - R_C \beta \frac{E - V_{BE}}{R_B}$$

WWW.TALIB24.COM

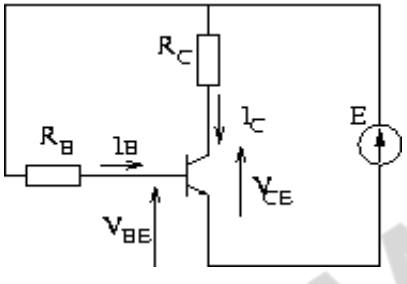
TRANSISTOR BIPOLAIRE

III.1 – Polarisation à deux sources de tension

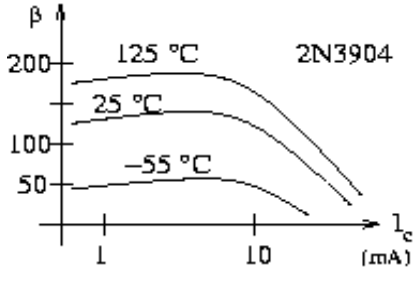
C'est un montage peu utilisé car il nécessite deux sources.



III.2 – Polarisation à une source de tension



$$\begin{cases} E = R_B I_B + V_{BE} & (1) \\ E = R_C I_C + V_{CE} & (2) \\ I_C = \beta I_B & (3) \end{cases}$$



$$(1) \Rightarrow I_B = \frac{E - V_{BE}}{R_B}$$

$$(3) \Rightarrow I_C = \beta I_B = \beta \frac{E - V_{BE}}{R_B}$$

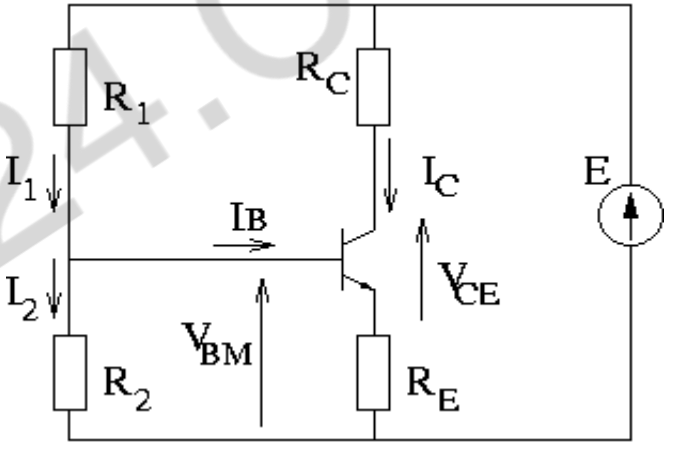
$$(2) \Rightarrow V_{CE} = E - R_C I_C = E - R_C \beta \frac{E - V_{BE}}{R_B}$$

Montage instable en température

WWW.TALIB24.COM

III.3 – Polarisation par pont et résistance d'émetteur

III.3.1 – Détermination approchée du point de fonctionnement



On considère I_1 , $I_2 >> I_B \Rightarrow I_1 = I_2 >> I_B$.

On en déduit : $$V_{BM} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

On a $V_{BM} = V_{BE} + R_E I_E = V_{BE} + R_E (I_C + I_B)$

Si β est grand, $I_C >> I_B$ et $V_{BM} \approx V_{BE} + R_E I_C$

d'où : $$I_C = \frac{V_{BM} - V_{BE}}{R_E} = \frac{E \cdot R_2}{(R_1 + R_2) R_E} - \frac{V_{BE}}{R_E}$$

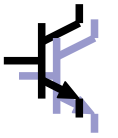
On a $E = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E = R_C I_C + V_{CE} + R_E (I_C + I_B) \approx R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C$

et on en déduit $$V_{CE} = E - (R_C + R_E) I_C = E - E \frac{(R_C + R_E) R_2}{(R_1 + R_2) R_E} - \frac{(R_C + R_E) V_{BE}}{R_E}$$

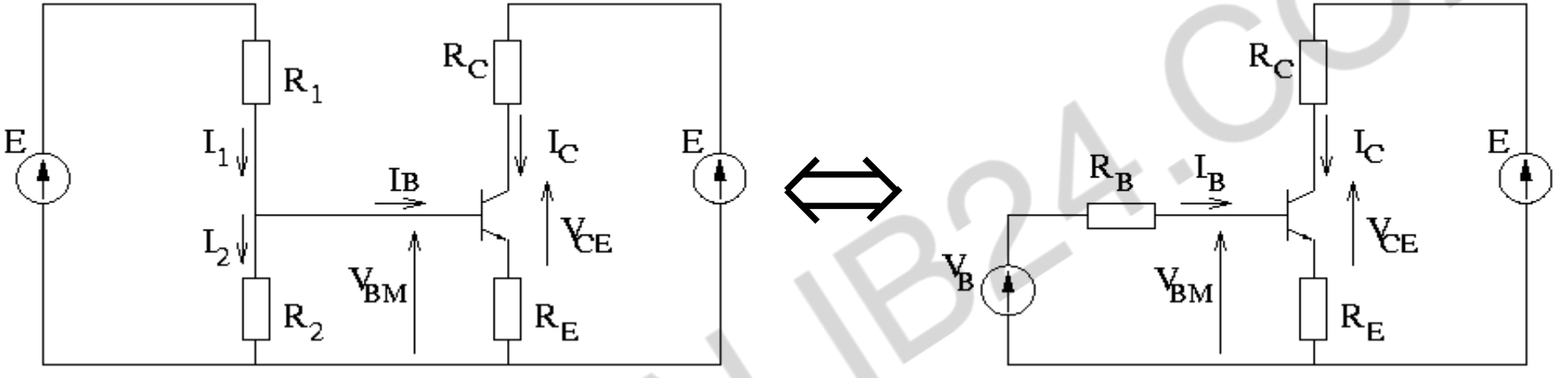
Stabilité en température : si I_C ↗ ,V_E ↗ donc V_{BE} ↘ $\Rightarrow I_B$ ↘ $\Rightarrow I_C$ ↘

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



III.3.2 – Détermination rigoureuse du point de fonctionnement



$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \qquad V_B = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E = R_C I_C + V_{CE} + R_E (I_C + I_B)$$

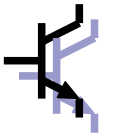
$$V_B = R_B I_B + V_{BE} + R_E (I_C + I_B)$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{BE} = valeur\ moyenne$$

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

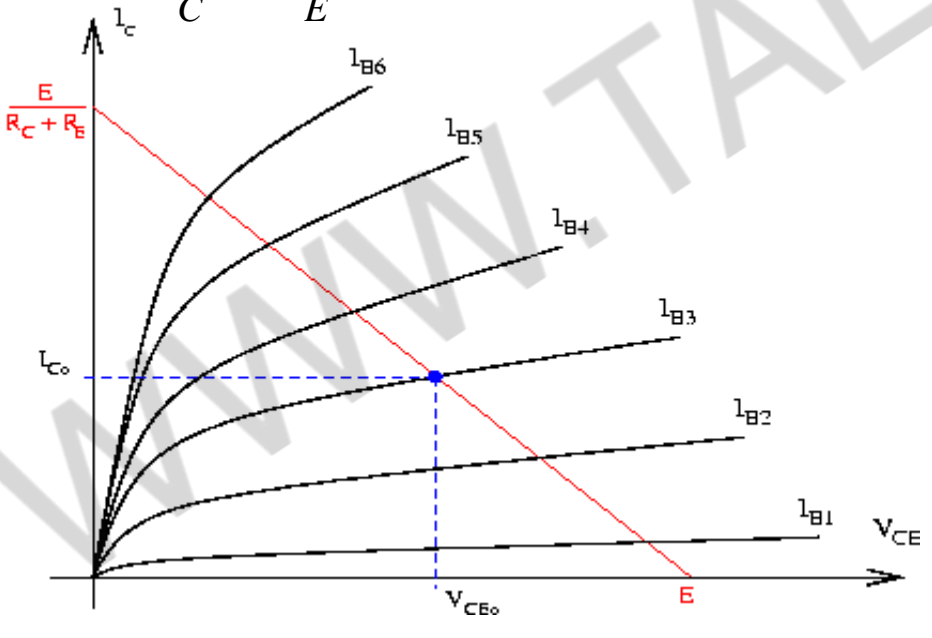


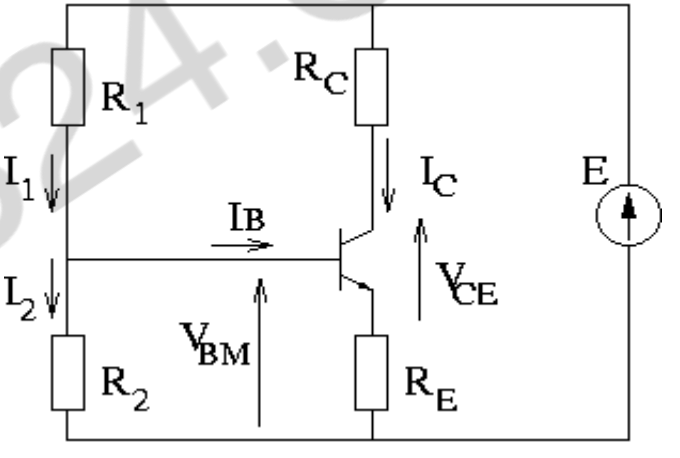
III.3.3 – Détermination graphique du point de fonctionnement

En négligeant I_B devant I_C , on a $E = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C$.

On en déduit l'équation de la droite de charge :

$$I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C + R_E}$$





Connaissant l'un des paramètres, on peut en déduire les autres.

WWW.TALIB24.COM

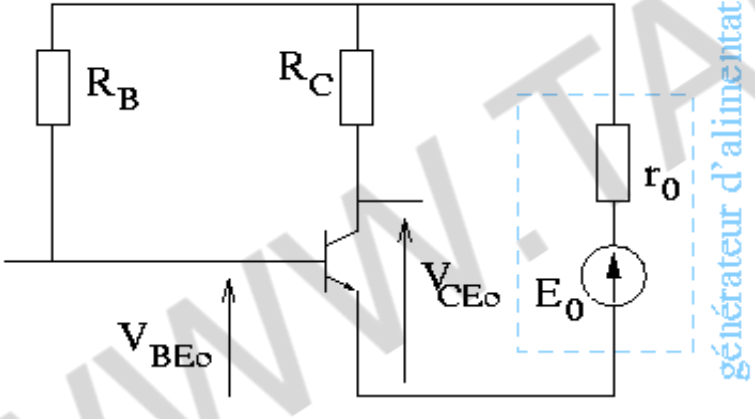
IV – Le transistor en régime dynamique

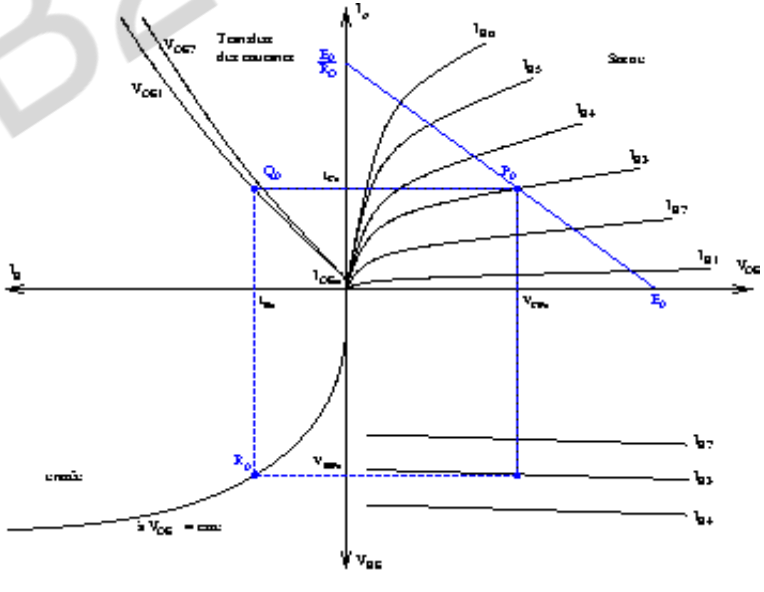
L'étude en régime dynamique consiste à analyser le fonctionnement d'un transistor polarisé lorsqu'on applique de petites variations à l'une des grandeurs électriques.

IV.1 – Analyse d'un montage EC

montage EC ⇒ entrée : base, sortie : collecteur

IV.1.1 – Polarisation

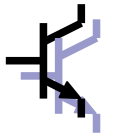




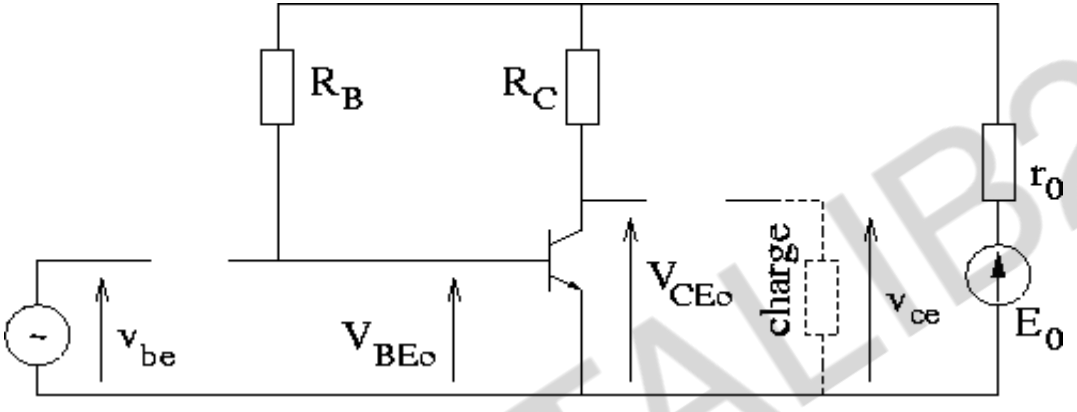
En continu (transistor polarisé), le point de repos est défini par les points P_0, Q_0 et R_0, de coordonnées V_{CEo}, Ico, I_{bo} et V_{BEo}.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



IV.1.2 – « Petits signaux »



$$Z_C = \frac{1}{jC\omega}$$

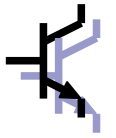
pour $\omega = 0$, $Z_C \to \infty$, *circuit ouvert*

pour $\omega \neq 0$, $Z_C \approx 0$ *si C est grand, court circuit*

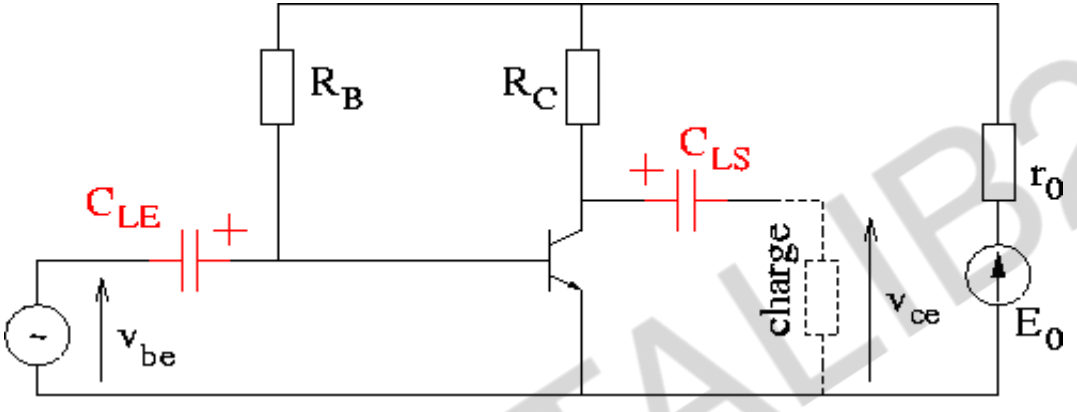
C_{LE}, C_{LS} : condensateurs de liaison.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



IV.1.2 – « Petits signaux »



$$Z_C = \frac{1}{jC\omega}$$

pour $\omega = 0$, $Z_C \to \infty$, *circuit ouvert*

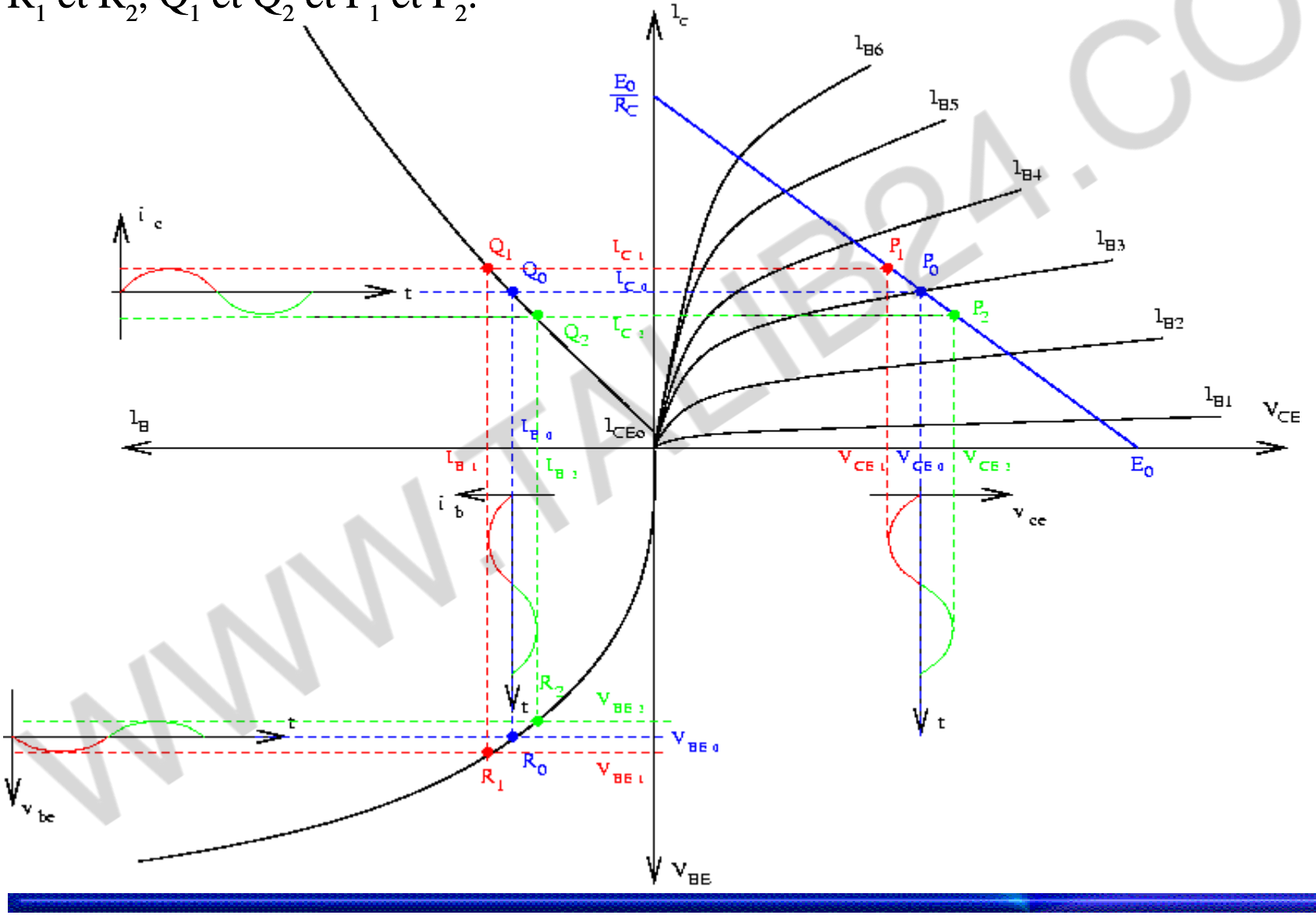
pour $\omega \neq 0$, $Z_C \approx 0$ *si C est grand, court circuit*

C_{LE}, C_{LS} : condensateurs de liaison.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

On considère la charge infinie. Le point de fonctionnement se déplace alors entre R_1 et R_2, Q_1 et Q_2 et P_1 et P_2.



WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

Remarques :

- Quand V_{BE} ↗ , I_B donc I_C ↗ et V_{CE} ↘.
- $|\Delta V_{BE}| = |V_{BE1} - V_{BE2}| << |\Delta V_{CE}| = |V_{CE1} - V_{CE2}|$

  ⇒ amplification de tension mais en opposition de phase.
- Les grandeurs électriques comportent une composante continue et une composante alternative.

$$V_{BE}(t) = V_{BEo} + v_{be}(t)$$
$$I_B(t) = I_{Bo} + i_b(t)$$
$$V_{CE}(t) = V_{CEo} + v_{ce}(t)$$
$$I_C(t) = I_{Co} + i_c(t)$$

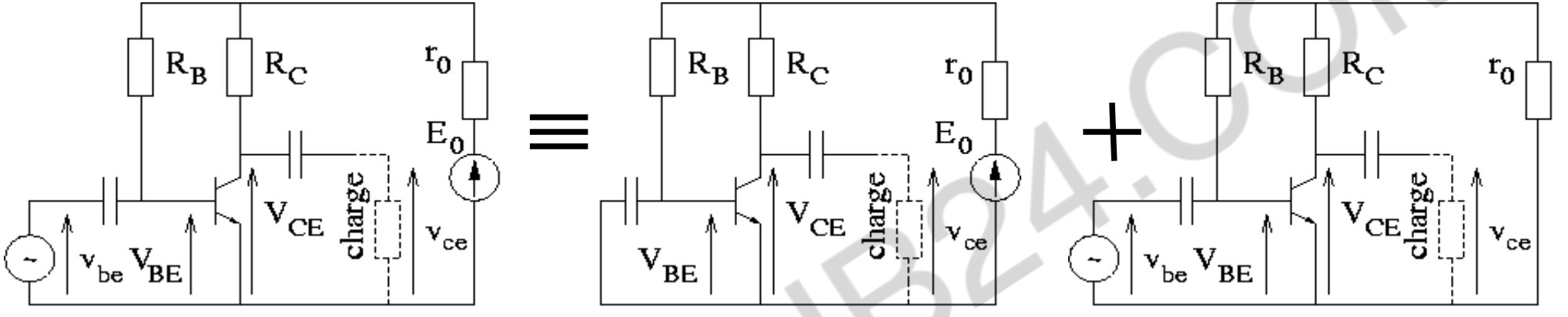
On peut donc décomposer l'analyse du montage en :

- une étude en continu (statique) pour calculer le point de repos,
- une étude en dynamique pour calculer les gains.

WWW.TALIB24.COM

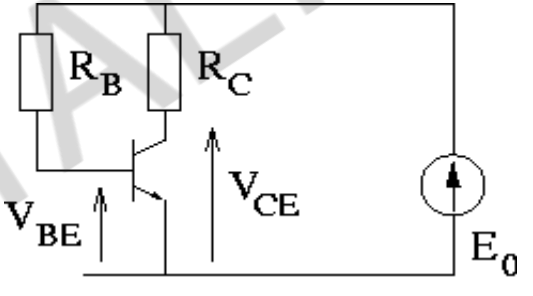
TRANSISTOR BIPOLAIRE

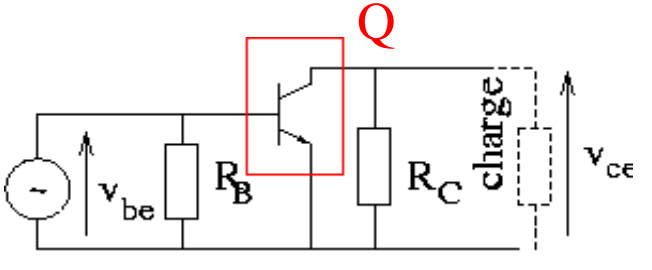
Ainsi en appliquant le théorème de superposition :

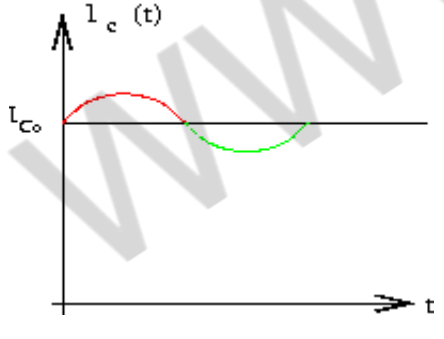


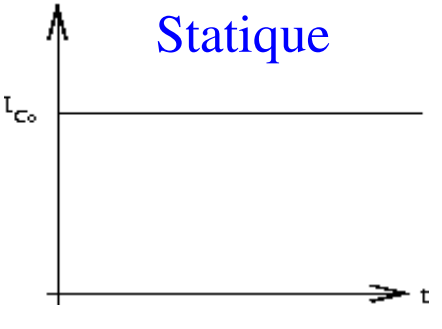
Si la source E est de bonne qualité, $r_0 = 0$:

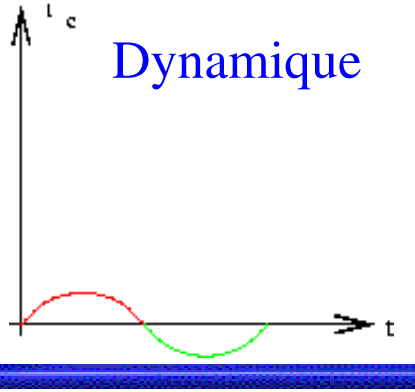
Q : quadripôle équivalent au transistor en régime dynamique.











WWW.TAVIB24.COM

IV.2 – Modèle en régime dynamique

En régime dynamique, le transistor peut être considéré comme le quadripôle suivant :

En utilisant les paramètres hybrides :

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

$$h_{11} = \left.\frac{v_{be}}{i_b}\right|_{v_{ce}=0} \qquad h_{21} = \left.\frac{i_c}{i_b}\right|_{v_{ce}=0}$$

$$h_{22} = \left.\frac{i_c}{v_{ce}}\right|_{i_b=0} \qquad h_{12} = \left.\frac{v_{be}}{v_{ce}}\right|_{i_b=0}$$

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

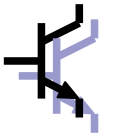
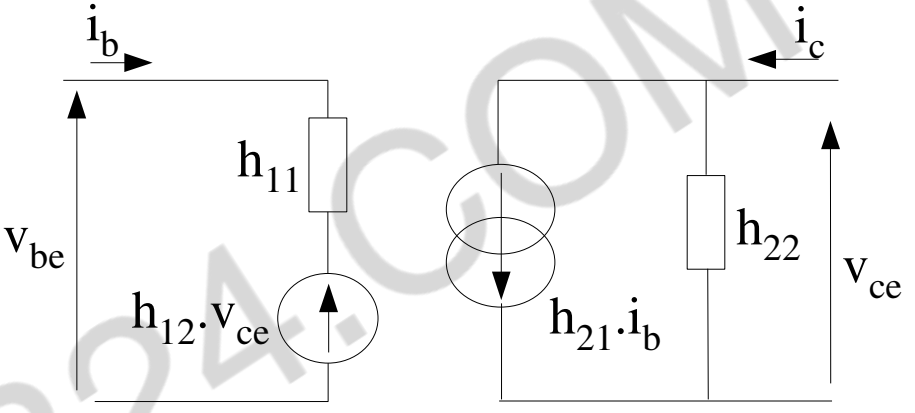


Schéma équivalent :



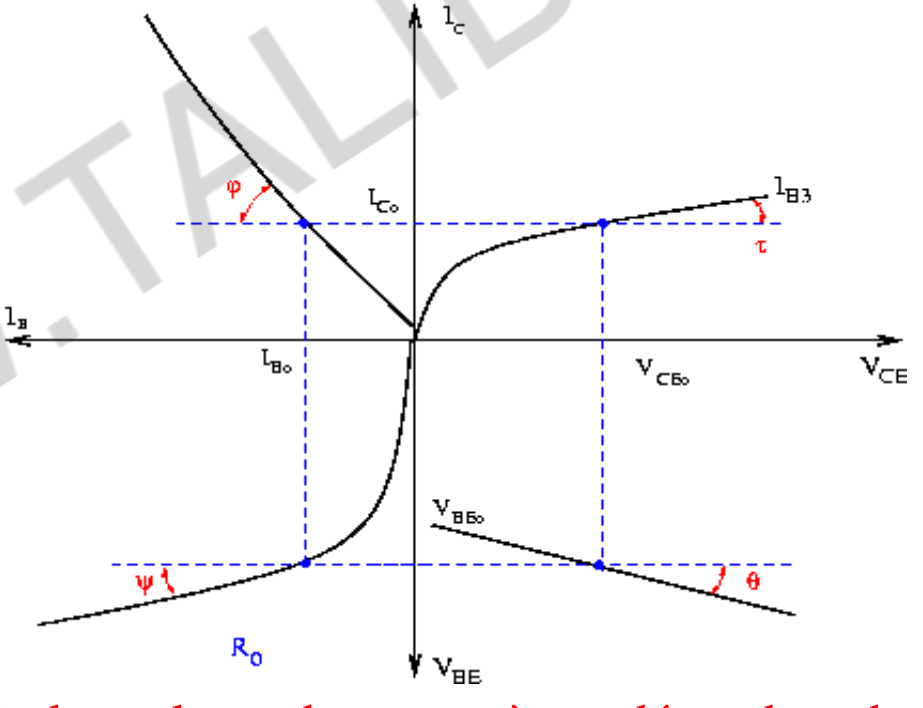
$$h_{11} = \left.\frac{v_{be}}{i_b}\right|_{v_{ce}=0} = \left.\frac{dV_{BE}}{dI_B}\right|_{V_{CE}=cste}$$

$$h_{12} = \left.\frac{dV_{BE}}{dV_{CE}}\right|_{I_B=cste}$$

$$h_{21} = \left.\frac{dI_C}{dI_B}\right|_{V_{CE}=cste}$$

$$h_{22} = \left.\frac{dI_C}{dV_{CE}}\right|_{I_B=cste}$$

Sur un réseau de caractéristiques



⊙ : les valeurs des paramètres dépendent du pt de polarisation

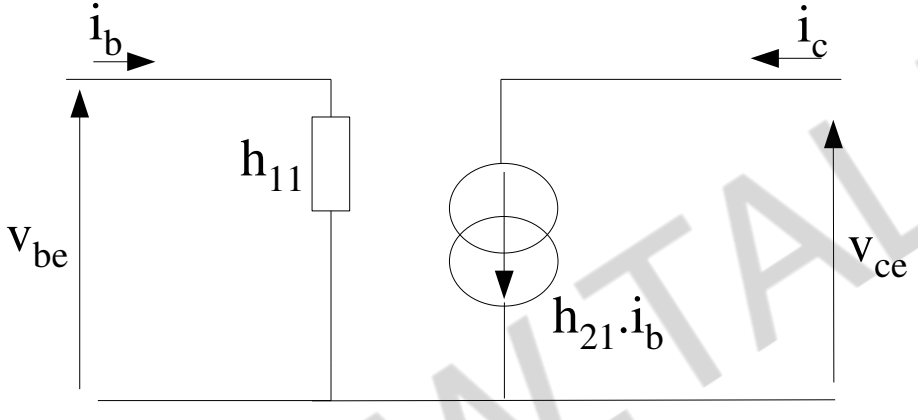
WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

Remarques :

- $\theta = 0 \Rightarrow \tan(\theta) = 0$ donc $h_{12} = 0$.

- pour de faibles valeurs de I_C , τ est très faible $\Rightarrow \tan(\tau)$ est très faible donc $h_{22} \approx 0$ on peut donc simplifier le schéma équivalent :



donc $i_c = h_{21}\, i_b$
sachant que $I_C = \beta\, I_B$, on a $h_{21} = \beta$
Si I_C augmente, les caractéristiques $I_C = f(V_{CE})$ ne sont plus horizontales et h_{22} n'est plus négligeable.

- On suppose que les paramètres sont réels. Ceci n'est vrai qu'aux basses fréquences. Pour les hautes fréquences, les capacités parasites qui existent dans le transistor conduisent à des expressions complexes pour les paramètres.

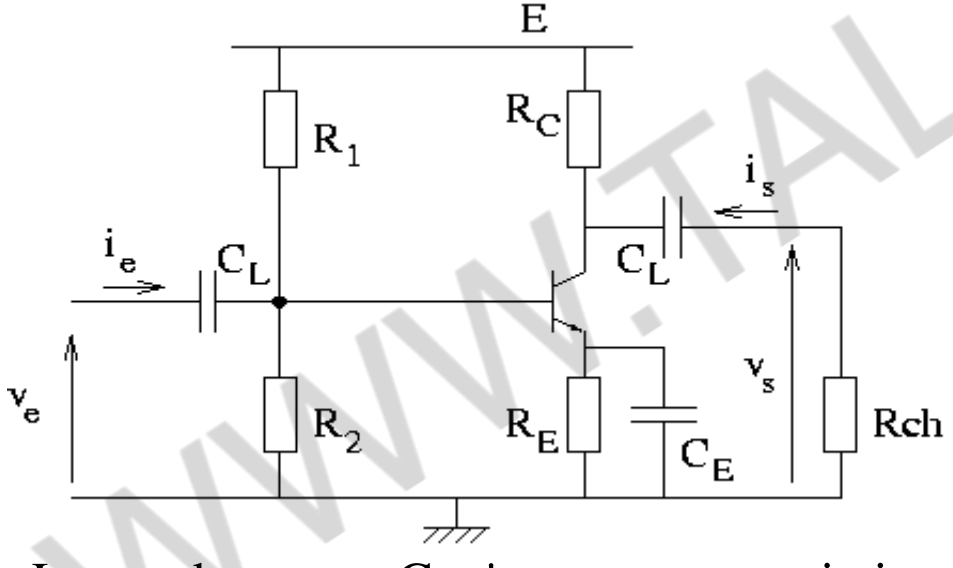
- Les valeurs des paramètres varient avec le point de polarisation du transistor.

WWW.TALIB24.COM

IV.3 – Montages fondamentaux

On considère que l'impédance des condensateurs utilisés est très faible à la fréquence de travail. Ces condensateurs seront donc remplacés par des court-circuits en régime dynamique.

IV.3.1 – Montage émetteur commun



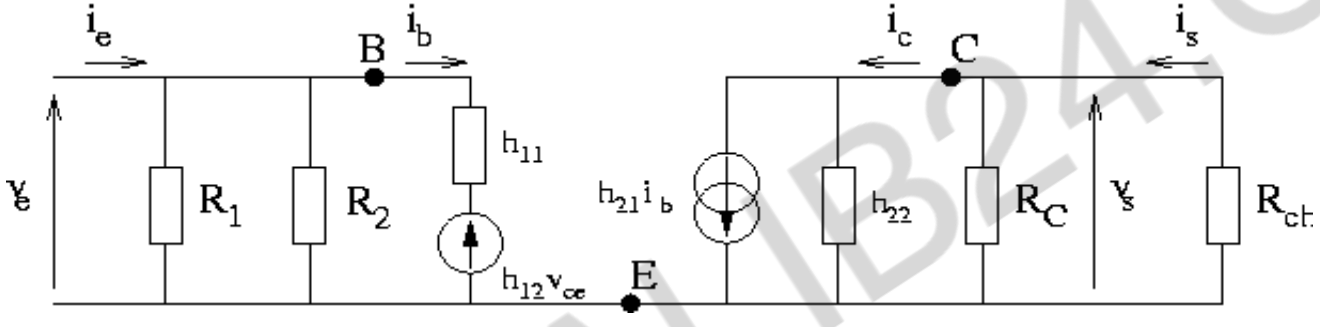
La résistance R_E est indispensable pour obtenir un point de fonctionnement (point de repos) stable en température

Le condensateur C_E s'oppose aux variations de potentiel de l'émetteur. Du point de vue des « petits signaux », l'émetteur est donc connecté à la masse.

WWW.TALIB24.COM

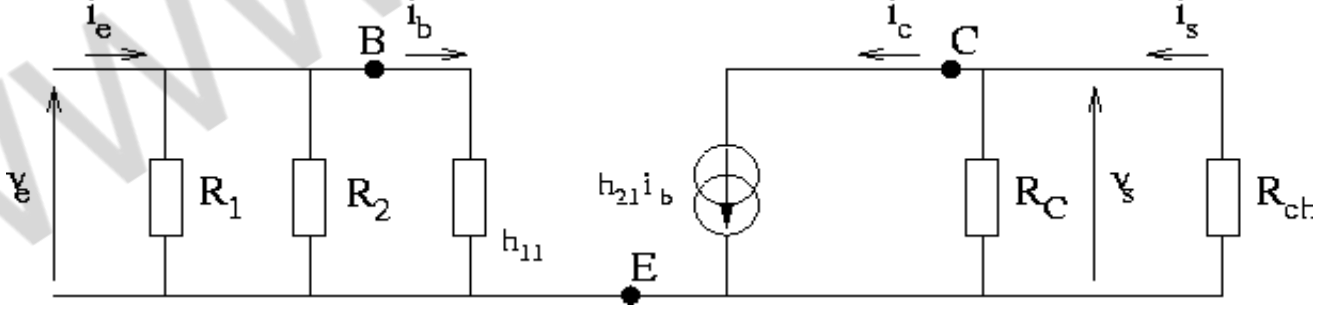
TRANSISTOR BIPOLAIRE

On considère que l'impédance interne de la source est nulle. En remplaçant les condensateurs par des court-circuit et le transistor par un quadripôle équivalent, on obtient le schéma en régime dynamique suivant :



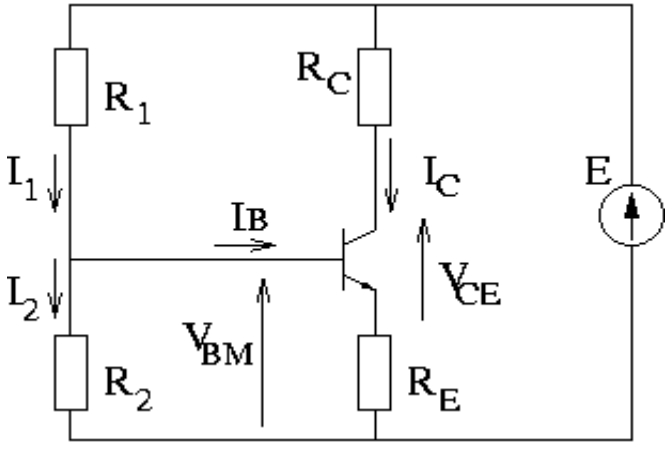
En régime dynamique, l'émetteur est bien l'électrode commune à l'entrée et à la sortie.

En négligeant les paramètres h_{12} et h_{22}, le schéma devient :

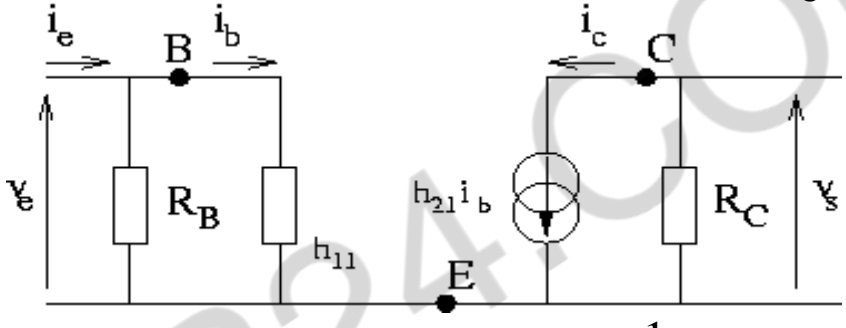


WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



Etude statique et dynamique dans le plan I_C , V_{CE}

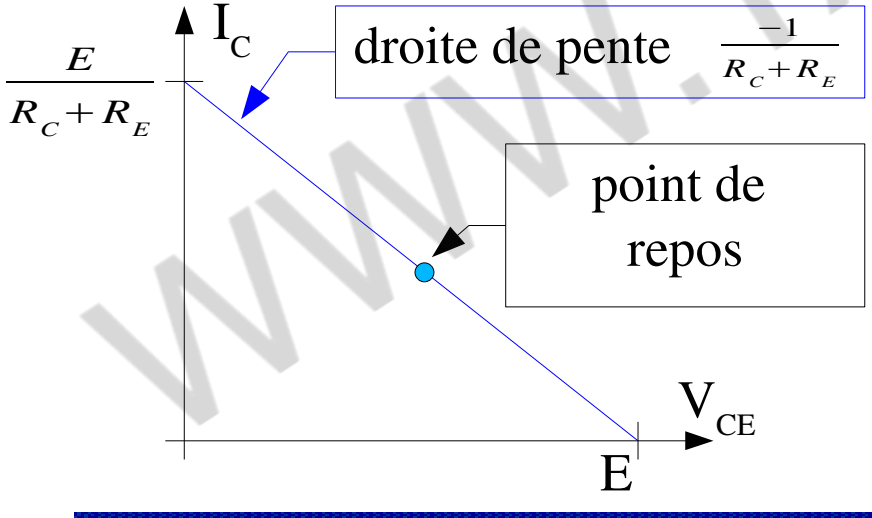


$R_B = R_1 // R_2$

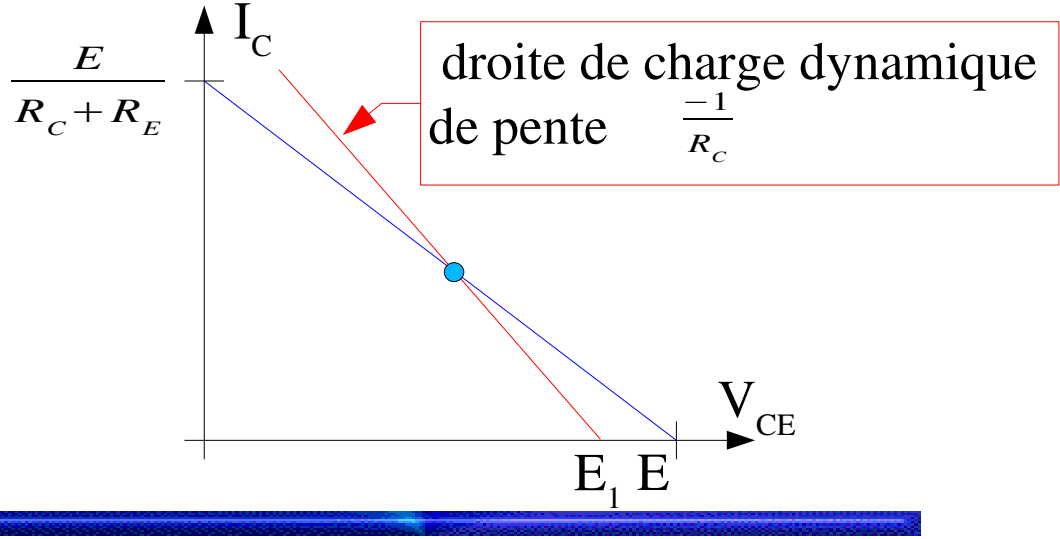
$$v_s = v_{ce} = -R_C i_c \Rightarrow \quad i_c = -\frac{1}{R_C} v_{ce}$$

$$E = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_C \Rightarrow \quad I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

Droite de charge statique : lieu des points de fonctionnement en statique.



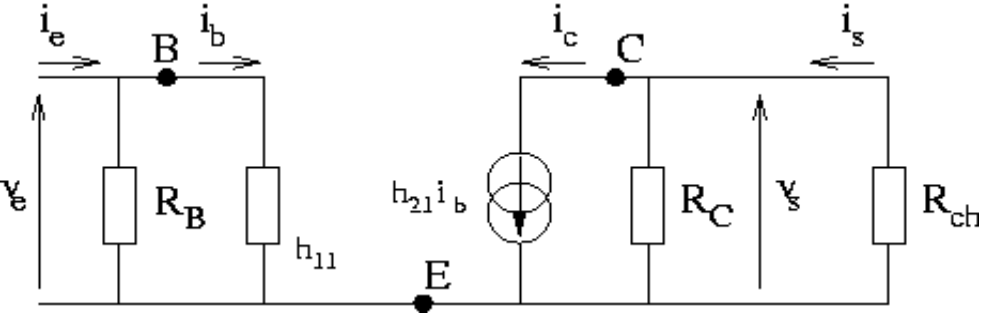
Droite de charge dynamique : lieu des variations du point de fonctionnement en dynamique. Il s'agit d'une droite de pente $-1/R_C$.



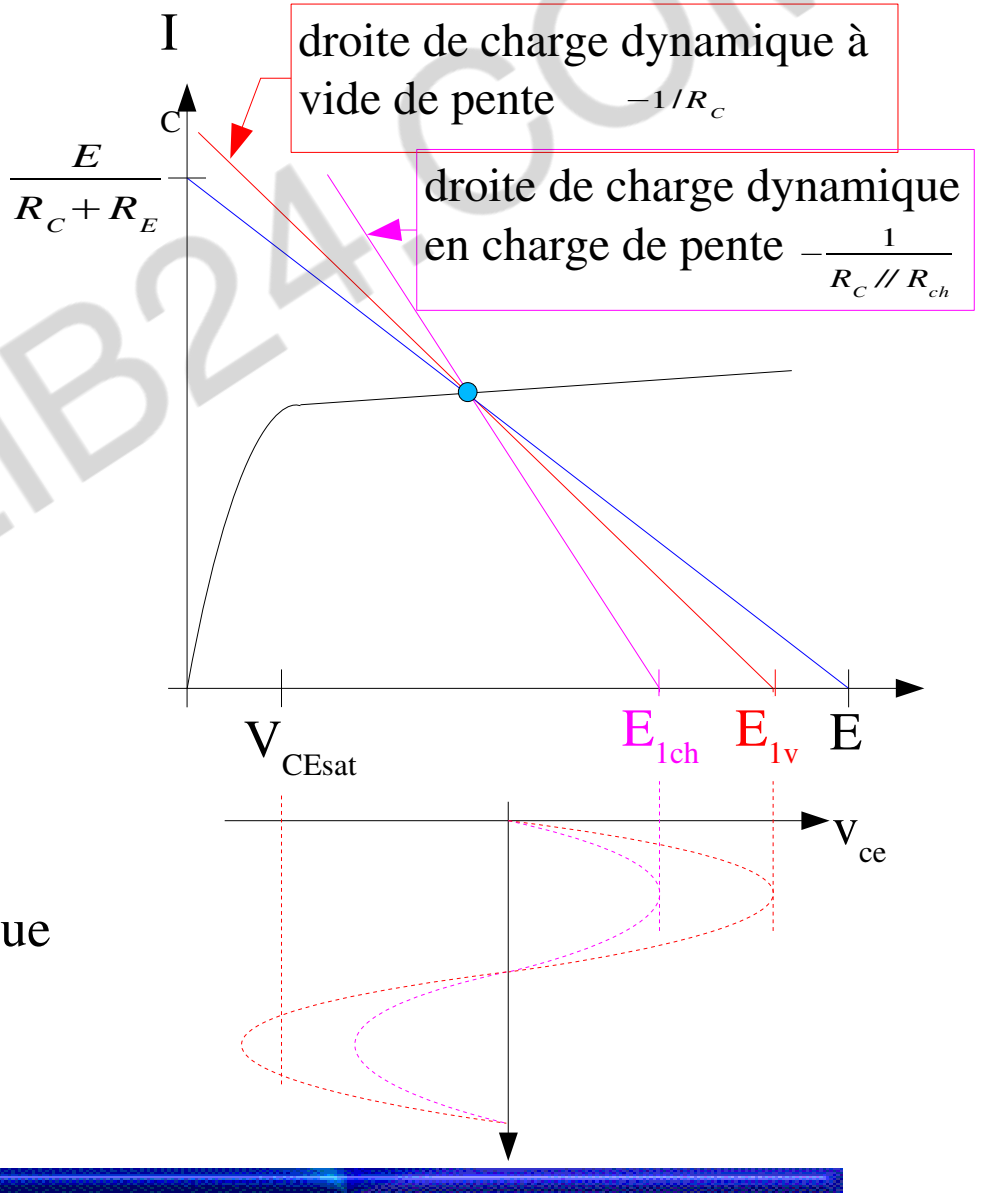
WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

Etude dynamique en charge dans le plan I_C , V_{CE}



$R_B = R_1 // R_2$



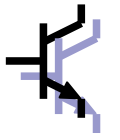
en charge, on a : $v_s = v_{ce} = -(R_C // R_{ch})\, i_c$

$$\Rightarrow \quad i_c = -\frac{R_C + R_{ch}}{R_C . R_{ch}} v_{ce}$$

L'excursion maximale de v_{ce} est inférieure à E_0.
Elle est limitée par le droite de charge dynamique (point E_1) et par la zone de saturation.

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



IV.3.2 – Montage collecteur commun

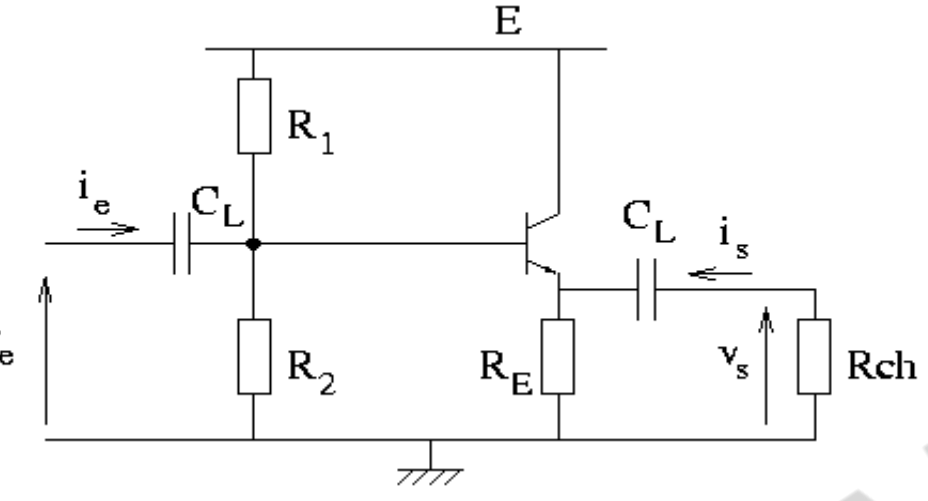
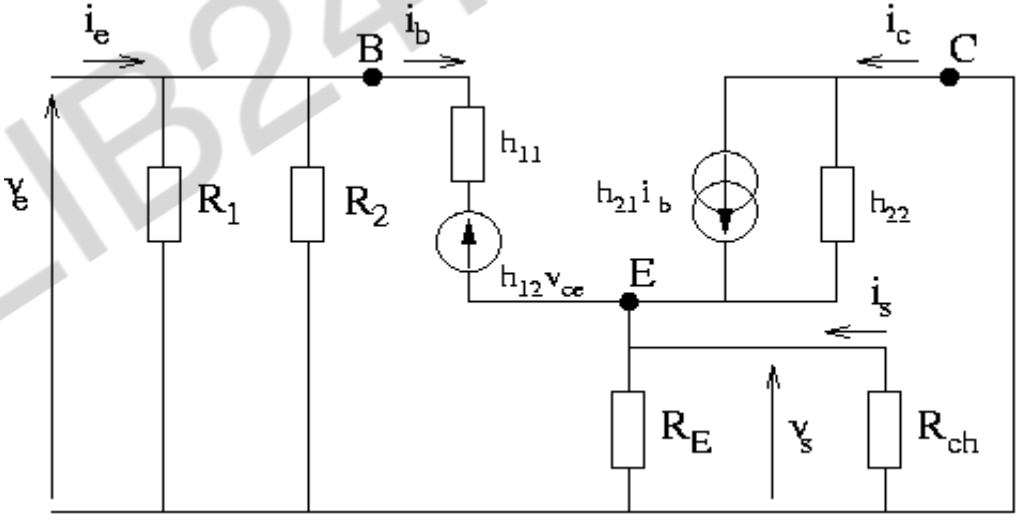
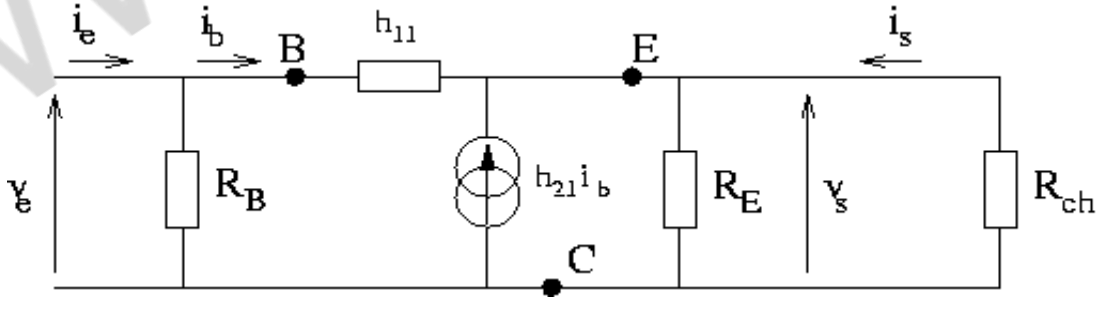


schéma équivalent en dynamique

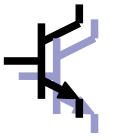




$R_B = R_1 // R_2$

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



IV.3.3 – Montage base commune

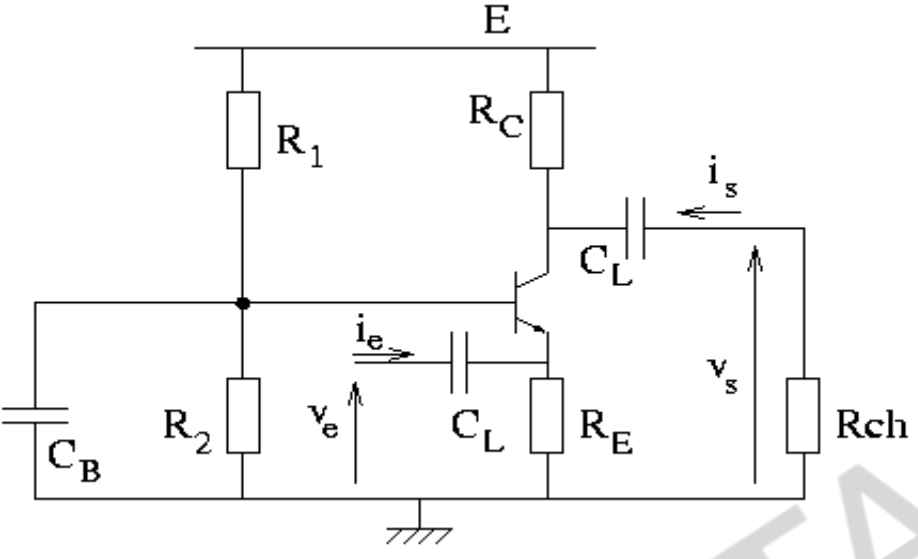
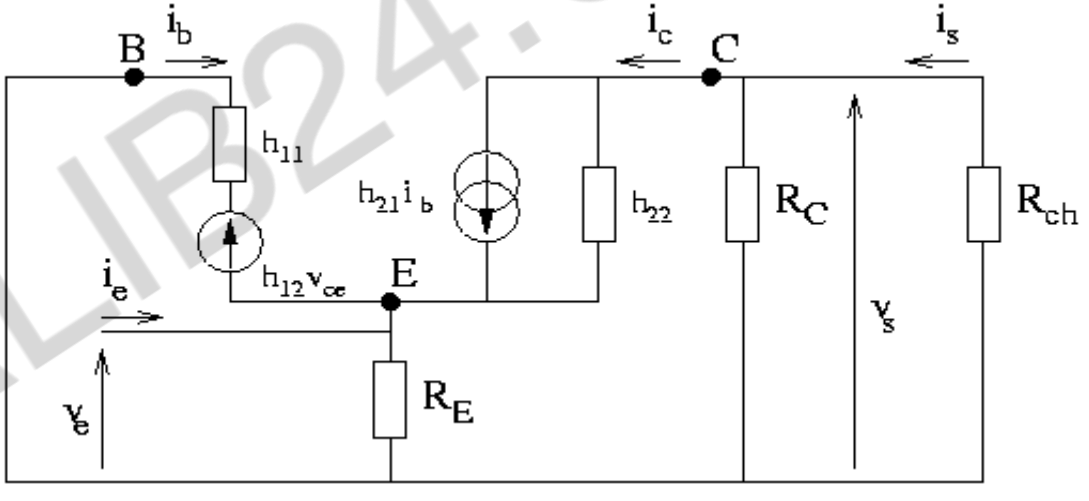
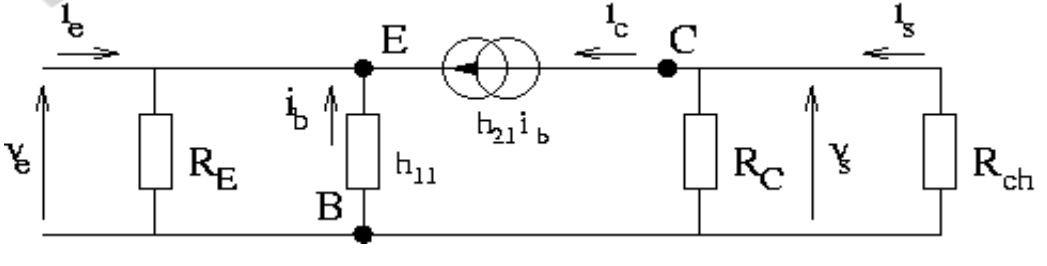


schéma équivalent en dynamique

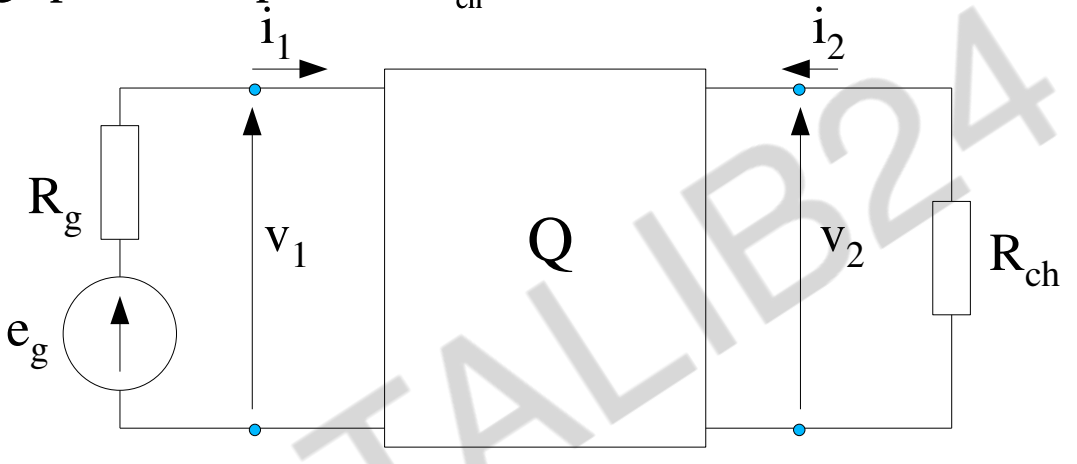




WWW.TALIB24.COM

IV.4 – Caractéristiques des montages

On considère le montage comme un quadripôle alimenté par un générateur de Thévenin e_g , r_g et chargé par une impédance Z_{ch}.



IV.4.1 – Définitions

$$Z_E = \frac{v_1}{i_1} \qquad A_v = \frac{v_2}{v_1} \qquad A_{vg} = \frac{v_2}{e_g} = A_v \cdot \frac{Z_E}{Z_E + R_g}$$

$$A_i = \frac{i_2}{i_1} \qquad Z_s = \left.\frac{v_2}{i_2}\right|_{e_g=0} \; ou \; \left.\frac{v_2}{i_2}\right|_{v_1=0} \quad si\, r_g = 0$$

WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

IV.4.2 – Propriétés des montages fondamentaux

	EC	CC	BC
Z_E	moyenne (1kΩ)	forte (100kΩ)	faible (20Ω)
Z_S	moyenne (50kΩ)	faible (100Ω)	très forte (1MΩ)
A_v	négatif fort (-100)	positif (1)	positif fort (100)
A_i	positif fort (50)	négatif fort (-50)	négatif faible

Applications :

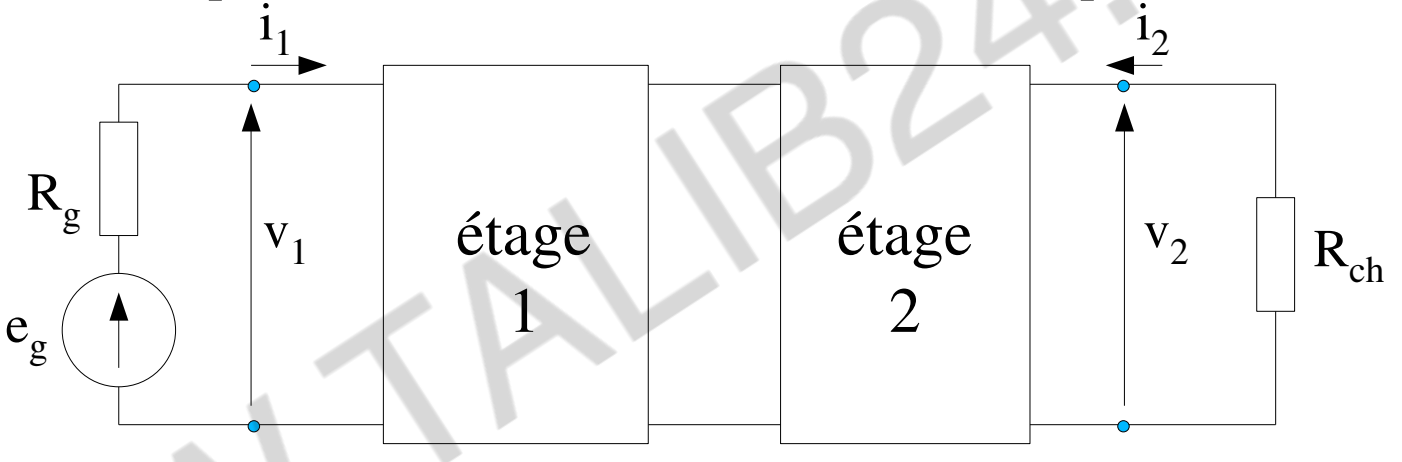
- EC : montage amplificateur (tension – courant).
- CC : montage adaptateur d'impédance (Z_E fort, Z_S faible), étage de séparation entre deux étages dont les impédances sont inadaptées ($Z_{S1} >> Z_{E2}$).
- BC : montage amplificateur de tension à forte impédance de sortie (qualité parfois recherchée en HF).

WWW.TALIB24.COM

IV.4.3 – Association de montages

L'association de plusieurs étages est nécessaire :

- soit quand le gain d'un seul étage est insuffisant,
- soit quand les impédances d'entrée ou de sortie sont inadaptées.



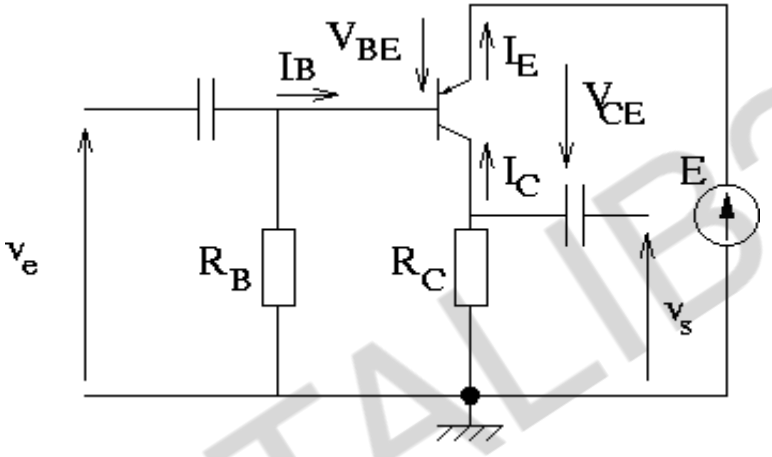
On associe généralement :

- EC + EC : pour obtenir un gain élevé
- CC + EC : si l'impédance interne du générateur d'entrée est trop élevée
- EC + CC : si l'impédance de la charge est faible.
- CC + CC : pour obtenir un fort gain en courant.

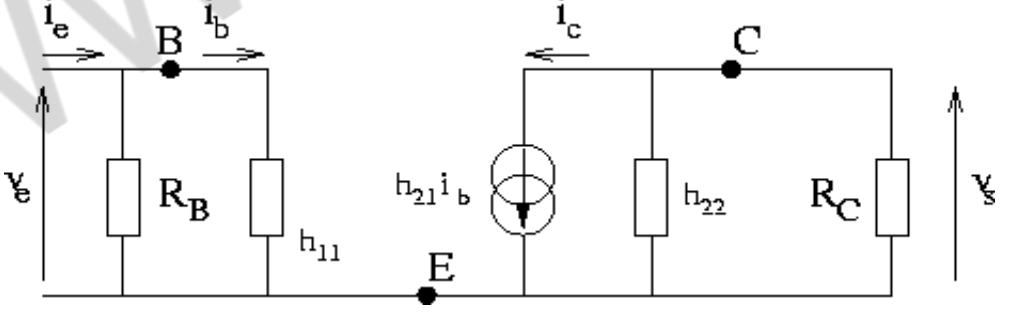
WWW.TALIB24.COM

IV.5 – Etude des montages à transistors PNP

En statique, le signe des courants et tensions du transistor est inversé.



En dynamique, l'étude est identique à l'étude des transistors NPN.



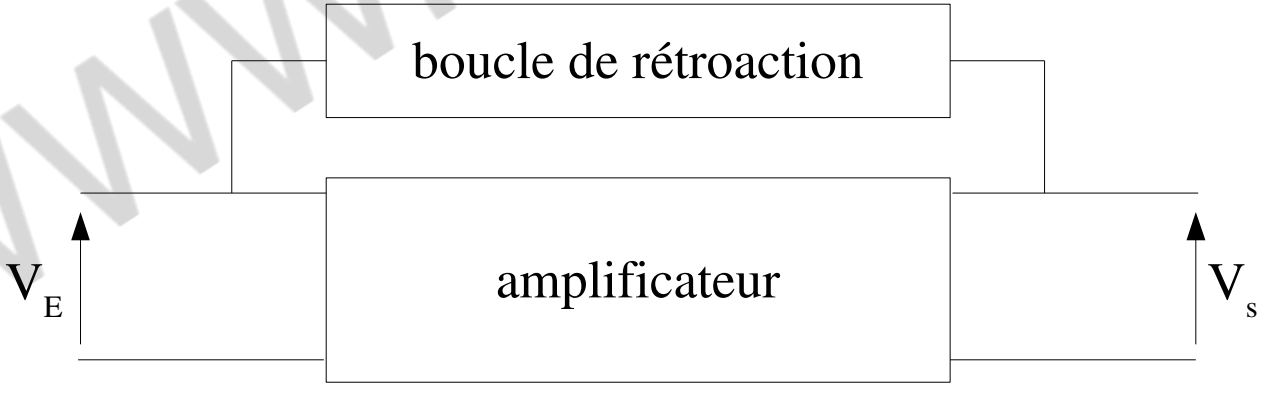
WWW.TALIB24.COM

V – La rétroaction

La rétroaction est un procédé qui consiste à renvoyer vers l'entrée d'un amplificateur une partie de la tension de sortie. Le réseau électrique permettant de prélever une fraction de la tension de sortie et de la réinjecter vers l'entrée se nomme boucle de rétroaction.

Dans le cas où la rétroaction a tendance à augmenter l'amplification du montage initial, on parle de rétroaction positive ou de réaction.

Dans le cas contraire où la rétroaction a tendance à diminuer l'amplification, on parle de rétroaction négative ou de contre-réaction.



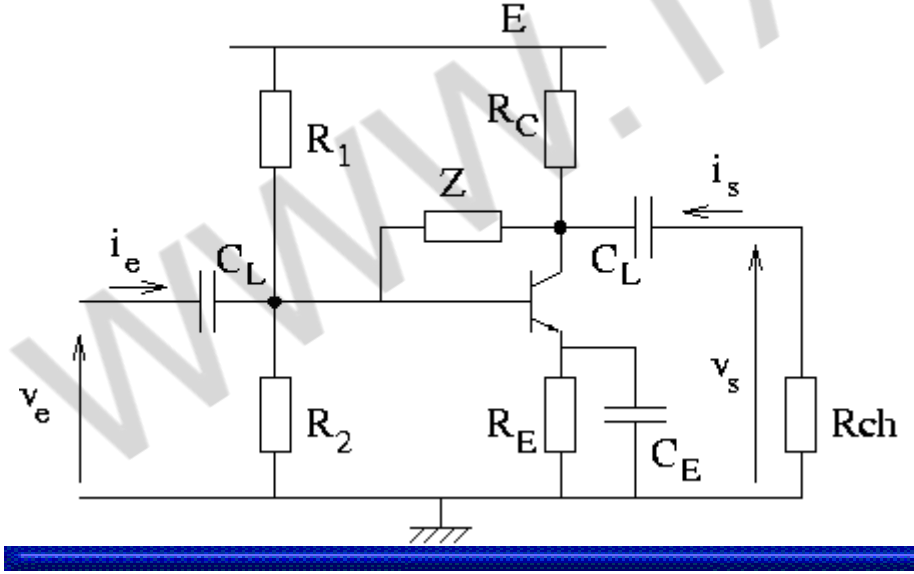
WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE

<u>Principaux effets de la contre réaction :</u>

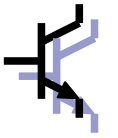
- diminution de l'amplification par rapport au montage en boucle ouverte.
- grande indépendance des tensions de polarisation et de l'amplification vis à vis de la dispersion des paramètres des transistors.
- amélioration de la linéarité.
- limitation les oscillations spontanées.

<u>Exemples de rétroaction :</u>

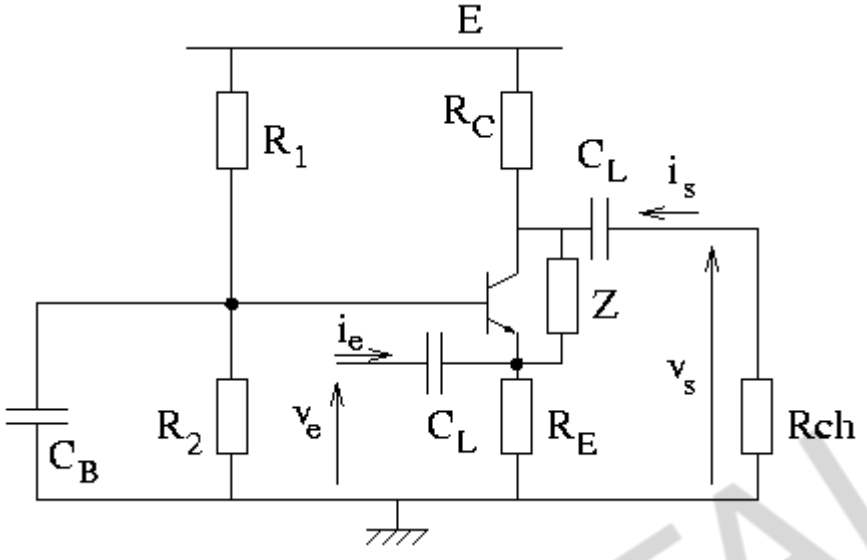


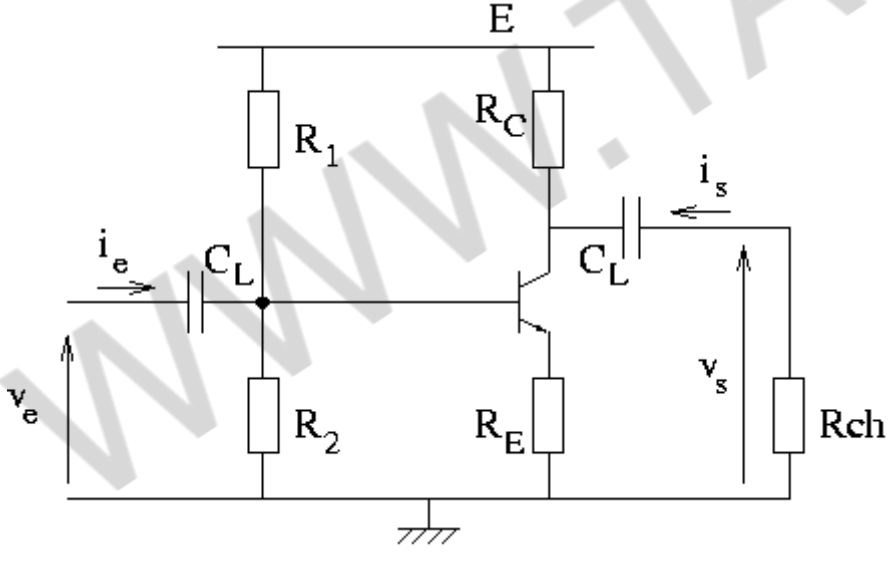
WWW.TALIB24.COM

TRANSISTOR BIPOLAIRE



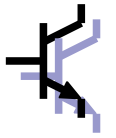
Exemples de rétroaction :





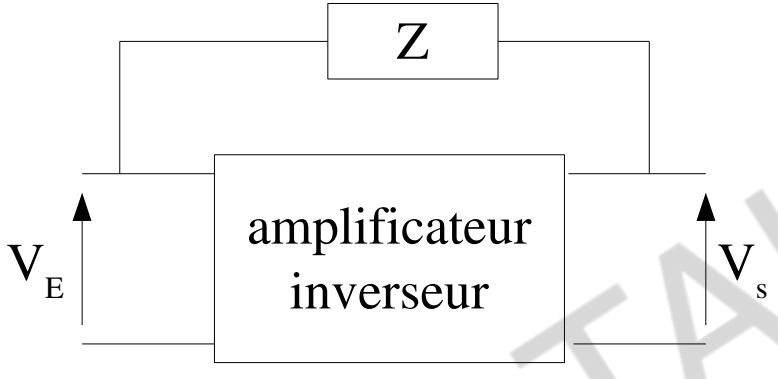
WWW.TALIB24.COM

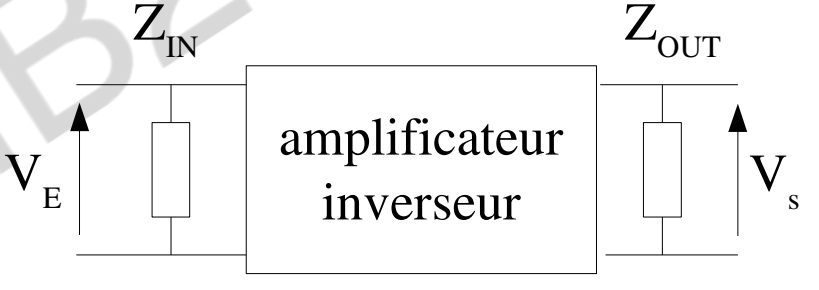
TRANSISTOR BIPOLAIRE



Théorème de Miller :

On considère un ampli inverseur (V_S est en opposition de phase avec V_E) de gain A. L'impédance Z est une impédance de contre-réaction.





D'après le théorème de Miller :

$$Z_{IN} = Z(A+1)$$

$$Z_{OUT} = Z\frac{A+1}{A}$$

WWW.TALIB24.COM