

4.1 Introduction

■ le Transistor = l'élément "clef" de l'électronique

il peut :

↓ **amplifier un signal**

↗ amplificateur de tension, de courant, de puissance,...

↓ être utilisé comme une **source de courant**

↓ agir comme un **interrupteur commandé** (= **mémoire binaire**)

↗ essentiel pour l'**électronique numérique**

↓ ...

il existe :

↓ soit comme **composant discret**

↓ soit sous forme de **circuit intégré**, i.e. faisant partie d'un circuit plus complexe, allant de quelques unités (ex: AO) à quelques millions de transistors par circuit (microprocesseurs)



BC547 Plastic leaded transistor

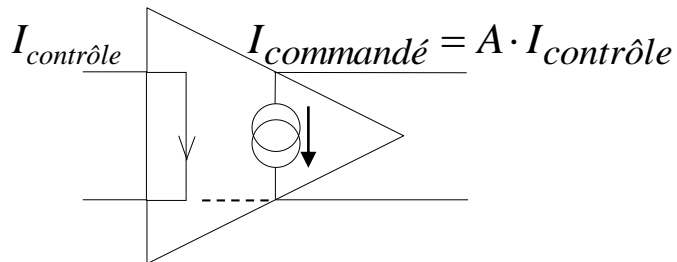
■ on distingue le transistor **bipolaire** du transistor **à effet de champ**

↓ différents mécanismes physiques

■ Ils agissent, en 1^{ière} approx., comme une **source de courant commandé**

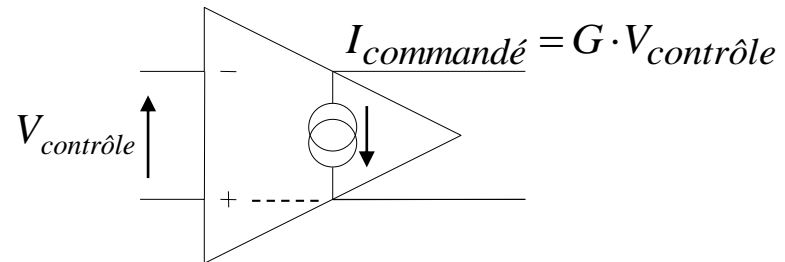
↓ transistor bipolaire : commandé **par un courant**

↓ transistor à effet de champ: commandé par **une tension**



*source de courant
commandée par un
courant*

$A = \text{“gain” en courant}$



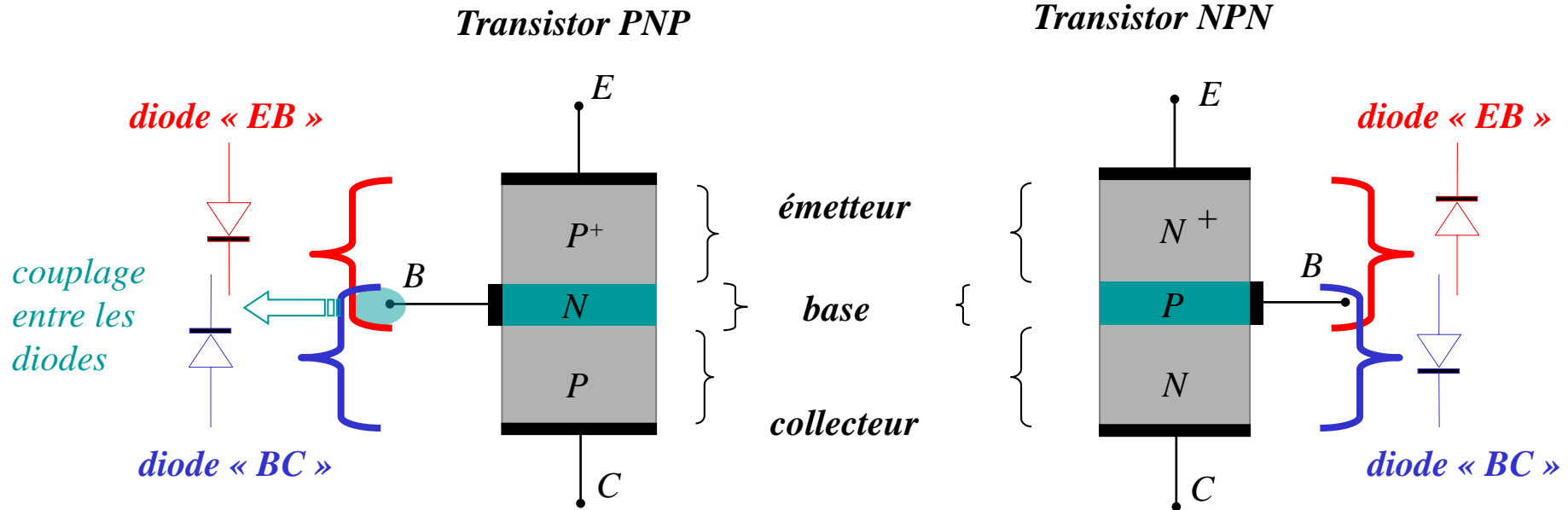
*source de courant
commandée par une
tension*

$G = \text{transconductance.}$

✉ **Idéalement** : l'étage d'entrée ne dépend **pas** de l'étage de sortie.

4.2 Structure et fonctionnement d'un transistor bipolaire

■ Structure simplifiée



☒ Deux « **jonctions PN** ou **diodes** » **couplées** ⇔ « **effet transistor** »

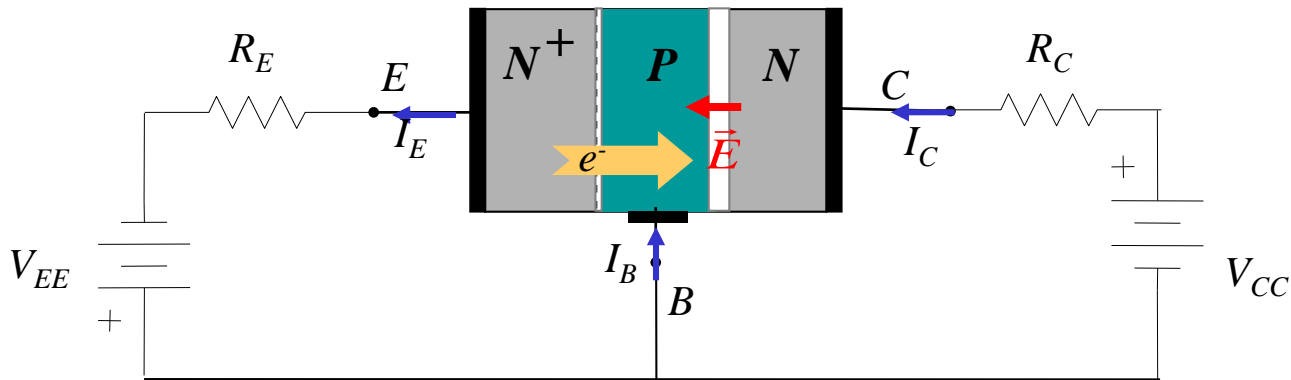
le courant dans l'une des diodes (généralement dans la jonction base/émetteur) détermine le courant dans la seconde

☒ **Symétrie NPN/PNP** (Les transistors **PNP** et **NPN** ont un **comportement analogue** à condition d'**inverser les polarités** des tensions)

■ Effet transistor

Exemple: Transistor NPN

✉ *Conditions normales de polarisation* : Jonction EB : **directe**
Jonction BC : **inverse**
= **MODE ACTIF** du transistor
Dans ces conditions « L'effet transistor » apparaît



Le courant I_E est déterminé par la tension V_{BE} (comme pour une diode simple);

Le courant I_C (au lieu d'être nul, comme dans le cas d'une diode bloquée) est égal, en première approximation, à I_E .

En d'autres termes, le courant collecteur est **commandé** par le courant émetteur.

L'origine physique de cet effet est le champ électrique intense qui apparaît dans la « zone de charge d'espace de la jonction BC). Ce champ « collecte les électrons qui sont injectés par l'émetteur dans la base.

En réalité le courant I_C est légèrement inférieur à I_E . Certains électrons ne parviennent pas jusqu'au collecteur (ils se « recombinent » avec les trous dans la base). Par ailleurs une petite fraction du courant I_E est porté par les trous qui diffusent de la base vers l'émetteur et qui de fait ne participent pas à l'effet transistor).

En vertu de la conservation de la charge électrique (ou de la loi des nœuds qui en découle en régime stationnaire), la différence des deux courants est égale au courant « de base » I_B .

Remarque: La jonction EB étant à dopage dissymétrique (le dopage côté émetteur est plus élevé que côté base), la part du courant I_E transportée par les électrons (cas du transistor NPN) est largement majoritaire.

EN RESUME

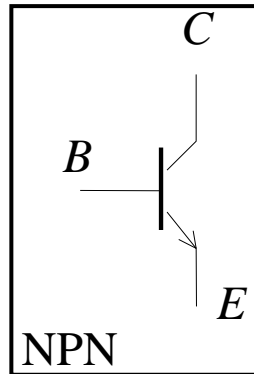
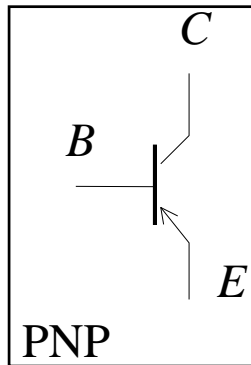
- ↓ si $V_{EE} > \sim 0.7V$, jonction EB passante → $V_{BE} \sim 0.7V, I_E \gg 0$
- ↓ La jonction EB est **dissymétrique** (dopage plus élevé côté E)
→ **courant** porté essentiellement par les **électrons** (peu de trous circulent de B vers E)
- ↓ $V_{CC} > 0$, jonction BC “bloquée” => **champ électrique intense** à l’interface Base/Collecteur
- ↓ La **majorité** des électrons injectés par l’émetteur dans la base sont **collectés** par le champ
→ $I_C \sim I_E$ et $I_B = I_E - I_C \ll I_E$
- ↓ En mode actif, I_C **est contrôlé par** I_E , et **non** vice versa...

■ Premières *différences* entre le transistor bipolaire et la source commandée *idéale*...

↓ Contraintes de **polarisation** : $V_{BE} > 0$ ($\sim 0.7V$), $V_{BC} < 0$ ($- 0.5V$)

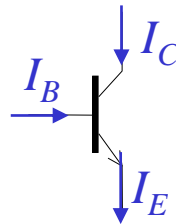
Le transistor bipolaire n'est pas une source de courant commandée idéale. Il ne se comporte comme une source de courant commandée que s'il est en mode actif, c'est-à-dire que lorsque $V_{BE} > \sim 0.7V$, $V_{CB} > \sim -0.5V$ (pour un PNP il faudrait $V_{EB} > \sim 0.7V$, $V_{BC} > \sim -0.5V$)

■ Symboles

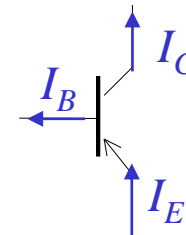


✉ $I_E > 0$ en **mode actif**

■ Conventions des courants :



NPN



PNP

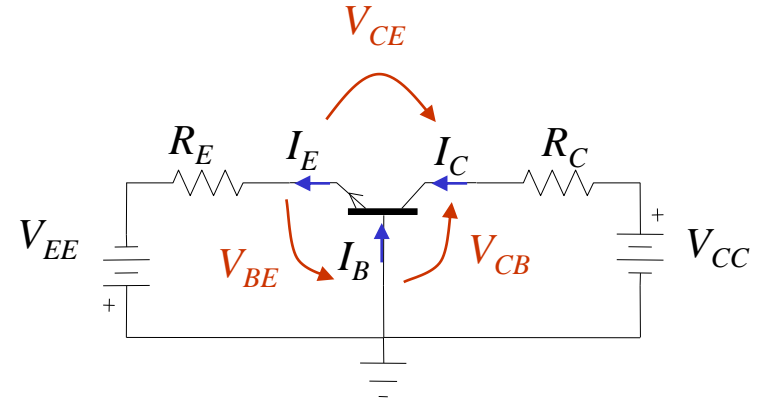
↓ $I_E = I_B + I_C$

4.3 Caractéristiques du transistor NPN

■ Choix des paramètres :

✉ Les différentes grandeurs électriques (I_E , I_B , V_{BE} , V_{CE} , ...) sont **liées**:

↓ *différentes représentations équivalentes des caractéristiques électriques existent*



● Configuration “Base Commune”

(base = électrode commune)

↓ Caractéristiques : $I_E(V_{BE}, V_{BC})$, $I_C(V_{BC}, I_E)$

● Configuration “Emetteur Commun”

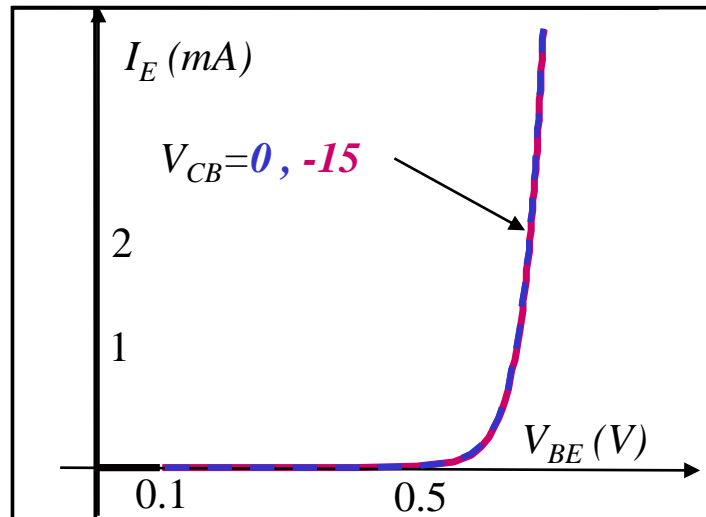
(émetteur = électrode commune)

↓ Caractéristiques : $I_B(V_{BE}, V_{CE})$, $I_C(V_{CE}, I_B)$

✉ La représentation des caractéristiques en configuration “collecteur commun” est plus rare.

■ Caractéristiques en configuration BC : CAS DU TRANSISTOR NPN

$I_E(V_{BE}, V_{CB})$: « caractéristique d'entrée »
hypothèse: diode BC bloquée (mode usuel)



↓ ~ caractéristique d'une **jonction PN**

$$I_E \cong I_s \left[\exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right]$$

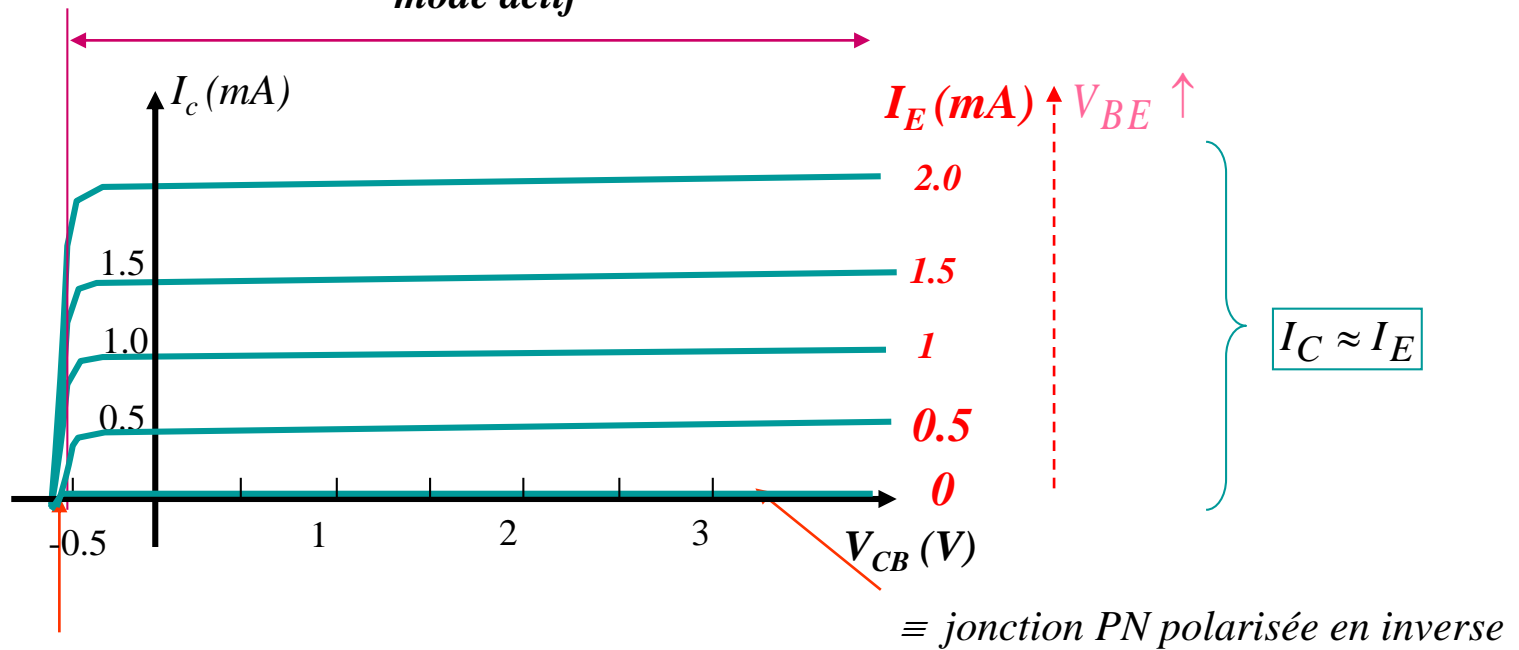
↓ très **peu d'influence** de I_C (resp. V_{CB})

←
Jonction BE bloqué
 $I_E \sim 0, V_{BE} < 0.5 \text{ V}$

→
Jonction BE passante
 $I_E > 0, V_{BE} \approx 0.6-0.7 \text{ V} = \ll V_o \gg$

mode actif

$I_C(V_{CB}, I_E) :$



\equiv jonction PN polarisée en inverse

tension seuil de la jonction BC

↓ pour $V_{CB} > \sim -0.5$ V, on a $I_C = \alpha_N I_E$, avec α_F proche de 1.

↗ En **mode actif**, $I_B = I_E - I_C = I_E(1 - \alpha_N)$

↓ pour $I_E = 0$, on a $I_C =$ **courant de saturation inverse** de la jonction BC ~ 0

↗ Transistor en “**mode bloqué**”

↓ pour $V_{CB} \approx -0.7$, la jonction BC est **passante**, I_C n'est **plus contrôlée** par I_E

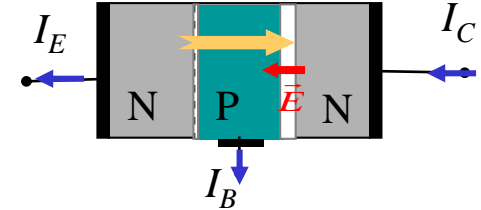
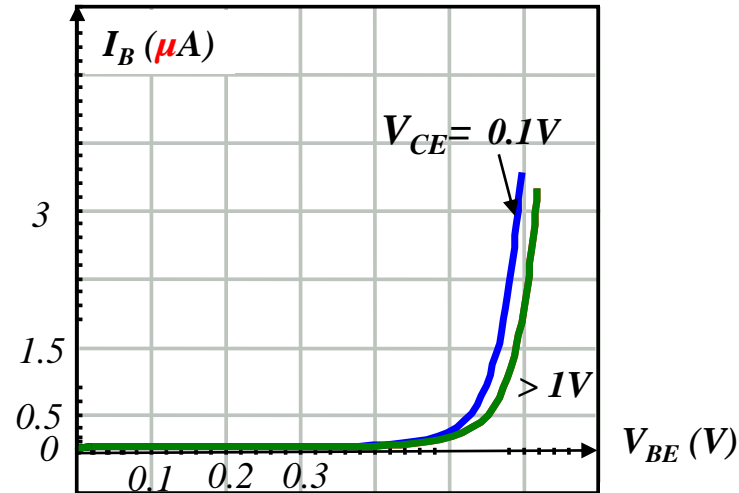
↗ Transistor en “**mode saturé**”

Ordre de grandeur : $\alpha_N \sim 0.950 - 0.999$ $\alpha_N =$ “gain en courant continue en BC”

α_N = représente la fraction des électrons, issus de l'émetteur, qui atteignent le collecteur sans s'être recombinaés avec les trous de la base.

■ Caractéristiques en configuration EC :

$I_B(V_{BE}, V_{CE})$: « caractéristique d'entrée »
hypothèse: diode BC bloquée (mode usuel)



↓ $V_{BE} > 0.6V$, jonction PN passante

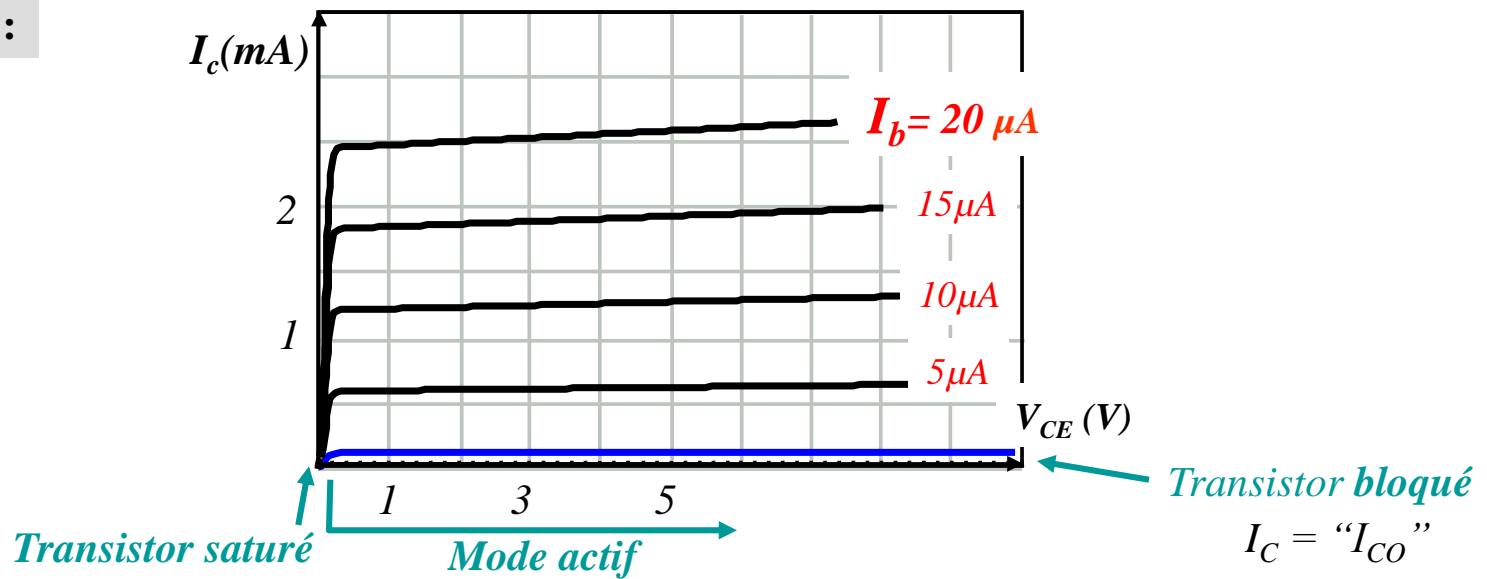
☒ $I_B \ll I_E \leftrightarrow$ **charges non collectées** par le champ électrique de la jonction BC

$$I_B = (1 - \alpha_N) I_E$$

↓ Influence non-négligeable de V_{CE} sur $\alpha_N \leftrightarrow$ “**Effet Early**”

Rappel: Découvert en 1952, c'est l'effet de modulation du courant collecteur (I_B varie avec I_C) par tension collecteur-base.

$I_C(V_{CE}, I_B) :$



↓ **Mode actif** : BE passant, BC bloquée $\rightarrow V_{BE} \approx 0.7V$ et $V_{CB} > \sim -0.5 V$

$$\nearrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE} > -0.5 + 0.7 \sim 0.2 V$$

$$I_C = \alpha_F I_E = \alpha_F (I_C + I_B) \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = h_{FE} I_B$$

h_{FE} = "gain en courant continue en EC" = " β_F "

ordre de grandeur : $h_{FE} \sim 50 - 250$

☒ Grande dispersion de fabrication sur h_{FE} .

↓ **Effet Early** : α_F tend vers 1 lorsque V_{CE} augmente $\rightarrow h_{FE}$ augmente avec V_{CE}

↓ **Mode saturé** : Diode BC passante $\rightarrow I_C \sim$ indépendant de I_B

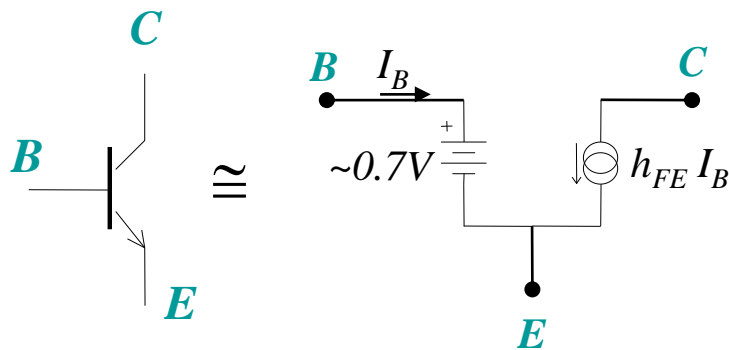
$\nearrow h_{FE}$ diminue lorsque $V_{CE} \rightarrow 0$

■ Modes actif / bloqué / saturé

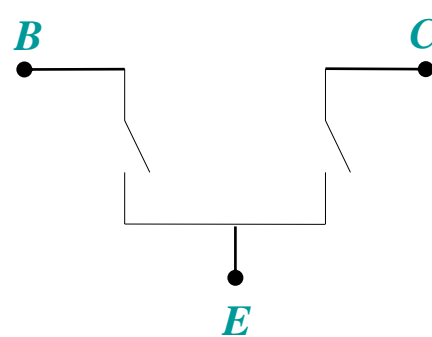
Transistor NPN

Configuration EC :

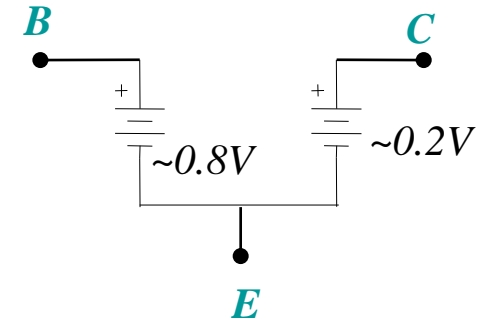
Mode actif :	$V_{BE} \approx 0.7V$	$\sim 0.3V < V_{CE} < V_{CC}$	$I_C \approx h_{FE} I_B$
Mode bloqué :	$I_B \cong 0$	$V_{CE} \cong V_{CC}$	$I_C \approx 0$
Mode saturé :	$V_{BE} \approx 0.8V$	$V_{CE} \approx 0.2V$	$I_C \neq h_{FE} I_B$



Mode actif



Mode bloqué



Mode saturé

⊠ V_{CC} = source de tension externe alimentant la maille contenant C et E (cf plus loin)
 V_{CE} ne peut pas dépasser cette valeur!

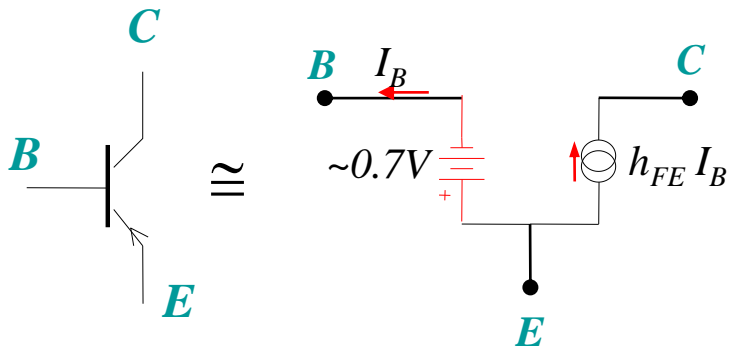
Transistor PNP

Configuration EC :

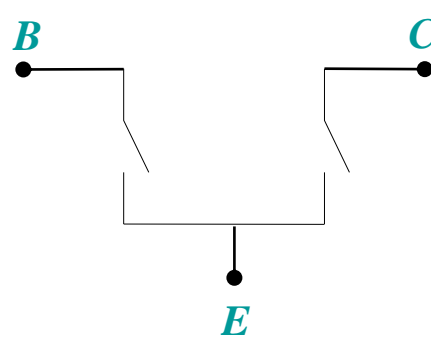
Mode actif : $V_{BE} \approx -0.7V$ $\sim -0.3V < V_{CE} < V_{CC}$ (< 0) $I_C \approx h_{FE} I_B$

Mode bloqué : $I_B \cong 0$ $V_{CE} \cong V_{CC}$ $I_C \approx 0$

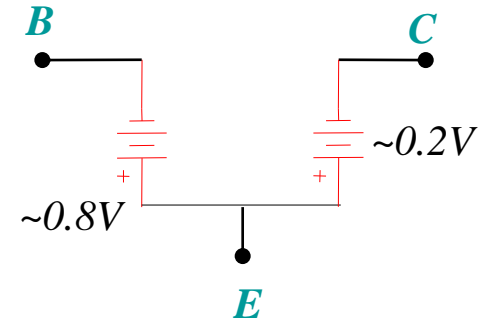
Mode saturé $V_{BE} \approx -0.8V$ $V_{CE} \approx -0.2V$ $I_C \neq h_{FE} I_B$



Mode actif



Mode bloqué



Mode saturé

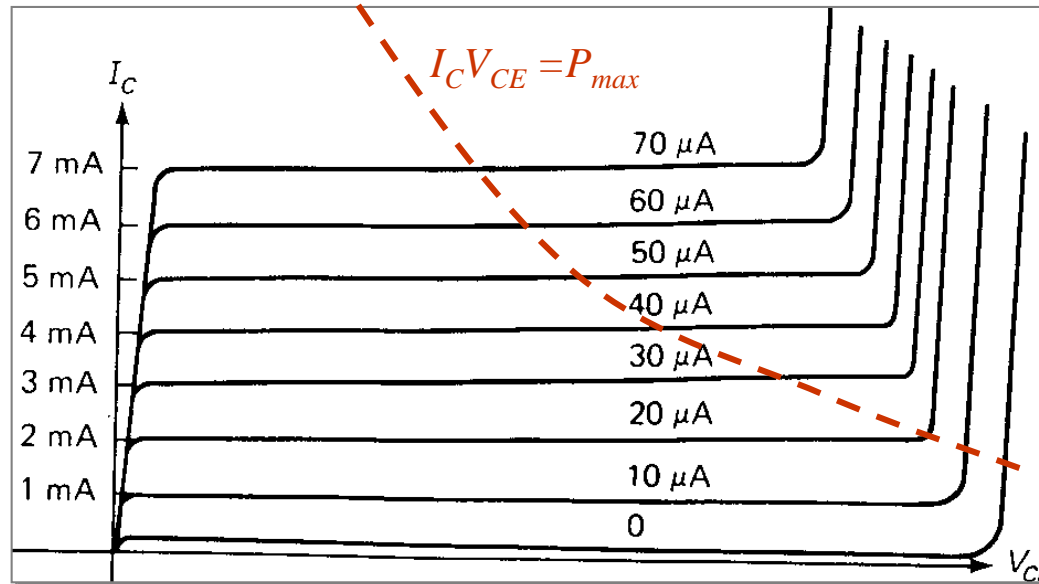
■ Valeurs limites des transistors

↓ Tensions inverses de claquage des jonctions PN (EB, BC)

↓ Puissance maximale dissipée : $P_{\max} = V_{CE} I_C$

↓ Courants de saturations inverses :

↗ I_C , I_B et $I_E \neq 0$ en mode bloqué



fiches techniques :

■ Influence de la température

☒ La caractéristique d'une jonction PN dépend de la température

↓ les courants inverses (mode bloqué) augmentent avec T

↓ V_{BE} , à $I_{B,E}$ constant, diminue avec T

↓ *ou réciproquement* : pour V_{BE} maintenue fixe, I_E (*et donc* I_C) **augmente avec T**

↓ **Risque d'emballement thermique :**

Lorsque $T \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow$ Puissance dissipée $\uparrow \Rightarrow$ Hausse de T amplifiée $\uparrow \dots$

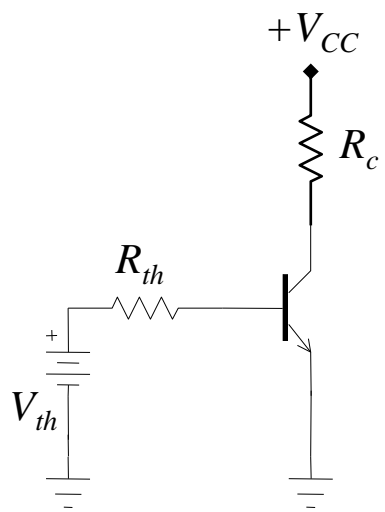
4.4 Modes de fonctionnement du transistor dans un circuit : Utilisation en émetteur commun

↔ *Point de fonctionnement*

■ **Droites de charges :**

Le point de fonctionnement est déterminé par les **caractéristiques** du transistor **et** par les **lois de Kirchhoff** appliquées au circuit.

Exemple : ● Comment déterminer I_B , I_C , V_{BE} , V_{CE} ?



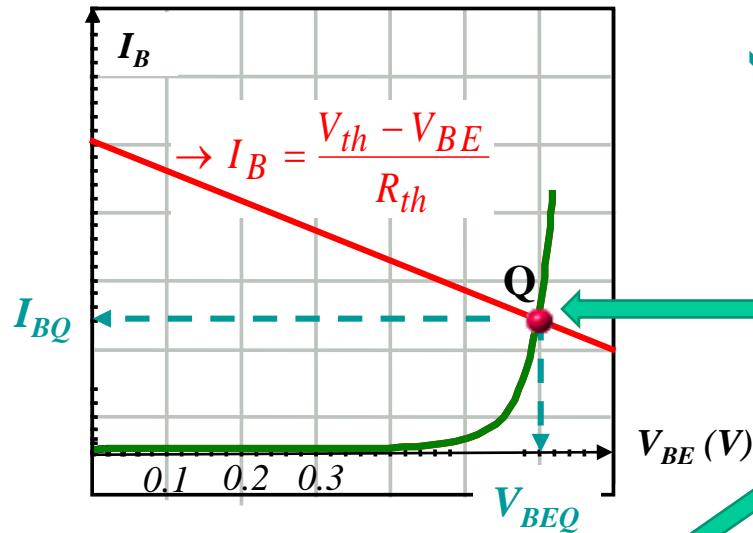
Droites de charges : deux équations linéaires

$$V_{th} = R_{th}I_B + V_{BE}$$
$$\rightarrow I_B = \frac{V_{th} - V_{BE}}{R_{th}}$$

$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$$
$$\rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

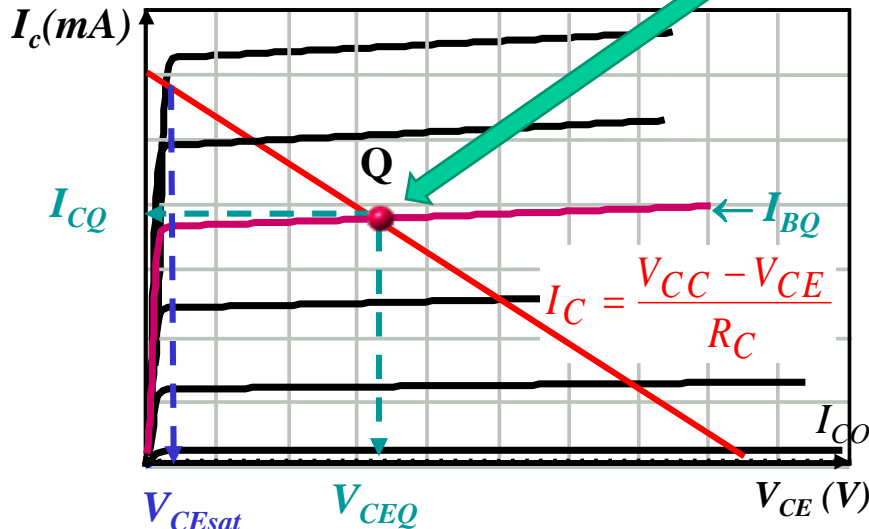
Permettent de localiser le point de fonctionnement sur les caractéristiques du transistor

■ Point de fonctionnement: détermination graphique



↓ $V_{BEQ} \approx 0.6-0.7V$, dès que $V_{th} > 0.7V$
(diode passante
transistor actif ou saturé)

fixe le courant I_B à la valeur I_{BQ} et dans le réseau de courbes $I_C(V_{CE})$ c'est celle qui correspond à I_{BQ} qui est d'actualité
l'intersection de la seconde droite de charge avec cette caractéristique détermine la valeur de I_{CQ} et de V_{CEQ} .

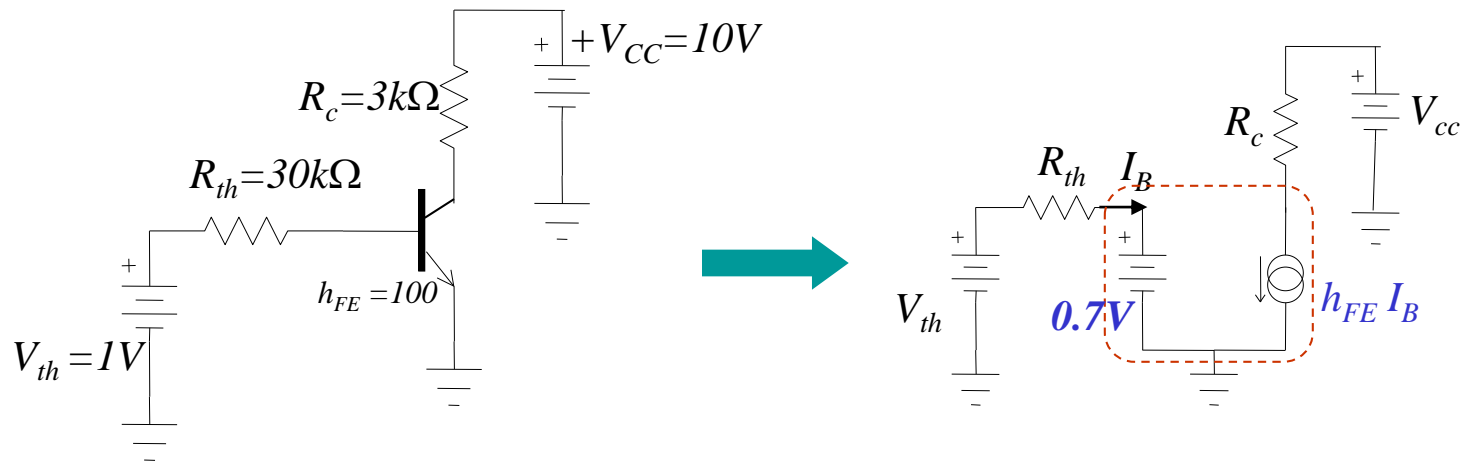


↓ $V_{CE_{sat}} \leq V_{CEQ} \leq V_{CC}$

$$I_{CO} \leq I_C \leq \frac{V_{CC} - V_{CE_{sat}}}{R_C} \approx \frac{V_{CC}}{R_C}$$

✉ **Q fixe le mode de fonctionnement du transistor**

Exemple : Calcul du point de fonctionnement : détermination par calcul



$$\rightarrow I_{B_Q} = 10\mu A$$

$$\rightarrow I_{C_Q} = 1mA$$

$$\rightarrow V_{CE_Q} = 7V$$

✉ On a bien : $\sim 0,3 < V_{CE_Q} < V_{CC}$

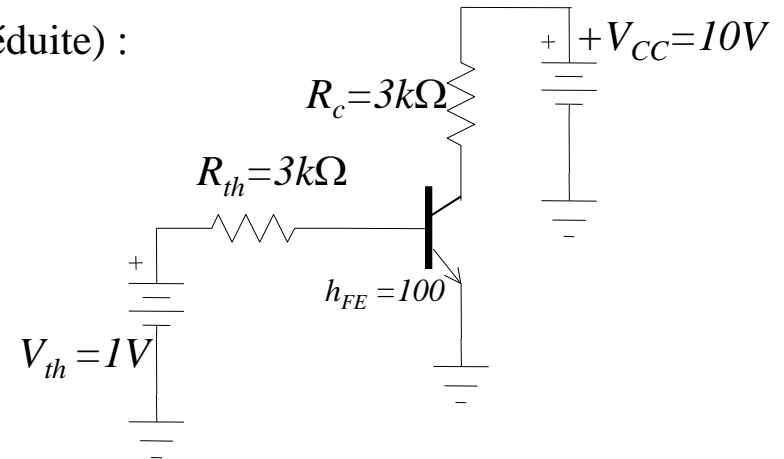
Résultat **cohérent** avec le **mode actif** du transistor.

- Remplacement de R_{th} par $3k\Omega$ (résistance R_{th} est réduite) :

$$\dots \rightarrow I_{BQ} = 100\mu A$$

$$\dots \rightarrow I_{CQ} = 10mA$$

$$\dots \rightarrow V_{CEQ} = -20V !!$$



✉ **Résultat incompatible** avec le mode actif

↓ le modèle donne des valeurs erronées

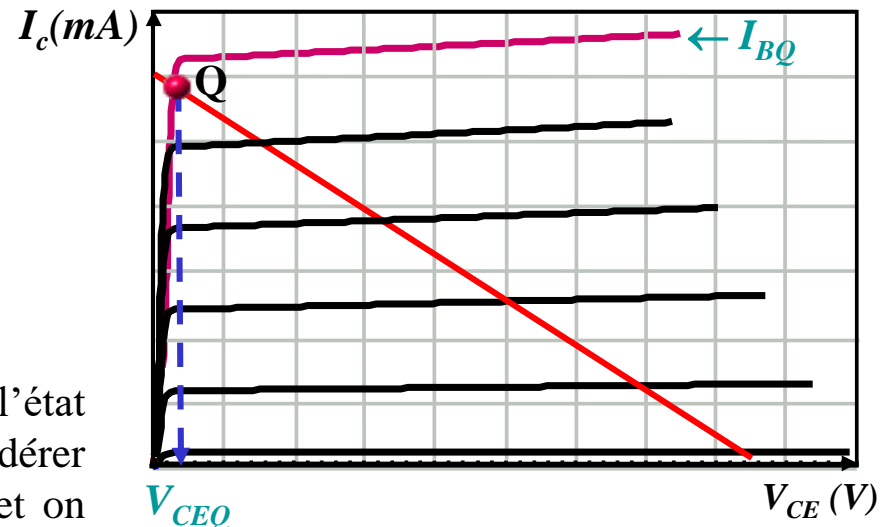
Conséquences :

En ayant augmenté I_{BQ} , (réduction de R_{th})
Q a atteint la limite de la zone
correspondant au mode actif

$$\rightarrow V_{CEQ} \sim 0.3V$$

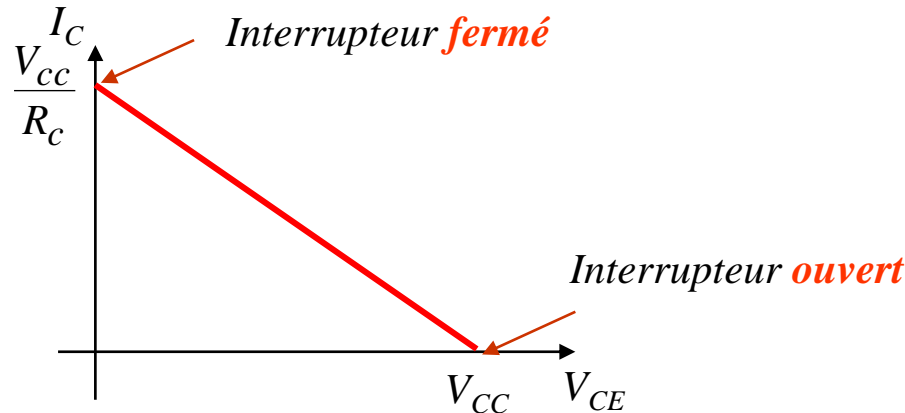
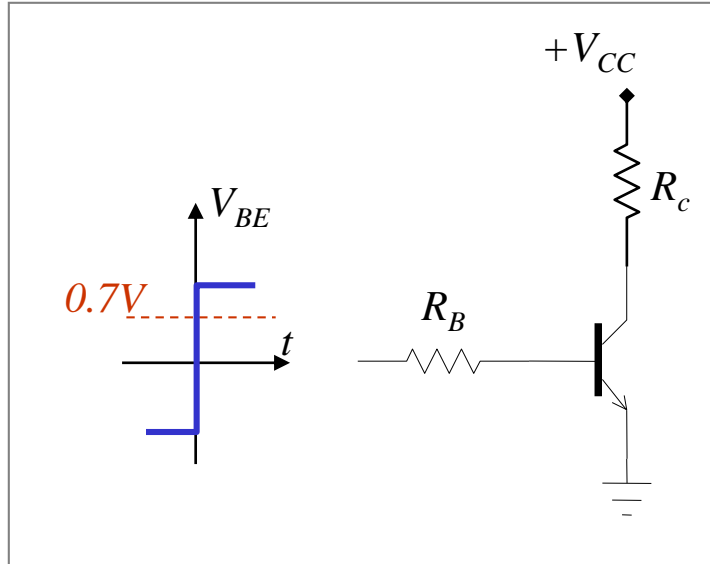
$$\text{et } I_{CQ} = 3.2mA$$

On peut en conclure que le transistor passe dans l'état saturé. Partant de cette constatation, on peut considérer que la tension V_{CE} est de l'ordre de 0.2 à 0.3V et on peut estimer les autres grandeurs électriques du montage.



■ Quelques circuits élémentaires :

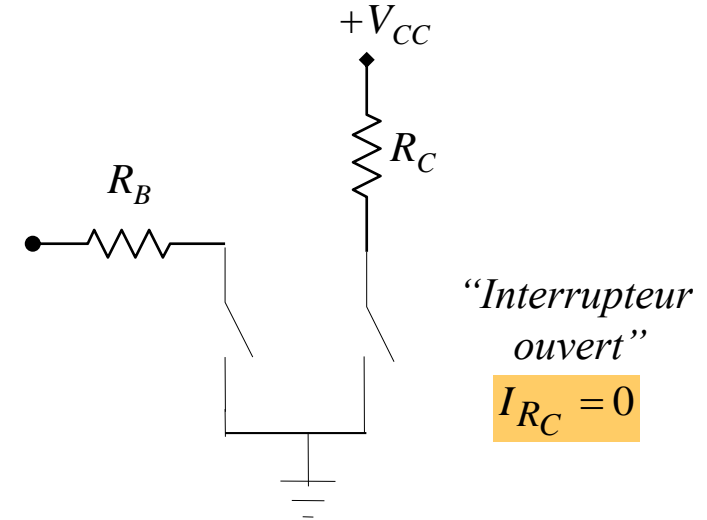
1_ Transistor interrupteur commandé:



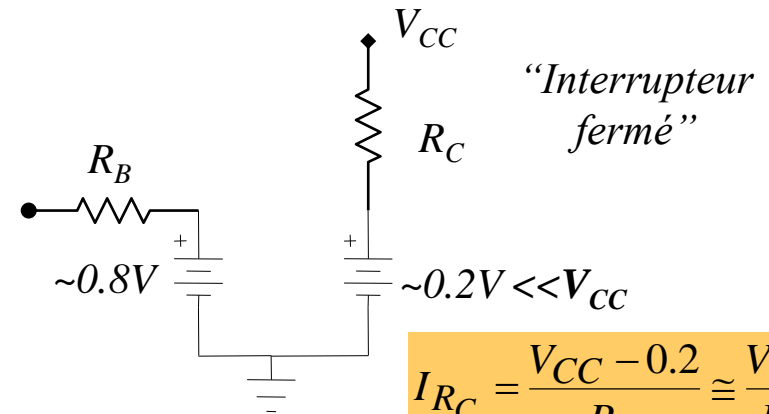
La valeur minimale de I_B pour atteindre ce régime d'interrupteur fermé est donnée par $I_{B_{\min}}$

$$I_{B_{\min}} \text{ (interrupteur fermé)} \cong \frac{V_{CC}}{R_C h_{FE}} \cong \frac{V_{BE_{\min}} - 0.7}{R_B}$$

$t < 0$: $V_{BE} < 0.7V \rightarrow$ Mode bloqué

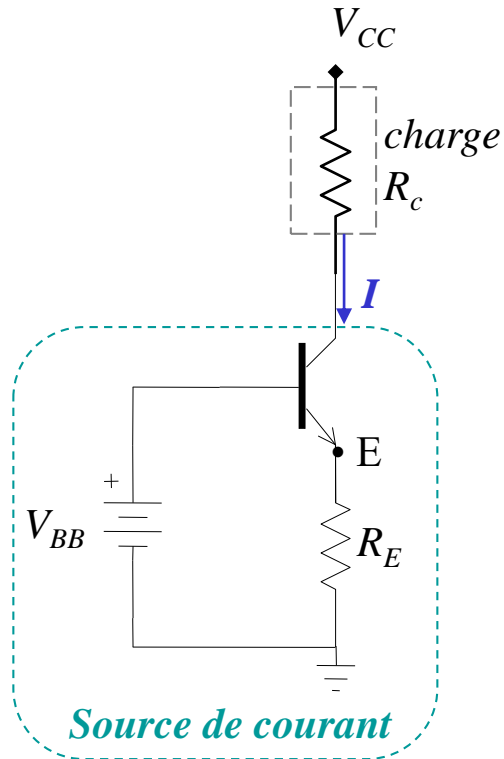


$t > 0$: $V_{BE} > \sim 0.8V$, telque $R_C I_C \sim V_{CC}$
 $\rightarrow V_{CE} \sim qq. 100mV$



$$I_{RC} = \frac{V_{CC} - 0.2}{R_C} \cong \frac{V_{CC}}{R_C}$$

2_ Transistor source de courant :



$$\rightarrow I \approx \frac{V_{BB} - 0.7V}{R_E}$$

En d'autres termes, le courant dans la charge (R_c) ne dépend pas (en première approximation) de la valeur de la charge.

“quelque soit” $R_c \dots$

tant que le transistor est en **mode actif**

Domaine de fonctionnement : ($V_{BB} > 0.7V$)

$$\approx 0 < V_{CE} = V_{CC} - (R_c + R_E)I_C < V_{CC}$$

Le circuit remplit sa fonction de source de courant tant que $R_c + R_E < V_{cc}/I$ ou encore $R_c < V_{cc}/I - R_E$ (à quelques 100mV près).

- $R_{c_{\max}} \cong \frac{V_{cc}}{I} - R_E$

pour R_c supérieure à $R_{c_{\max}} \rightarrow$ transistor passe en mode **saturé** et ne joue plus le rôle de source de courant.

✉ $R_{c_{\min}} = 0$

Transistor, amplificateur de tension :

hypothèses :

● Point de fonctionnement “au repos” :
Transistor en **mode actif** lorsque $v_B = 0$
(amplificateur “classe A”)

● **Amplitude** du signal v_B suffisamment **faible**
pour que le transistor soit à chaque instant actif

● En 1^{ière} **approximation** :

$$\rightarrow I_E \approx \frac{V_B - 0.7}{R_E} \approx I_C = \bar{I}_C + i_c \quad (I_B \ll I_C)$$

En négligeant la variation de V_{BE} : $\rightarrow i_c \approx \frac{v_B}{R_E}$

Enfin : $V_{Sortie} = V_{cc} - R_C I_C = V_S + v_s$ avec $V_S = V_{cc} - R \cdot \bar{I}_C$

et

$$v_s = -R_C i_c = -\frac{R_C}{R_E} v_B$$

Le “signal” v_B est amplifié par le facteur

$$A_v = -\frac{R_C}{R_E}$$

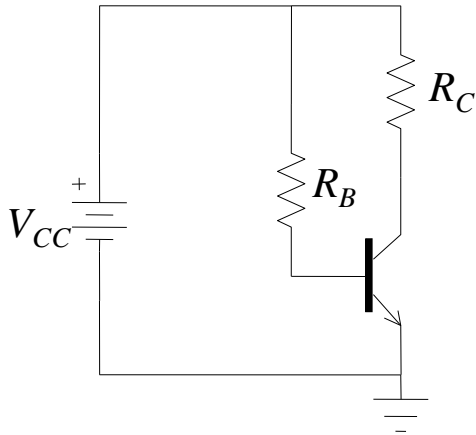
☒ $A_v = “\infty”$ pour $R_E = 0$?? voir plus loin pour la réponse...

☒ Comment fixer le point de fonctionnement au repos de manière optimale?

4.5 Circuits de polarisation du transistor

- Le circuit de polarisation fixe le **point de repos** (ou point de fonctionnement statique) du transistor
- Le choix du point de repos dépend de l'**application** du circuit.
- Il doit être à l'intérieur du domaine de **fonctionnement** du transistor ($I_{C(B)} < I_{max}$, $V_{CE(BE)} < V_{max} \dots$)
- Les principales caractéristiques d'un circuit de polarisation sont :
 - sensibilité par rapport à la dispersion de fabrication du transistor (incertitude sur h_{FE}, \dots)
 - stabilité thermique.
(coefficient de température des différents paramètres du transistor : V_{BE} , h_{FE}, \dots).

■ Circuit de polarisation de base (à courant I_B constant)



$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{V_{cc} - 0.7}{R_B}$$

$$Q: I_c = h_{FE} I_B \quad \text{et} \quad V_{CE} = V_{cc} - R_C I_c$$

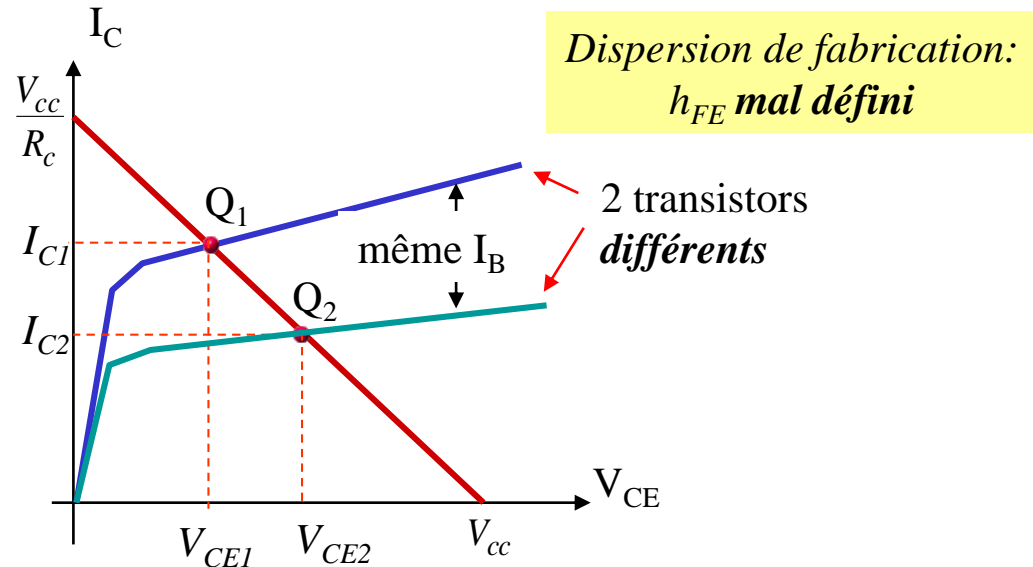
Conséquence : $\Delta h_{FE} \Rightarrow \Delta I_c \Rightarrow \Delta V_{CE}$

→ Le point de repos **dépend fortement de h_{FE}** = *inconvenient majeur*

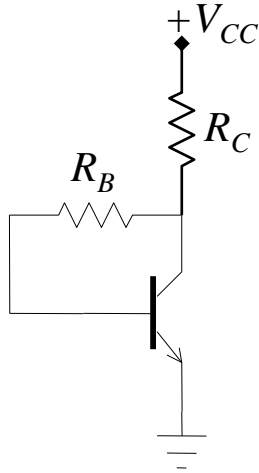
→ Circuit de polarisation **peu utilisé**.

Exemple : Transistor en mode saturé $\leftrightarrow R_B$ tel que $I_B > I_{B_{sat}} \approx \frac{V_{cc}}{R_C h_{FE}}$

en prenant pour h_{FE} la *valeur minimale* garantie par le constructeur.



■ Polarisation par réaction de collecteur



$$\rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_C + \frac{R_B}{h_{FE}}}$$

Le point de fonctionnement reste sensible à h_{FE}

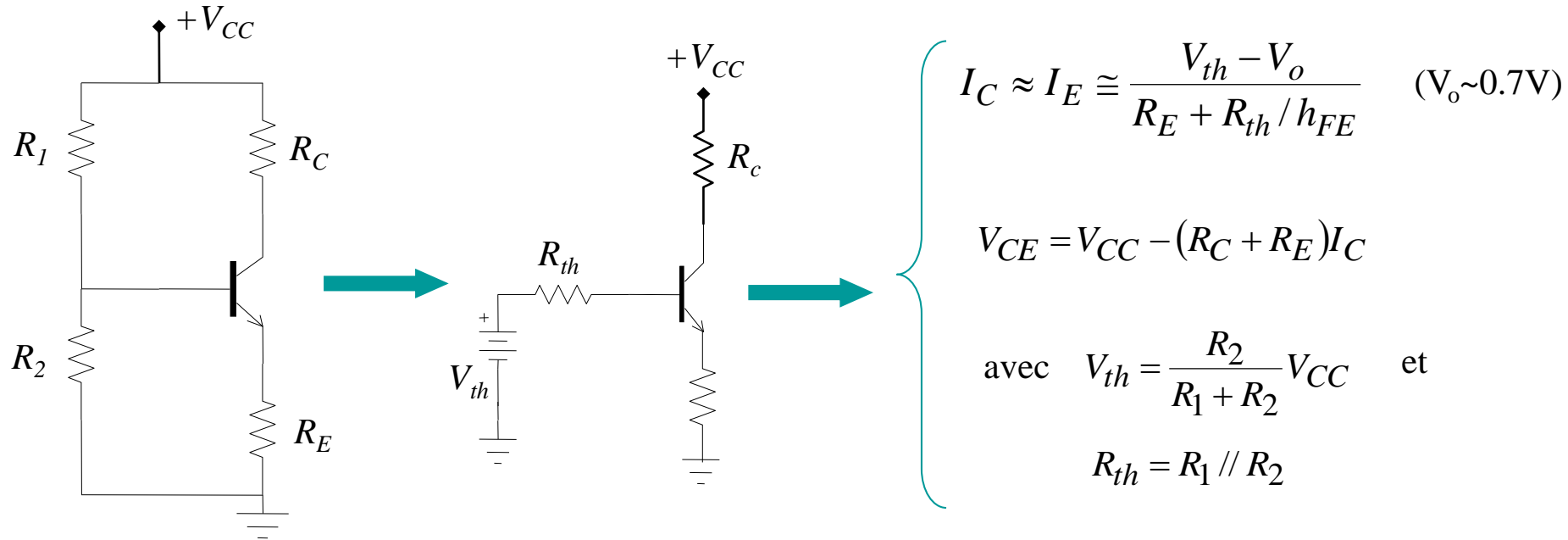
Propriété intéressante du montage :

Le transistor ne peut rentrer en saturation puisque V_{CE} ne peut être inférieur à 0.7V

Cas particulier : $R_B=0 \rightarrow I_C \approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_C} \quad V_{CE} = 0.7V$

↓ Le transistor se comporte comme un **diode**.

■ Polarisation par diviseur de tension - « polarisation à courant (émetteur) constant »



↓ **Peu sensible** à h_{FE} : si $\frac{R_{th}}{h_{FE}} \ll R_E \rightarrow I_C \approx \frac{V_{th} - V_o}{R_E}$

↓ Bonne stabilité **thermique** de I_C à condition que $V_{th} \gg V_o \Leftrightarrow V_B \gg V_o$

Règles « d'or » pour la conception du montage :

- $R_{th}/R_E \leq 0.1 h_{FE}^{\min}$ ou encore $R_2 < 0.1 h_{FE}^{\min} R_E \Leftrightarrow I_{R2} \approx 10 I_b$
- $V_E \sim V_{CC}/3$

☹ Diminuer R_{th} **augmente** le courant de polarisation I_{R1}

Une façon de comprendre la stabilité du montage :

R_E introduit une **contre-réaction**

