

### 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)

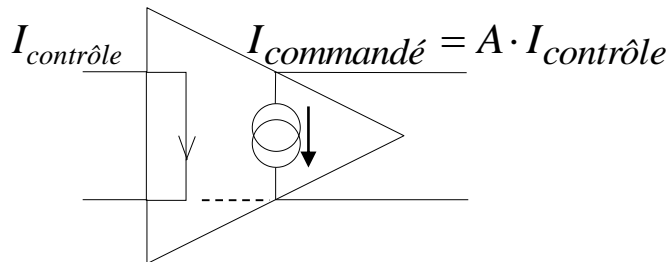
■ on distingue le transistor **bipolaire** du transistor **à effet de champ**

↓ différents mécanismes physiques

■ Ils agissent, en 1<sup>ière</sup> approx., comme une **source de courant commandé**

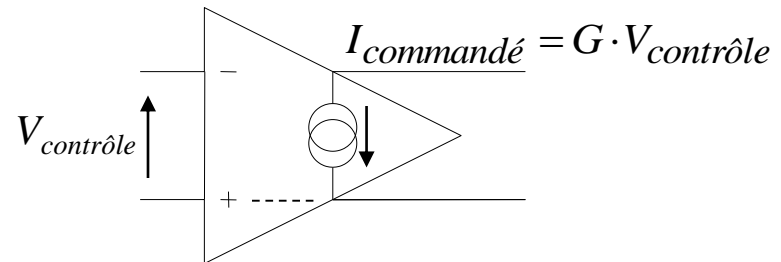
↓ transistor bipolaire : commandé **par un courant**

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



*source de courant  
commandée par un  
courant*

$A = \text{“gain” en courant}$



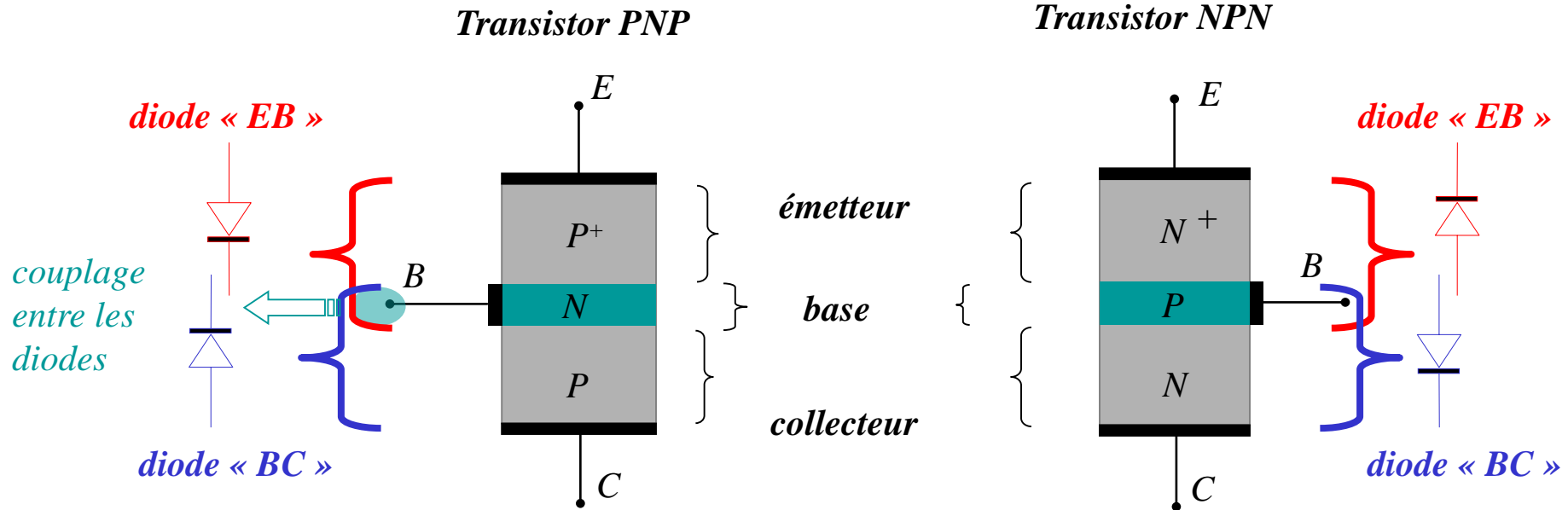
*source de courant  
commandée par une  
tension*

$G = \text{transconductance.}$

☒ **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** »

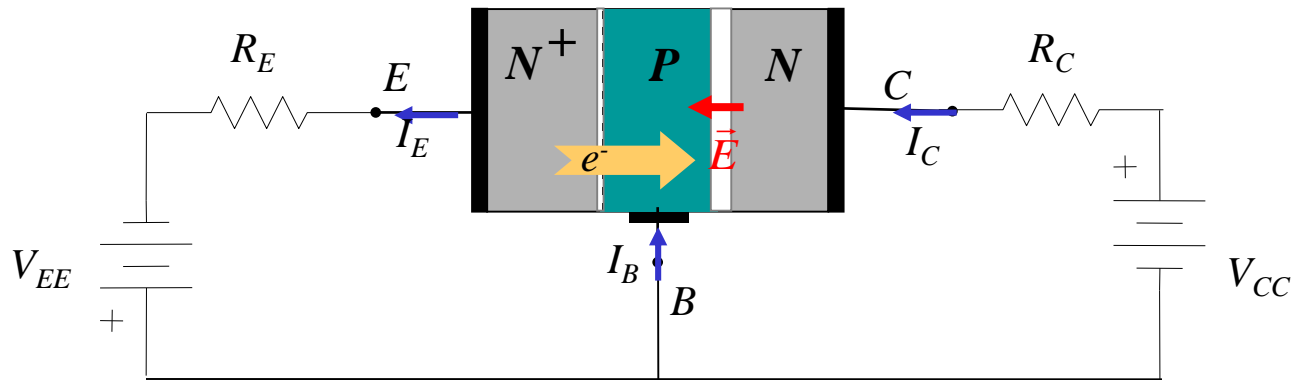
le courant dans l'une des diodes (généralement dans la jonction base/émetteur) détermine le courant dans la seconde

☒ **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

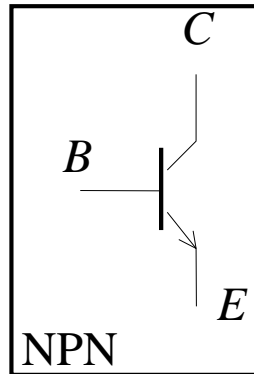
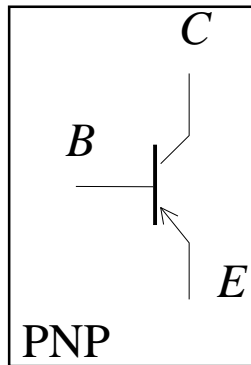
- ↓ si  $V_{EE} > \sim 0.7V$  , jonction EB passante →  $V_{BE} \sim 0.7V, I_E \gg 0$
- ↓ La jonction EB est **dissymétrique** (dopage plus élevé côté E)  
→ **courant** porté essentiellement par les **électrons** (peu de trous circulent de B vers E)
- ↓  $V_{CC} > 0$ , jonction BC “bloquée” => **champ 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** :  $V_{BE} > \sim 0.7V$ ,  $V_{CB} > -0.5V$

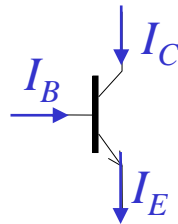
Le transistor bipolaire n'est pas une source de courant commandée idéale. Il ne se comporte comme une source de courant commandée que s'il est en mode actif, c'est-à-dire que lorsque  $V_{BE} > \sim 0.7V$ ,  $V_{CB} > \sim -0.5V$  ( pour un PNP il faudrait  $V_{EB} > \sim 0.7V$ ,  $V_{BC} > \sim -0.5V$

## ■ Symboles

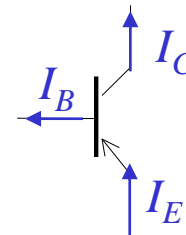


✉  $I_E > 0$  en **mode actif**

## ■ 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

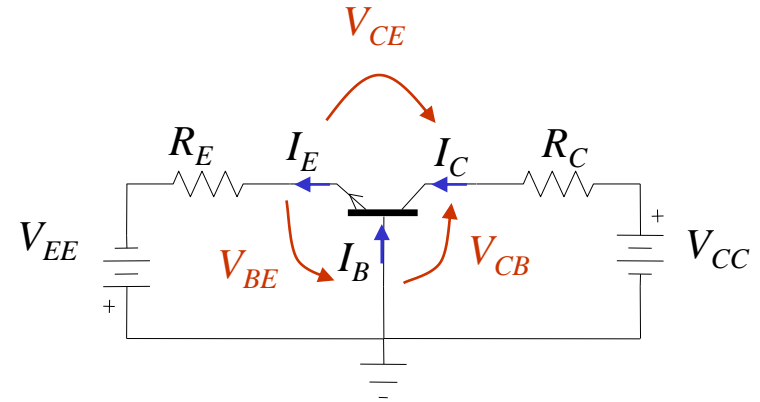
### ● Configuration “Base Commune” (base = électrode commune)

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

### ● Configuration “Emetteur Commun” (émetteur = électrode commune)

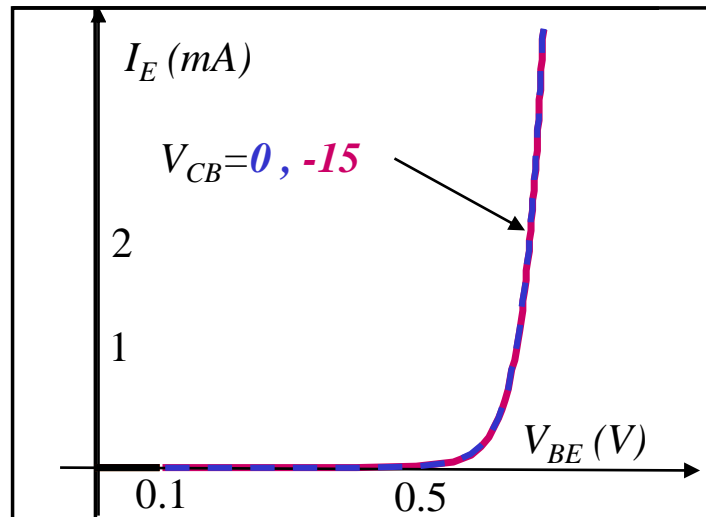
↓ Caractéristiques :  $I_B(V_{BE}, V_{CE})$ ,  $I_C(V_{CE}, I_B)$

✉ 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.  $V_{CB}$ )

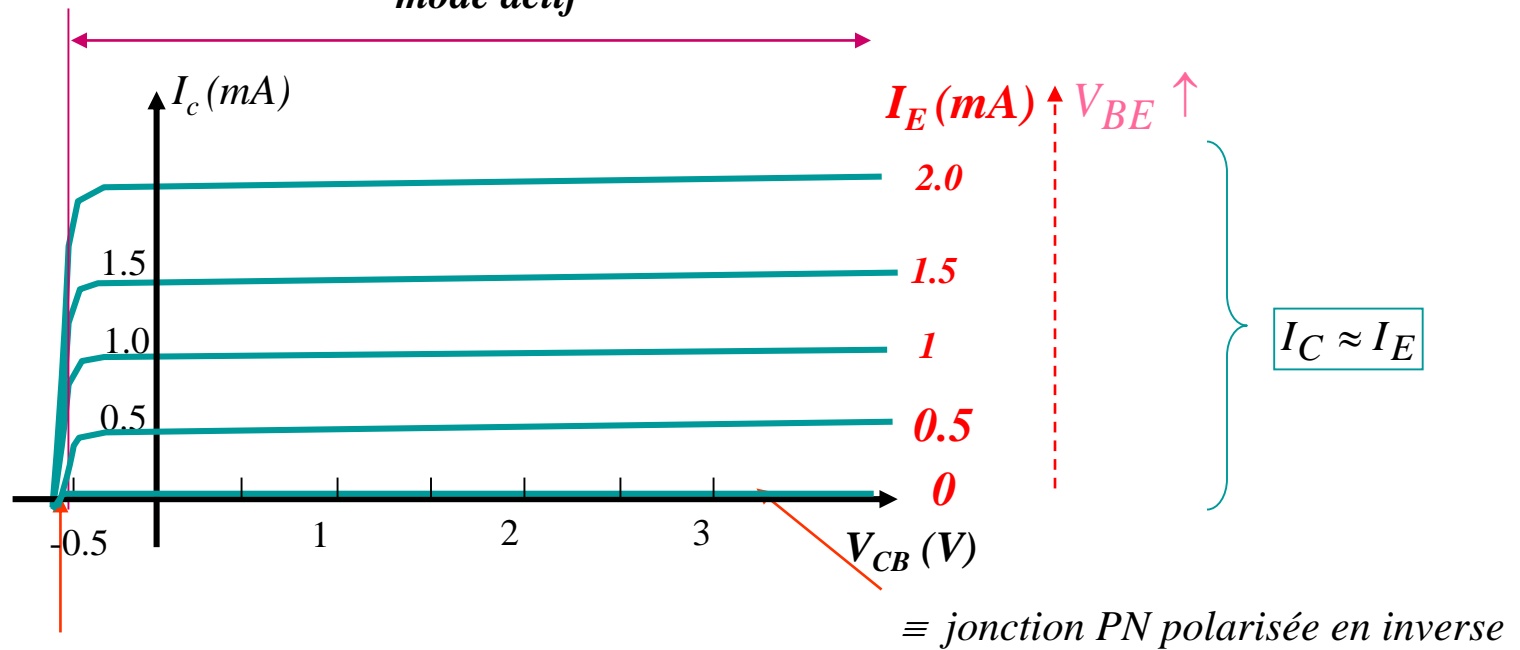
*Jonction BE bloqué*  
 $I_E \sim 0, V_{BE} < 0.5 \text{ V}$

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



*mode actif*

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



*tension seuil de la jonction BC*

- ↓ pour  $V_{CB} > \sim -0.5$  V, on a  $I_C = \alpha_F I_E$ , avec  $\alpha_F$  proche de 1.  
 ↗ En **mode actif**,  $I_B = I_E - I_C = I_E(1 - \alpha_F)$
- ↓ pour  $I_E = 0$ , on a  $I_C =$  **courant de saturation inverse** de la jonction BC  $\sim 0$   
 ↗ 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 :  $\alpha_F \sim 0.950 - 0.999$   $\alpha_F =$  “gain en courant continue en BC”

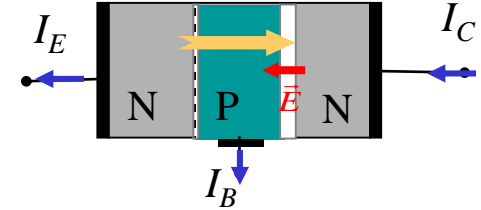
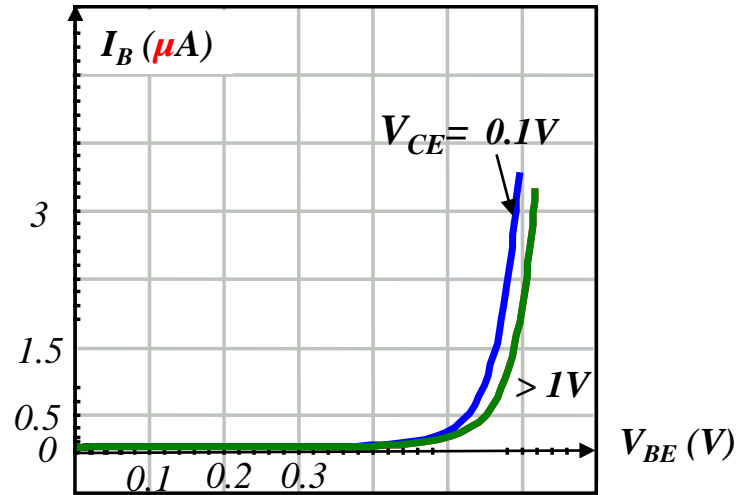
$\alpha_F$  = représente la fraction des électrons, issus de l’émetteur, qui atteignent le collecteur sans s’être recombinaés avec les trous de la base.

## ■ 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

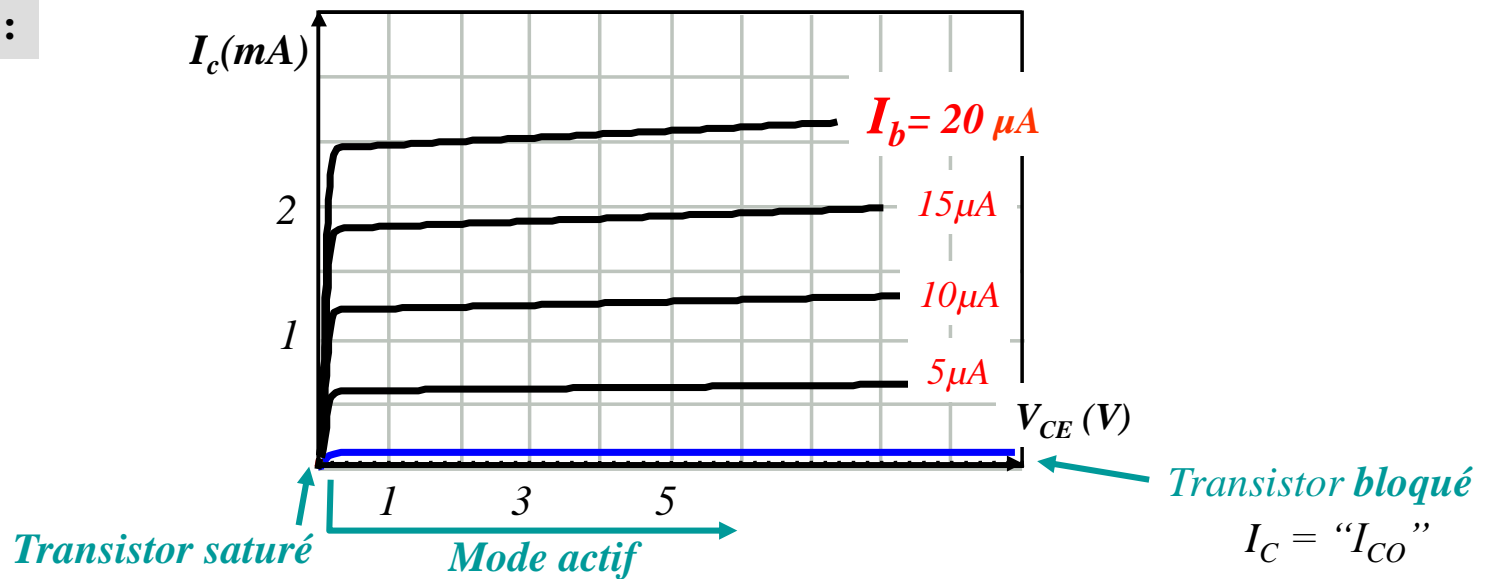
☒  $I_B \ll I_E \leftrightarrow$  **charges non collectées** par le champ électrique de la jonction BC

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

↓ Influence non-négligeable de  $V_{CE}$  sur  $\alpha_F \leftrightarrow$  “**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  $V_{CB} > \sim -0.5 V$

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

$$I_C = \alpha_F I_E = \alpha_F (I_C + I_B) \Rightarrow I_C = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} I_B = "h_{FE}" I_B \quad h_{FE} = \text{"gain en courant continue en EC"} = "\beta_F"$$

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

☒ Grande dispersion de fabrication sur  $h_{FE}$ .

↓ **Effet Early** :  $\alpha_F$  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  $I_B$

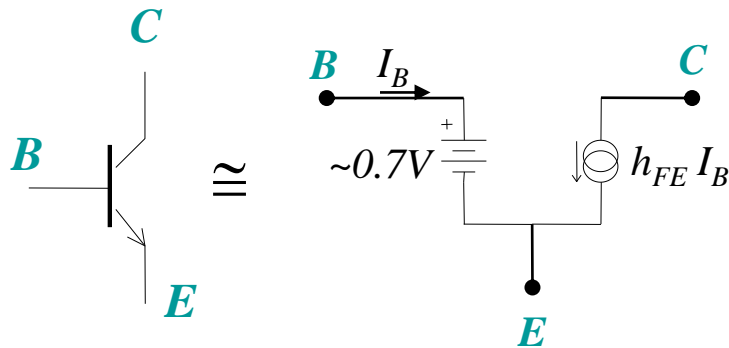
$\nearrow h_{FE}$  diminue lorsque  $V_{CE} \rightarrow 0$

## ■ Modes actif / bloqué / saturé

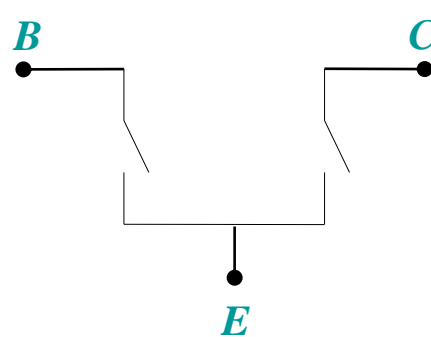
### Transistor NPN

#### Configuration EC :

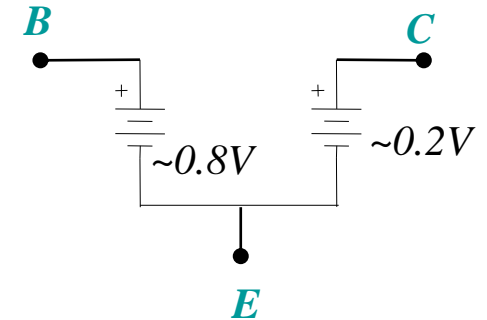
<b>Mode actif :</b>	$V_{BE} \approx 0.7V$	$\sim 0.3V < V_{CE} < V_{CC}$	$I_C \approx h_{FE} I_B$
<b>Mode bloqué :</b>	$I_B \cong 0$	$V_{CE} \cong V_{CC}$	$I_C \approx 0$
<b>Mode saturé :</b>	$V_{BE} \approx 0.8V$	$V_{CE} \approx 0.2V$	$I_C \neq h_{FE} I_B$



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!

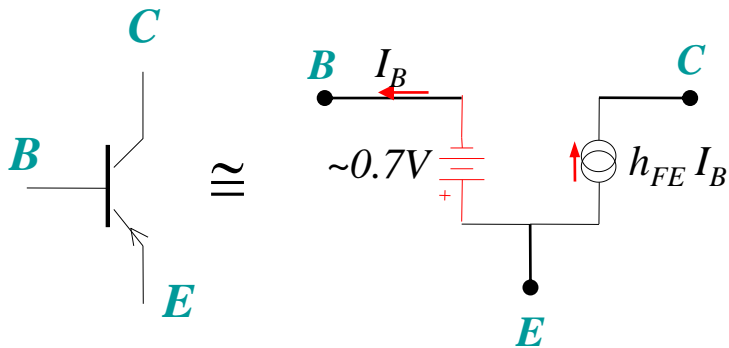
## Transistor PNP

Configuration EC :

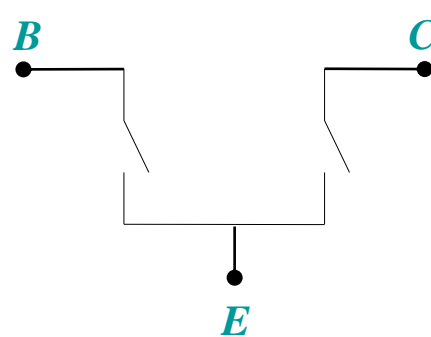
Mode actif :  $V_{BE} \approx -0.7V$   $\sim -0.3V < V_{CE} < V_{CC}$  ( $< 0$ )  $I_C \approx h_{FE} I_B$

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

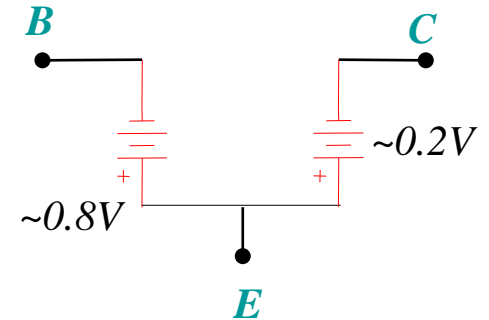
Mode saturé  $V_{BE} \approx -0.8V$   $V_{CE} \approx -0.2V$   $I_C \neq h_{FE} I_B$



Mode actif



Mode bloqué



Mode saturé

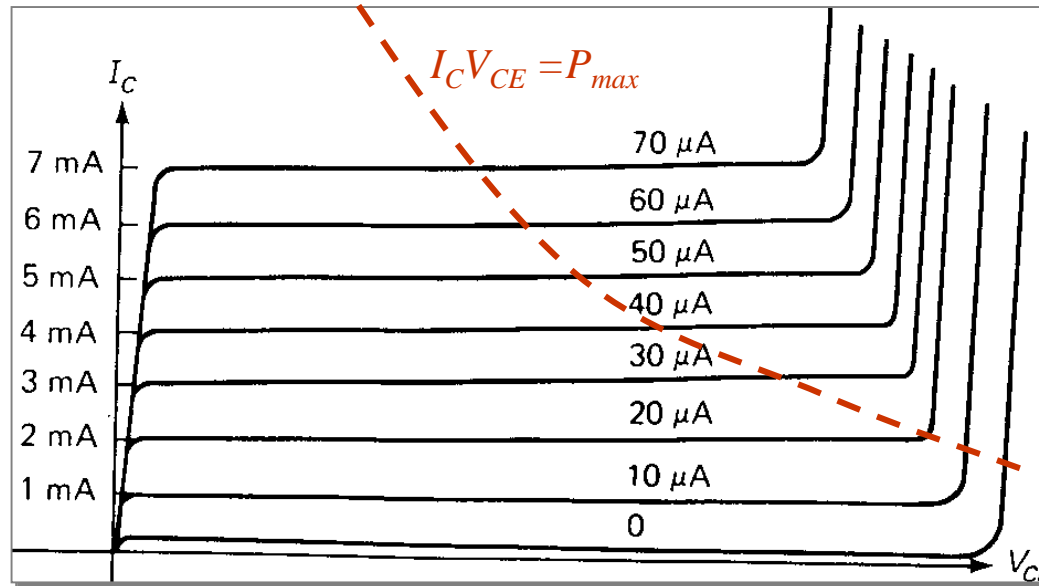
## ■ Valeurs limites des transistors

↓ 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**

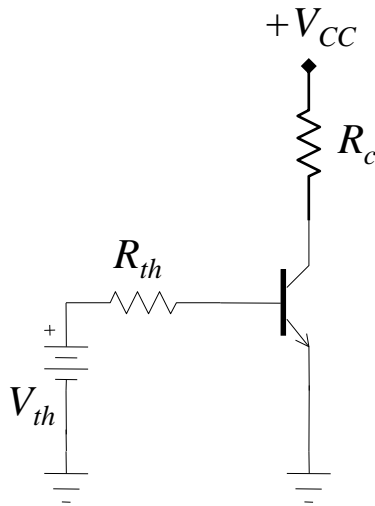
↓ **Risque d'emballement thermique** :  $T \uparrow \Rightarrow I_C \uparrow \Rightarrow \text{Puissance dissipée} \uparrow \Rightarrow T \uparrow \dots$

## 4.4 Modes de fonctionnement du transistor dans un circuit $\leftrightarrow$ 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  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$  ?



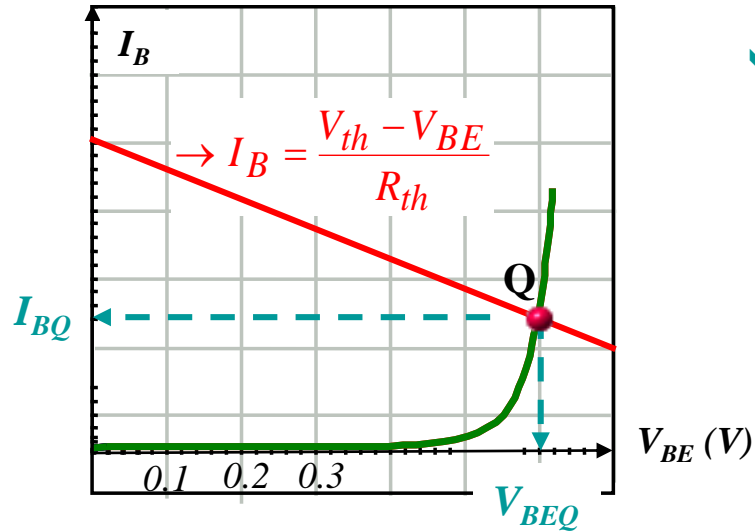
*Droites de charges :*

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

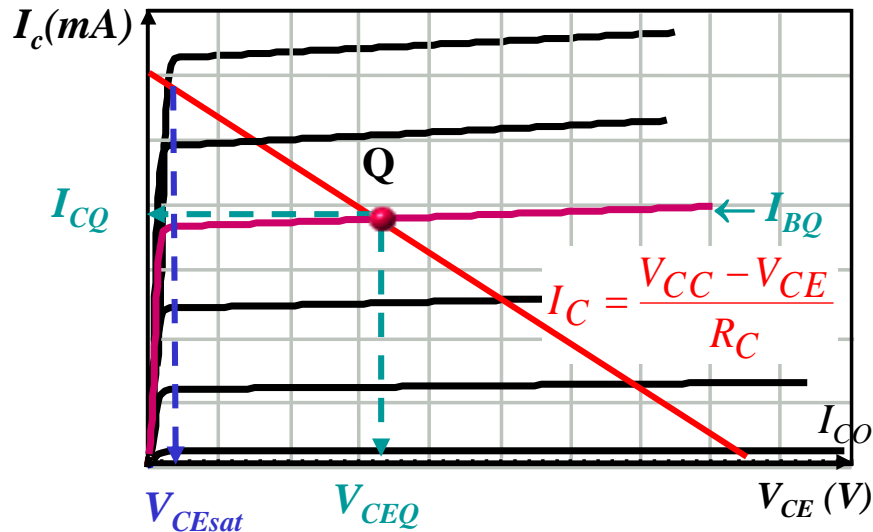
$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE} \quad \rightarrow I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$



## ■ Point de fonctionnement



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

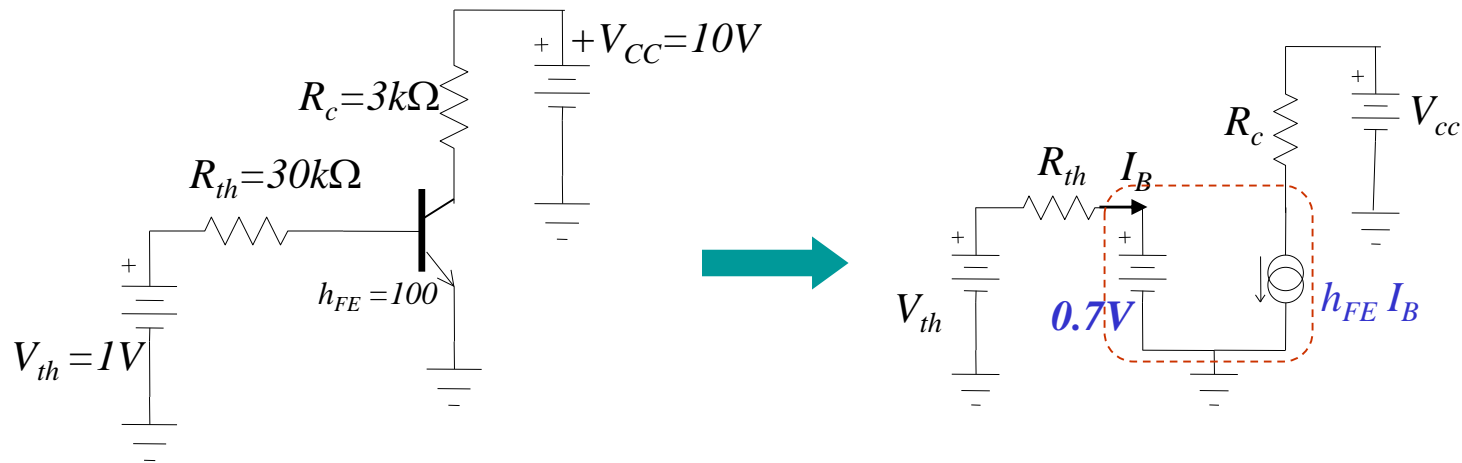


↓  $V_{CE_{sat}} \leq V_{CEQ} \leq V_{CC}$

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

⊠ Q fixe le mode de fonctionnement du transistor

### Exemple : Calcul du point de fonctionnement



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

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

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

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

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

- Remplacement de  $R_{th}$  par  $3k\Omega$  :

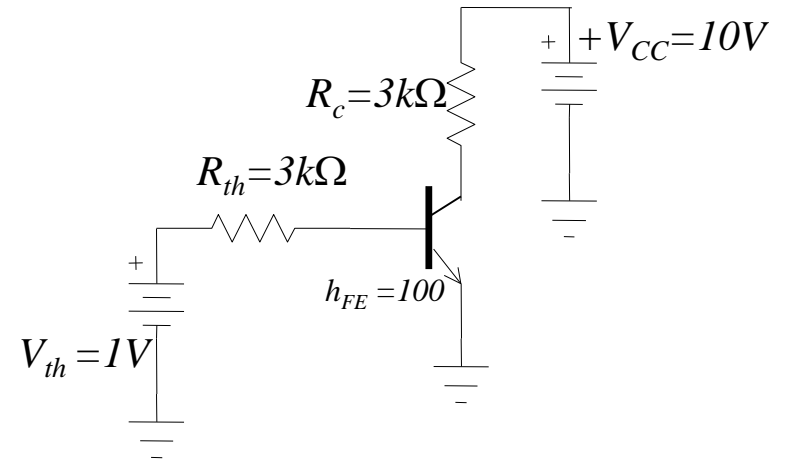
$$\dots \rightarrow I_{BQ} = 100\mu A$$

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

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

✉ **Résultat incompatible** avec le mode actif

↓ le modèle donne des valeurs erronées

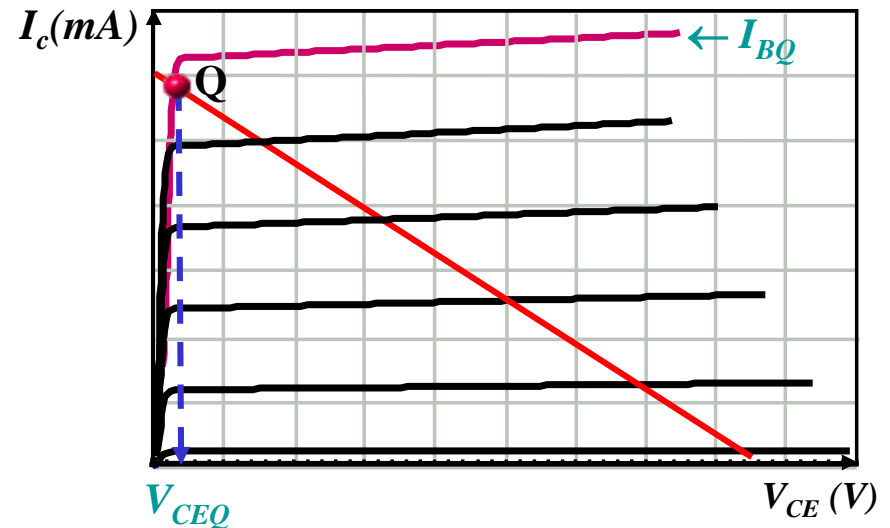


**Cause :**

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

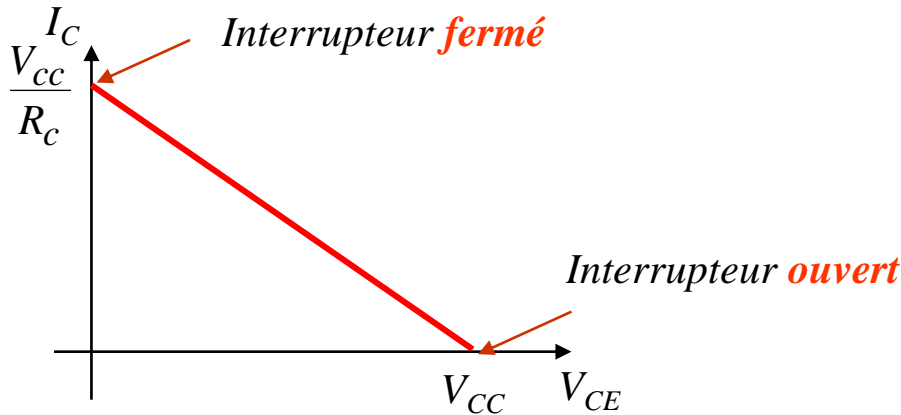
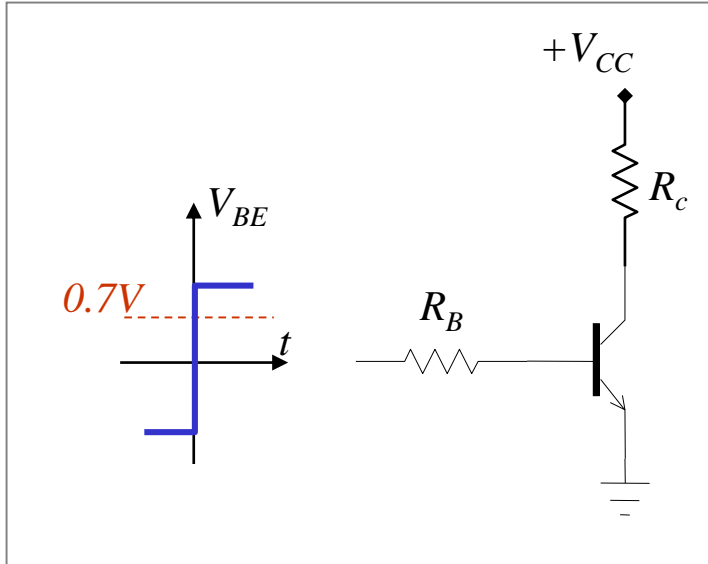
$$\rightarrow V_{CEQ} \sim 0.3V$$

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



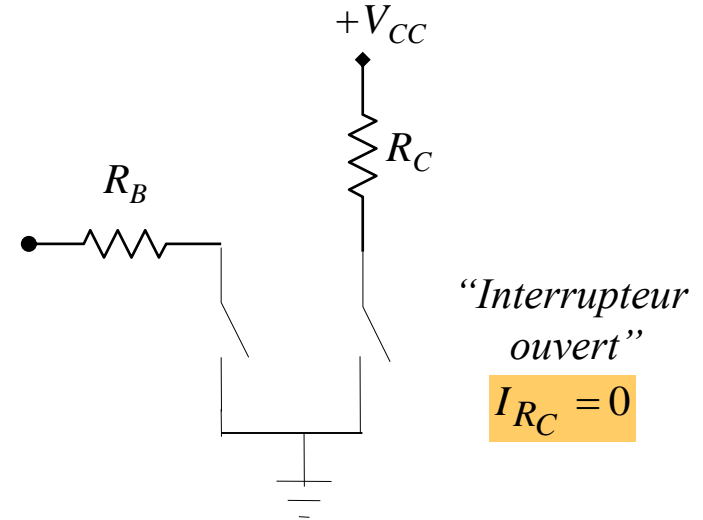
## ■ Quelques circuits élémentaires :

### Transistor interrupteur:

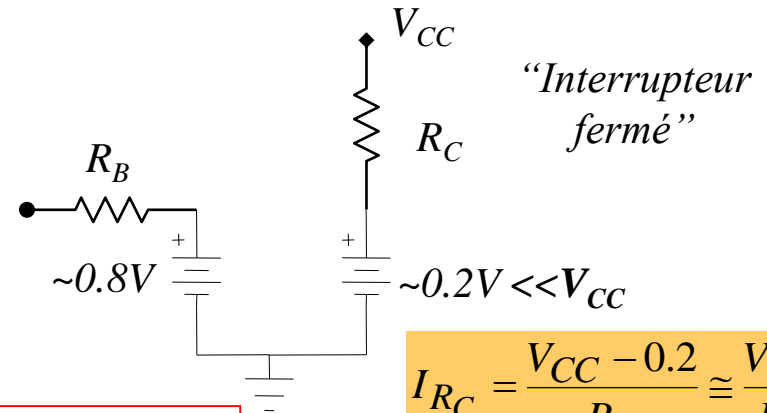


$$I_{B_{\min}} \text{ (interrupteur fermé)} \cong \frac{V_{CC}}{R_C h_{FE}} \cong \frac{V_{BE_{\min}} - 0.7}{R_B}$$

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

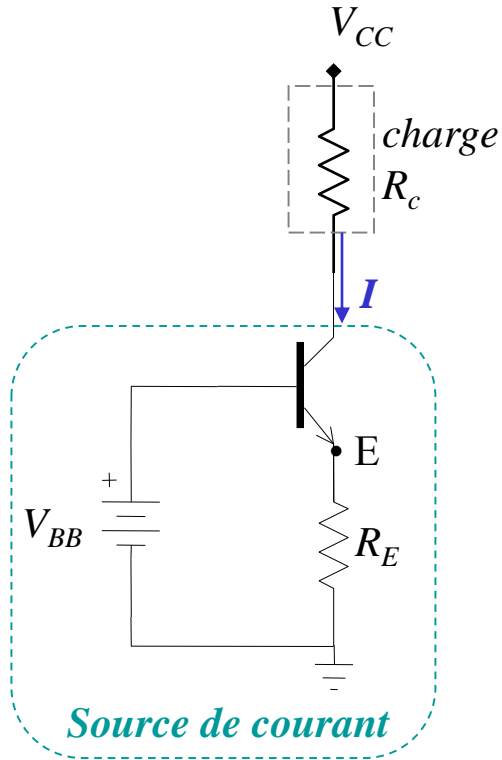


$t > 0$  :  $V_{BE} > \sim 0.8V$ , telque  $R_C I_c \sim V_{CC}$   
 $\rightarrow V_{CE} \sim qq. 100mV$



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

## Transistor source de courant :



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

“quelque soit”  $R_C$  ...

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

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

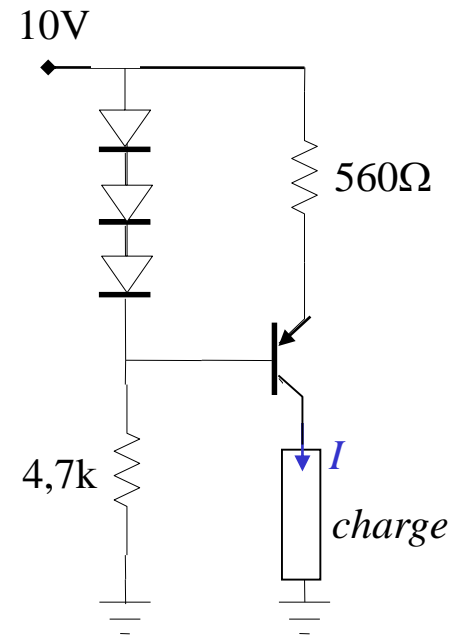
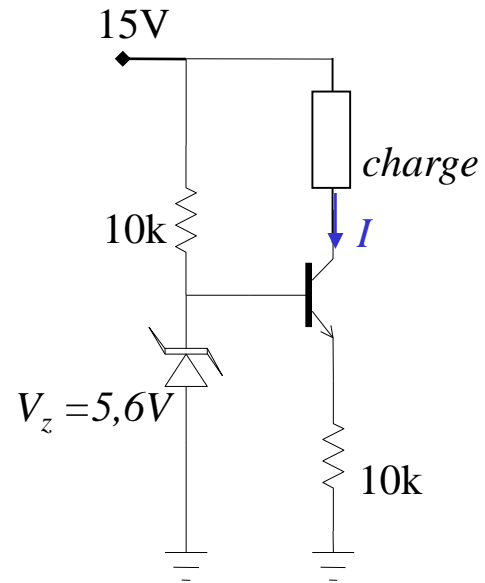
$$\approx 0 < V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C < V_{CC}$$

●  $R_{C_{\max}} \cong \frac{V_{CC}}{I} - R_E$

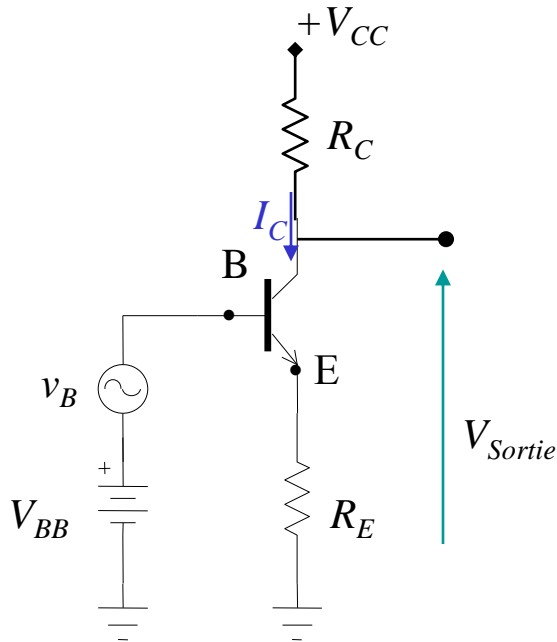
pour  $R_C$  supérieure à  $R_{C_{\max}} \rightarrow$  transistor **saturé**

✉  $R_{C_{\min}} = 0$

**Exercices : Calculer le courant dans la charge, la plage de tension**



## 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<sup>ière</sup> 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...

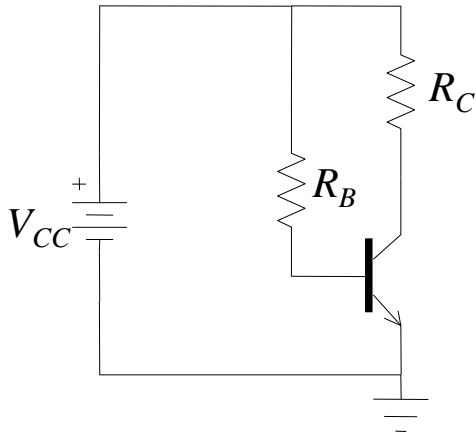
☒ Comment fixer le point de fonctionnement au repos de manière optimale?

## 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)



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

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

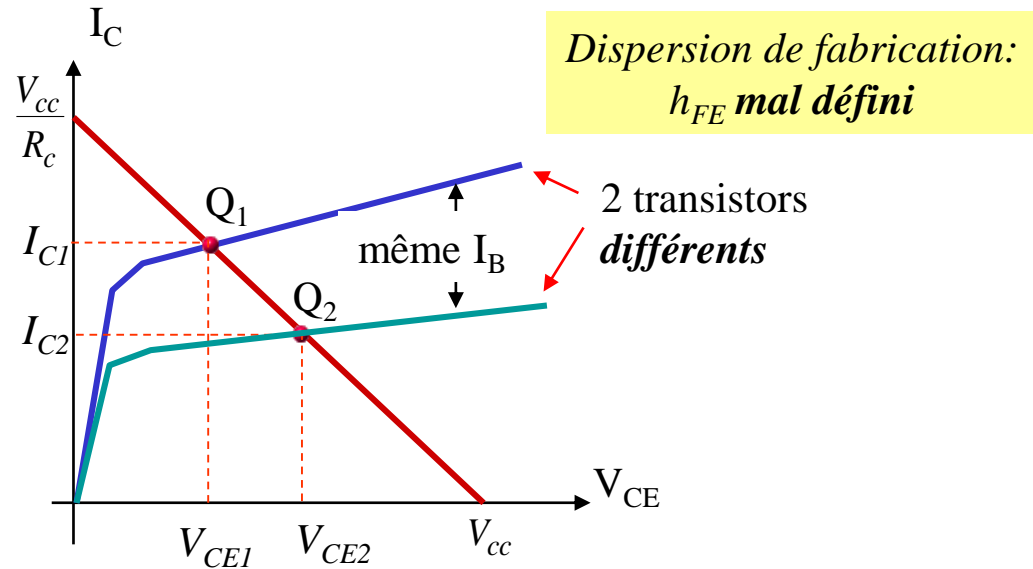
Conséquence :  $\Delta h_{FE} \Rightarrow \Delta I_c \Rightarrow \Delta V_{CE}$

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

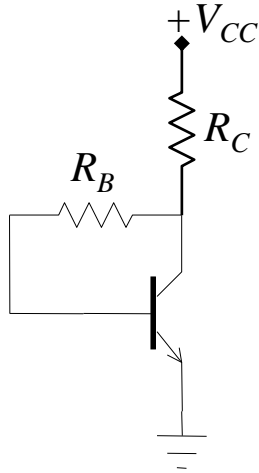
→ Circuit de polarisation **peu utilisé**.

**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  $h_{FE}$

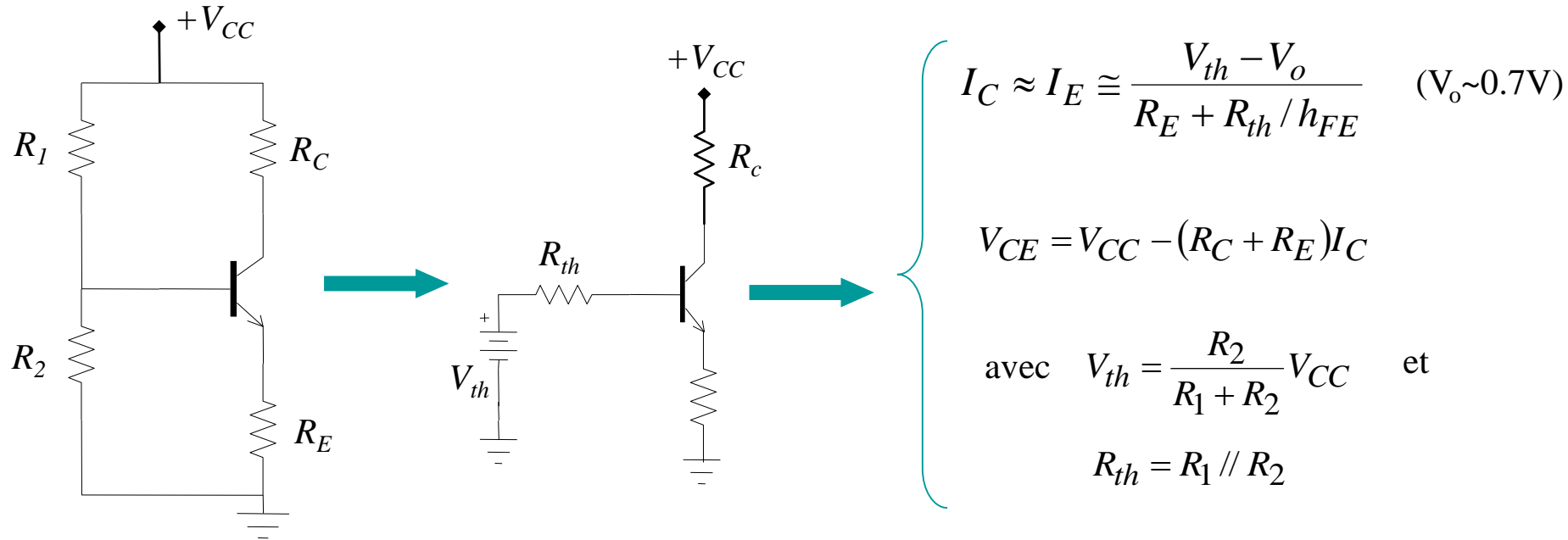
***Propriété intéressante du montage :***

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**

