

## EL/MT Cycle Bachelor 2ème année : Electronique II (Printemps 2025):

	Date	Cours: Je 10h/12h; Exo : 12h/13h CO3	Ve EL(8h-12h) MT(13h-17h)
<b>Transistor Bipolaire (Circuits discrets et intégrés)</b>	<u>20-21 Fév</u>	Bipolaire: Caractéristiques Electriques, polarisation DC et point de fonctionnement	<b>TP1: Caractérisation du Bipolaire (LTSPICE) (Gr. A et B)</b>
	<u>27-28 Fév</u>	Amplificateur: Régime et Model petits signaux (AC), cas Emetteur Commun	<b>TP2: Ampli EC (Lab+LTSPICE) (Gr. A)</b>
	<u>6-7 Mar</u>	Amplificateurs (Base et Collecteur com.) et Réponse fréquentielle	<b>TP2: Ampli EC (Lab+LTSPICE) (Gr. B)</b>
	<u>13-14 Mar</u>	Sources de courant et Amplificateurs pour circuits intégrés	<b>TP3: Ampli BC, CC (Lab+LTSPICE) (Gr. A)</b>
	<u>20-21 Mar</u>	Amplificateurs différentiels pour circuits intégrés	<b>TP3: Ampli BC, CC (Lab+LTSPICE) (Gr. B)</b>
	<u>27-28 Mar</u>	Ampli-Op : OTA + Etage de Puissance (class B)	<b>TP4 : OTA+Ampli de puissance (Lab+LTSPICE) (Gr. A)</b>
<b>Transistor MOSFET (Circuits intégrés)</b>	<u>3-4 Avr</u>	Model physique, Caractérisation électriques, Model grands signaux	<b>TP4 : OTA+Ampli de puissance (Lab+LTSPICE) (Gr. B)</b>
	<u>10-11 Avr</u>	Sources de courants	<b>TP_Sim5 : Ampli MOS (Gr. A et B ZOOM)</b>
	<u>17-18 Avr</u>	Model petits signaux et Amplificateurs (Source, Grille et Drain commun)	<b>Vendredi Saint (férié)</b>
	<u>21-27 Avr</u>	<b>Vacances</b>	
	<u>1-2 Mai</u>	Amplificateurs différentiels (OTA)	<b>TP_Sim6 : Ampli-diff MOS (Gr. A et B ZOOM)</b>
	<u>8-9 Mai</u>	Ampli-Op en MOS : OTA + Etage de Puissance (class B)	<b>Labo-test Blanc (Gr. A et B)</b>
	<u>15-16 Mai</u>	Révision (Exam Blanc)	<b>Enoncé TP_Sim_test</b>
	<u>22-23 Mai</u>	Révision	<b>Révision Labo (Gr. A et B)</b>
	<u>29-30 Mai</u>	<b>Jeudi de l'Ascension (férié)</b>	<b>Labo-test 2h30: (EL: 10h) (MT: 12h45 Gr.A et 15h30 Gr. B)</b>

# Transistor Bipolaire (Régime Statique)

Electronique II

---

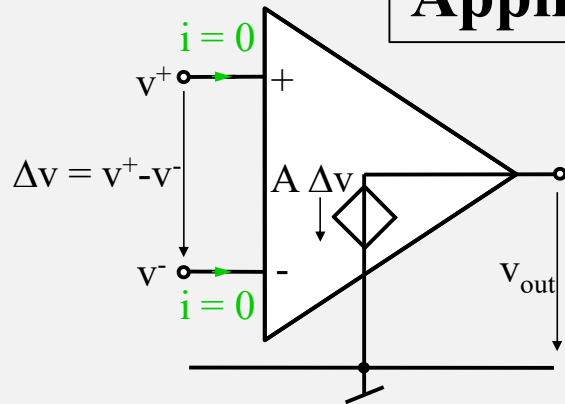
# Table des matières

---

- Généralités
- Transistor Bipolaire: Symbole et structure
- Caractéristiques électriques
- Régime statique (DC):
  - Polarisation du transistor (DC) et point de fonctionnement
- Exemple

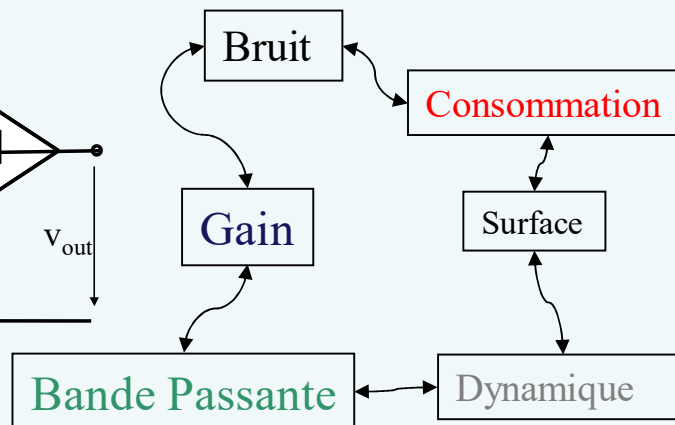
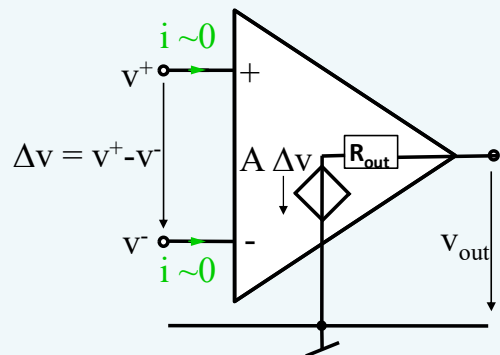
# OpAmp: un bloc deux Méthodologies de design

## Application Générale



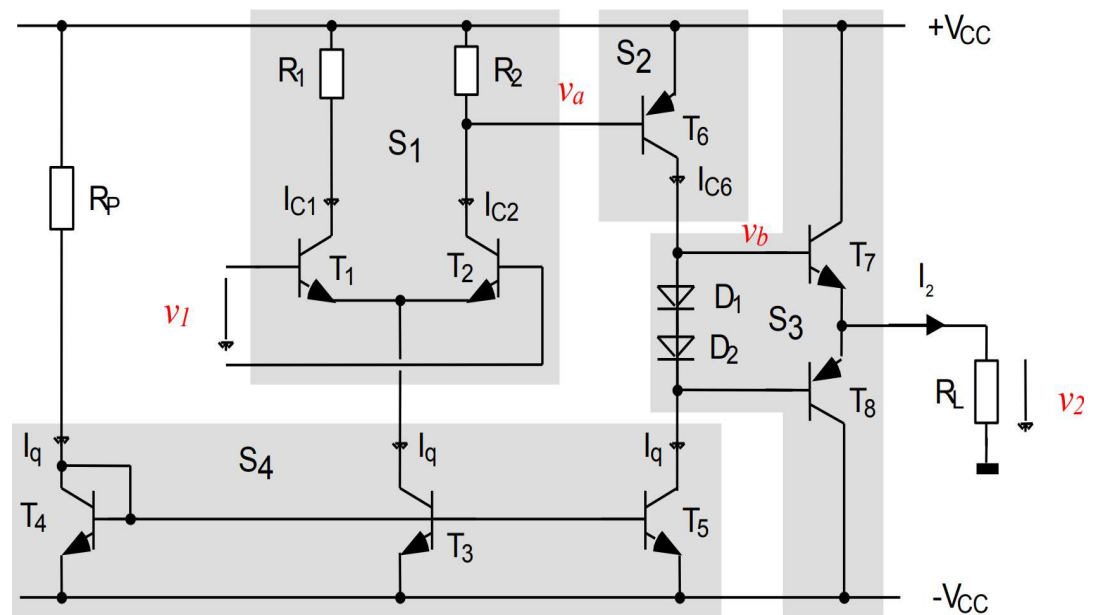
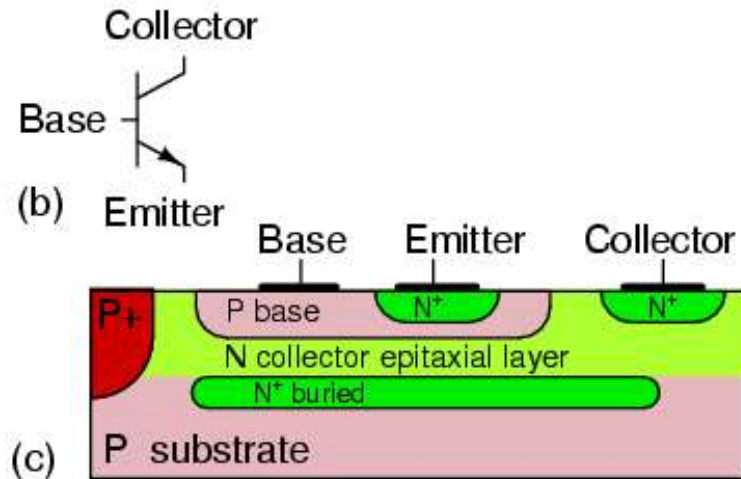
- Caractéristiques quasi-idéales
  - gain  $\rightarrow \infty$ ;  $R_{in} \rightarrow \infty$ ;  $R_{out} \rightarrow 0$
  - prix-complexité-consommation-taille... élevés

## Application spécifique (ASIC)

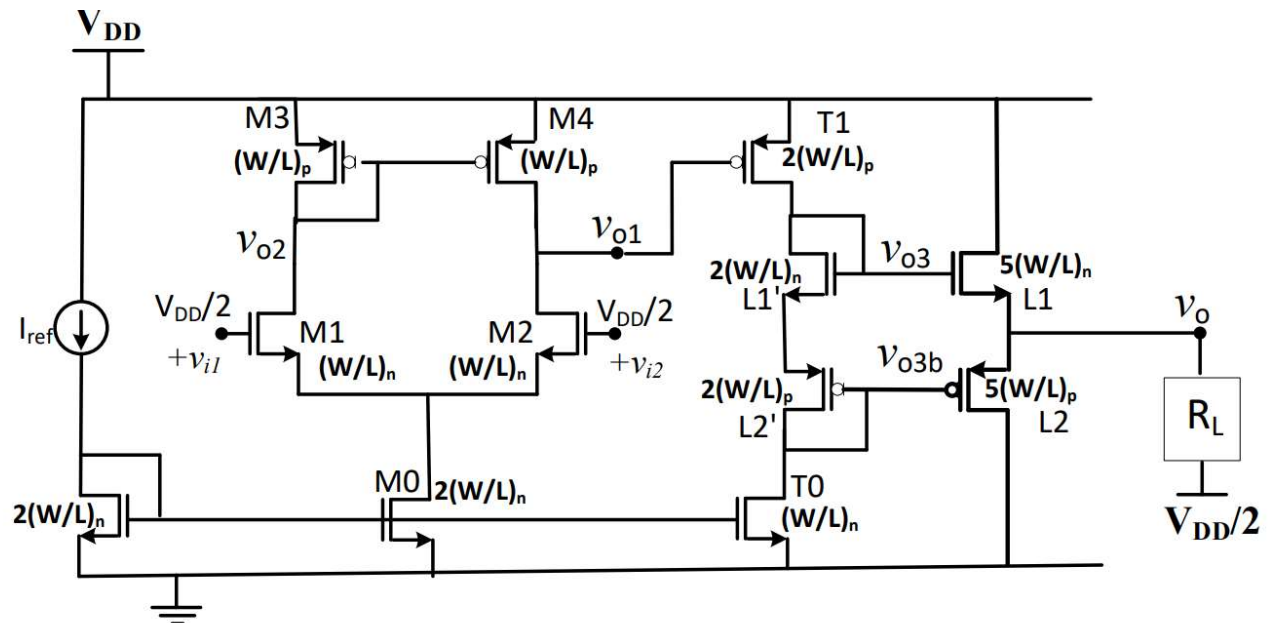
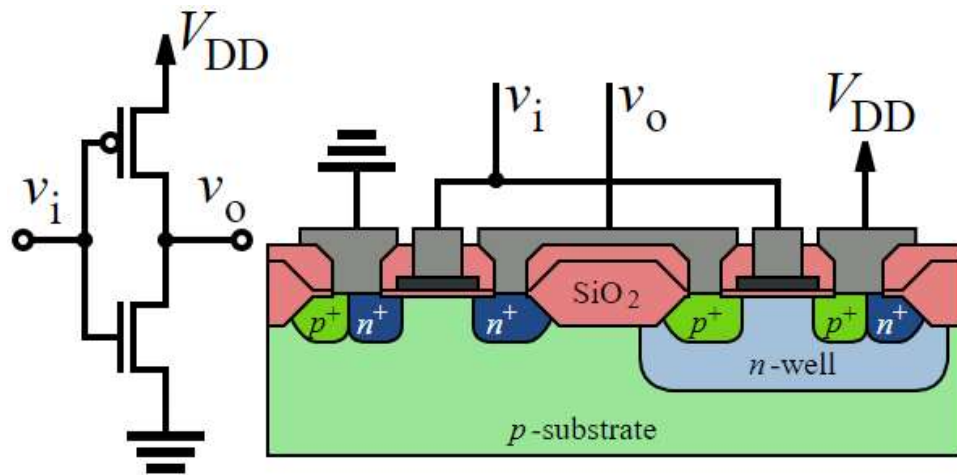


- Caractéristiques adaptées
  - prix-complexité-consommation-taille... Optimisés

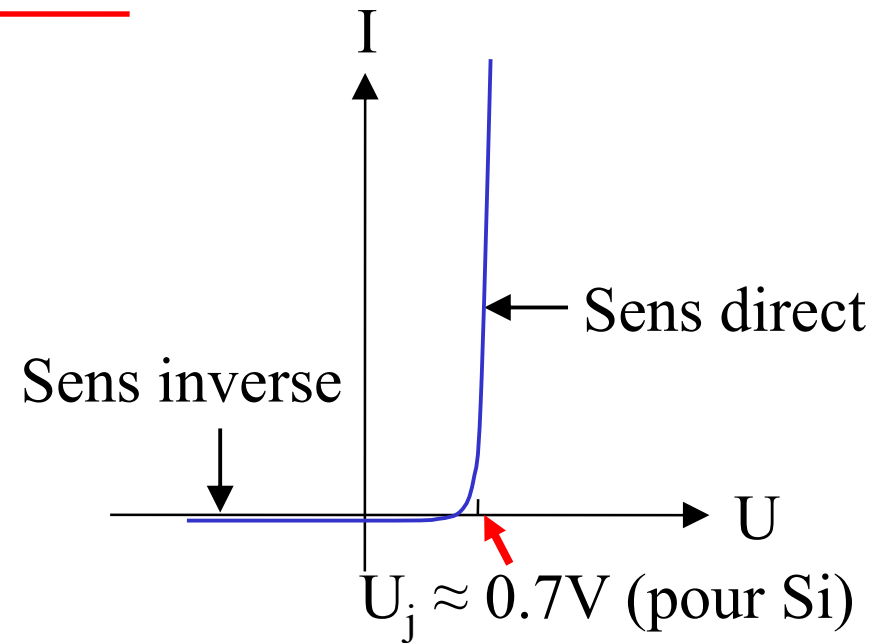
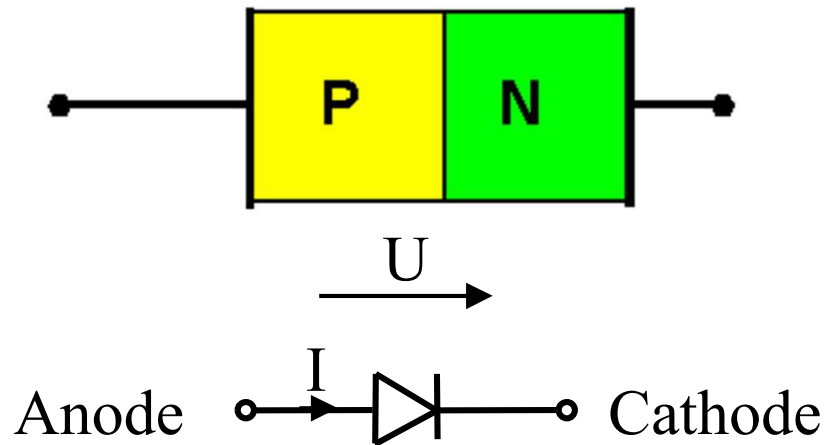
# AmpliOP en Bipolaire “Bipolar junction transistor (BJT)”



# AmpliOp en MOSFET “Field Effect Transistor (FET)”



# Diode réelle: Caractéristique Symbole et Modèle



$$I = I_s \left( e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \approx I_s e^{\frac{U}{nU_T}}$$

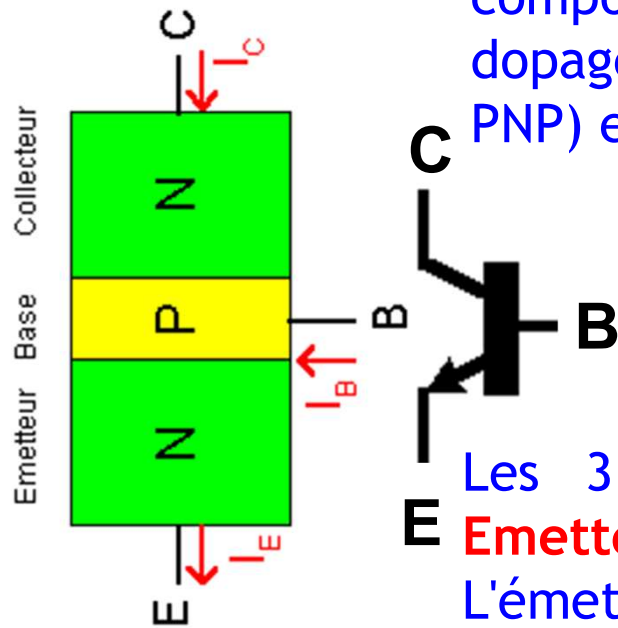
$U_T$  potentiel thermodynamique =  $kT/q = 26 \text{ mV}$  à  $T = 300\text{K}$  ( $27^\circ\text{C}$ )

$n = 1$  par défaut (en réalité entre 1 et 2)

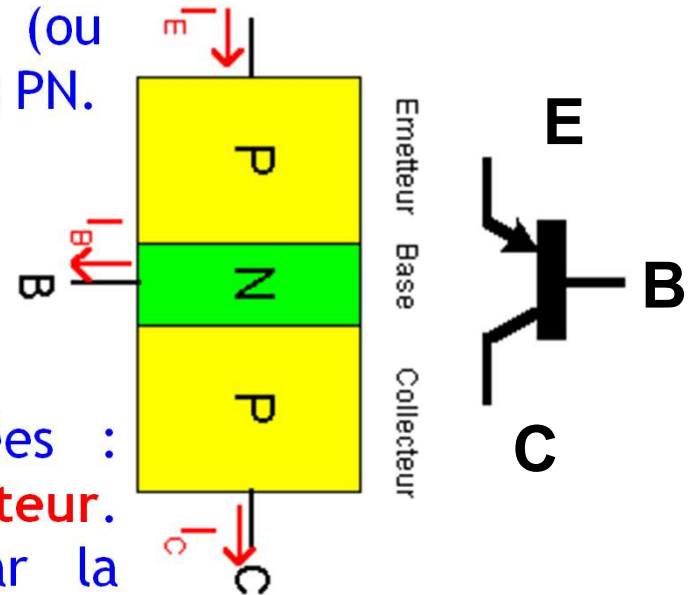
$I_s$  courant inverse de saturation,  $10^{-9}$  à  $10^{-15} \text{ A}$

# Transistor Bipolaire: “Bipolar junction transistor (BJT)”

Le transistor bipolaire est réalisé dans un monocristal comportant trois zones de dopage différentes NPN (ou PNP) et donc deux jonctions PN.



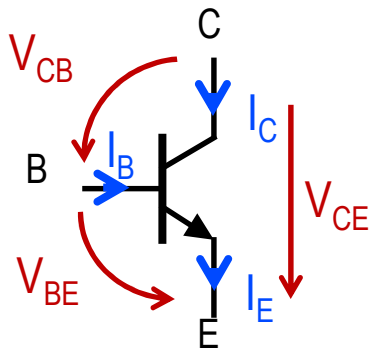
Les 3 Zones sont appelées : **Emetteur, Base, Collecteur**. L'émetteur est repéré par la flèche qui symbolise le sens réel du courant



# Réseau des caractéristiques statiques du transistor

- Le transistor bipolaire comporte trois accès: **Collecteur, Base, Emetteur**  
→ Il est donc caractérisé par 6 grandeurs électriques:
  - 3 tensions  $V_{BE}$ ,  $V_{CE}$ ,  $V_{CB}$
  - 3 courant  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $I_E$

NPN

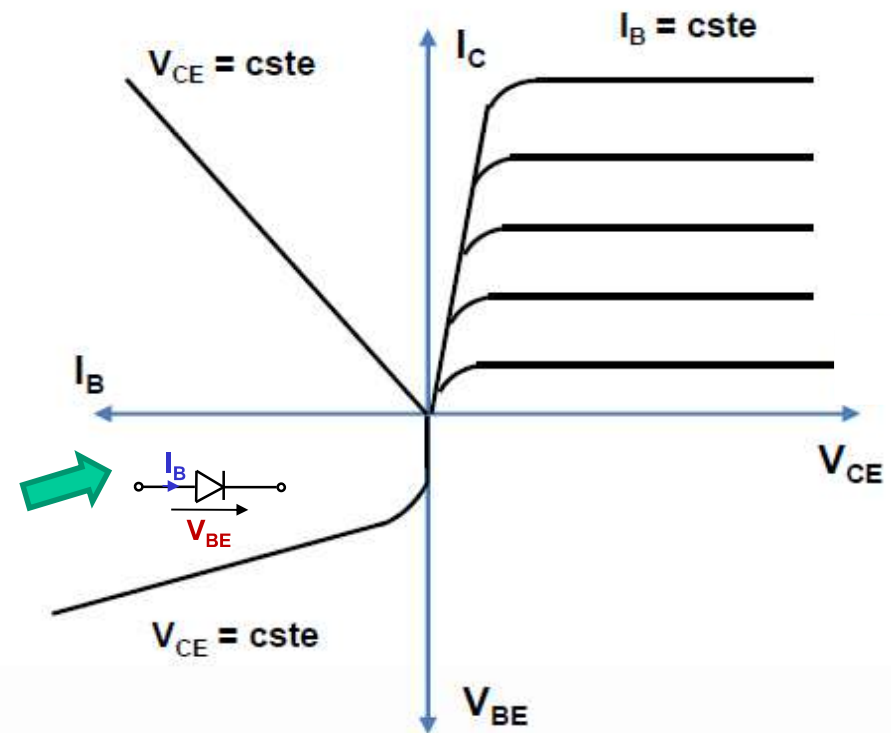


Ces grandeurs sont liés par le réseau de caractéristiques suivant:

Plus les Lois de Kirchhoff

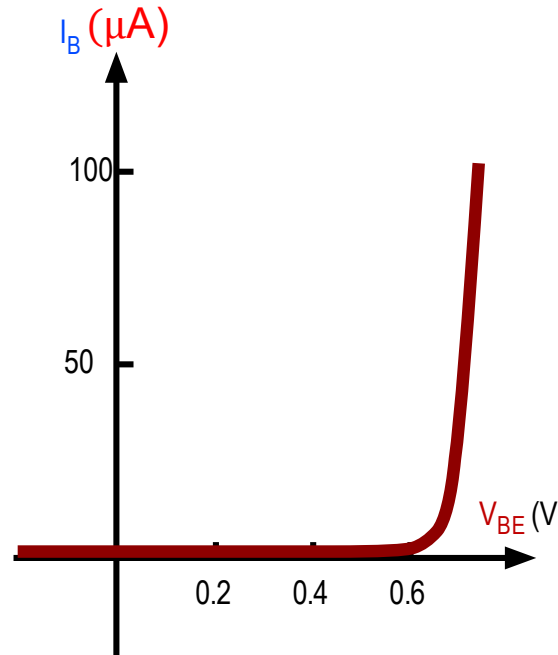
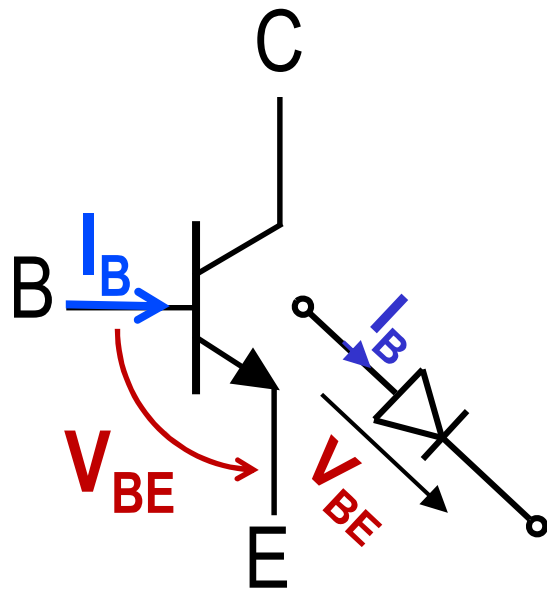
$$\rightarrow I_E = I_C + I_B$$

$$\rightarrow V_{CE} = V_{CB} + V_{BE}$$



# Caractéristiques d'entrée du transistor $I_B = f(V_{BE})$

- La jonction base-émetteur est une jonction pn elle se comporte donc comme une diode.

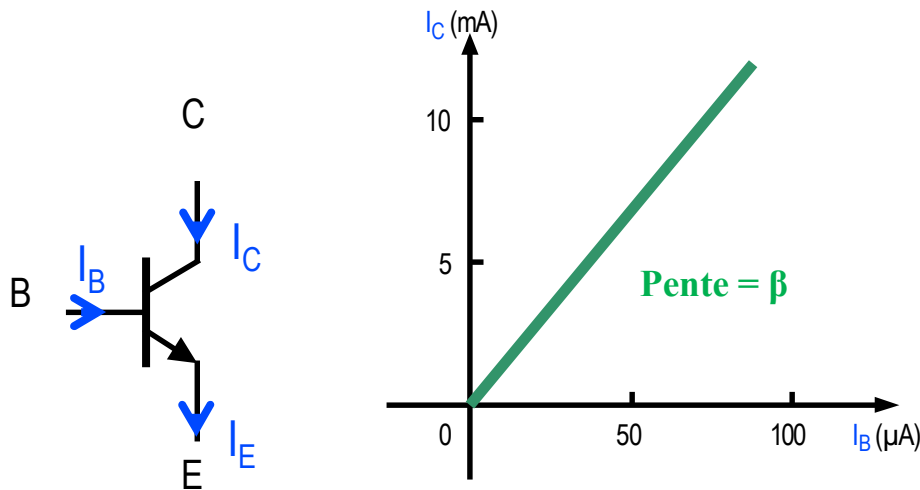


$$I_B = I_{SB} \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \\ \cong I_{SB} e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

- Le courant de base  $I_B$  varie donc exponentiellement en fonction de la tension  $V_{BE}$ .
  - ✓  $I_{SB}$  est le courant de saturation inverse de la jonction (extrêmement faible  $10^{(-16 \rightarrow -18)}$  A et proportionnel à la surface de l'émetteur)
  - ✓  $U_T$  le potentiel thermique ( $U_T \approx 26$  mV @  $T=300$  K).

# Caractéristiques de transfert du transistor $I_C = f(I_B)$

- Le BJT est caractérisé par une relation linéaire entre  $I_C$  et  $I_B$



$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

- $\beta$  appelé gain en courant,
- En général  $\beta > 100$
- donc  $I_C \gg I_B$

Loi de Kirchhoff:

$$I_E = I_C + I_B = (\beta + 1)I_B \cong \beta I_B \rightarrow I_E \cong I_C$$

- Rq: pour les transistors de puissance  $\beta < 100$  (autour de 20-30)

# Caractéristiques de transfert du transistor $I_C = f(V_{BE})$

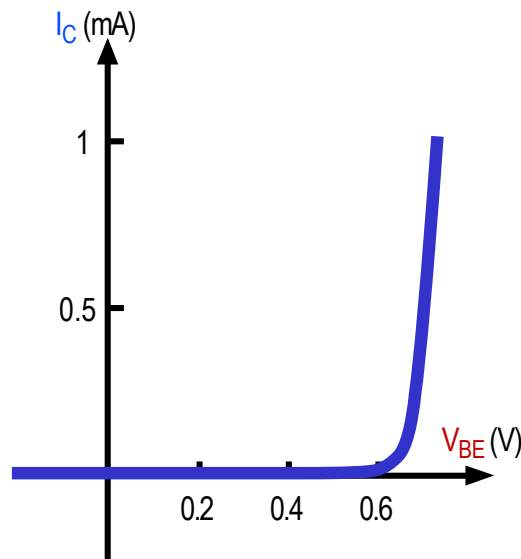
- $I_C = \beta I_B$

- $I_B = I_{SB} \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$

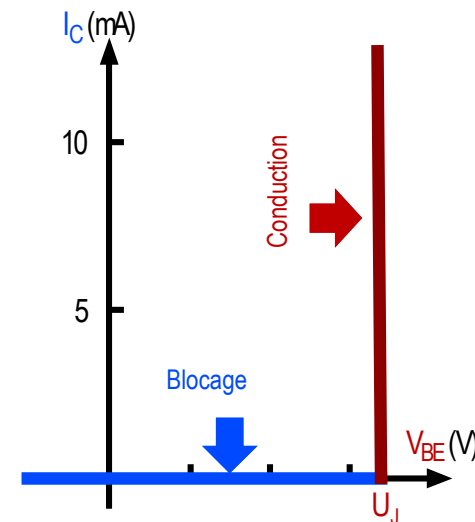
- $I_C$  est donc aussi commandé par  $V_{BE}$

$$I_C = \beta I_B = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \cong I_S e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

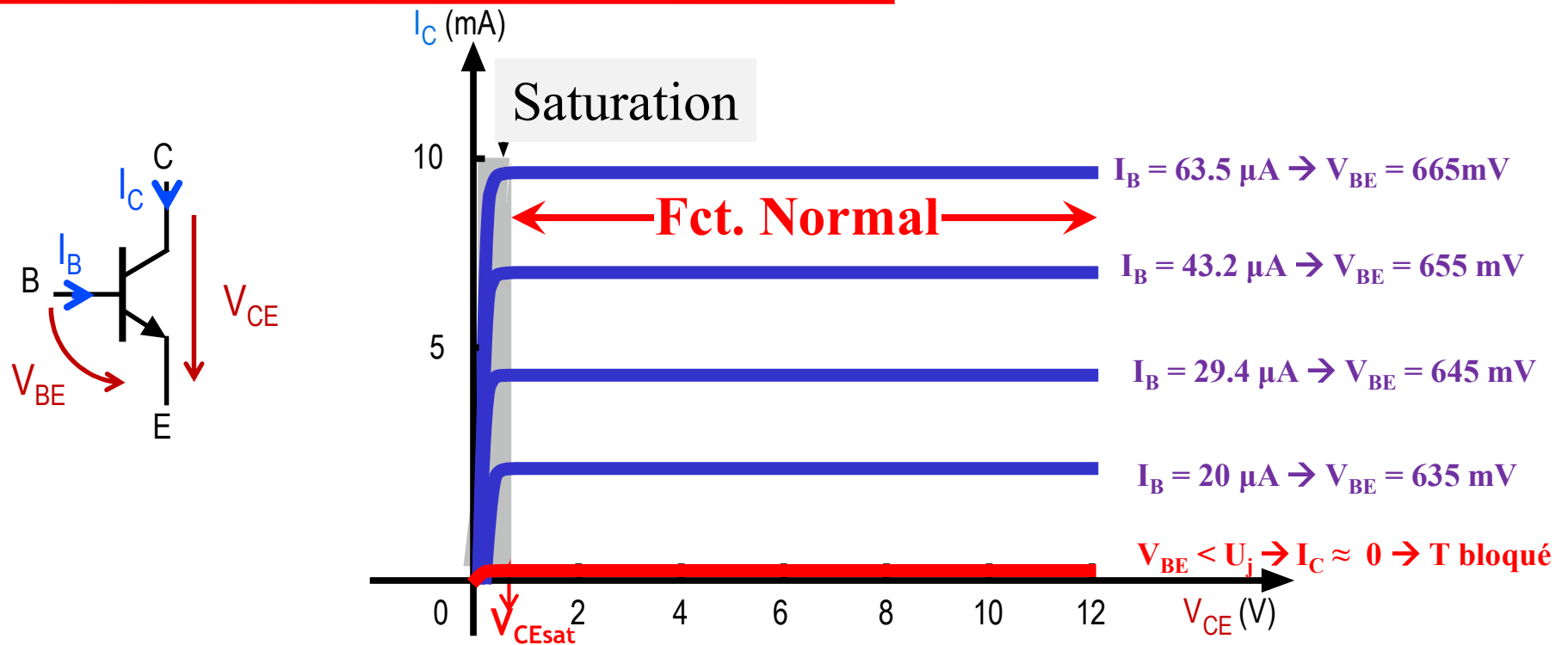
- $I_S$  courant spécifique =  $\beta I_{SB}$  (ordre de grandeur  $10^{-14}$ - $10^{-16}$ ) A



Modèle linéaire  
grands signaux (DC)



# Caractéristiques de **sortie** du transistor $I_C = f(V_{CE})$



- On mode de **fonctionnement Normal** ( $V_{CE} > V_{CEsat}$ ), le BJT se comporte comme **une source de courant commandée par  $V_{BE}$  (resp) par  $I_B$**   $\rightarrow$  c'est la Zone d'amplification ou  $I_C = \beta I_B$
- On mode **Saturé** ( $V_{CE} < V_{CEsat}$ ),  $I_C$  chute rapidement vers zéro (zone à éviter).  $V_{CEsat} \approx 0V$  (en réalité quelques centaines de mV).

# Analyse (DC) pour le NPN et PNP

- Fonctionnement normal (NPN):

- $V_{BE} \approx U_J \rightarrow$  Jonction BE conduit:

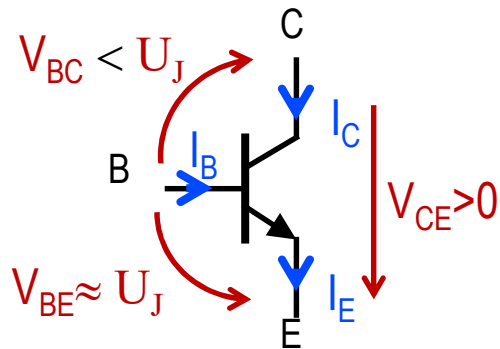
- $V_{CE} > V_{CEsat} \approx 0$

- $\rightarrow V_{CB} + V_{BE} > 0$

- $\rightarrow V_{BC} < U_J$  Jonction BC (pn) bloquée

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = I_B(1 + \beta) \approx I_C$$



- Fonctionnement normal (PNP):

- $V_{EB} \approx U_J \rightarrow$  Jonction BE conduit:

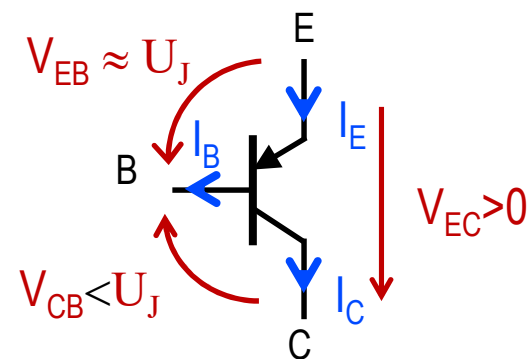
- $V_{EC} > V_{ECsat} \approx 0$

- $\rightarrow V_{EB} + V_{BC} > 0$

- $\rightarrow V_{CB} < U_J$  Jonction CB (pn) bloquée

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_E = I_B + I_C = I_B + \beta I_B = I_B(1 + \beta) \approx I_C$$

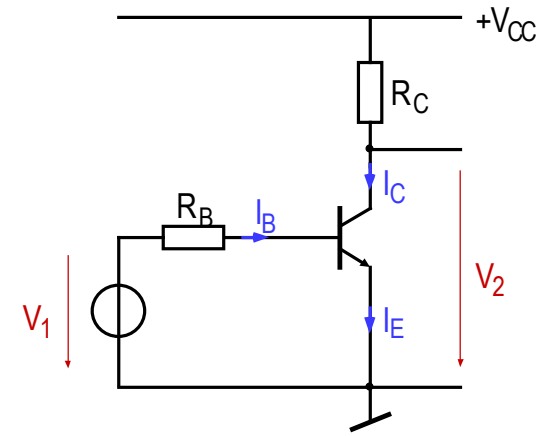


# Polarisation et point de fonctionnement

# Régime statique: Polarisation

(pour montage en éléments discrets)

- Polariser un transistor consiste à utiliser:
  - ✓ des sources de tension continues DC (Ex:  $V_{CC}$  et  $V_1$ ) et des résistances ( Ex:  $R_C$  et  $R_B$ ) pour définir son état de fonctionnement, dit **Point de Fonctionnement**.
  - L'objectif premier est de le mettre en **conduction** et en **mode normal**.
  - C'est la première étape dans la conception d'un amplificateur.

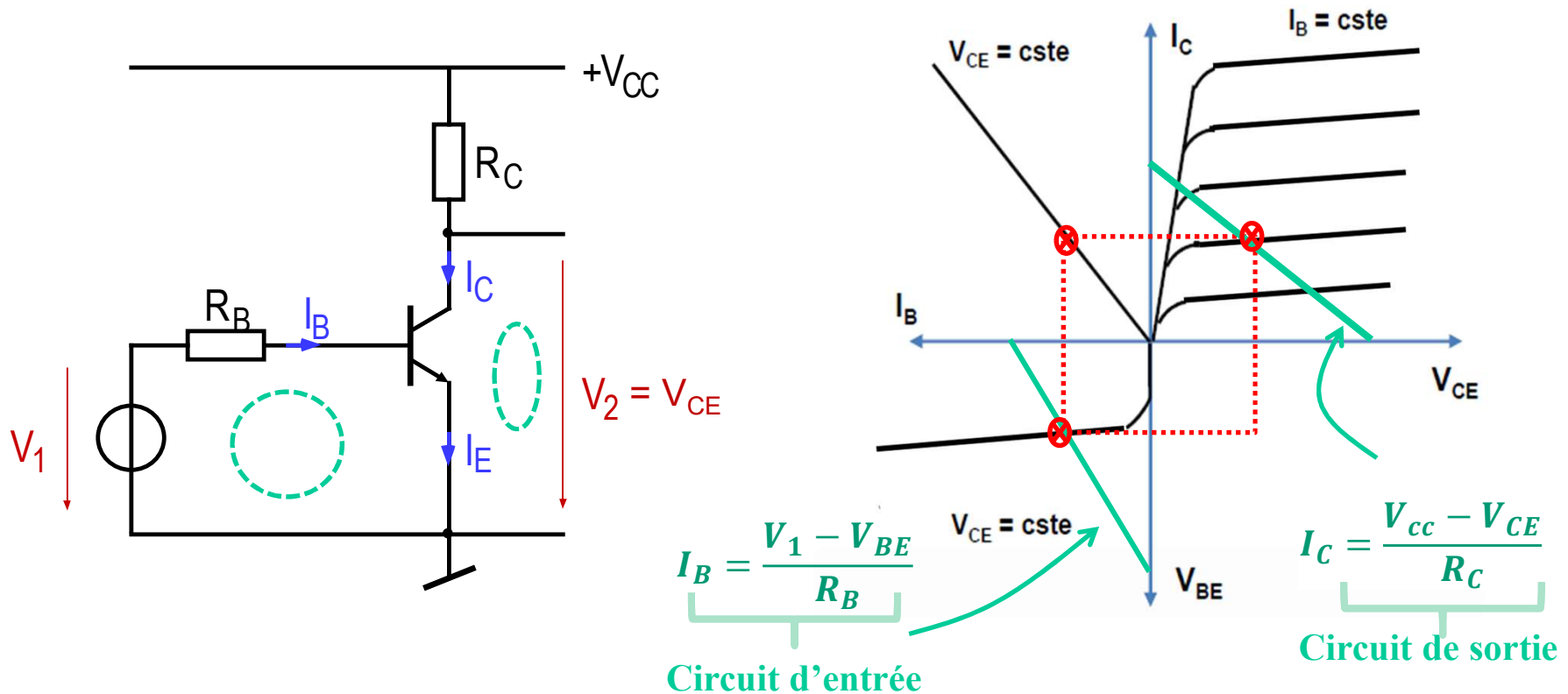


Exemple de polarisation:

- Le point de fonctionnement est le point d'accord entre les caractéristiques du transistor et les lois imposées par le circuit.

# Ex: de point de fonctionnement

## Caractéristique du Bipolaire



## Lois du Circuit

---

# Objectifs d'une bonne polarisation

---

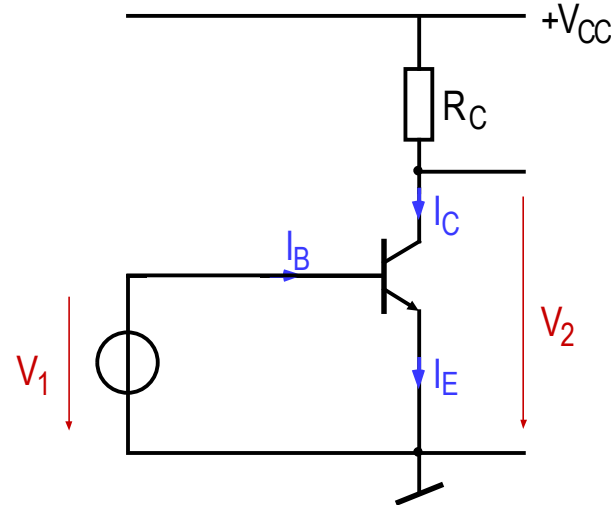
- A l'entrée elle doit aboutir à un point de fonctionnement ( $I_C, V_{BE}$ ):
  - ✓ dans la zone de conduction (c.à.d.  $V_{BE}$  proche de  $U_j$ ) pour qu'une variation de  $V_{BE}$  entraîne une variation significative de  $I_C$  et donc permettre une amplification du signal.
- A la sortie elle doit aboutir à un point de fonctionnement ( $I_C, V_{CE}$ ):
  - ✓ dans la zone linéaire (transistor en mode normale  $V_{CE} > V_{CEsat}$ )
  - ✓ Le plus loin possible de la zones de saturation et de  $V_{CC}$  afin de permettre en régime dynamique, le signal le plus large possible à la sortie sans distorsion.
- Une bonne polarisation doit aussi aboutir à un point de fonctionnement stable c.à.d. avec le minimum de dépendance vis-à-vis des variations omniprésentes de  $\beta$  et de la température

# Exemple d'une mauvaise polarisation

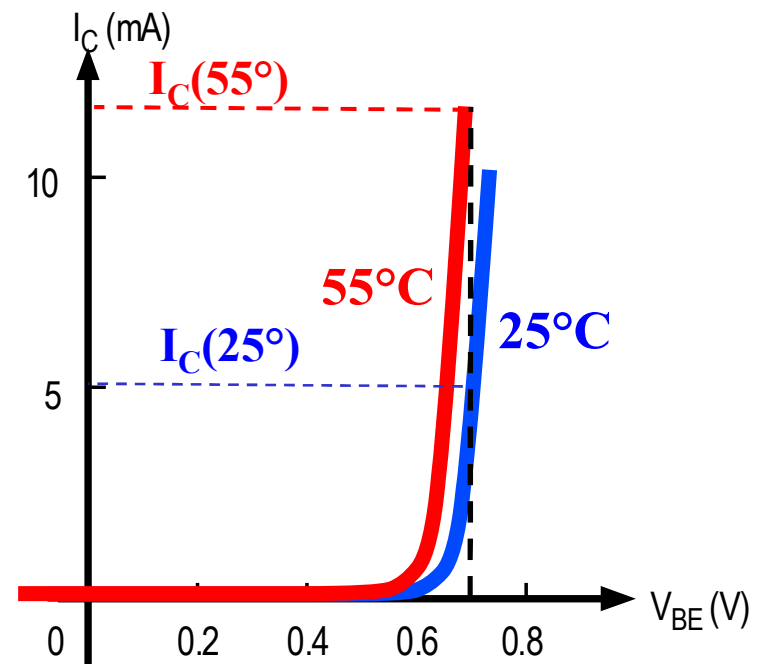
## I. Polarisation par contrôle $V_{BE}$

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{U_T}}$$

Ex: si  $I_S = 10^{-14} \text{ A}$   
 $V_{BE} = 700 \text{ mV} = V_1$   
 $\Rightarrow I_C = 5 \text{ mA}$



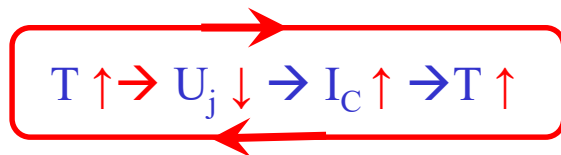
$$\frac{\Delta U_j}{\Delta T} \approx -2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$



☹ Faible erreur sur  $V_{BE} \rightarrow$  Enorme erreur sur  $I_C$

☹ Forte sensibilité à la température:

☹ Emballement thermique,



$\rightarrow$  (Jamais utilisée)

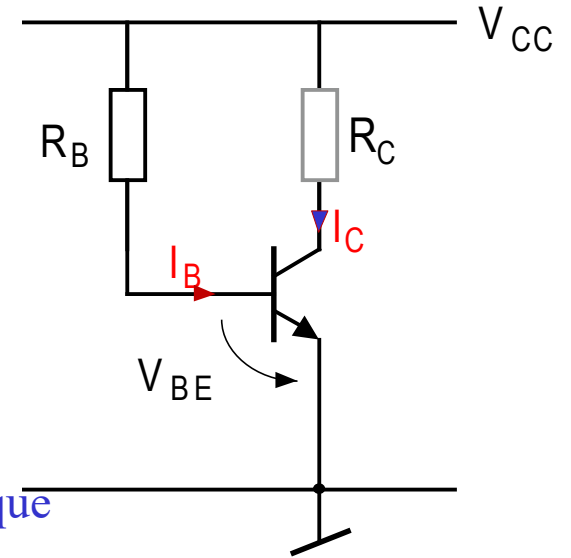
# Exemple de polarisation acceptable

- **II. Polarisation par contrôle de  $I_B$ : ( $I_C = \beta I_B$ )**

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{CC} - U_j}{R_B}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - \beta I_B R_C$$



☺ Contre-réaction exercée par  $R_B$  ☺ Pas d'emballlement thermique

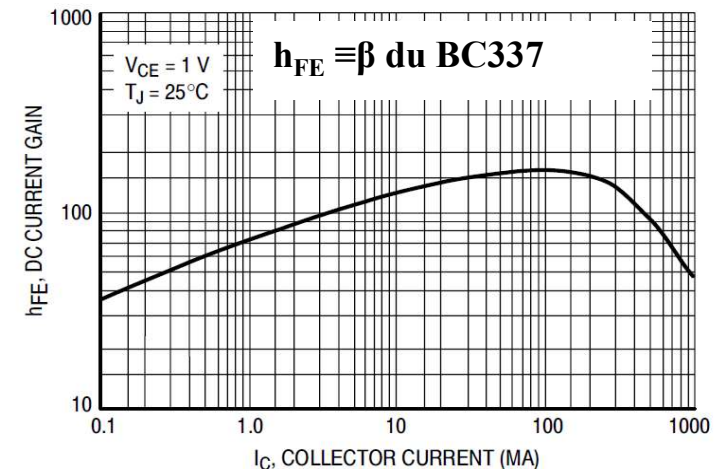
☺ Simple: Une seule source et une seule résistance à l'entrée

☹ Dépendance de  $\beta$  / Grande dispersion des valeurs de  $\beta$

hFE*	DC Current Gain	* $I_C = 100 \text{ mA}$ for BC337-25 for BC337-40	$V_{CE} = 1 \text{ V}$	min		max	
				160	400	250	600

☹ Forte dépendance de  $\beta$  / Température

➤ Acceptable pour des montages expérimentaux

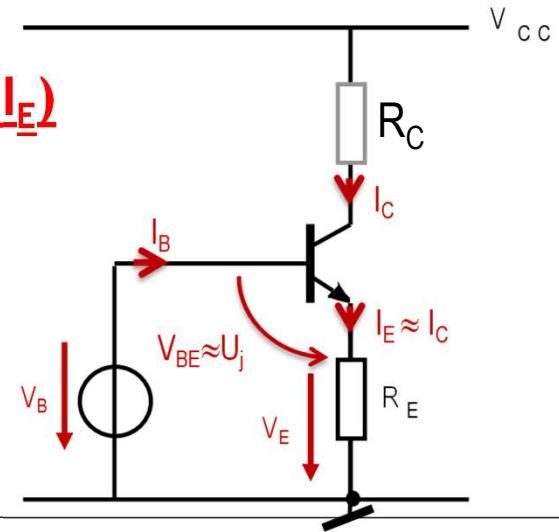


# Exemple de bonne polarisation

## • II. Polarisation par contrôle direct de $I_E$ : ( $I_C = I_E$ )

$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \approx \frac{V_B - U_j}{R_E} \quad (\text{avec } V_B > U_j)$$

$$V_{CE} \approx V_{cc} - (R_C + R_E)I_C$$



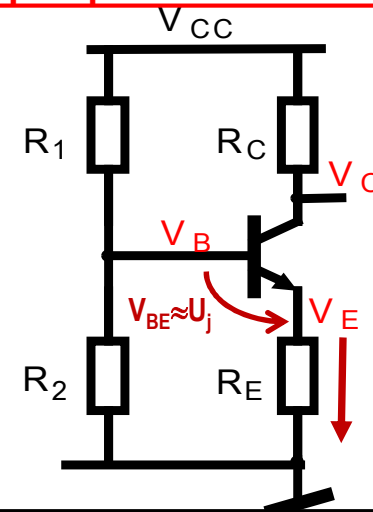
☺ La méthode la **plus utilisée**

☺ Meilleure contrôle de la valeur de  $I_C$  car faible dépendance de  $\beta$  et de  $T$

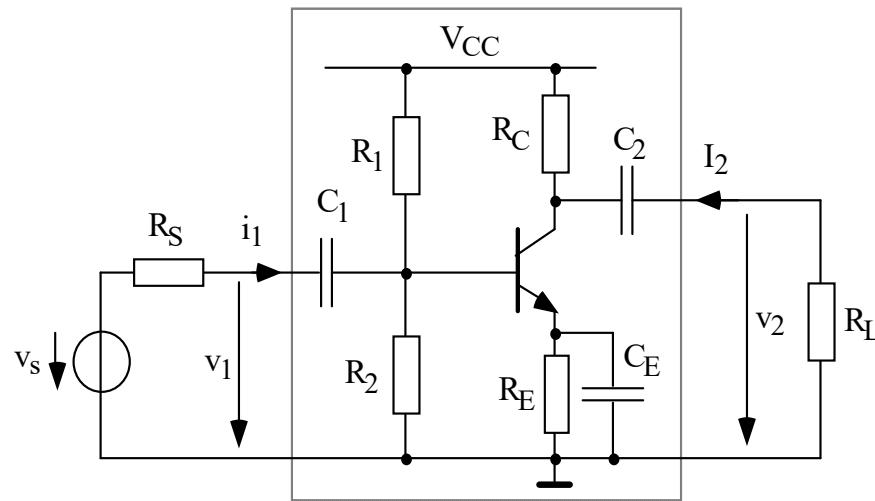
☺  $I_E$  stabilisé par la **contre-réaction** exercée par  $R_E$ .

☺ si  $I_E$  augmente ( $\uparrow$ ) accidentellement  $\rightarrow V_E \uparrow \rightarrow V_{BE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow \rightarrow I_E \downarrow$  (le circuit s'oppose à cette augmentation)

**Variante avec 1 seule source DC (polarisation par pont de résistances)**



# Ex1:



$$V_{CC} = +10 \text{ V}$$

$$R_1 = 68 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 27 \text{ k}\Omega$$

$$R_E = 2.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_C = 3.9 \text{ k}\Omega$$

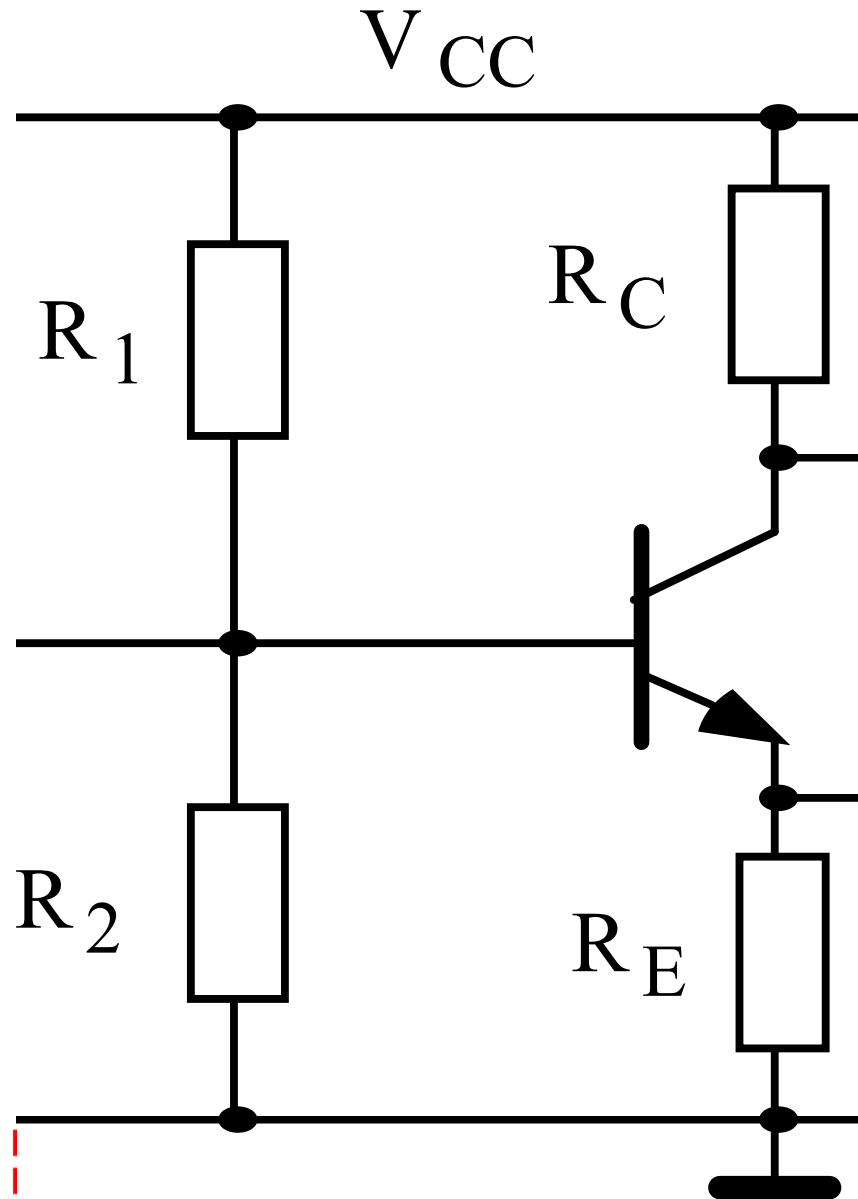
$$C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$$

$$C_E = 47 \mu\text{F}$$

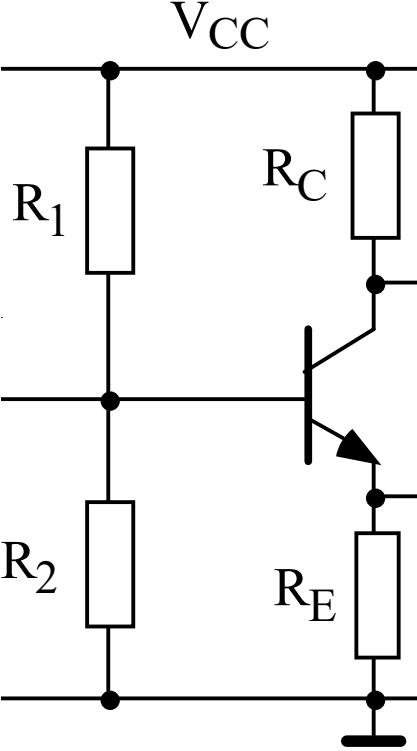
$$T_1: \text{BC107B}$$

- 1/ Calculez tous les paramètres DC du circuit (supposer que  $I(R_1) \approx I(R_2)$ )
- 2/ Analyser le mode de fonctionnement du transistor.
- 3/ Recalculer  $I_{B0}$  sans faire l'approximation  $I(R_2) \approx I(R_1)$ , conclure.

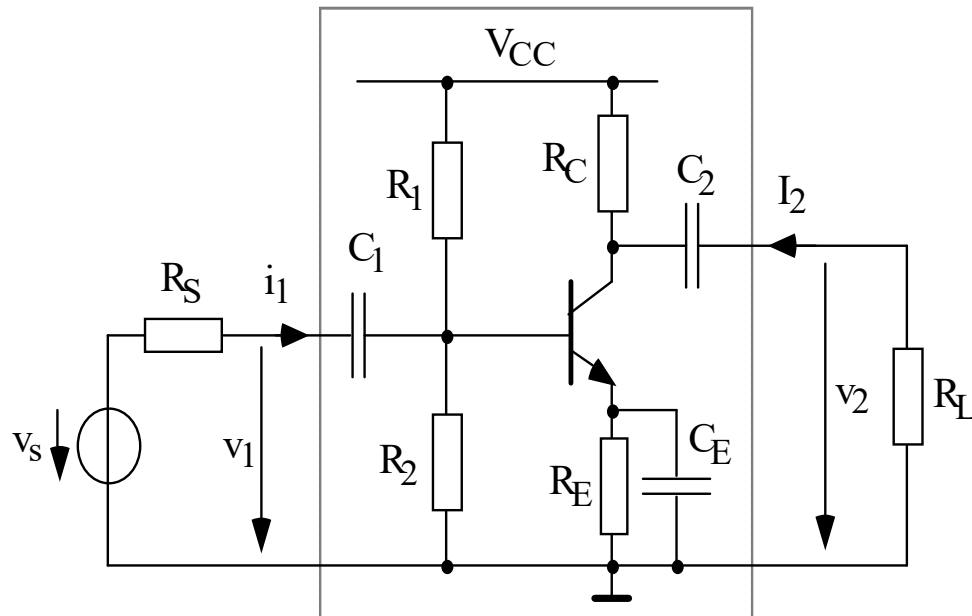
Calculez tous les paramètres DC du circuit (supposer que  $I(R_1) \approx I(R_2)$ )  
Analyser le mode de fonctionnement du transistor.



Recalculer  $I_{B0}$  sans faire l'approximation  $I(R_2) \approx I(R_1)$ , conclure.



- 
- Ex2: Concevoir la polarisation par une source d'alimentation  $V_{CC} = 12V$  de l'amplificateur donnant un courant  $I_E = 1\text{ mA}$ . Le signal de sortie  $v_2$  a une amplitude max de  $V_{CC}/3$  et le transistor utilisé a un  $\beta = 100$  et un  $V_{CE,sat} \approx 0\text{ V}$
- 



Ex2: Concevoir la polarisation par une source d'alimentation  $V_{CC} = 12V$  de l'amplificateur donnant un courant  $I_E = 1\text{ mA}$ . Le signal de sortie  $v_2$  a une amplitude max de  $V_{CC}/3$  et le transistor utilisé a un  $\beta = 100$  et un  $V_{CE,sat} \approx 0\text{ V}$

