

Chapitre V : Transistors bipolaires

OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama

Plan du cinquième chapitre

1. Définition
2. Symbole et convention
3. Différents modes de fonctionnement du transistor bipolaire
4. Modélisation du transistor bipolaire : modèle à deux diodes idéales
5. Représentation quadripolaire en statique du transistor
6. Détermination graphique des paramètres hybrides du transistor
7. Polarisation du transistor bipolaire

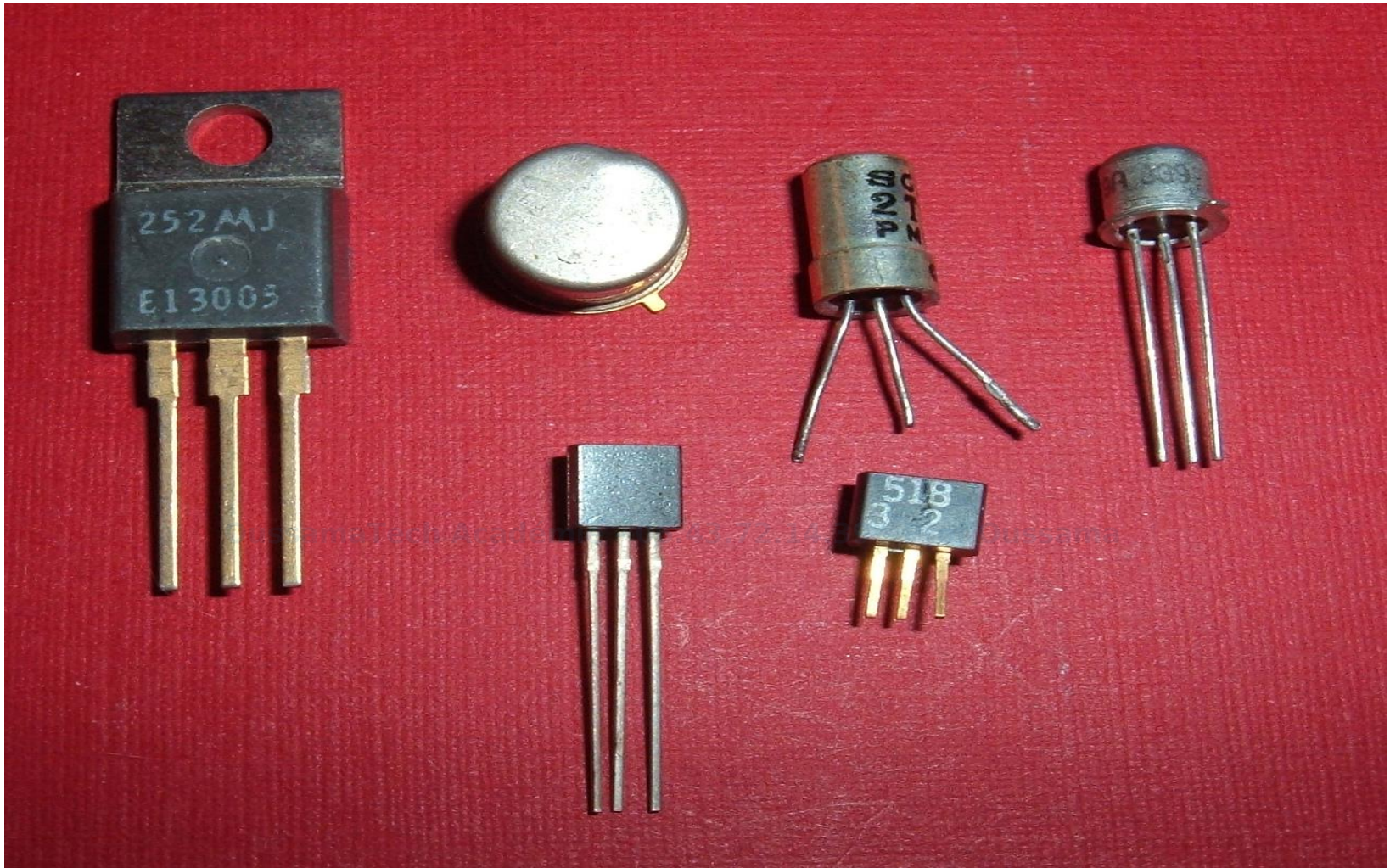
1. Définition

Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur de la famille des transistors.

- ❖ Son principe de fonctionnement est basé sur **deux jonctions PN**, l'une en direct et l'autre en inverse.

OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama

- ❖ La polarisation de la jonction PN inverse par un faible courant électrique (parfois appelé **effet transistor**) permet de **commander** un courant beaucoup plus important, suivant le principe de l'amplification de courant.



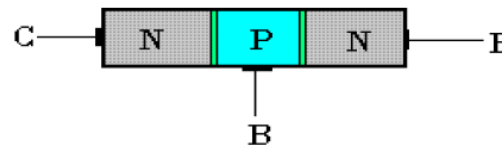
Quelques types de transistors bipolaires

2. Symbole et convention

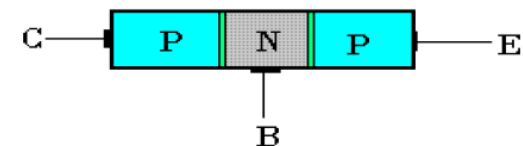
► Il existe deux types :

* Transistor NPN

* Transistor PNP



1) Type NPN



2) Type PNP

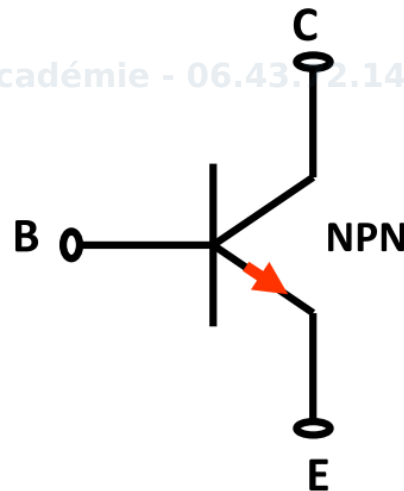
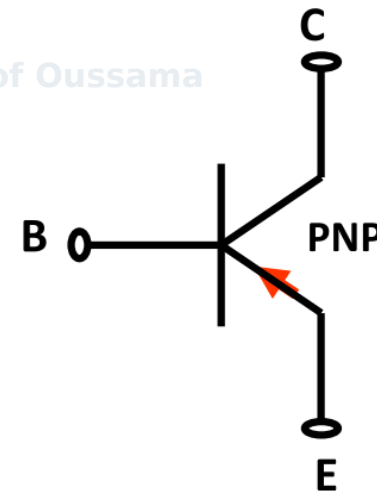
Symbole

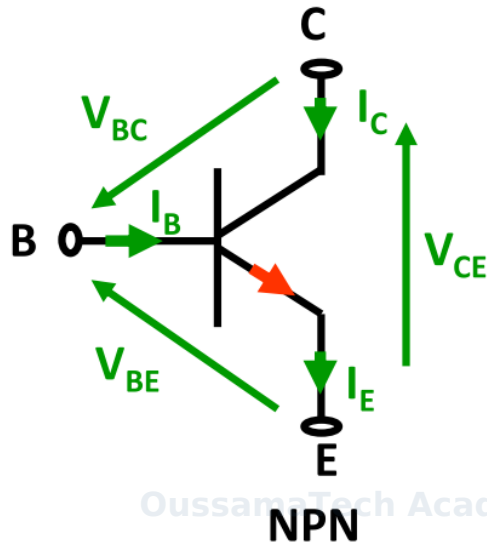
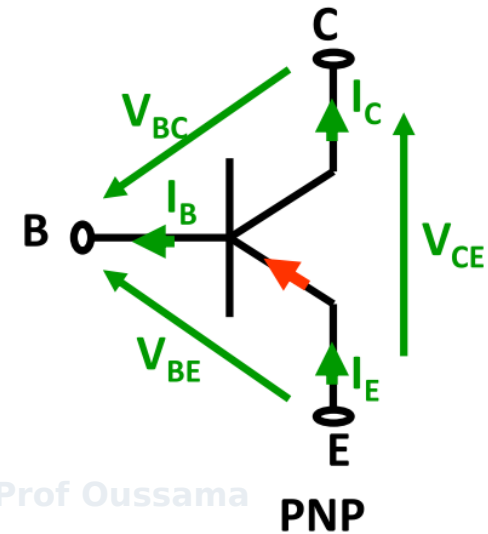
► Il possède trois bornes
(ou trois électrodes) :

B : Base

E : Émetteur

C : Collecteur



Convention de signe

OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama

► Le transistor est une maille de tension et un nœud de courant

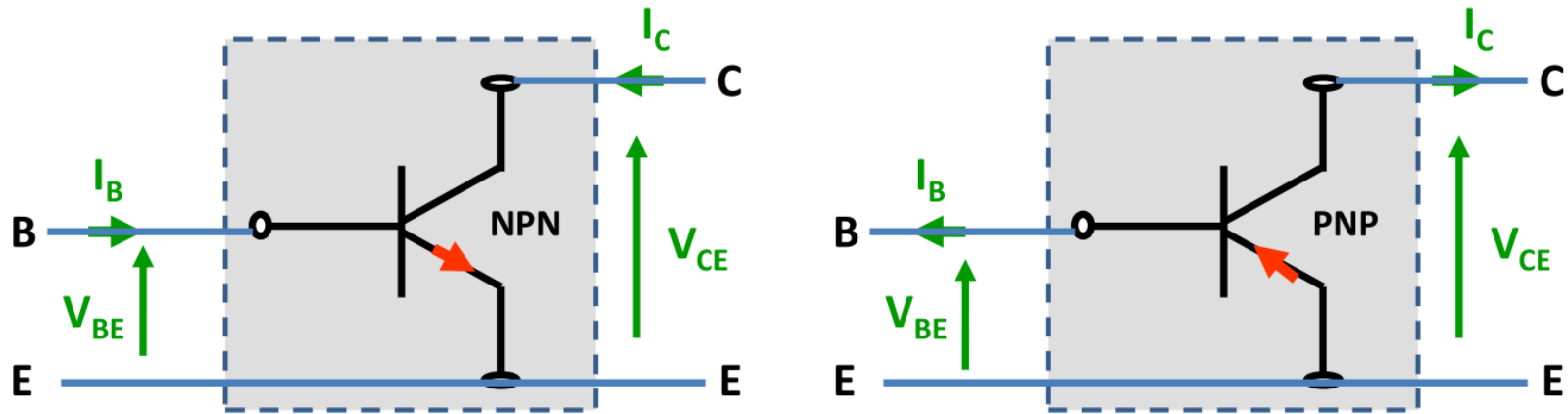
■ Loi des mailles :

$$V_{BE} = V_{BC} + V_{CE}$$

■ Loi des nœuds :

$$I_E = I_C + I_B$$

Gain en courant du transistor



- ▶ Le transfert direct en courant du quadripôle est défini par : I_C/I_B
- ▶ Ce transfert direct en courant correspondant à un gain en courant
- ▶ On pose :

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

β est le gain en courant du transistor. β varie entre 10 à 800 selon le type transistor

$$\beta \gg 1$$

Relation entre α et β du transistor

► α est un coefficient de proportionnalité reliant le courant de collecteur au courant d'émetteur. On pose :

$$I_C \approx \alpha I_E$$

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{soit} \quad \frac{I_C}{\alpha} = \frac{I_C}{\beta} + I_C$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Approximation :

$$I_C \approx \alpha I_E \quad \text{avec} \quad \alpha = 0,999.. \approx 1$$

► A partir de maintenant, on considère pour le transistor bipolaire que :

$$I_C = \beta I_B$$

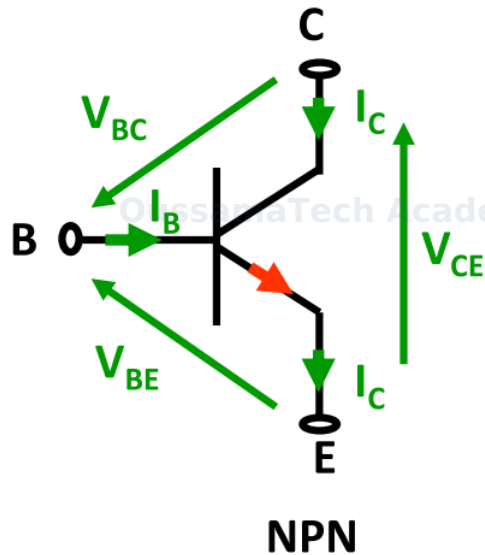
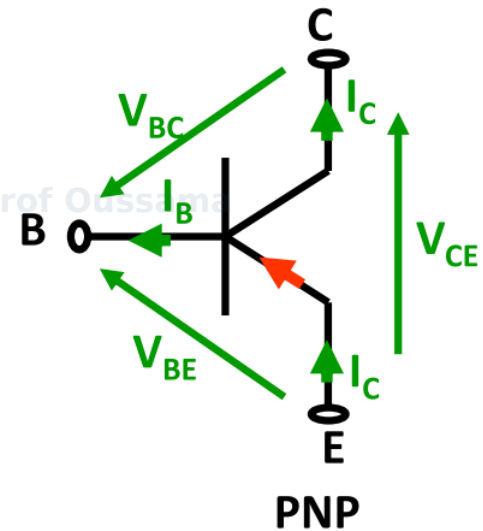
$$I_C \approx I_E$$

Simplification :

► On retient pour les deux types :

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C \approx I_E$$



► I_B et I_C , les seuls courants qui circulent : transistor bipolaire

3. Différents modes de fonctionnement du transistor bipolaire

Transistor NPN

► Il existe quatre régimes de fonctionnement :

■ FND ou FC (Fonctionnement Normal Direct ou Fonctionnement Conducteur) pour l'amplification et autres fonctions de l'EA...



$$\begin{cases} V_{BE} > 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} > 0$$

$$0 < V_{CE} < E \quad \text{et} \quad 0 < I_C < I_{C_{sat}}$$

■ FB (Fonctionnement Bloqué ou Éteint) pour la commutation.
Base de l'EN



$$\begin{cases} V_{BE} < 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} \geq E$$

$$V_{CE_{max}} = E$$

$$V_{CE} = E \quad \text{et} \quad I_C = 0$$

■ FS (Fonctionnement Saturé ou Allumé) pour la commutation.
Base de l'EN



$$\begin{cases} V_{BE} > 0 \\ V_{BC} > 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} \leq 0$$

$$V_{CE_{min}} = 0$$

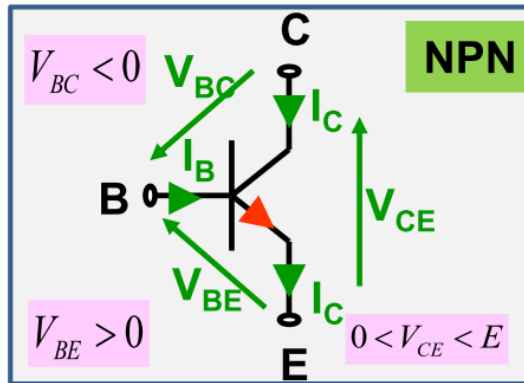
$$V_{CE} = 0 \quad \text{et} \quad I_C = I_{C_{sat}}$$

■ FNI (Fonctionnement Normal Inverse) : aucun intérêt pratique, il n'est de fonctionnement que par la théorie.



$$\begin{cases} V_{BE} < 0 \\ V_{BC} > 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} < 0$$

FND ou FC

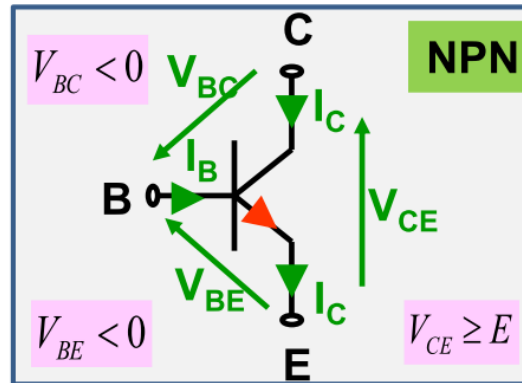


$0 < V_{CE} < E$ et $0 < I_C < I_{C_{sat}}$

Transistor est tout le temps conducteur

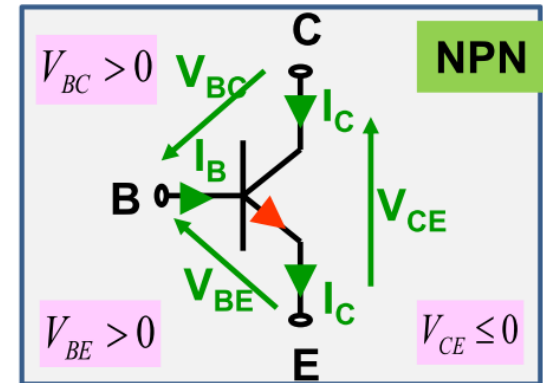
Électronique analogique

FB



$V_{CE} = E$ et $I_C = 0$

FS



$V_{CE} = 0$ et $I_C = I_{C_{sat}}$

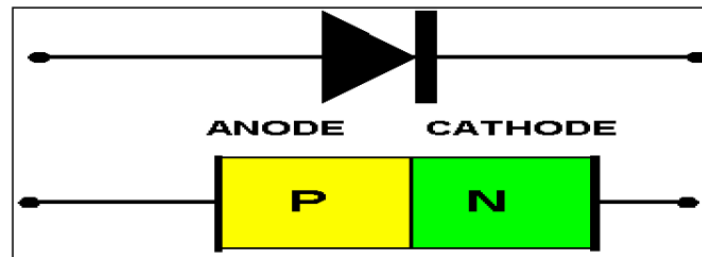
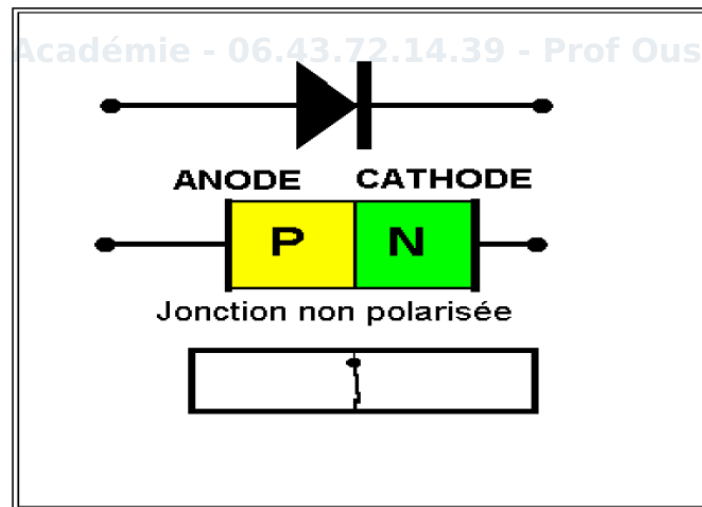
Transistor est tantôt bloqué et tantôt saturé : il commute

Électronique numérique

Technologie TTL

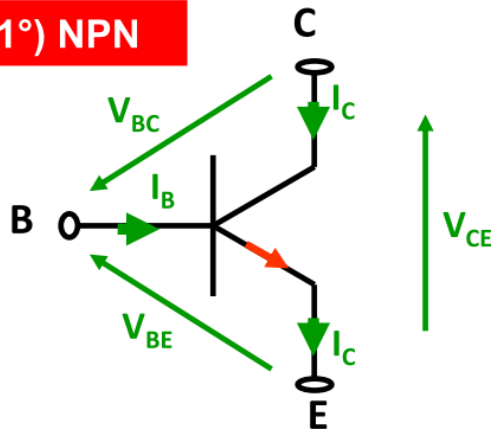
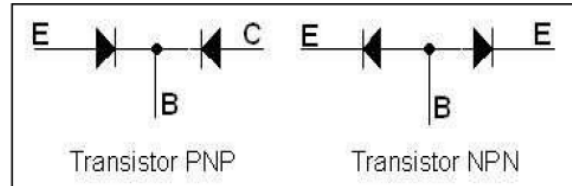
4. Modélisation du transistor bipolaire : modèle à deux diodes idéales

Diode à jonction PN

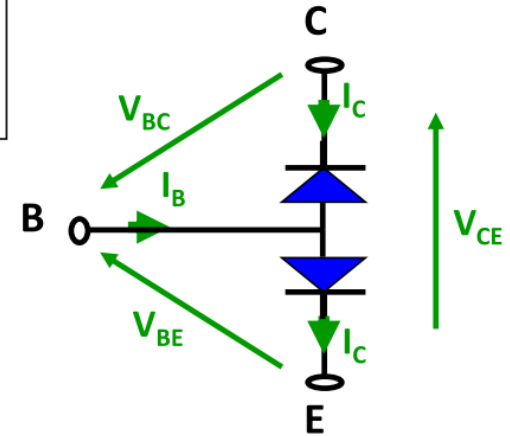


Transistor bipolaire

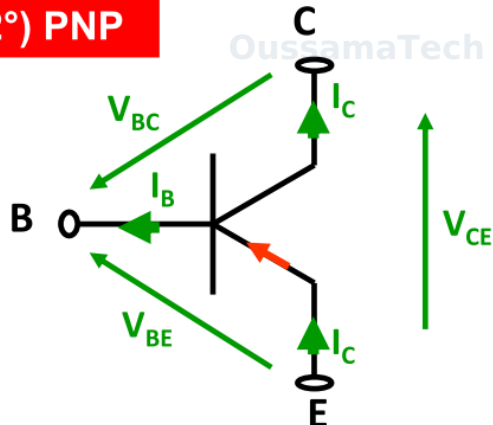
1°) NPN



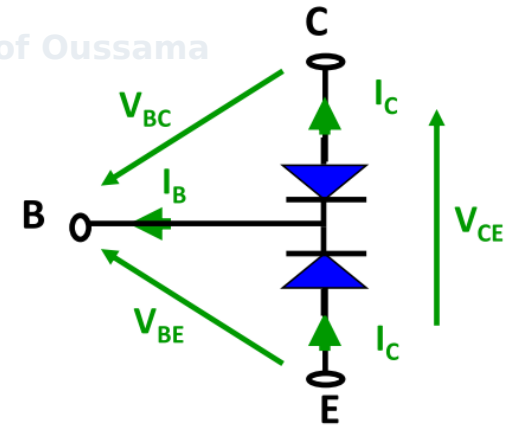
diodes à têtes opposées
« Anodes communes »



2°) PNP



diodes à têtes bêtes
« Cathodes communes »

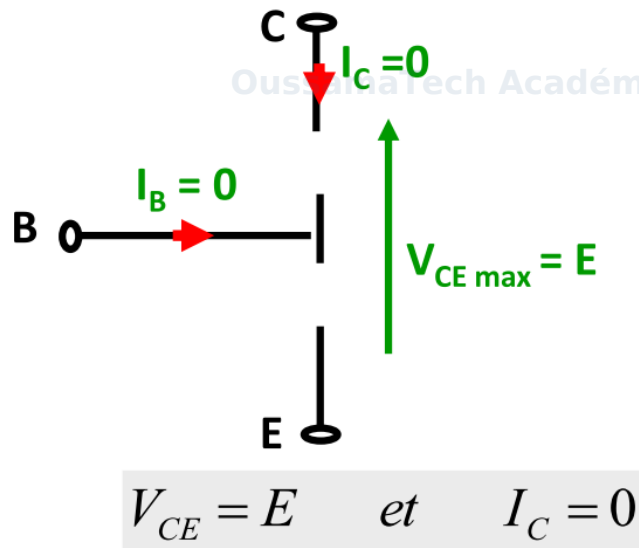


Attention!!! En pratique, deux diodes montées de la sorte ne permettent pas l'obtention de l'effet transistor.

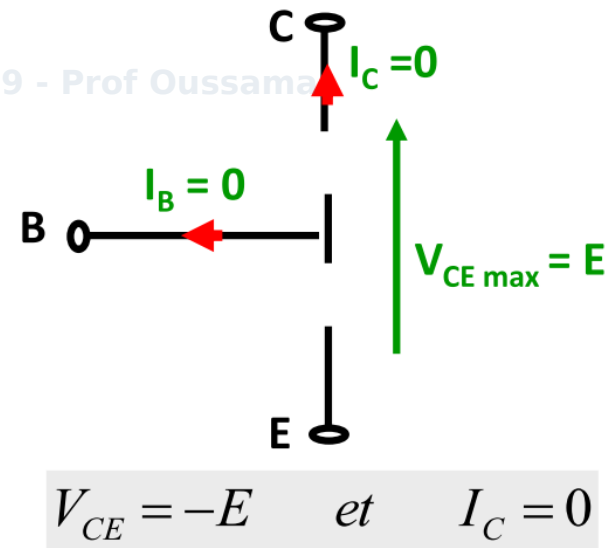
FB ou FE**Commutation : électronique numérique***NPN*

$$\begin{cases} V_{BE} < 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} \geq E$$

$$\text{Démonstration : } V_{BE} = V_{BC} + V_{CE} \Leftrightarrow \underbrace{V_{BE}}_{<0} - \underbrace{V_{BC}}_{<0} = \underbrace{V_{CE}}_{>0} \text{ (car } |V_{BC}| > |V_{BE}|)$$



2 diodes
sont
bloquées



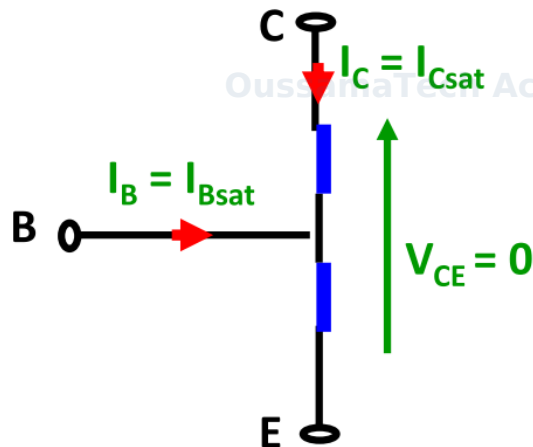
FS ou FA

Commutation : électronique numérique

NPN

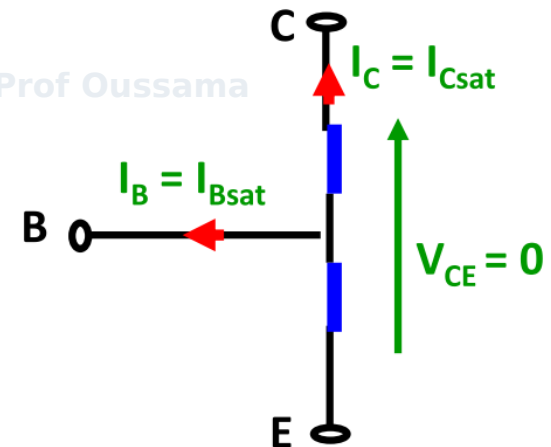
$$\begin{cases} V_{BE} > 0 \\ V_{BC} > 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} \leq 0$$

Démo : $V_{BE} = V_{BC} + V_{CE} \Leftrightarrow \underbrace{V_{BE}}_{>0} - \underbrace{V_{BC}}_{>0} = \underbrace{V_{CE}}_{<0} \text{ (car } |V_{BC}| > |V_{BE}| \text{)}$



$$V_{CE} = 0 \quad \text{et} \quad I_C = I_{C_{sat}}$$

2 diodes
sont
passantes



$$V_{CE} = 0 \quad \text{et} \quad I_C = I_{C_{sat}}$$

FND ou FC**Conduction : électronique analogique**NPN

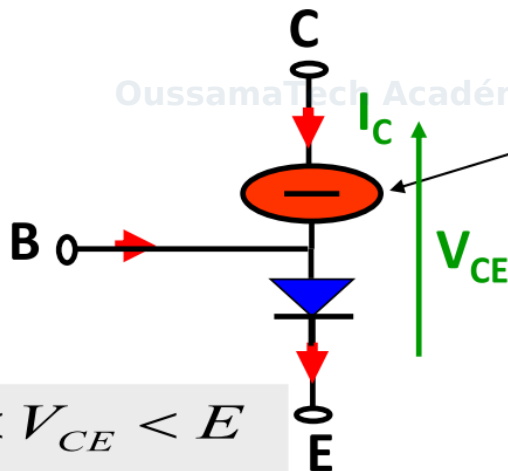
$$\begin{cases} V_{BE} > 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} > 0$$

$$\text{Démonstration : } V_{BE} = V_{BC} + V_{CE} \Leftrightarrow \underbrace{V_{BE}}_{>0} - \underbrace{V_{BC}}_{<0} = \underbrace{V_{CE}}_{>0}$$

PNP

$$\begin{cases} V_{BE} < 0 \\ V_{BC} > 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} < 0$$

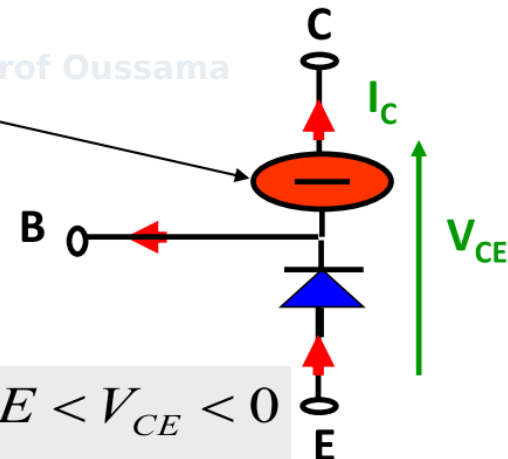
$$\text{Démonstration : } V_{BE} = V_{BC} + V_{CE} \Leftrightarrow \underbrace{V_{BE}}_{<0} - \underbrace{V_{BC}}_{>0} = \underbrace{V_{CE}}_{<0}$$



$$\begin{cases} 0 < V_{CE} < E \\ 0 < I_C < I_{C_{sat}} \end{cases}$$

Effet transistor

Transfert à travers une zone de forte résistance

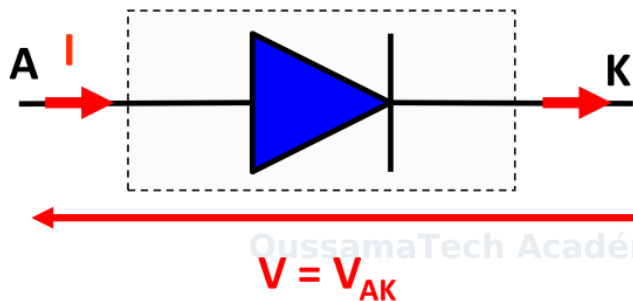


$$\begin{cases} -E < V_{CE} < 0 \\ 0 < I_C < I_{C_{sat}} \end{cases}$$

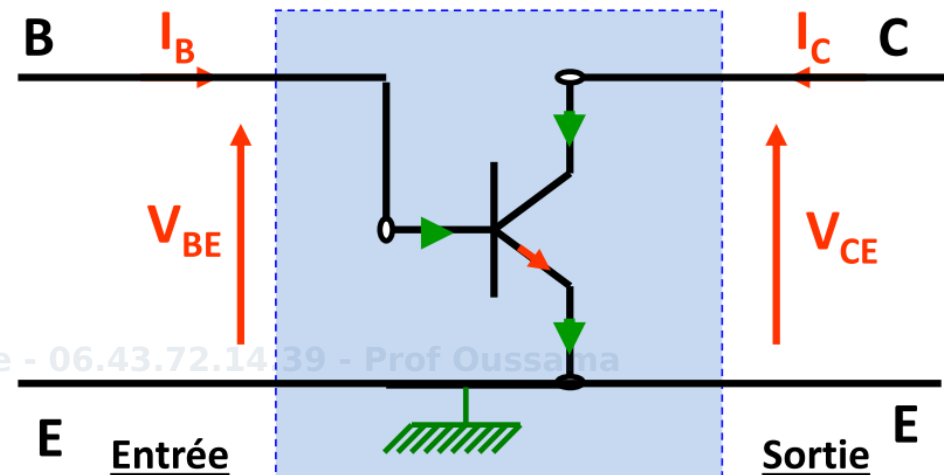
5. Représentation quadripolaire en régime statique du transistor

Représentation quadripolaire du transistor

Diode est un dipôle



Transistor est un quadripôle



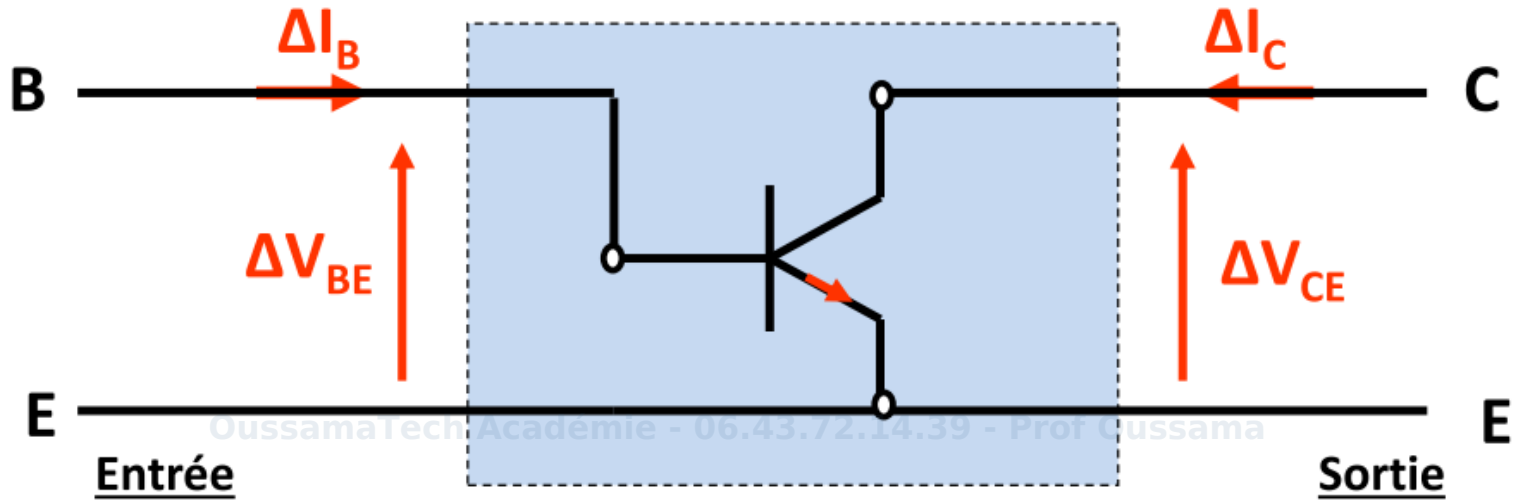
Rappel

Un fil est un point de potentiel



1 point

Représentation quadripolaire du transistor en statique



Paramètres hybrides du transistor :

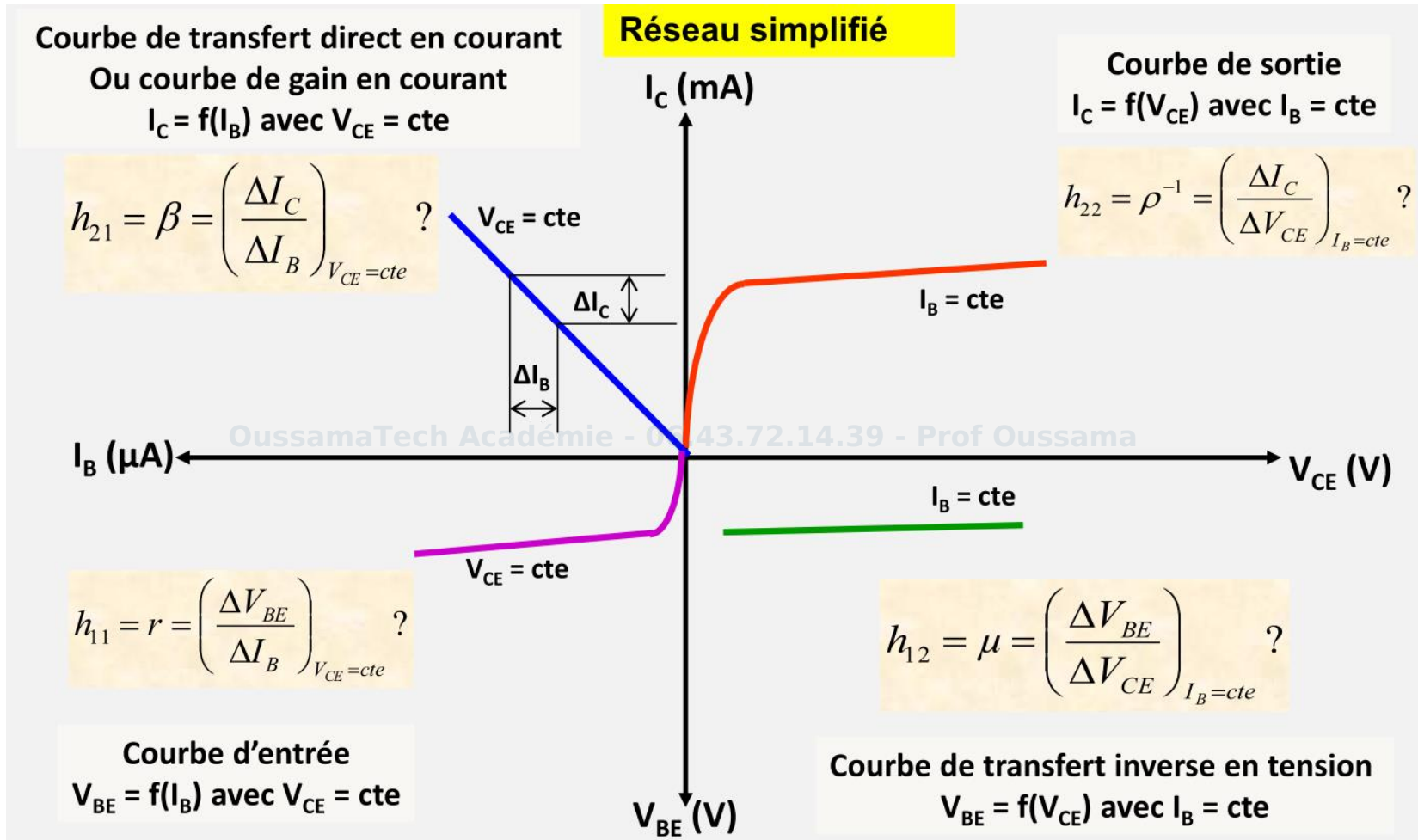
Ecriture matricielle :
$$\begin{pmatrix} \Delta V_{BE} \\ \Delta I_C \end{pmatrix} = (h) \begin{pmatrix} \Delta I_B \\ \Delta V_{CE} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta I_B \\ \Delta V_{CE} \end{pmatrix}$$

Système d'équations :
$$\begin{cases} \Delta V_{BE} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta V_{CE} \\ \Delta I_C = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta V_{CE} \end{cases}$$

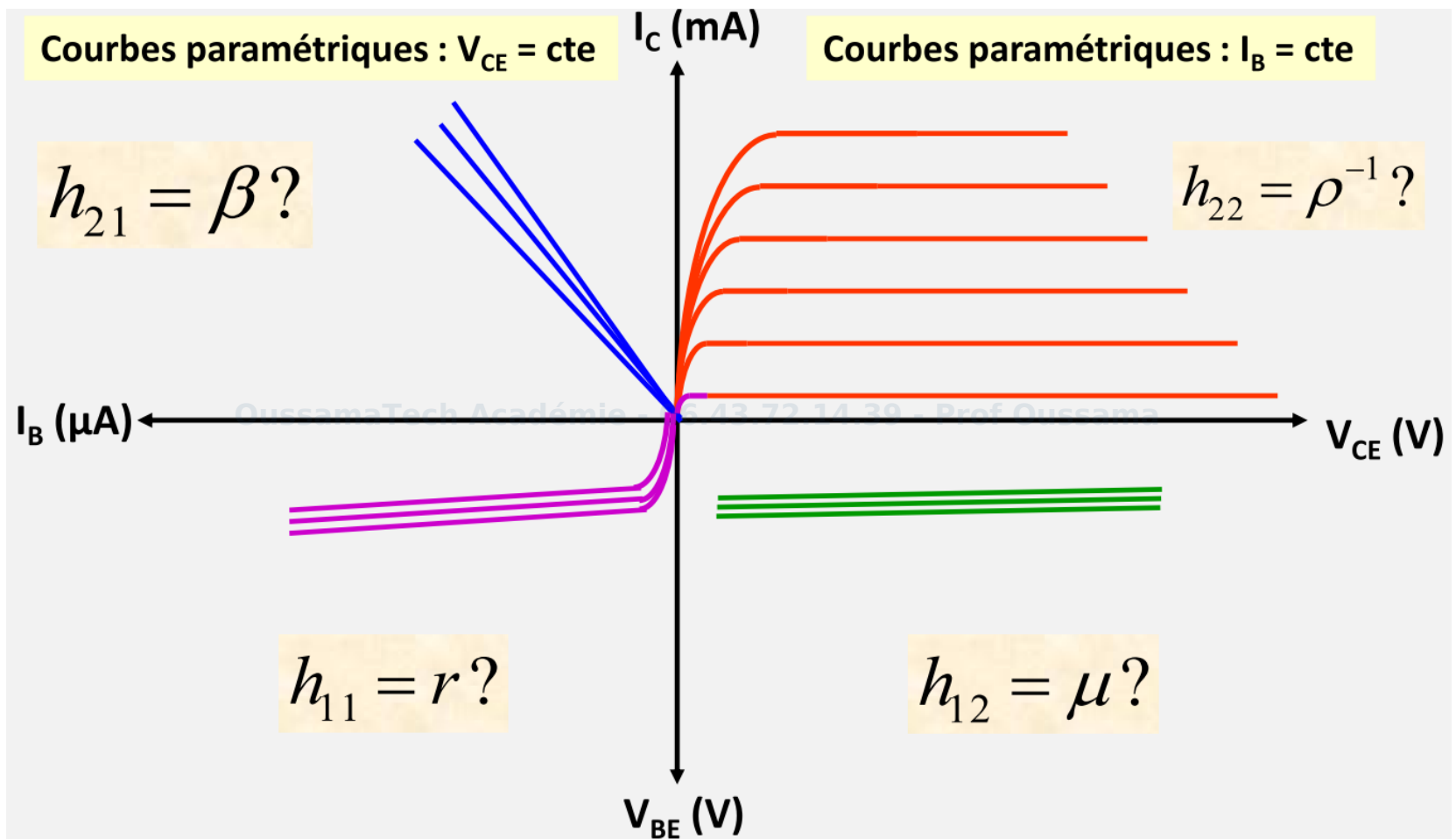
OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama

$$\left. \begin{aligned} h_{11} &= \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{(\Delta V_{CE}=0 \Leftrightarrow V_{CE}=cte)} \quad (\Omega) \\ h_{21} &= \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{(\Delta V_{CE}=0 \Leftrightarrow V_{CE}=cte)} \quad (S.U) \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} h_{12} &= \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right)_{(\Delta I_B=0 \Leftrightarrow I_B=cte)} \quad (S.U) \\ h_{22} &= \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{(\Delta I_B=0 \Leftrightarrow I_B=cte)} \quad (S) \end{aligned} \right\}$$

6. Détermination graphique des paramètres hybrides du transistor



Réseau complet



Ordre de grandeur des paramètres statiques du transistor

$$h_{11} = r = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE}=cte}$$

**r : résistance d'entrée (Ω)
de 100 à 1500 Ω**

$$h_{12} = \mu = \left(\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B=cte}$$

**μ : Coefficient de transfert inverse
de tension (S.U.) : 10^{-5} à 10^{-4}**

$$h_{21} = \beta = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right)_{V_{CE}=cte}$$

**β : coefficient de transfert direct
de courant (S.U.) : 10 à 800**

$$h_{22} = \rho^{-1} = \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} \right)_{I_B=cte}$$

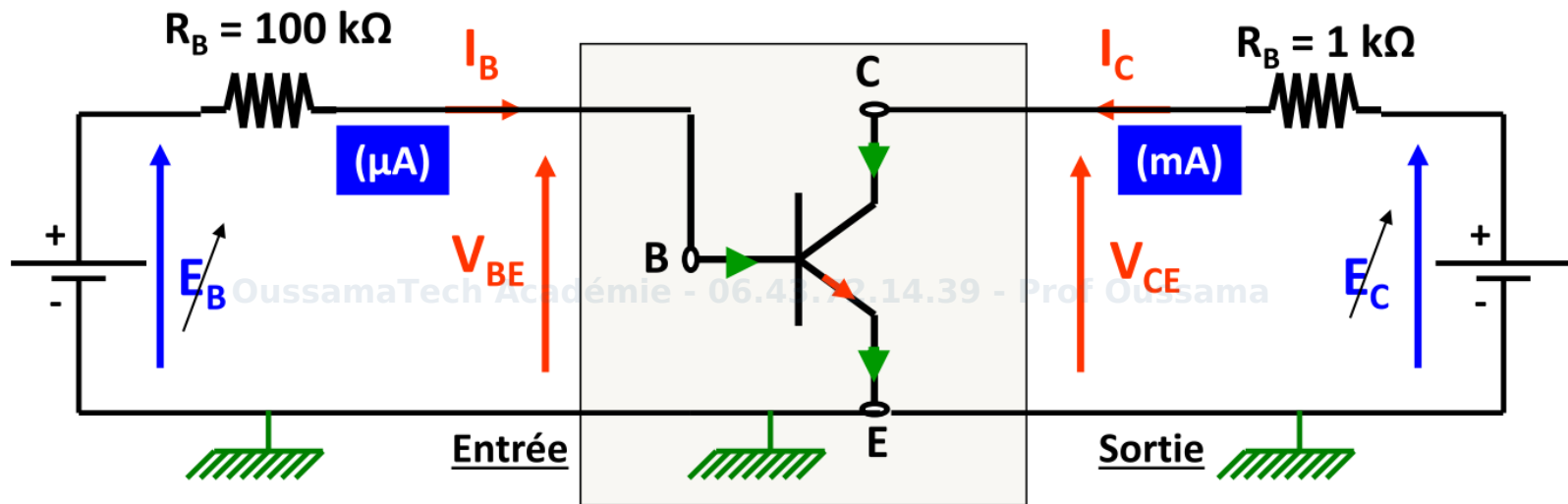
**ρ : résistance de sortie (Ω)
de 20 à 50 k Ω**

OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama

Montage pratique d'un NPN en FND ou FC

$$I_C = \beta I_B$$

$$\begin{cases} V_{BE} > 0 \\ V_{BC} < 0 \end{cases} \Rightarrow V_{CE} > 0 \Rightarrow \begin{cases} 0 < V_{CE} < V_{CE_{Max}} = E \\ 0 < I_C < I_{C_{Max}} = I_{C_{sat}} \end{cases}$$



$$V_{BE} > 0 \Rightarrow E_B > 0$$

$$V_{CE} > 0 \Rightarrow E_C > 0$$

R_B : résistance de limitation de courant de base I_B (μA)

R_C : résistance de limitation de courant de collecteur I_C (mA)

7. Polarisation du transistor bipolaire

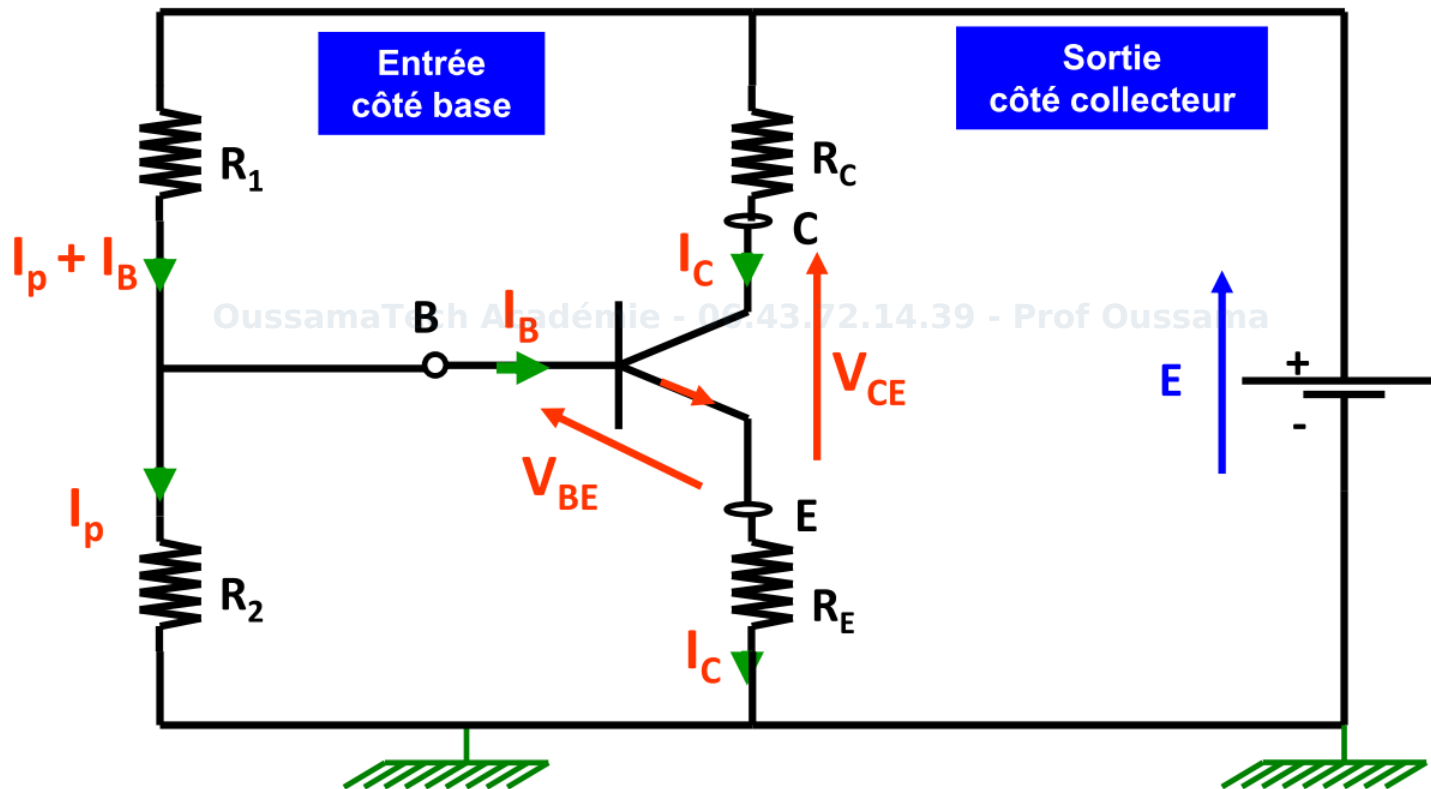
Principe et intérêt

- ▶ La polarisation est l'opération qui consiste à choisir un point de fonctionnement au transistor.
 - ▶ Cette opération est obligatoire pour un fonctionnement correct du transistor dans un circuit.
- OussamaTech Académie - 06.43.72.14.39 - Prof Oussama
- ▶ Pour polariser le transistor, il faut donc un montage de polarisation.
 - ▶ Il existe plusieurs types de montages, parmi eux, le plus rencontré et le plus utilisé est le montage de polarisation par pont de base.

On dit : point de fonctionnement ou point de repos ou point de polarisation

Montage de polarisation par pont de base

- On utilise une seule source E pour alimenter aussi bien le circuit de base que celui du collecteur
- Les résistances R_1 et R_2 forment le pont de base



Rôle des éléments

- ▶ R_C , R_E , R_1 et R_2 : les résistances de polarisation
- ▶ R_1 et R_2 constituent le pont de base
- ▶ R_E assure la stabilité thermique (empêche le transistor de chauffer et de s'emballer)
- ▶ E est l'alimentation continue de valeur fixée
- ▶ V_{CE} , I_C , V_{BE} et I_B : les grandeurs électriques continues du composant définissant le point de polarisation
- ▶ I_P : le courant de pont

Hypothèse pratique

On **suppose** : $I_P \gg I_B$

On utilise le facteur de sécurité pratique ($\times 10$)

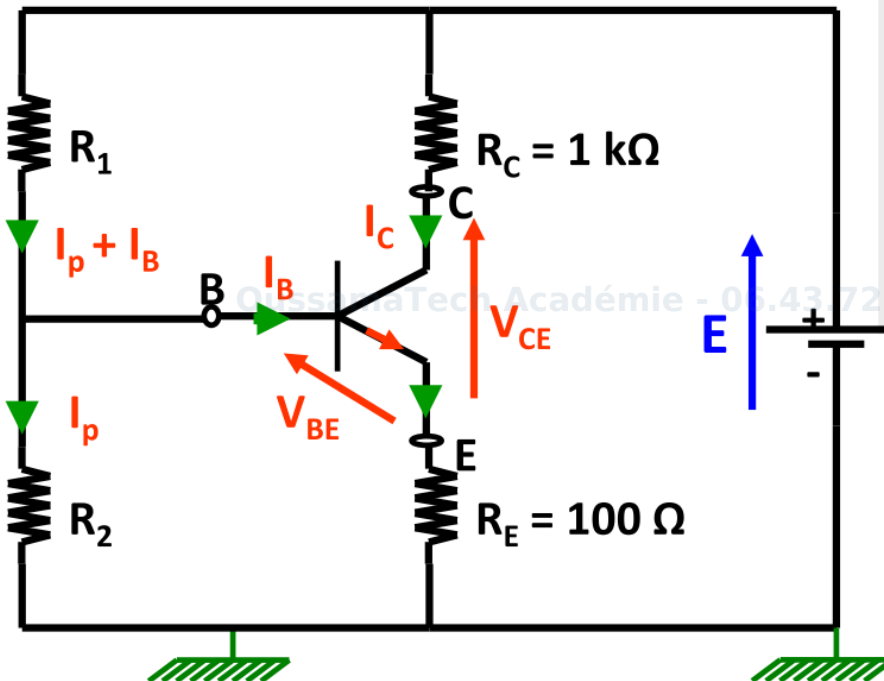
On pose : $I_P = 10 I_B$

On a donc : $I_P + I_B \approx I_P$

Équations utiles du montage de polarisation

$$I_p \gg I_B \Rightarrow I_p + I_B \approx I_p$$

$$I_C = \beta I_B \quad \text{et} \quad I_C \approx I_E$$



Côté entrée

$$\begin{aligned} (1) \quad & E \approx (R_1 + R_2) I_p \\ (2) \quad & R_2 I_p \approx V_{BE} + R_E I_C \\ (3) \quad & R_2 I_p \approx E \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

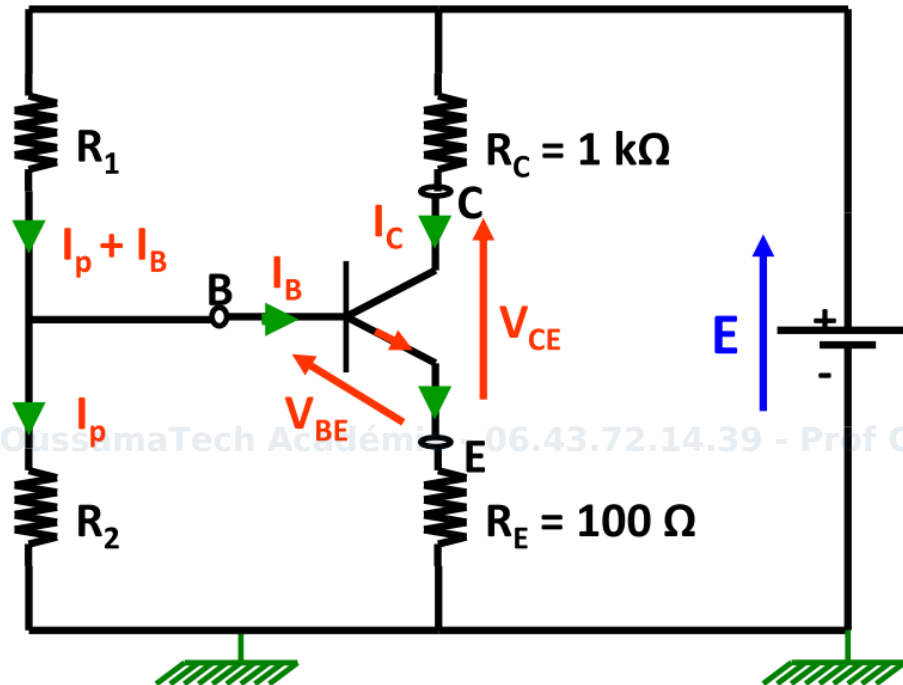
Côté sortie

$$(4) \quad E \approx (R_C + R_E) I_C + V_{CE}$$

Droite de charge statique : $I_C = f(V_{CE})$

Sortie : côté collecteur

► Elle est fournie par le circuit de sortie.

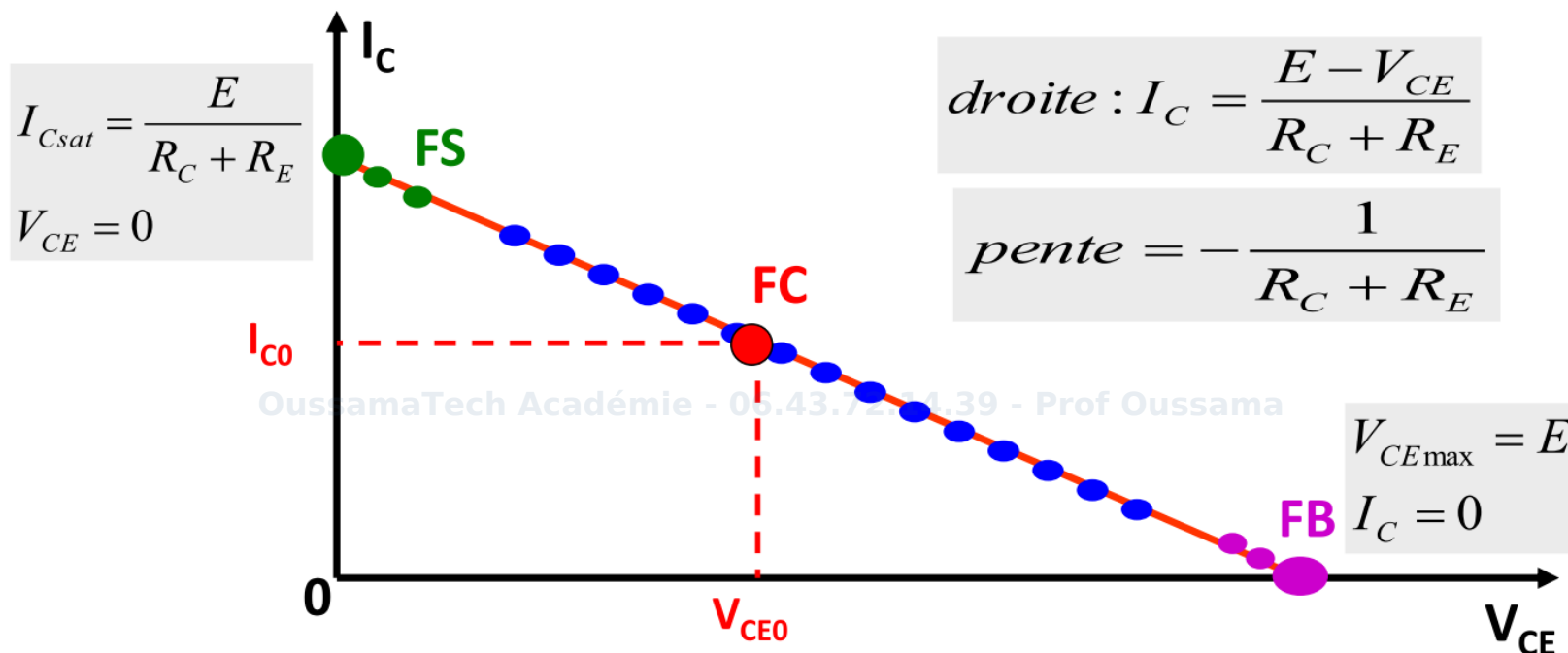


$$(4) \quad E \approx (R_C + R_E)I_C + V_{CE} \Rightarrow I_C = \frac{E - V_{CE}}{(R_C + R_E)}$$

► C'est une droite de pente négative $- 1/ R_C + R_E$

Tracé de la droite de charge statique : $I_C = f(V_{CE})$

► La droite de charge a pour rôle de fournir le lieu de tous les points de fonctionnement du transistor.



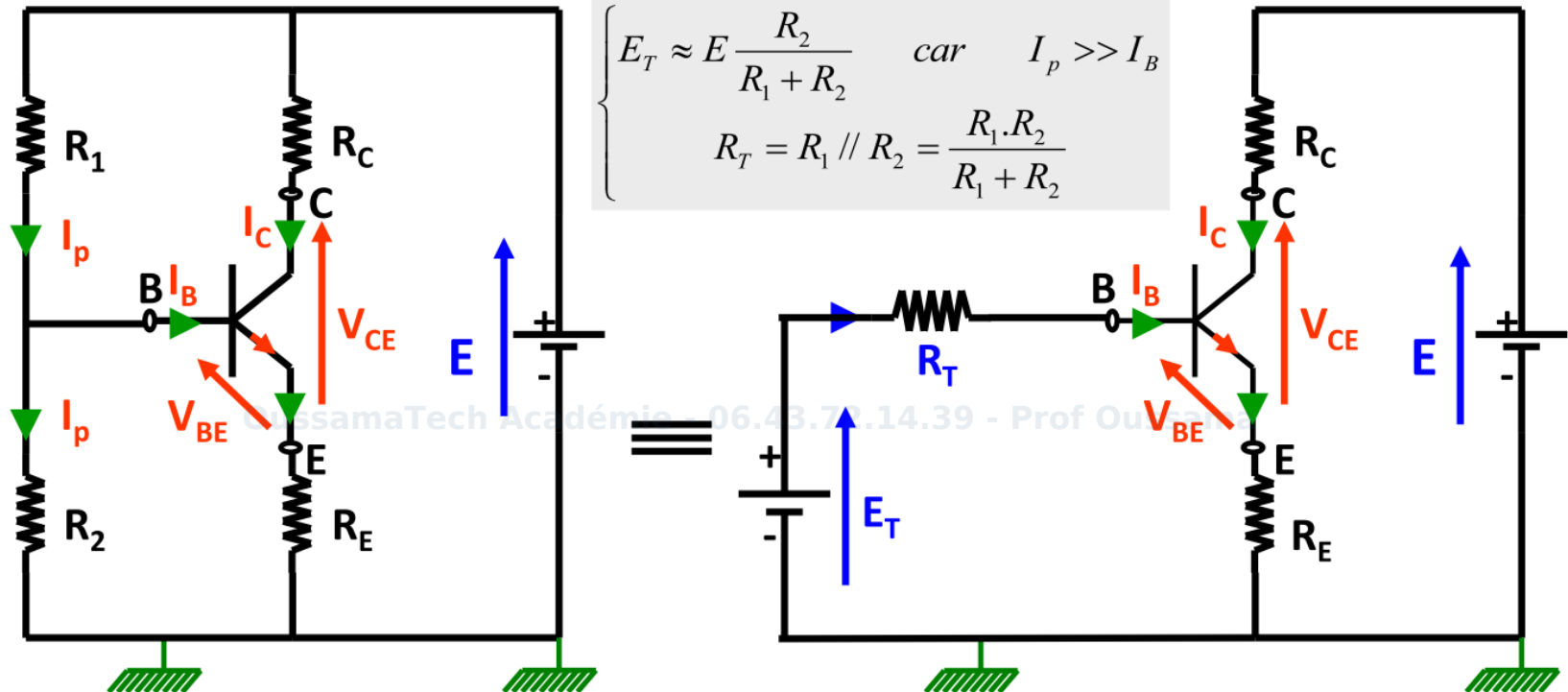
► Le couple de sortie (V_{CE0} et I_{C0}) définit ici le point de fonctionnement que l'on souhaite atteindre.

► Le couple d'entrée (V_{BE0} et I_{B0}) sera obtenu par déduction ou par la droite d'attaque.

Droite d'attaque statique : $I_B = f(V_{BE})$

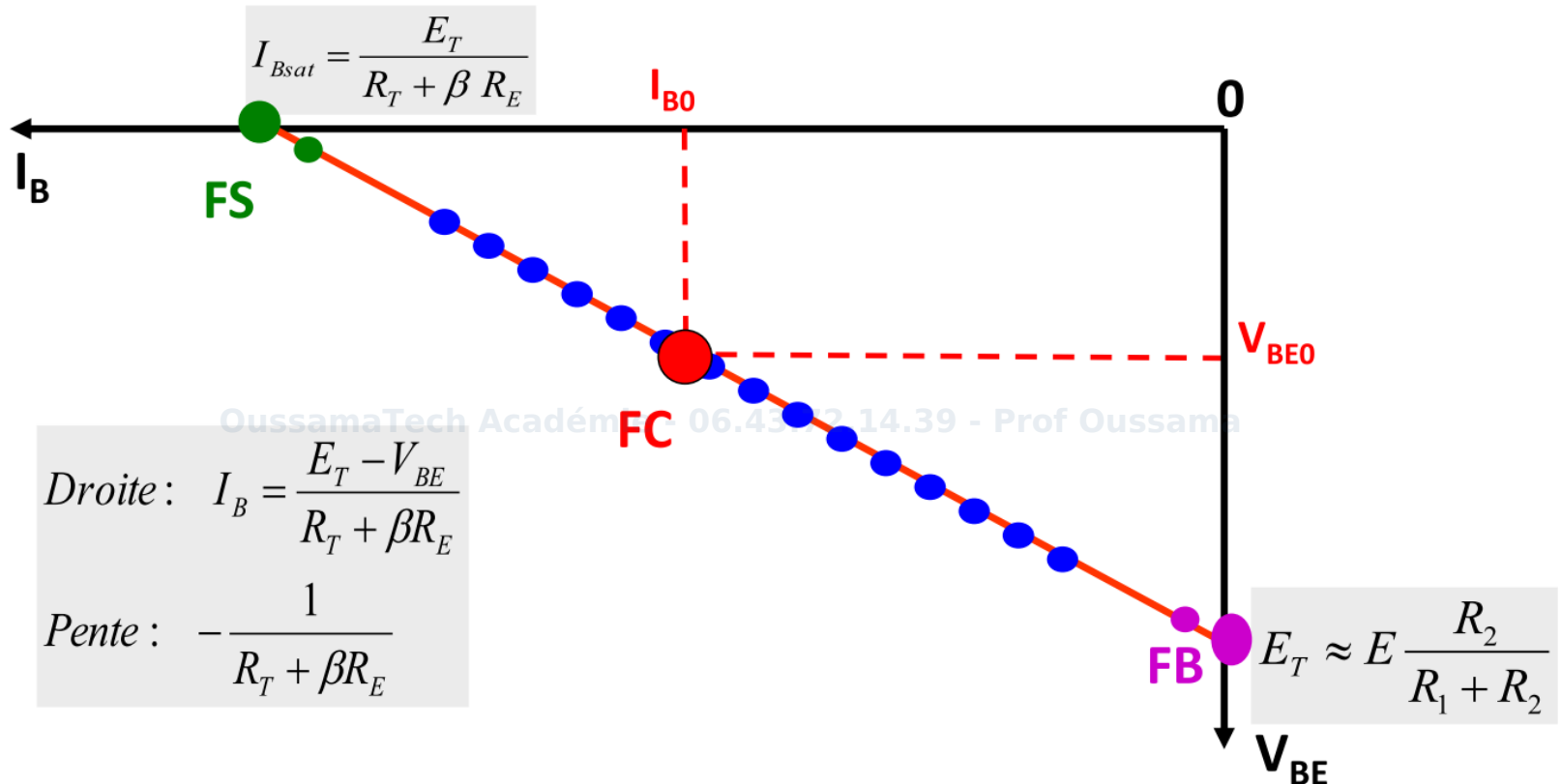
Entrée : côté base

► Elle est fournie par le circuit d'entrée.



$$E_T \approx R_T I_B + V_{BE} + R_E I_C = (R_T + \beta R_E) I_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{E_T - V_{BE}}{R_T + \beta R_E}$$

- La droite d'attaque a pour rôle de fournir le lieu de tous les points de fonctionnement du transistor.



- Le couple d'entrée (V_{BE0} et I_{B0}) définit ici le point de fonctionnement que l'on souhaite atteindre.

Résumé

Le quadruplet $(V_{CE0}, I_{C0}, V_{BE0}, I_{B0})$ définit le point de fonctionnement

droite de charge

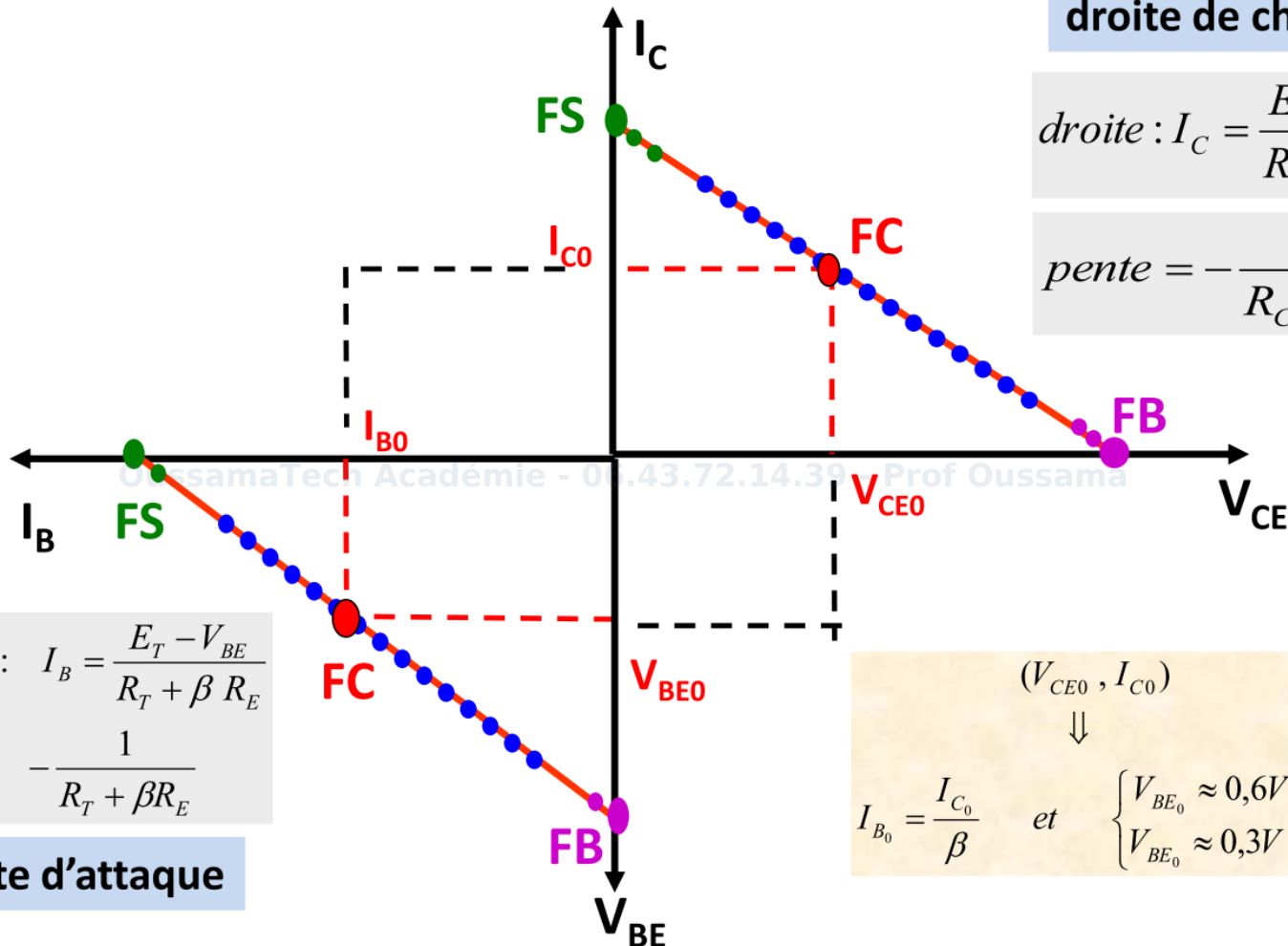
$$\text{droite : } I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C + R_E}$$

$$\text{pente} = -\frac{1}{R_C + R_E}$$

$$\text{Droite : } I_B = \frac{E_T - V_{BE}}{R_T + \beta R_E}$$

$$\text{Pente : } -\frac{1}{R_T + \beta R_E}$$

droite d'attaque



$$(V_{CE0}, I_{C0})$$

$$\Downarrow$$

$$I_{B0} = \frac{I_{C0}}{\beta} \quad \text{et} \quad \begin{cases} V_{BE0} \approx 0,6V & \text{Si} \\ V_{BE0} \approx 0,3V & \text{Ge} \end{cases}$$

Remarque n°1

- ▶ le quadruplet (V_{CE0} , I_{C0} , V_{BE0} et I_{B0}) constitue le point de fonctionnement
- ▶ La droite de charge statique permet de fournir le couple (V_{CE0} et I_{C0}).
- ▶ La droite d'attaque statique permet de fournir le couple (V_{BE0} et I_{B0}).

Remarque n°2

- ▶ Connaissant un couple, par exemple, (V_{CE0} et I_{C0}), on peut en déduire l'autre, (V_{BE0} et I_{B0}) ou inversement.
- ▶ Utilisation donc d'une seule droite suffit pour définir le point de fonctionnement