

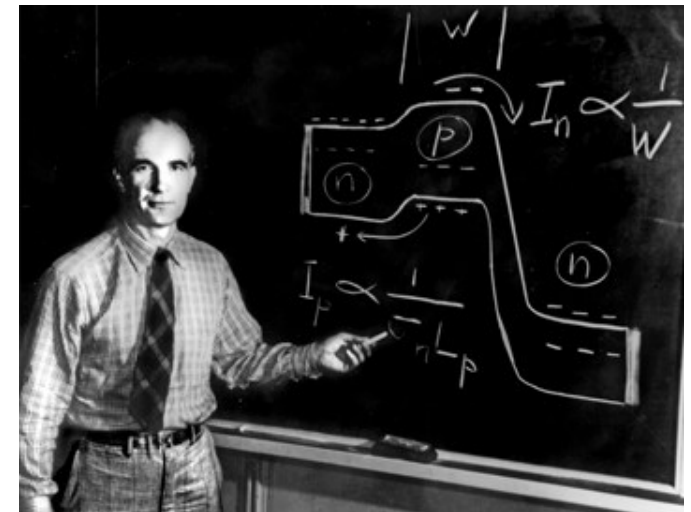
COMPOSANTS SEMI-CONDUCTEURS

VII) Principes du transistor bipolaire

Shockley. Bell Labs, 1949

P.A. Besse

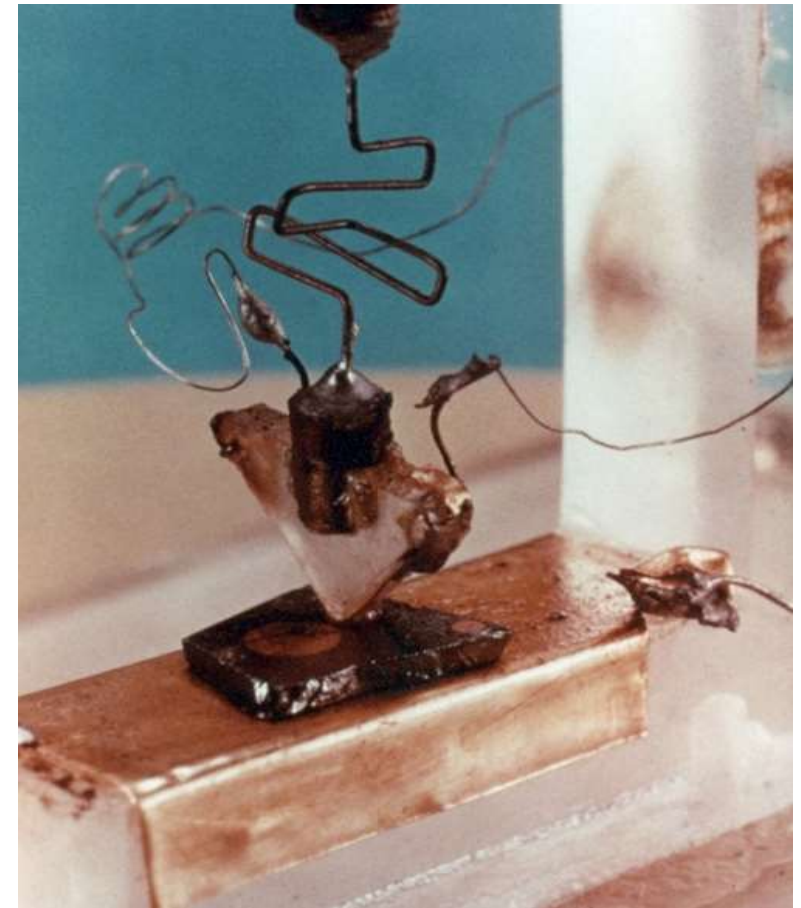
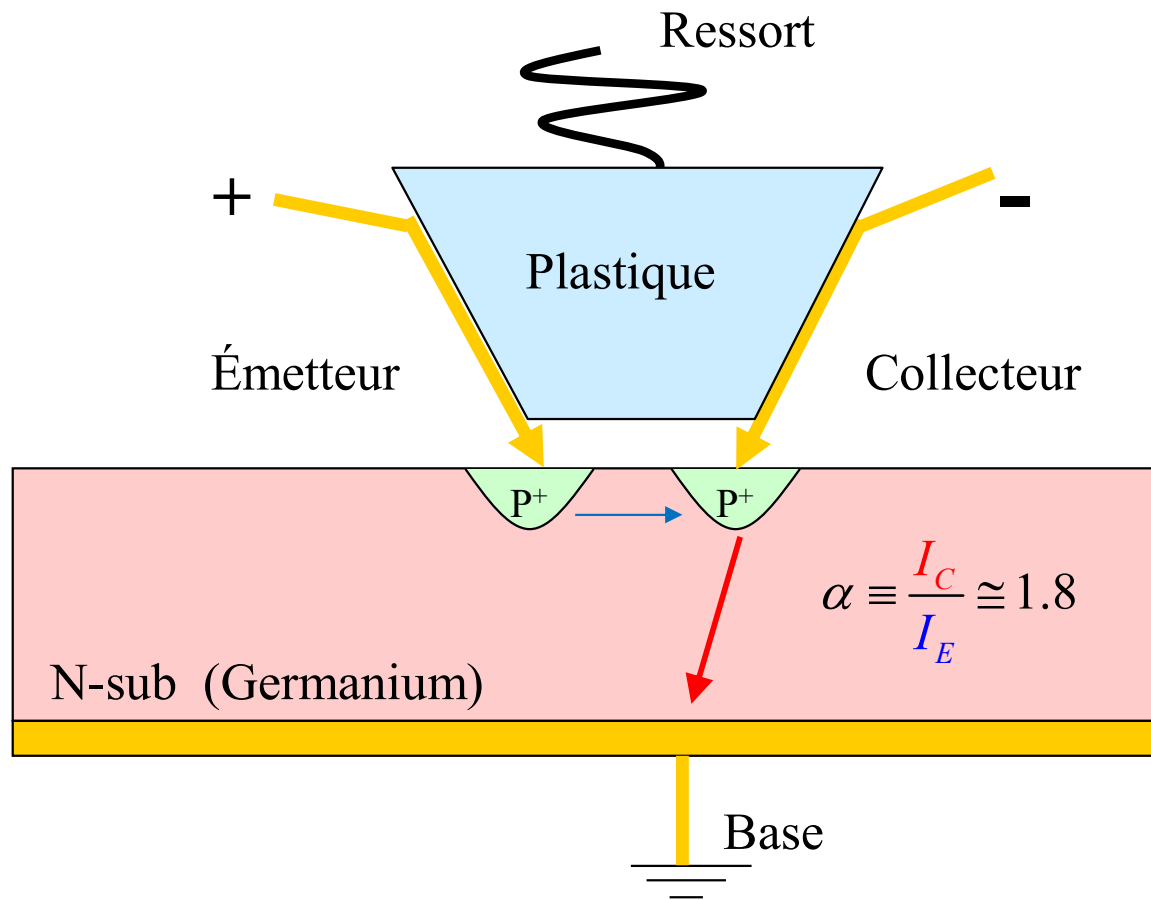
EPFL



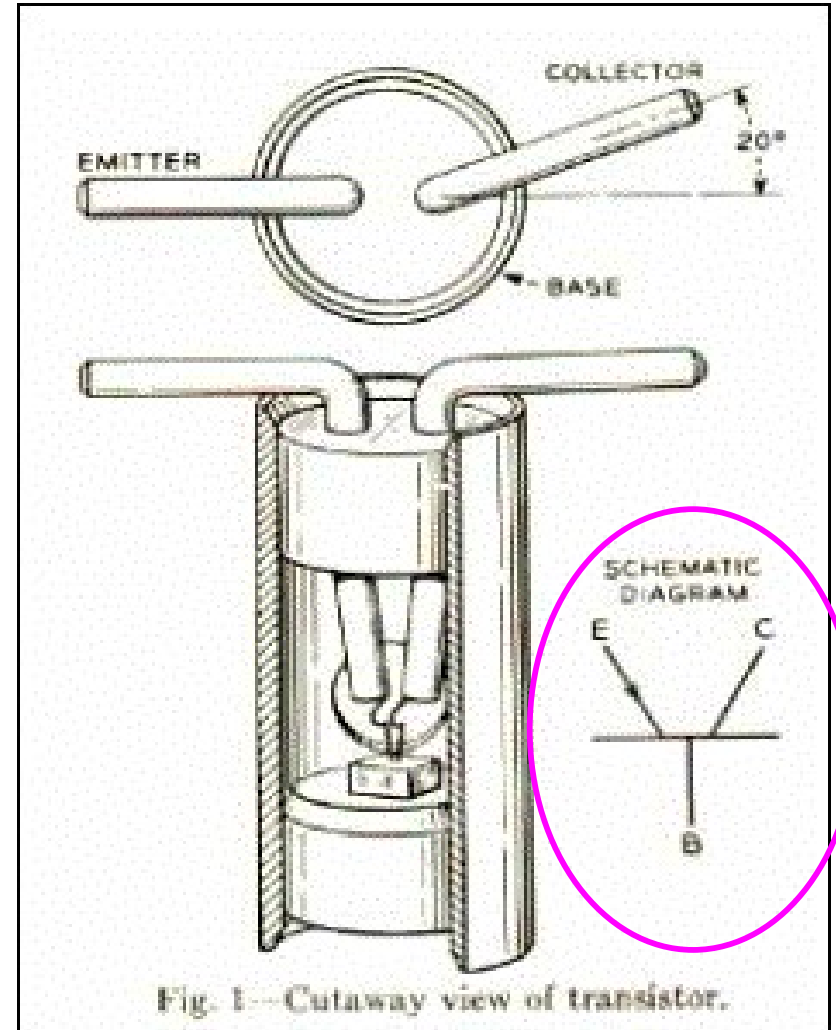
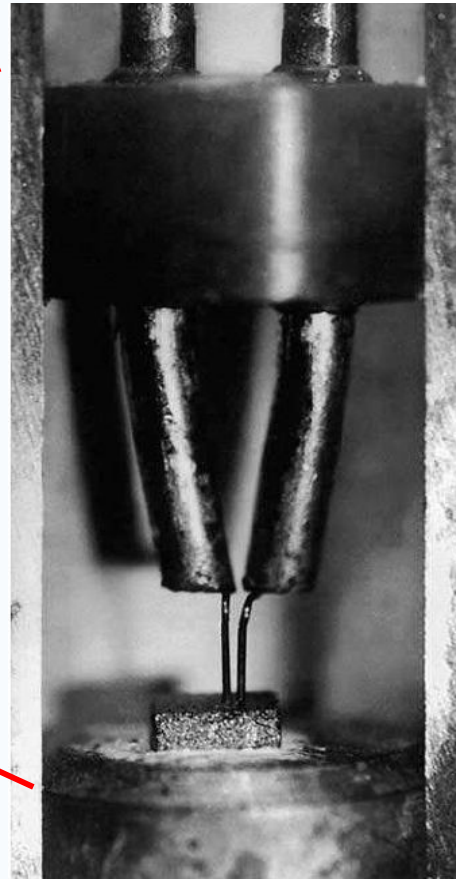
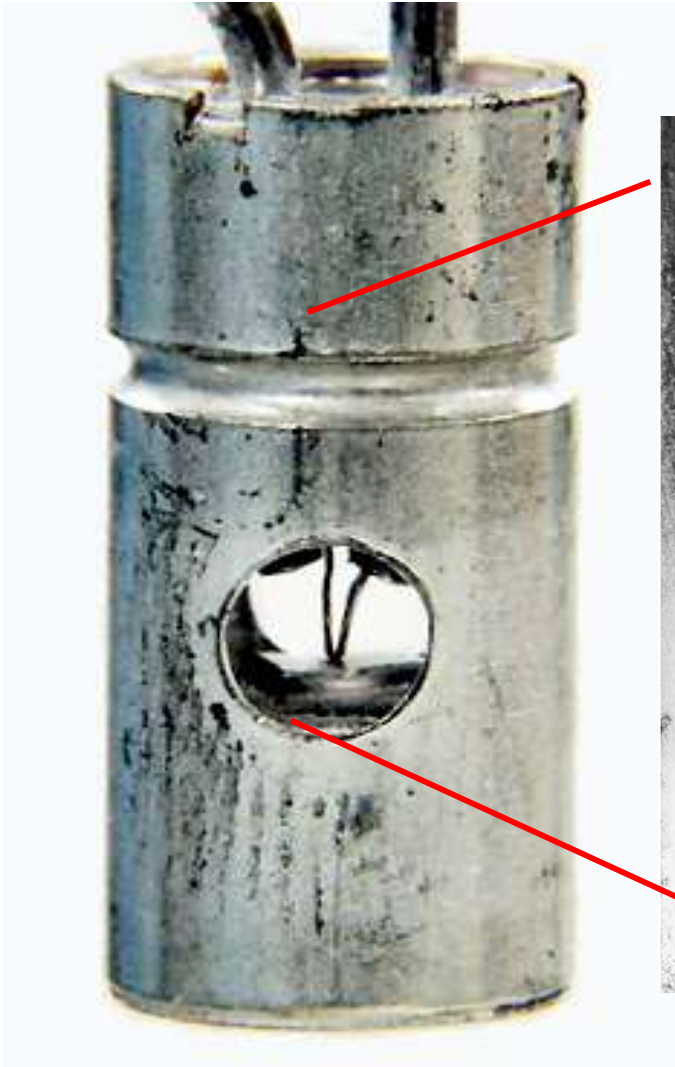
Point contact transistor



Noel 1947 – Transistor Bipolaire à point de contact Bardeen, Brattain, Shockley (Nobel 1956)



Point contact transistor "Type A"

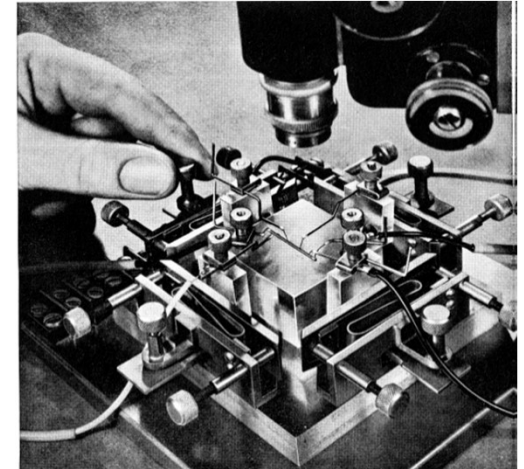


Bell Labs, 1948

Résumé: expérience de Haynes-Shockley (1949)

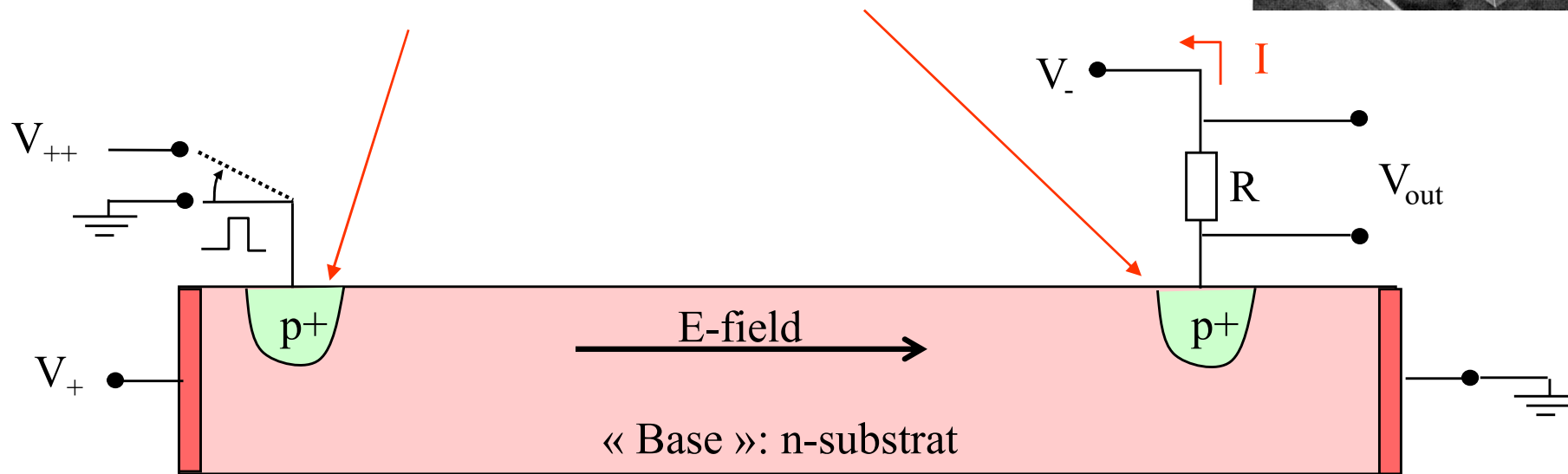
Mesure de μ_n , D_n et τ_n

Haynes, Shockley
1949

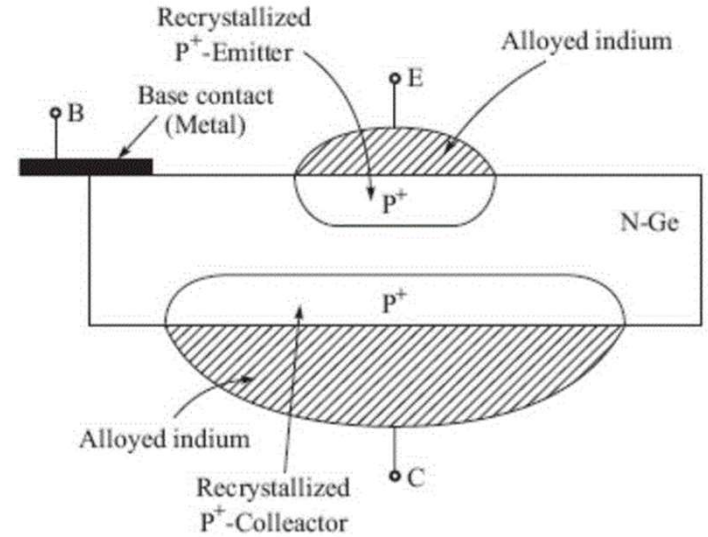


Diode direct
« Injecteur de
minoritaires »

Diode inverse
« Extracteur de
minoritaires »



Bipolar Junction Transistors: alloyed (1951)



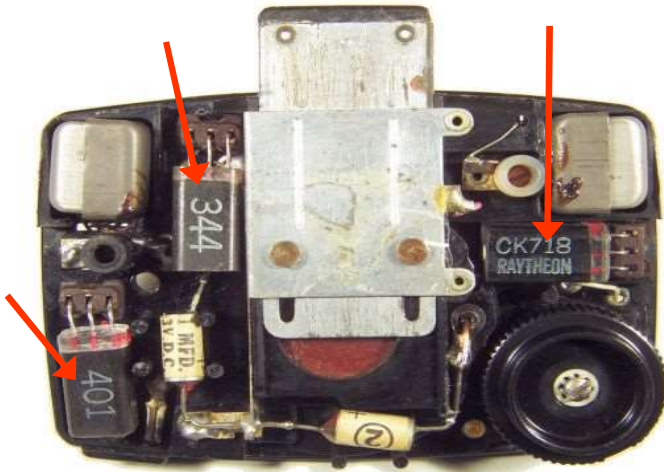
<https://academic-accelerator.com/encyclopedia/alloy-junction-transistor>

Market

1^{er} appareil auditif (2 tubes, 1 transistor)
Sonotone 1010, 1952



Appareil auditif "tout transistor"
MAICO, 1953



Première radio (4 transistors),
Regency TR1, 1954

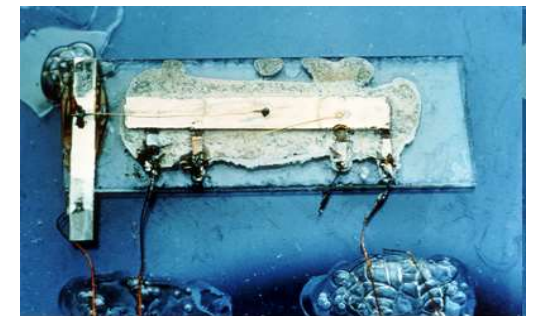


Labo

1^{ère} TV à transistors,
RCA, 1952



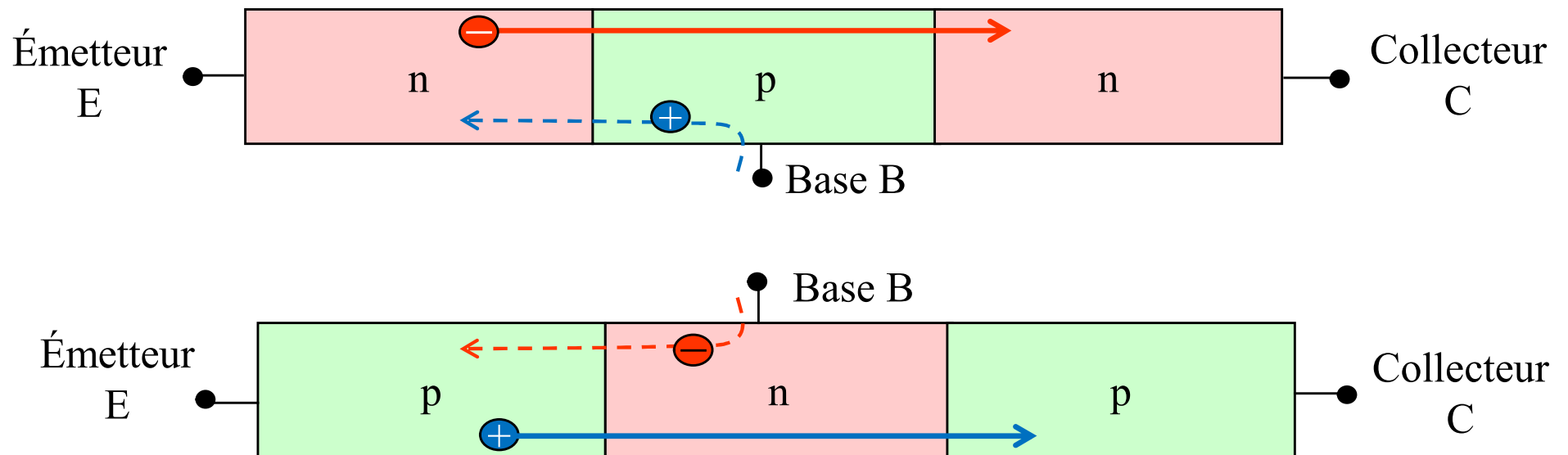
1^{er} circuit Intégré,
Texas Instruments, 1958
J. Kilby (Nobel 2000)



Oscillateur avec 1 pnp, 1C, 3R

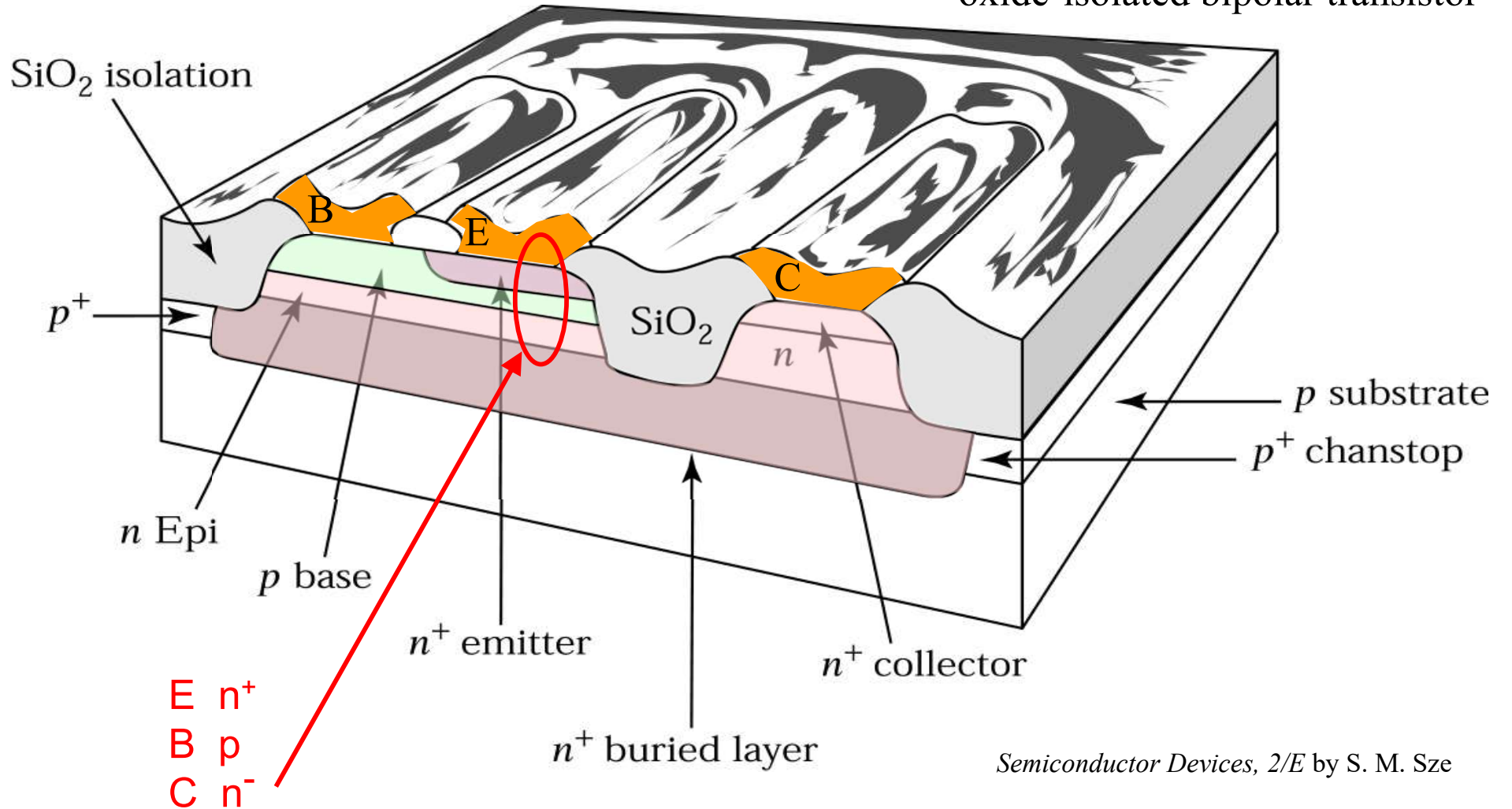
Principe du transistor bipolaire

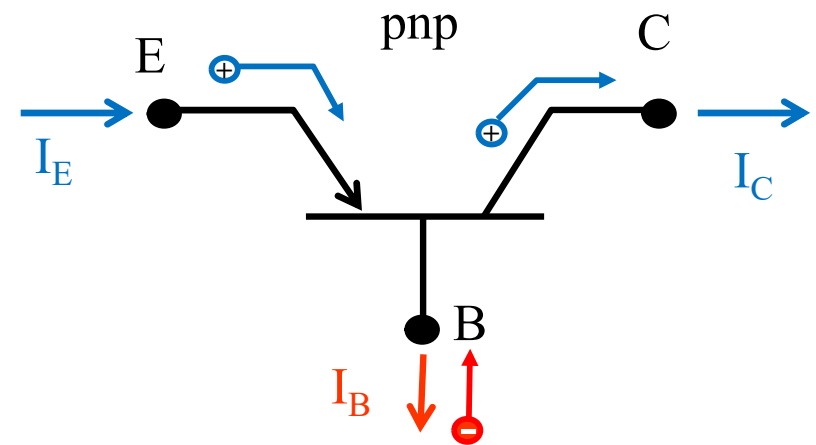
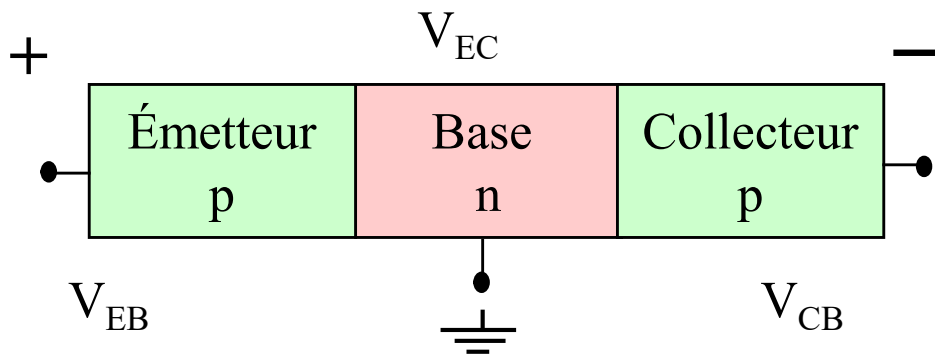
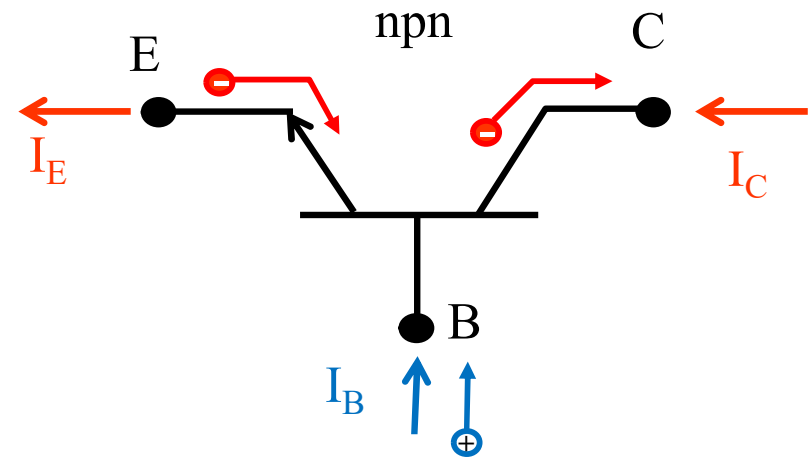
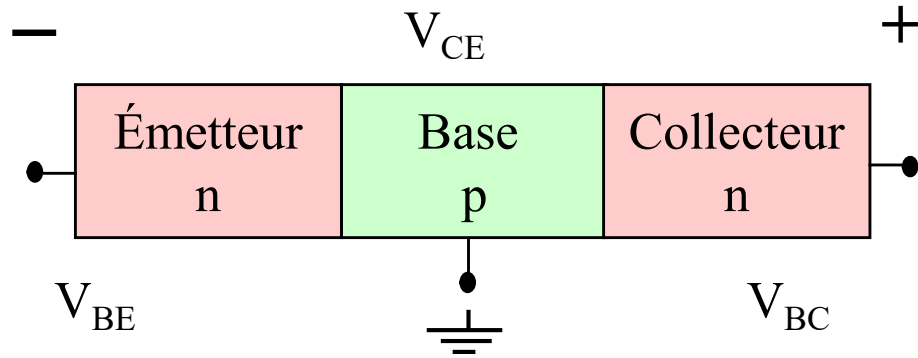
- Une diode en mode direct injecte (**émet**) des minoritaires dans la base
- Une diode en mode inverse extrait (**collecte**) ces minoritaires avant qu'ils ne recombinent dans la base. (base très courte).
- Des majoritaires de la base sont injectés comme minoritaires dans l'émetteur. Ce (faible) courant de base contrôle le courant récolté dans le collecteur.



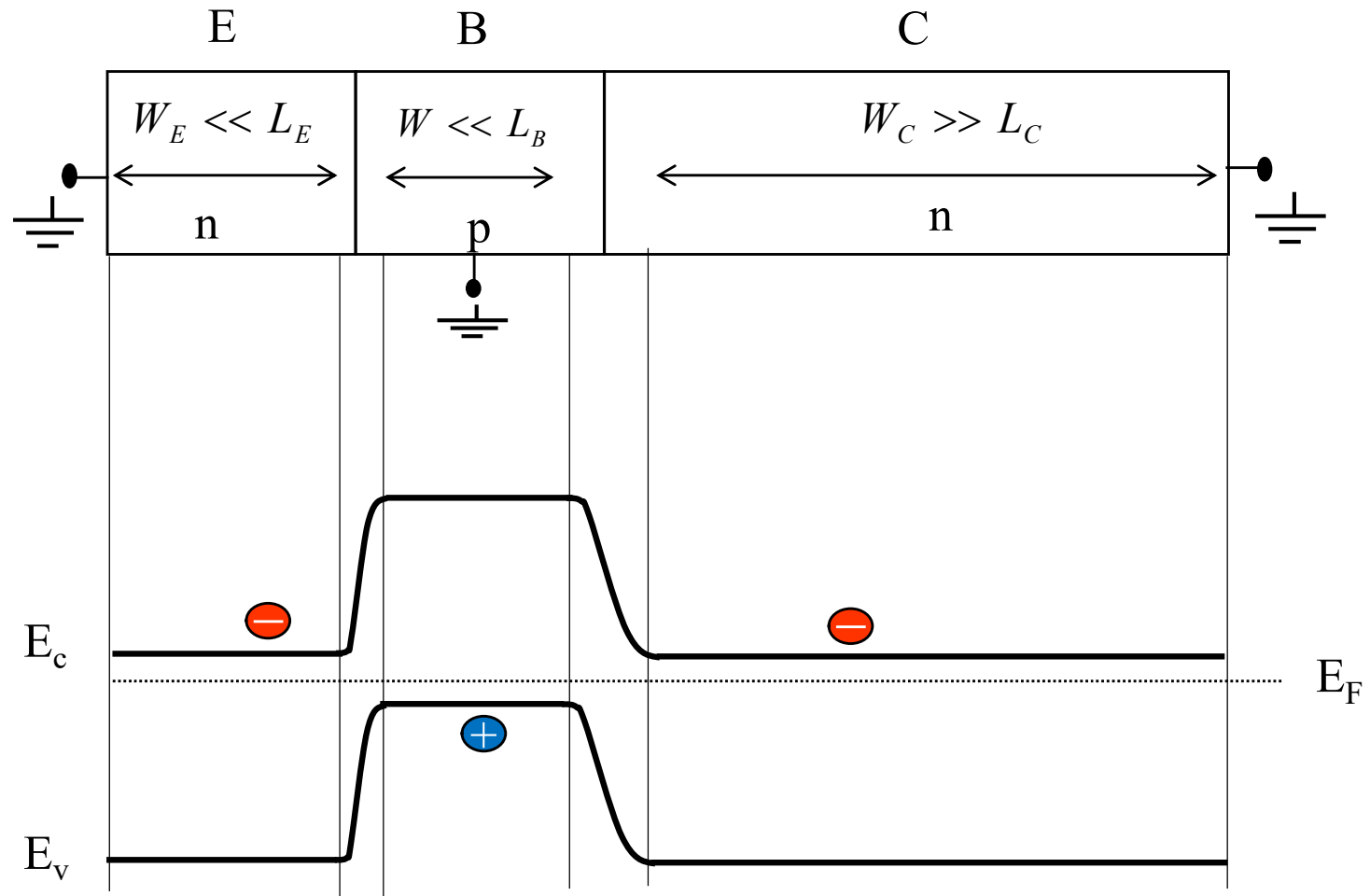
Transistor bipolaire npn

oxide-isolated bipolar transistor

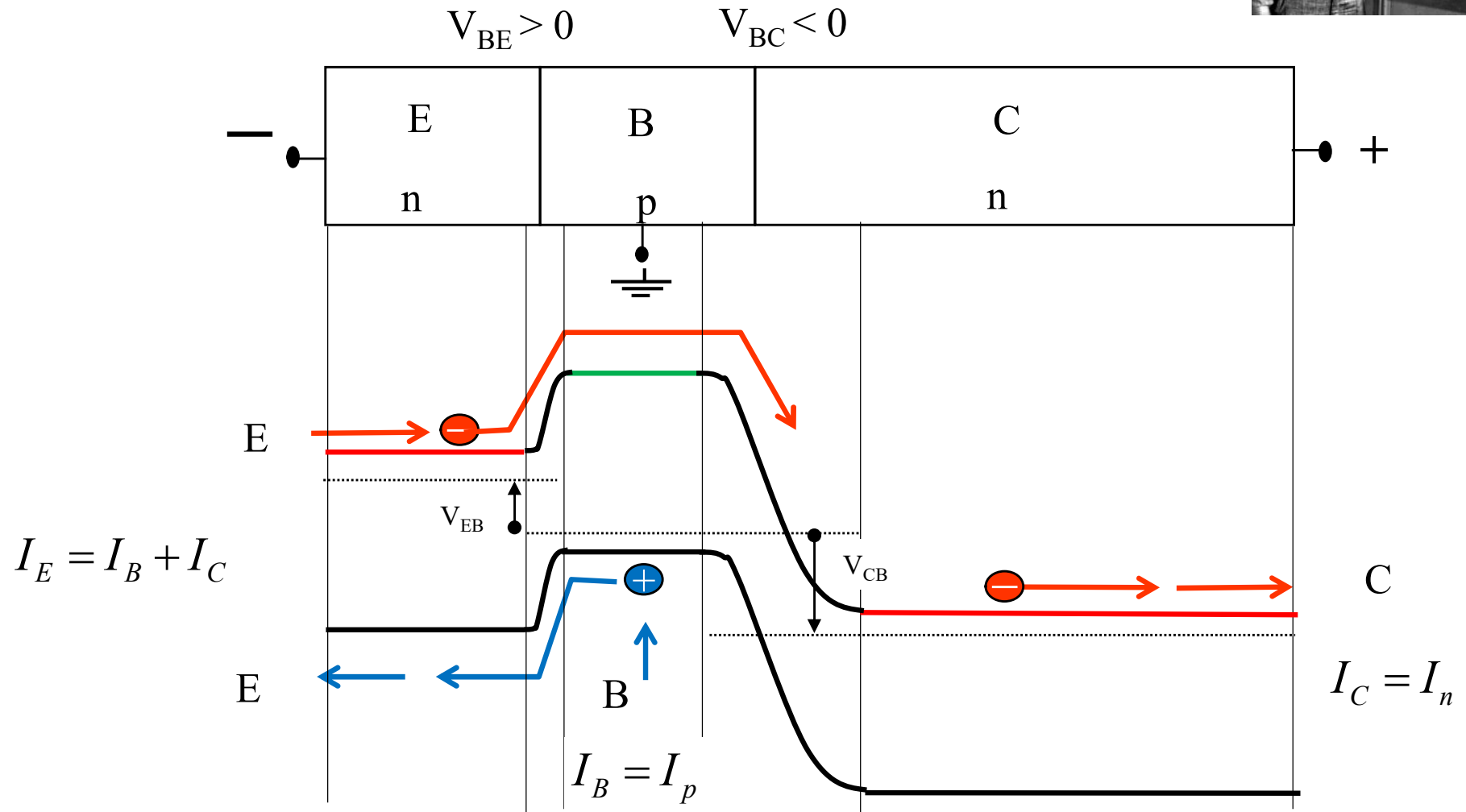
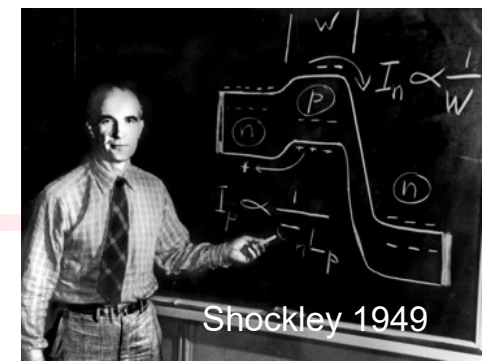




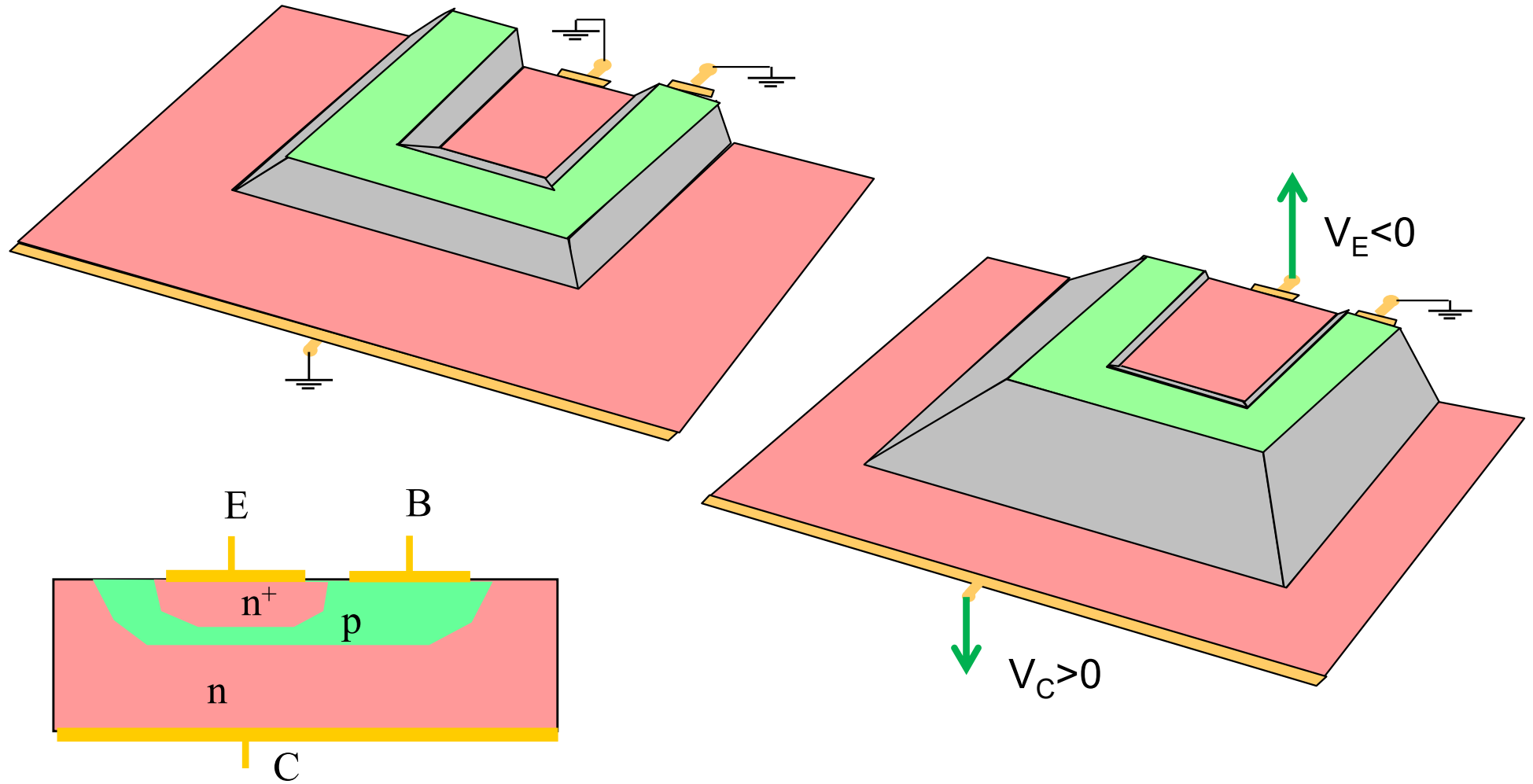
Transistor n/p/n à l'équilibre



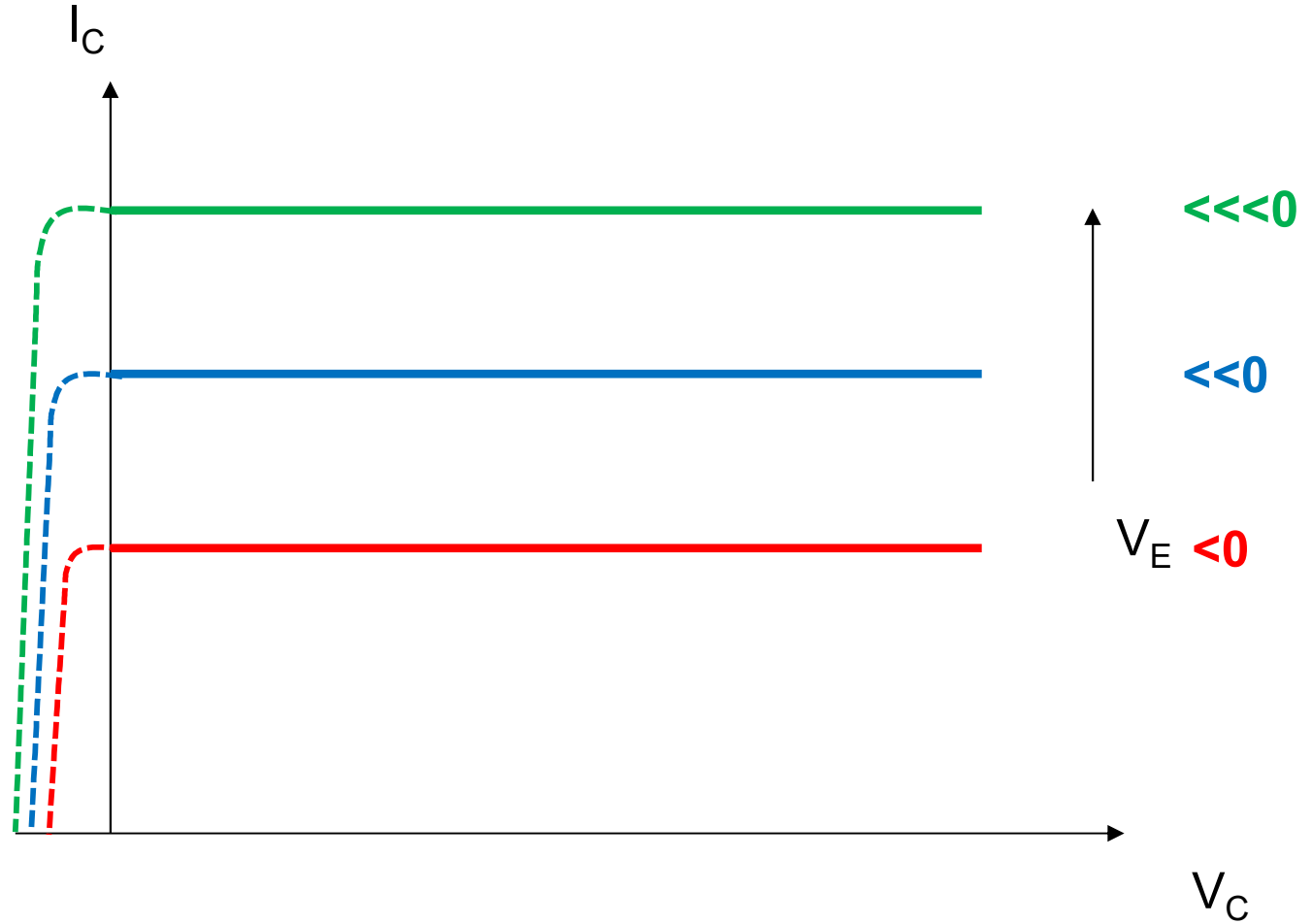
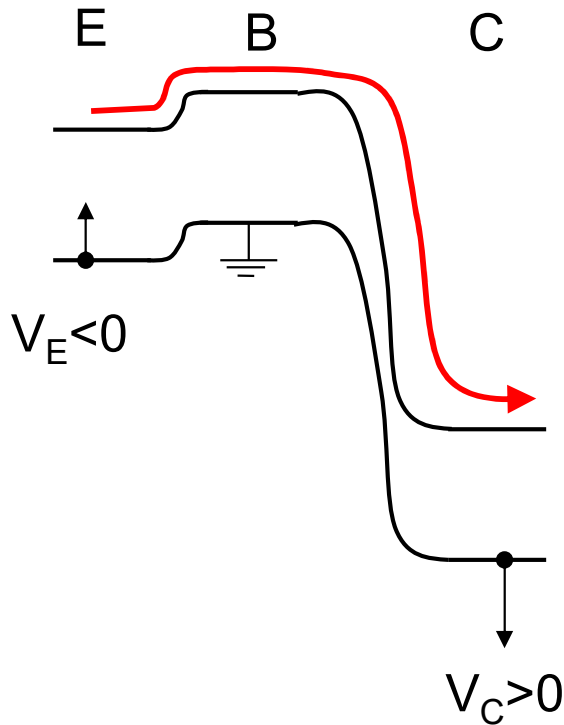
Transistor npn en mode actif



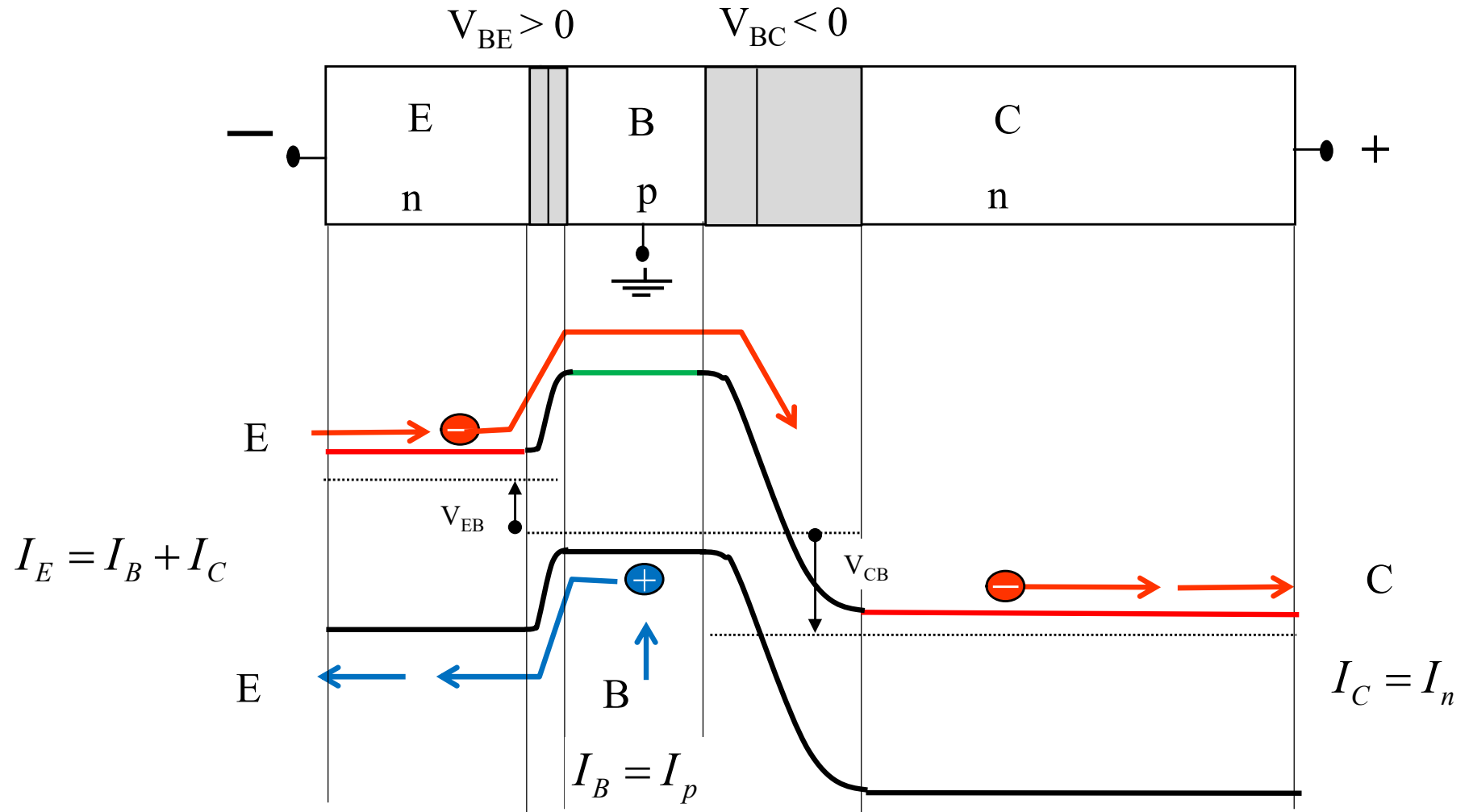
Transistor bipolaire npn: vision 3D



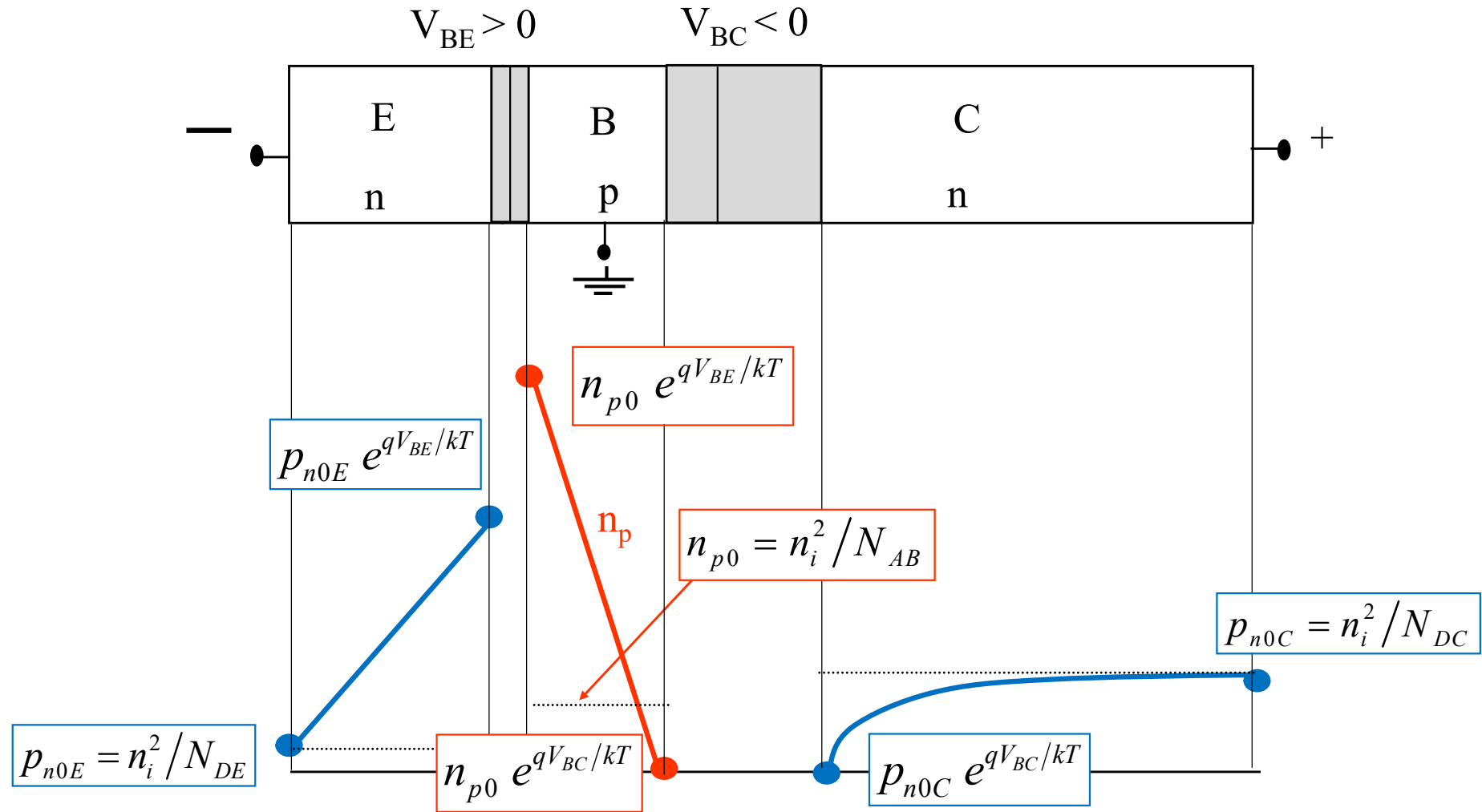
Esquisse des courants principaux (en base commune)



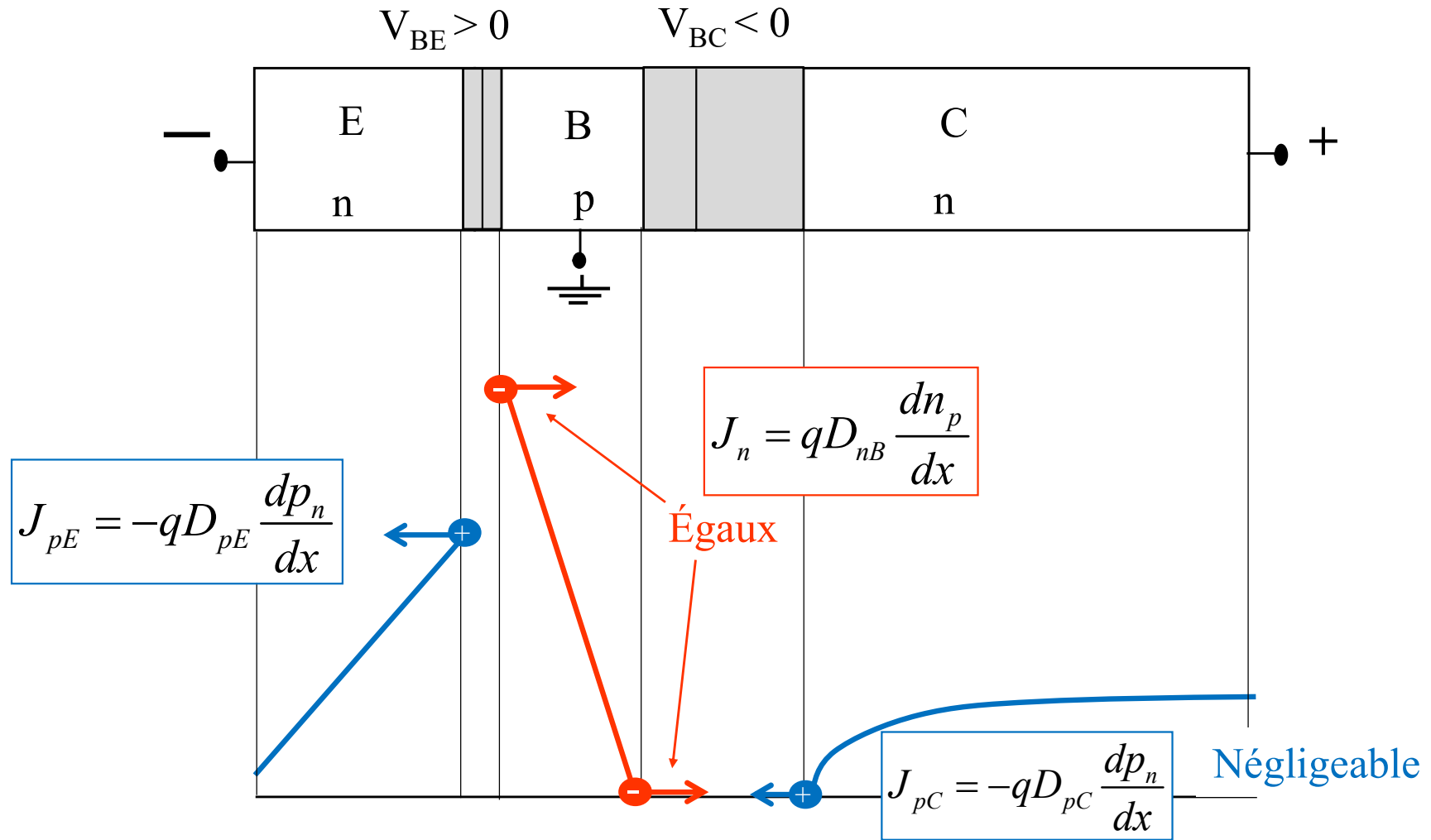
Transistor npn en mode actif



Mode actif: densité des minoritaires (npn)



Mode actif: courants principaux (npn)



Courants principaux: solutions en mode actif (npn)

En résolvant les équations pour les courants de diffusion,
avec les conditions aux bords données,
nous obtenons pour le mode actif, pour un transistor de surface A:

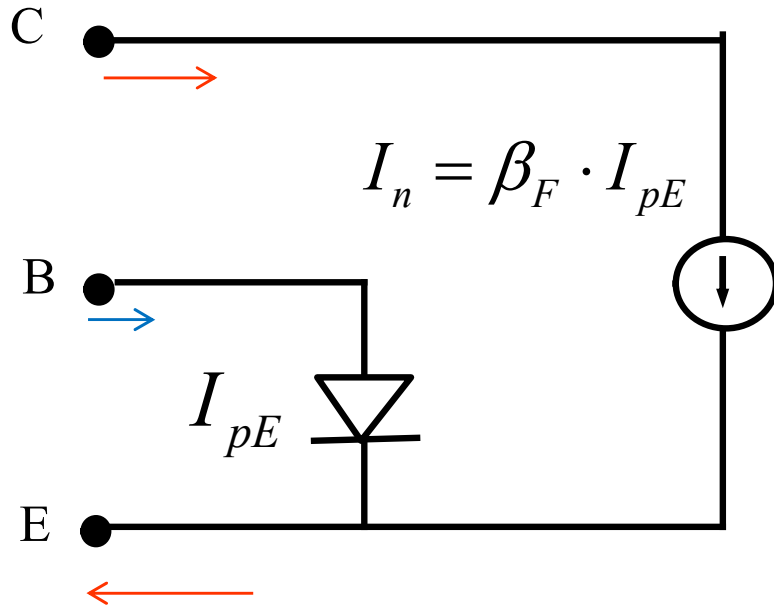
$$I_B = I_{pE} = I_{pE0} \cdot (e^{qV_{BE}/kT} - 1) \quad \text{avec} \quad I_{pE0} = A \frac{qD_{pE}}{W_E} \frac{n_i^2}{N_{DE}}$$

$$I_C = I_n = \beta_F \cdot I_{pE} \quad \text{avec} \quad \beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \cdot \frac{W_E}{W} \cdot \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

$$I_E = I_B + I_C = (1 + \beta_F) \cdot I_{pE}$$

Remarque: Le courant I_{pC} est négligeable en mode actif

Modèle de Ebers-Moll en mode actif (npn)

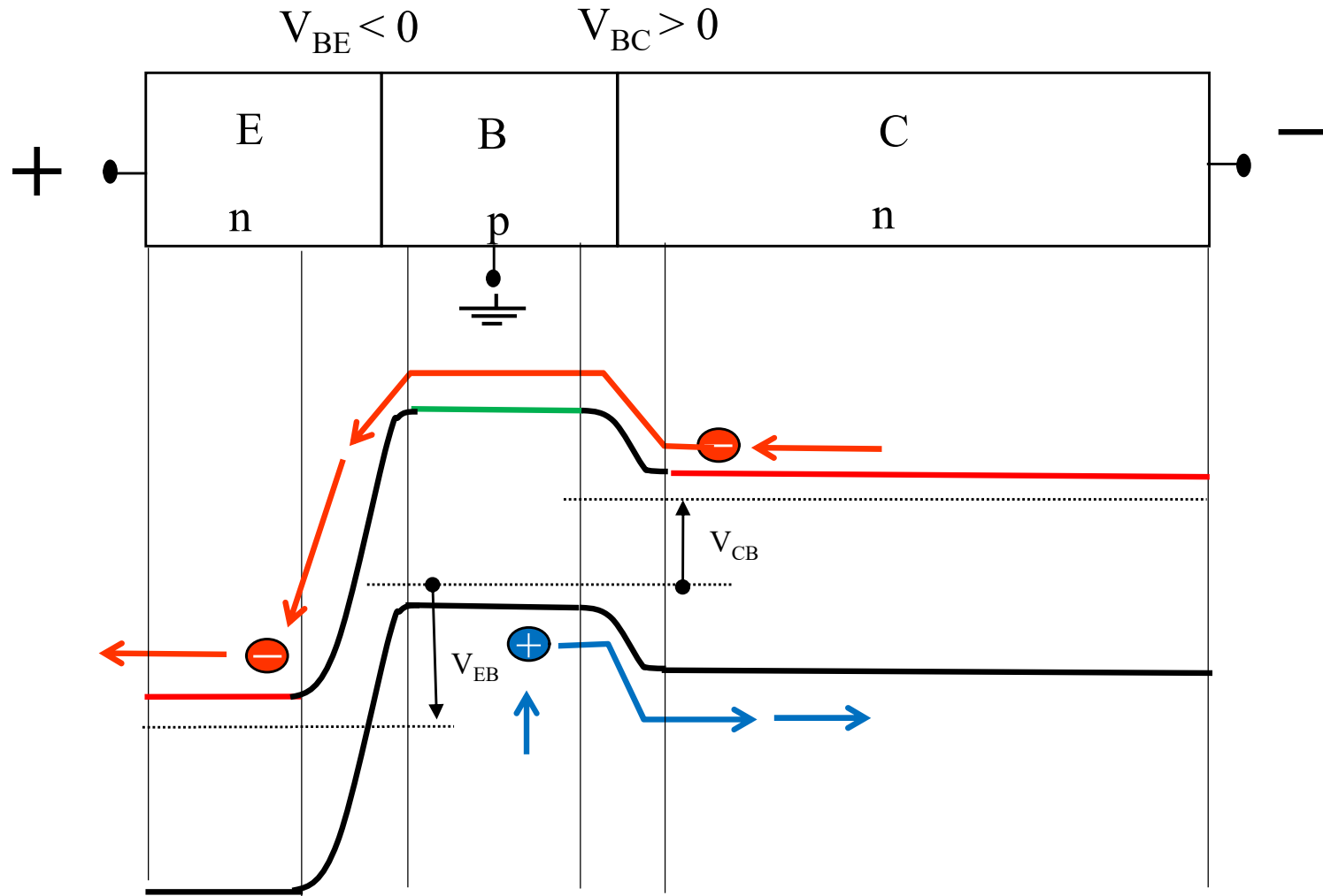


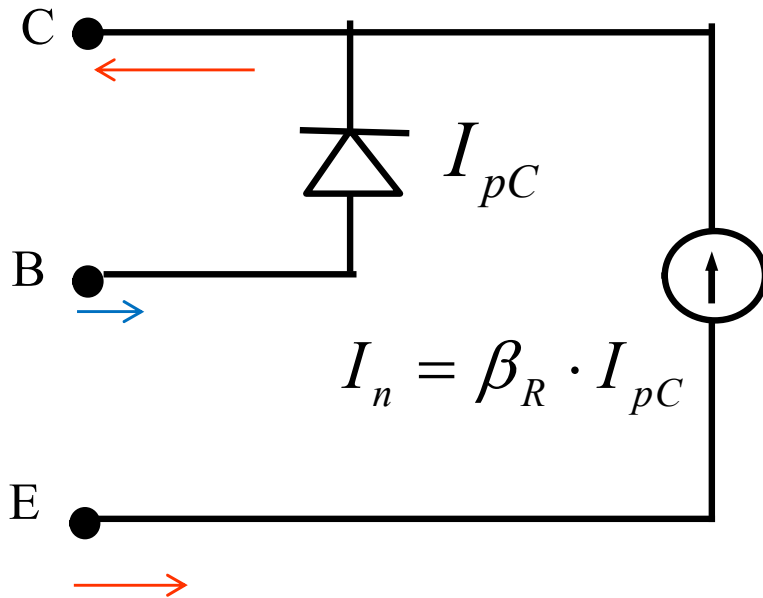
$$I_{pE} = I_{pE0} \cdot (e^{qV_{BE}/kT} - 1)$$

$$I_{pE0} = A \frac{qD_{pE}}{W_E} \frac{n_i^2}{N_{DE}}$$

$$\beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \cdot \frac{W_E}{W} \cdot \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

Transistor npn en mode reverse





$$I_{pC} = I_{pC0} \cdot (e^{qV_{BC}/kT} - 1)$$

$$I_{pC0} = A \frac{qD_{pC}}{L_C} \frac{n_i^2}{N_{DC}}$$

$$\beta_R = \frac{D_{nB}}{D_{pC}} \cdot \frac{L_C}{W} \cdot \frac{N_{DC}}{N_{AB}}$$

Modes d'opération: npn

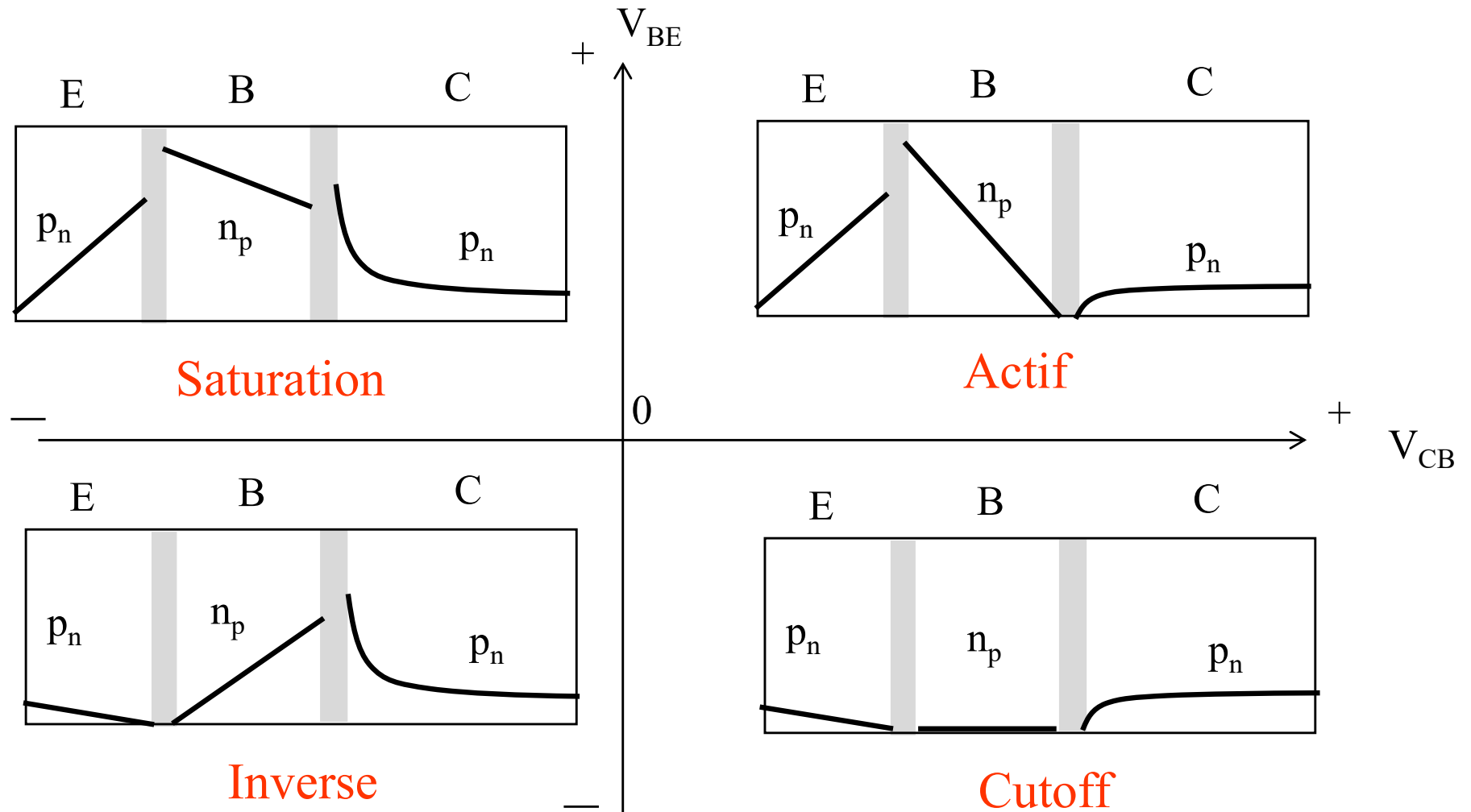
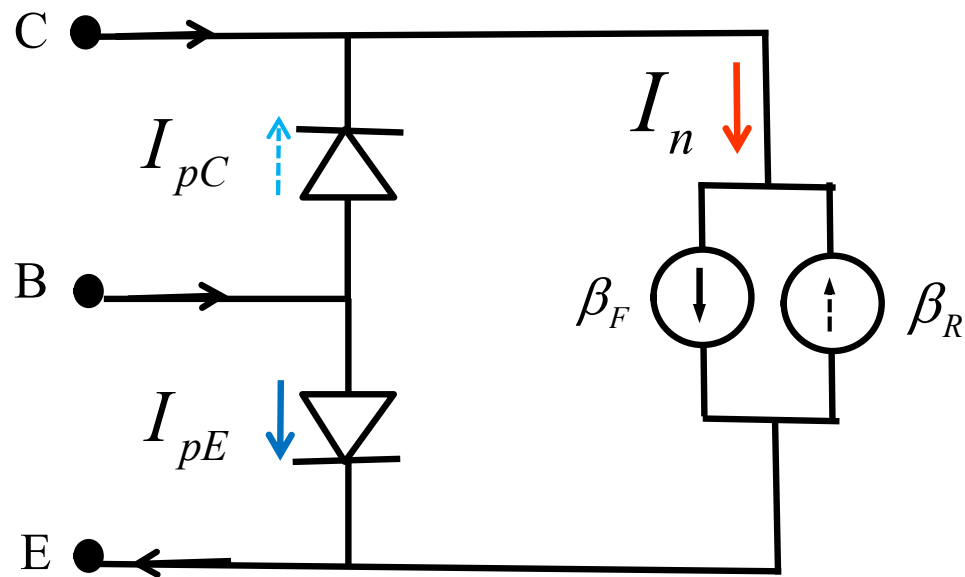
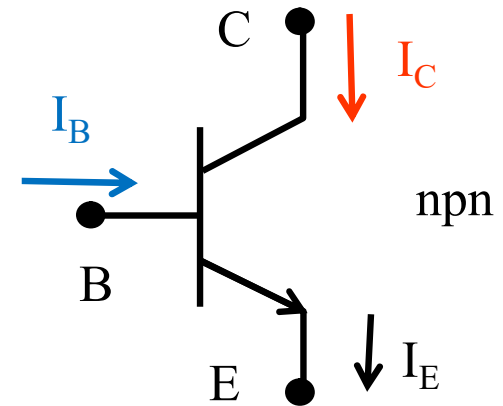
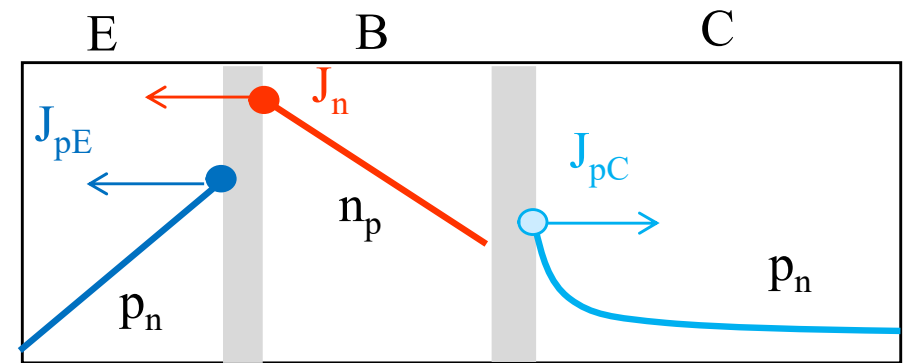




Schéma électronique



Densité de minoritaires





$$I_B = I_{pE} + I_{pC}$$

$$I_C = I_n - I_{pC}$$

$$I_n = \beta_F I_{pE} - \beta_R I_{pC}$$

$$I_E = I_{pE} + I_n = I_B + I_C$$

Avec:

$$I_{pE} = I_{pE0} \cdot (e^{qV_{BE}/kT} - 1)$$

$$I_{pE0} = A \frac{qD_{pE}}{W_E} \frac{n_i^2}{N_{DE}}$$

$$\beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \cdot \frac{W_E}{W} \cdot \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

$$I_{pC} = I_{pC0} \cdot (e^{qV_{BC}/kT} - 1)$$

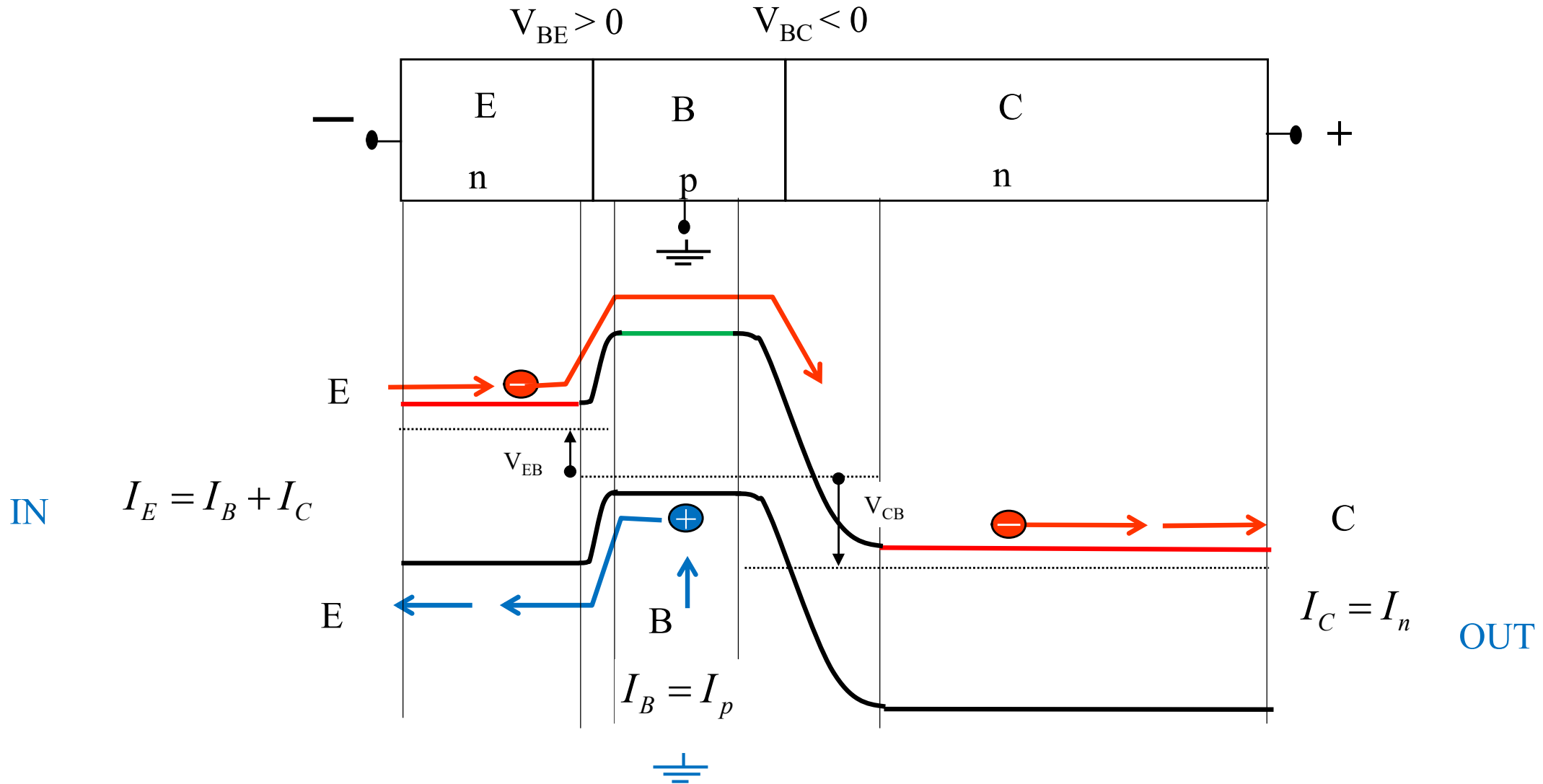
$$I_{pC0} = A \frac{qD_{pC}}{L_C} \frac{n_i^2}{N_{DC}}$$

$$\beta_R = \frac{D_{nB}}{D_{pC}} \cdot \frac{L_C}{W} \cdot \frac{N_{DC}}{N_{AB}}$$

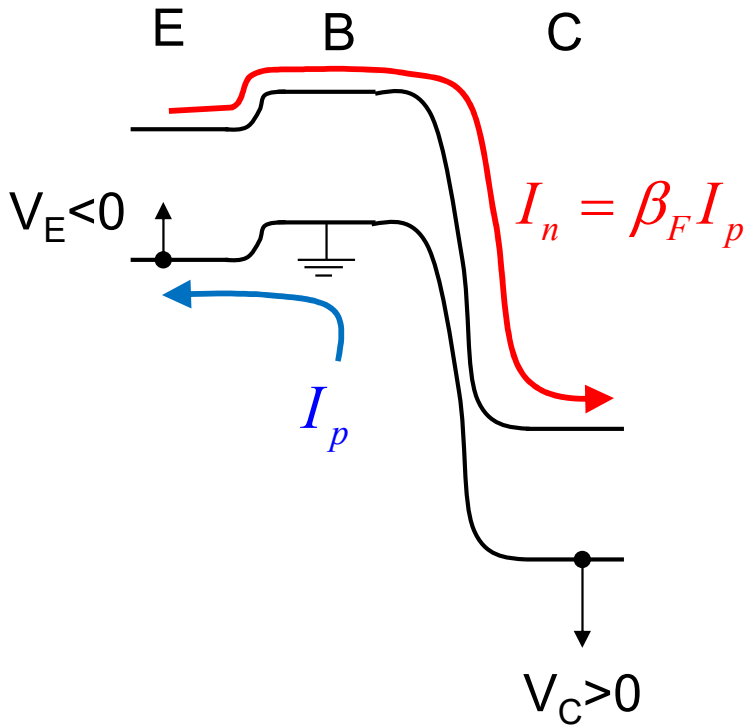
BJT

Base commune

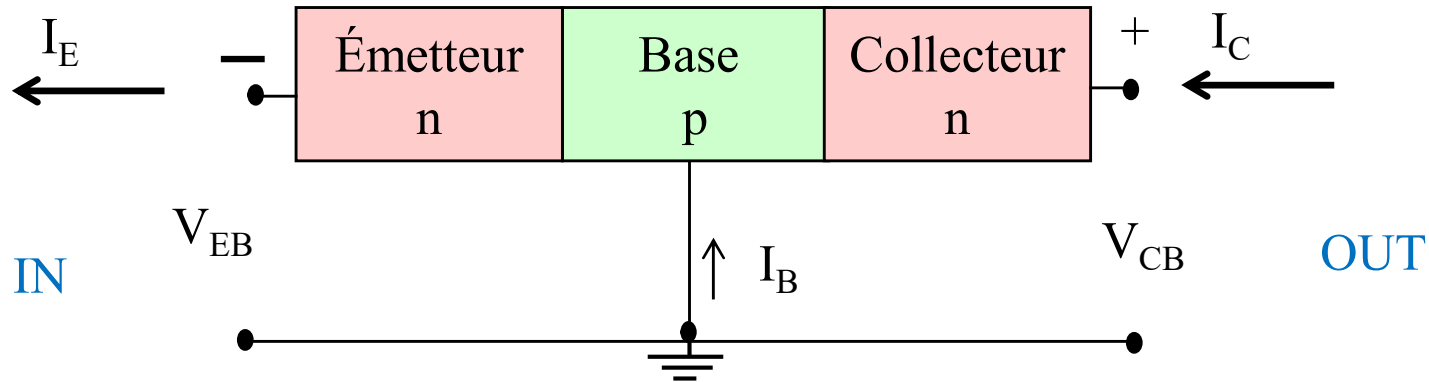
Transistor npn **base commune**



Esquisse des courants principaux (en base commune)



Configuration en base commune



Gain en courant en mode base commune « Common base current gain »:

$$\alpha_F = \frac{I_C}{I_E} \cong \frac{\beta_F}{\beta_F + 1}$$

Typique: $\alpha_F = 0.99$

Caractéristique: $I_{out}(V_{out}) = I_C(V_{CB})$ contrôlé par le courant $I_{in} = I_E$

Caractéristiques en base commune: théorie

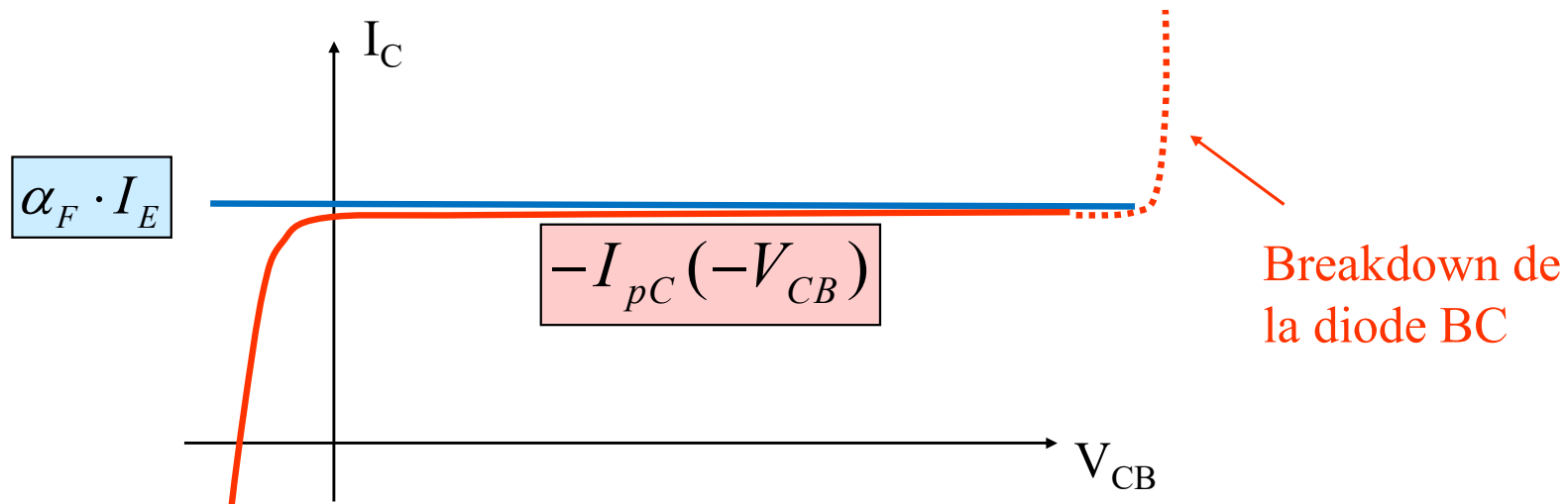
À partir des équations du modèle Ebers-Moll (npn):

$$I_C(V_{CB}, I_E) = \alpha_F \cdot I_E - \left(\frac{1 + \beta_F + \beta_R}{1 + \beta_F} \right) \cdot I_{pC}(-V_{CB})$$

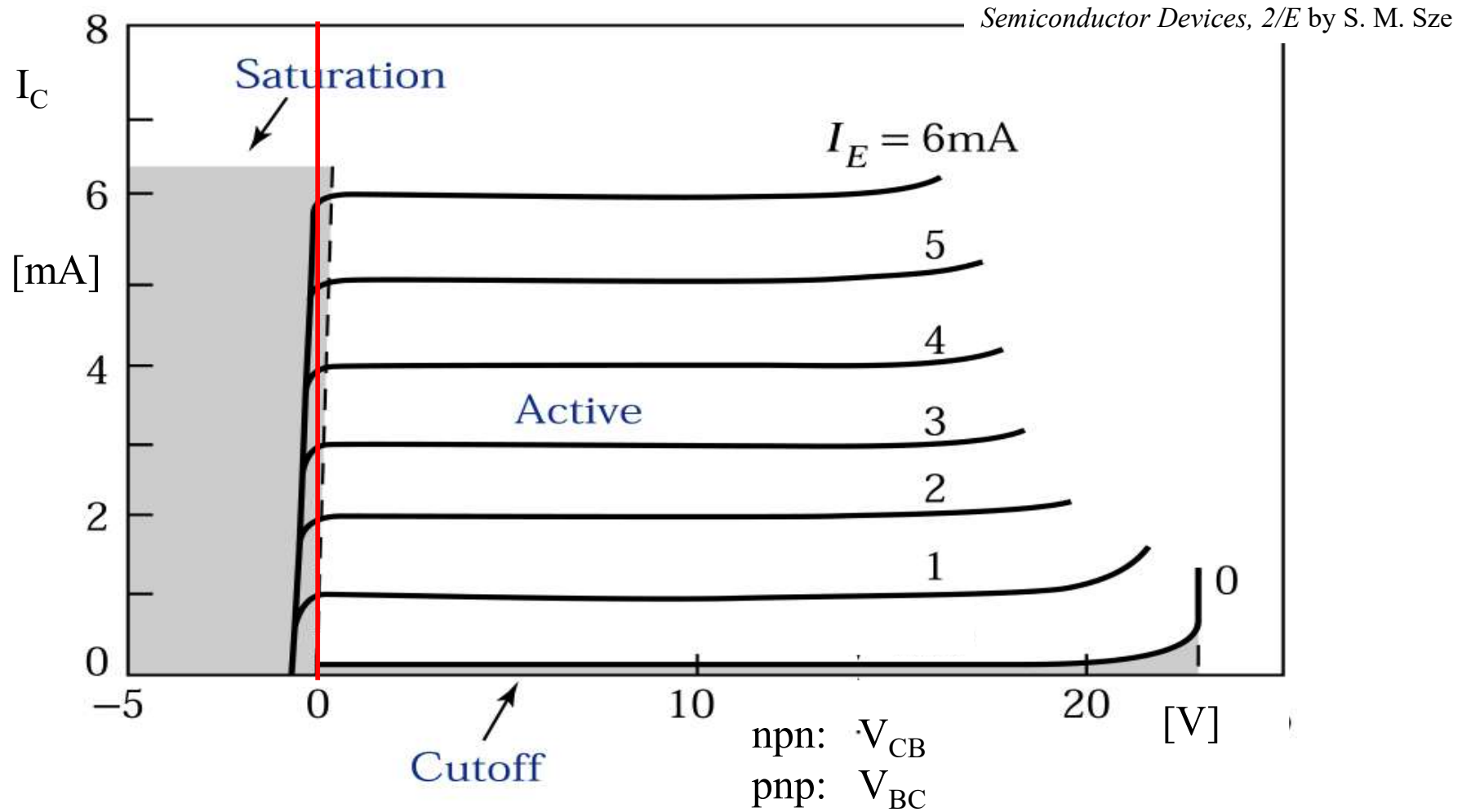
~ 1

~ 1

Courant de trous dans la diode BC
→ Caractéristique de diode !!



Caractéristiques en base commune: exemple

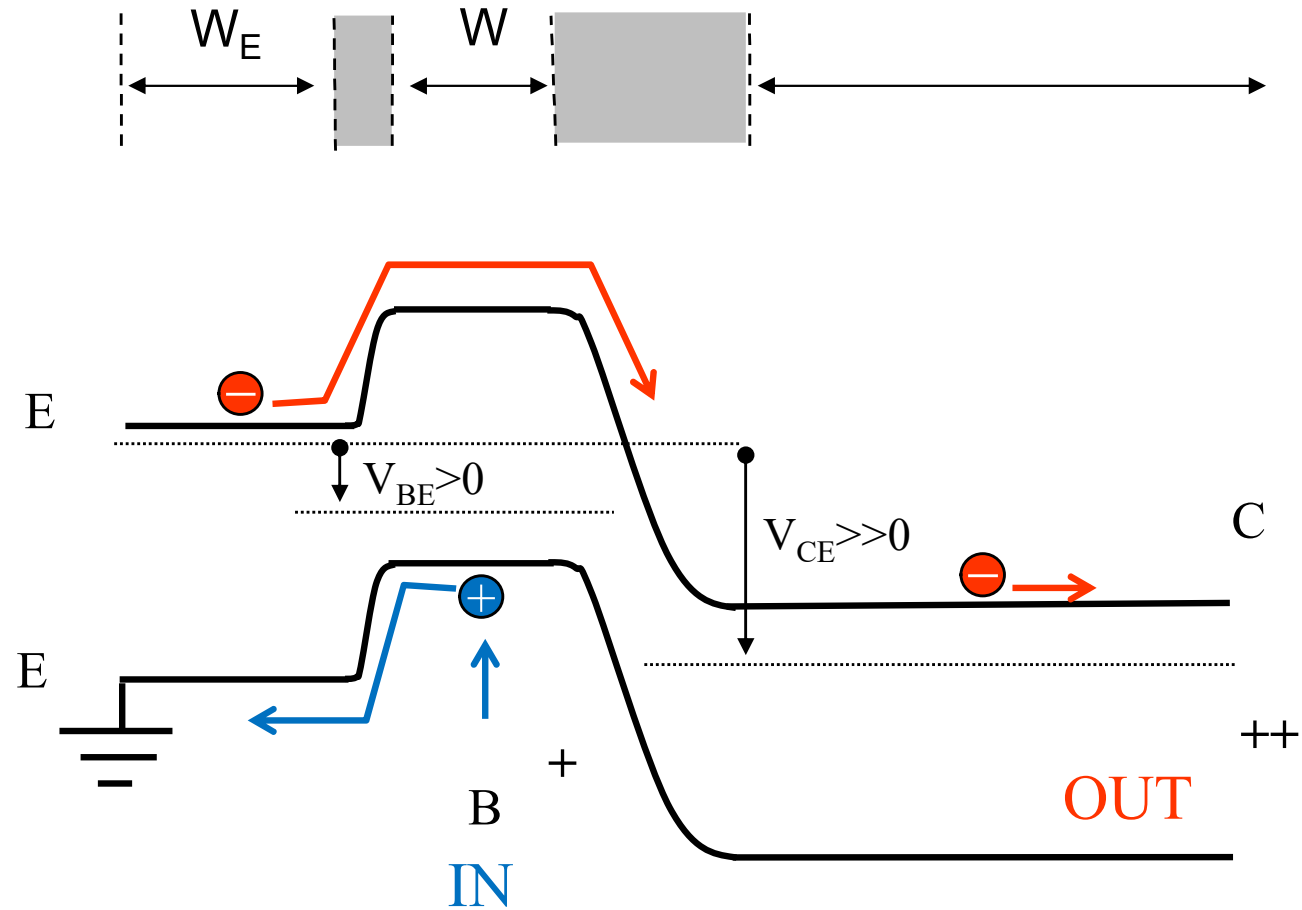


BJT

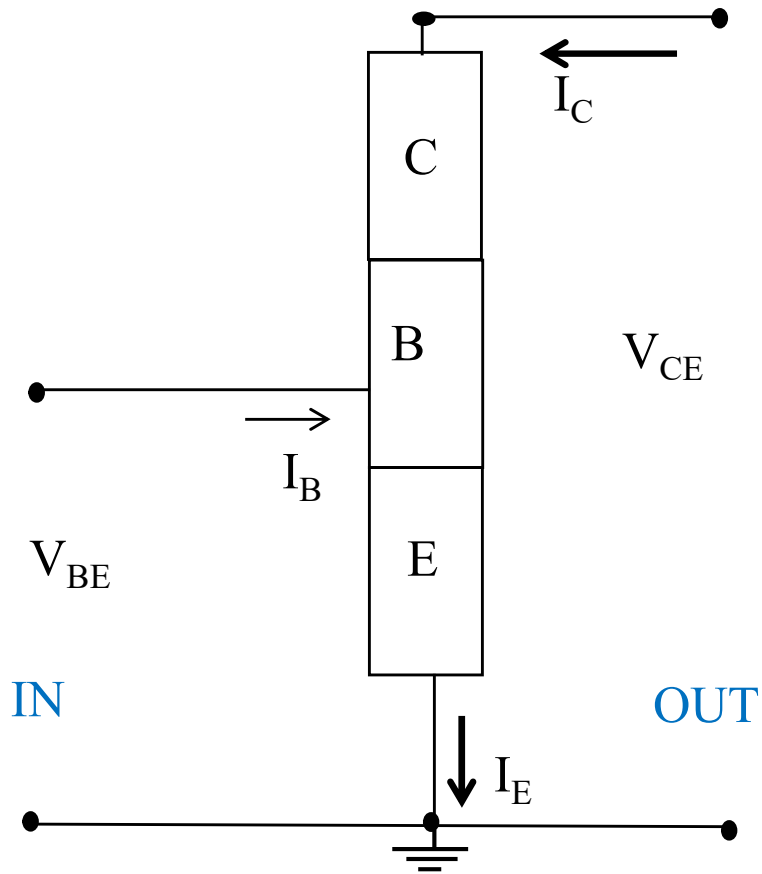
Emetteur commun

Émetteur commun: schéma de bandes

Transistor npn



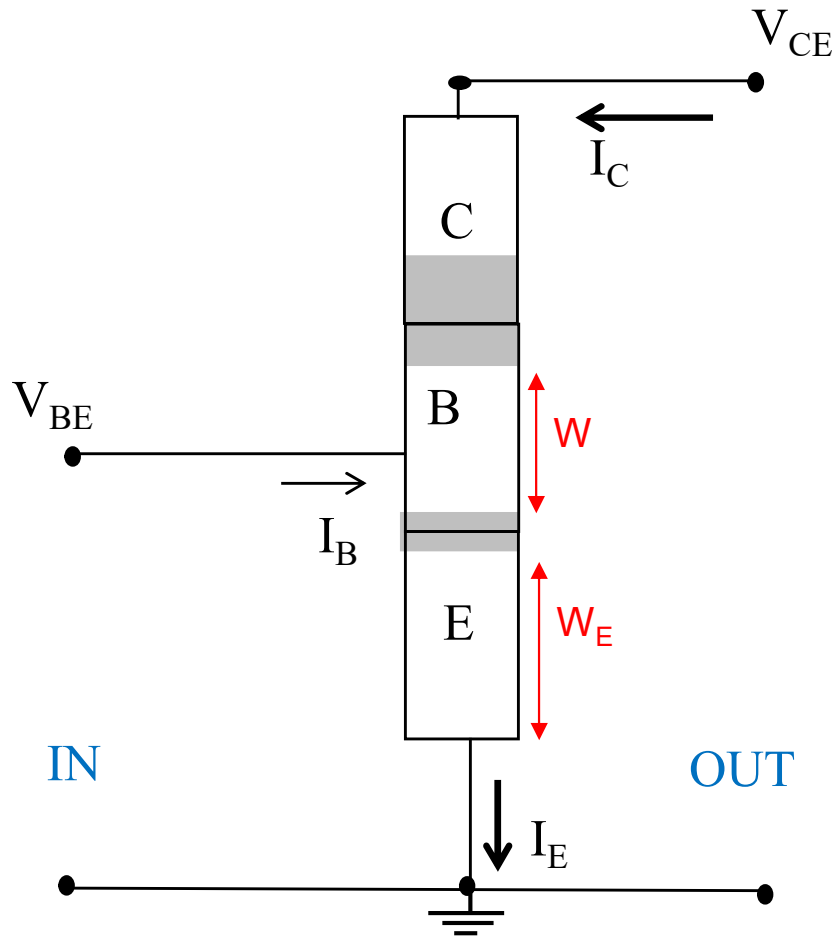
Configuration en émetteur commun



Gain en courant en mode émetteur commun
« Common-emitter current gain »:

$$\frac{I_C}{I_B} \equiv \beta_F$$

Configuration en émetteur commun



Gain en courant en mode émetteur commun
« Common-emitter current gain »:

$$\frac{I_C}{I_B} = \beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \cdot \frac{W_E}{W} \cdot \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

Optimisation ($\beta_F \rightarrow \infty$) :

- base courte $W \rightarrow 0$
- émetteur fortement dopé N_{DE} comparé à la base N_{AB}

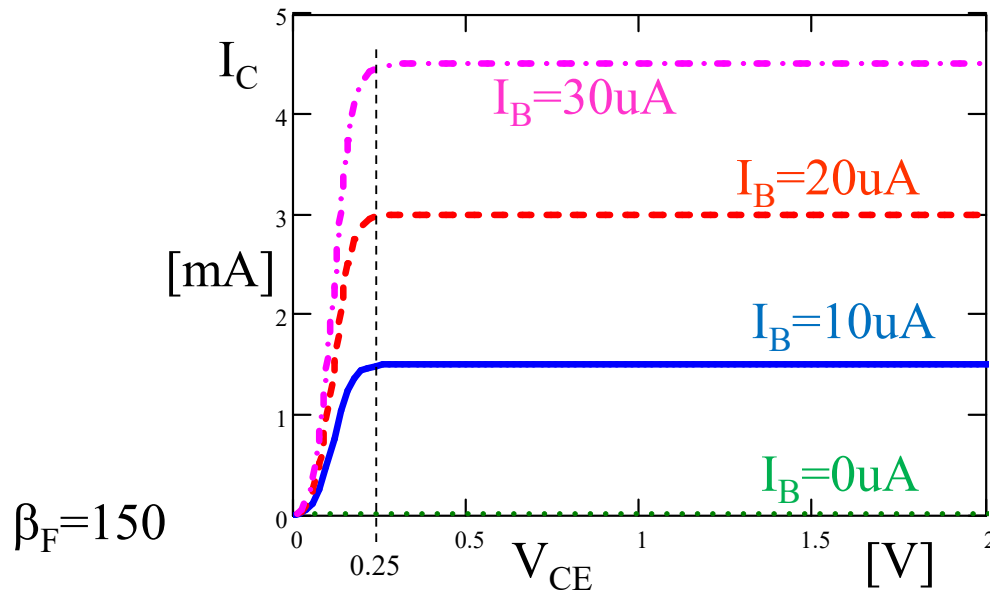
Typique: $\beta_F = 100 - 300$

Caractéristiques en émetteur commun: théorie

$$I_c(V_{CE}, I_B) = \beta_F I_B - \underbrace{\left[(1 + \beta_F + \beta_R) I_{pC0} \left(\frac{I_B + I_{pE0} + I_{pC0}}{I_{pE0} e^{qV_{CE}/kT} + I_{pC0}} - 1 \right) \right]}_{\text{Négligeable en mode actif}}$$

En mode actif: indépendant de la tension de sortie V_{CE}

Négligeable en mode actif



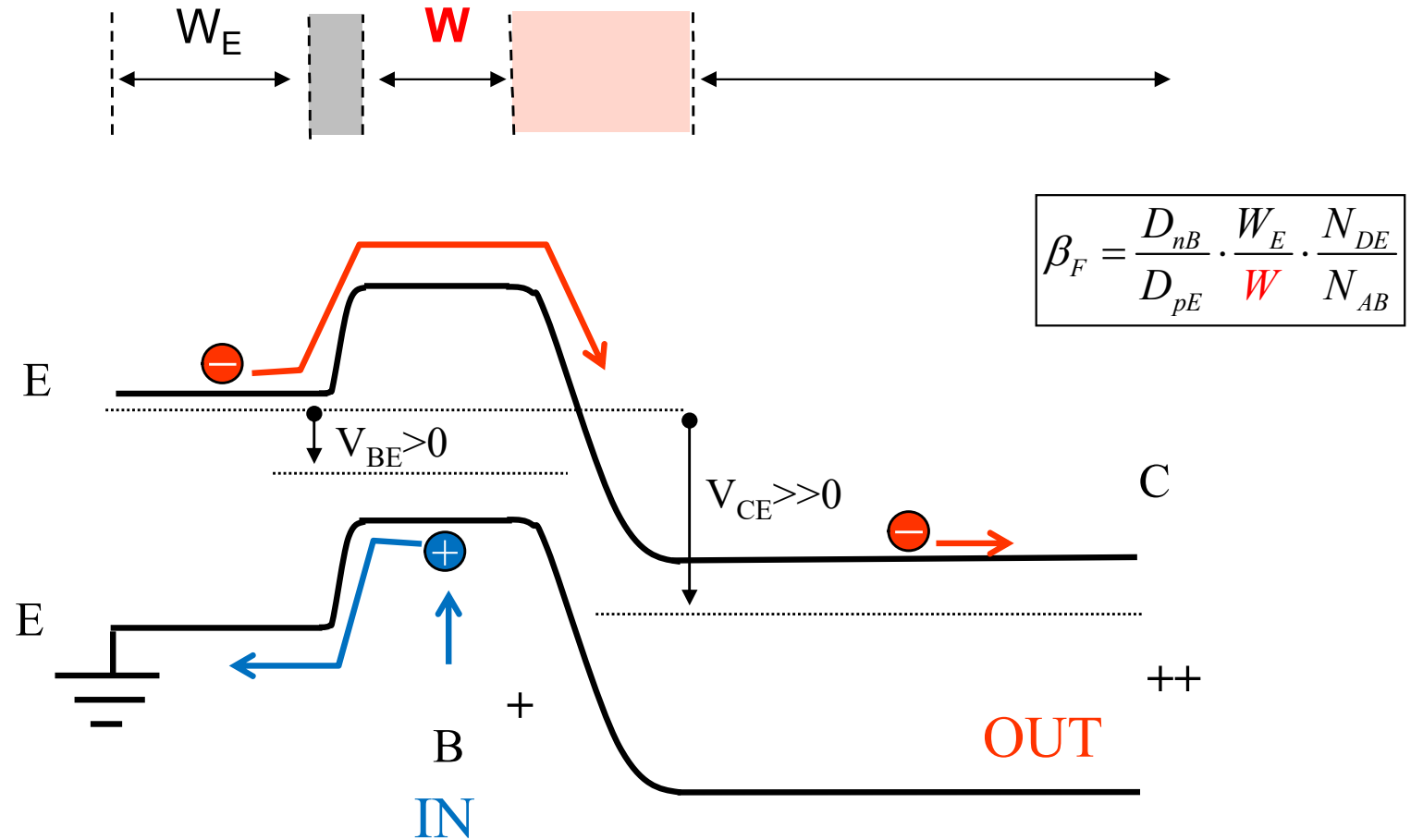
À partir des équations du modèle Ebers-Moll (npn)

BJT

Effet Early

Émetteur commun: schéma de bandes

Transistor npn

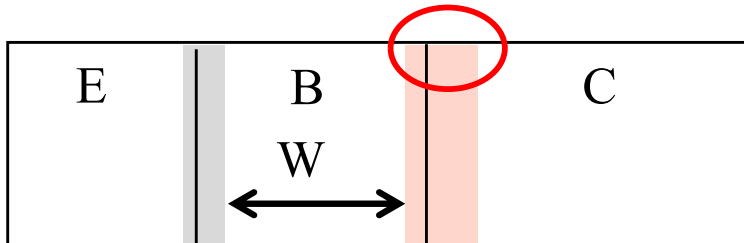


En mode actif:

$$\frac{I_C}{I_B} = \beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \cdot \frac{W_E}{W} \cdot \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

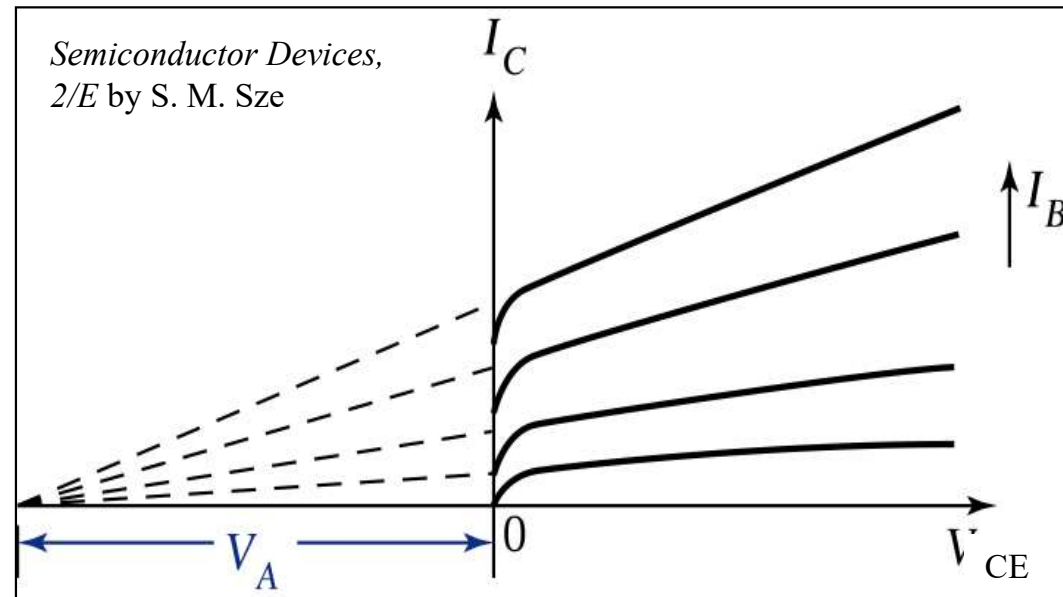
Variation de la largeur W de la base:

$$V_{CE} \uparrow \Rightarrow W \downarrow \Rightarrow \beta_F \uparrow$$

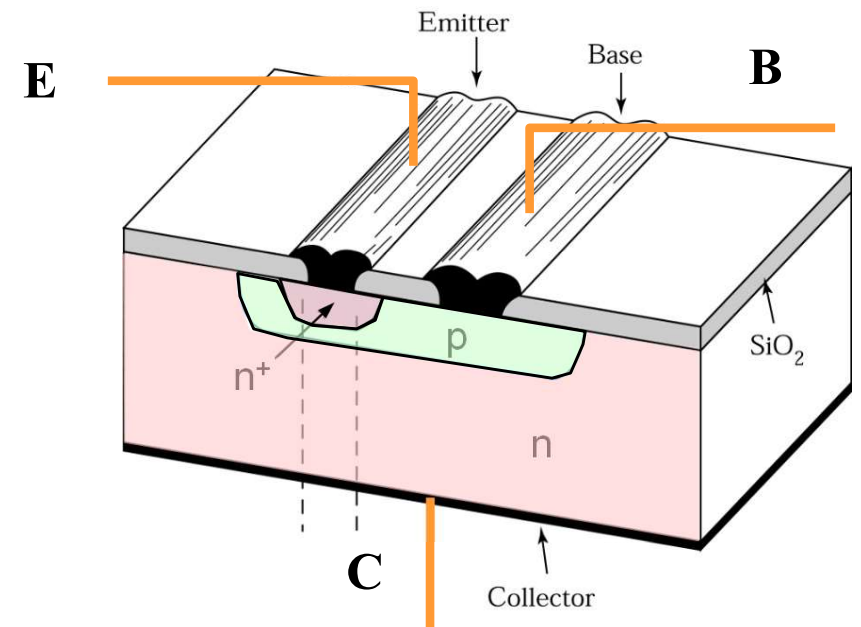
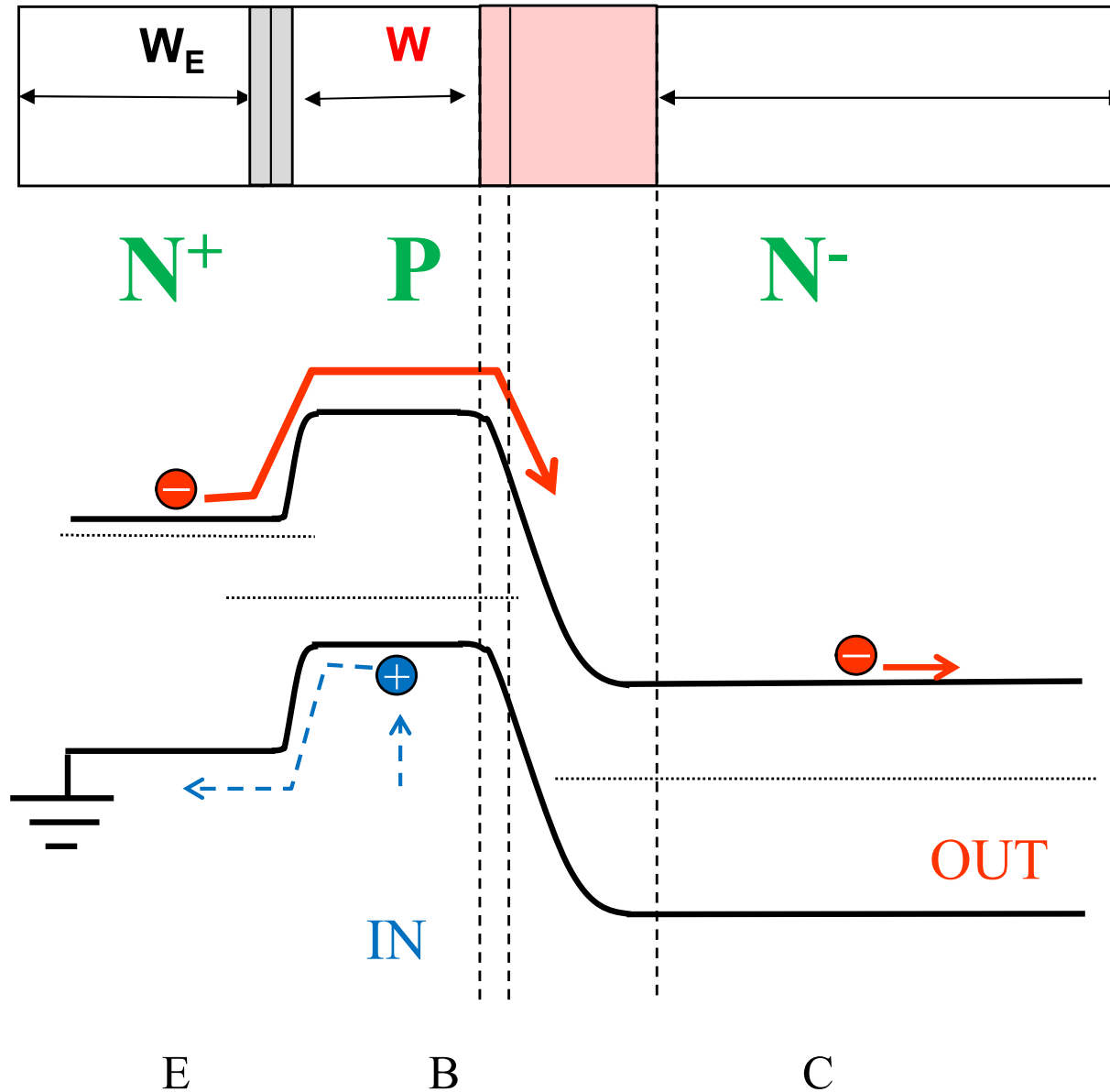


Optimisation:

- Effet moins fort si le dopage de la base est élevé
- Compromis avec une valeur élevée de β !!!



Homo-structure optimale: N⁺PN⁻



BJT

Conductances et Modèle petits signaux

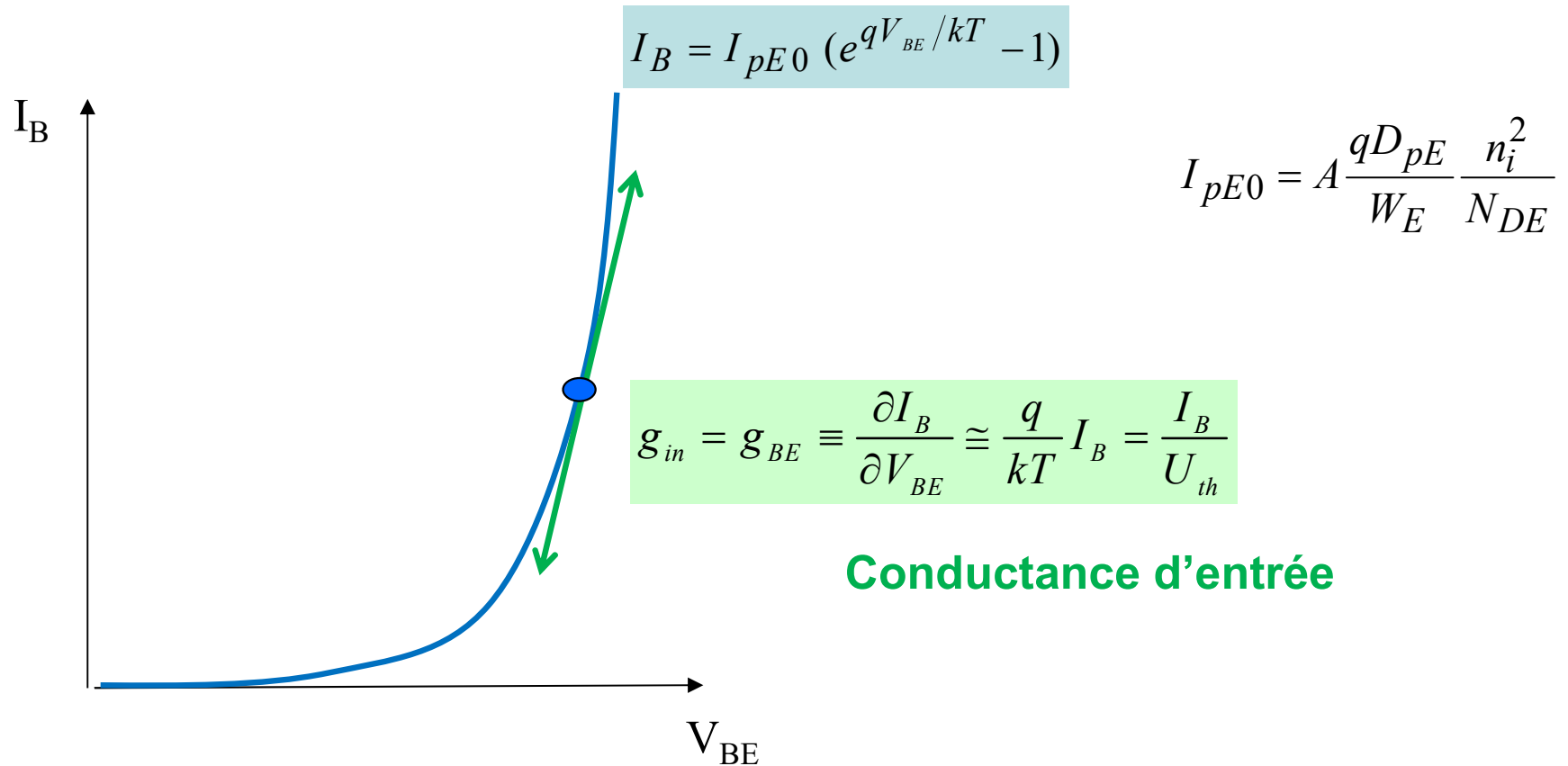
Conductance $g \equiv \frac{\partial \text{courant}}{\partial \text{tension}} = \frac{\partial I}{\partial V}$

Conductance d'entrée: $g_{in} \equiv \frac{\partial \text{courant d'entrée}}{\partial \text{tension d'entrée}} = \frac{\partial I_{in}}{\partial V_{in}}$

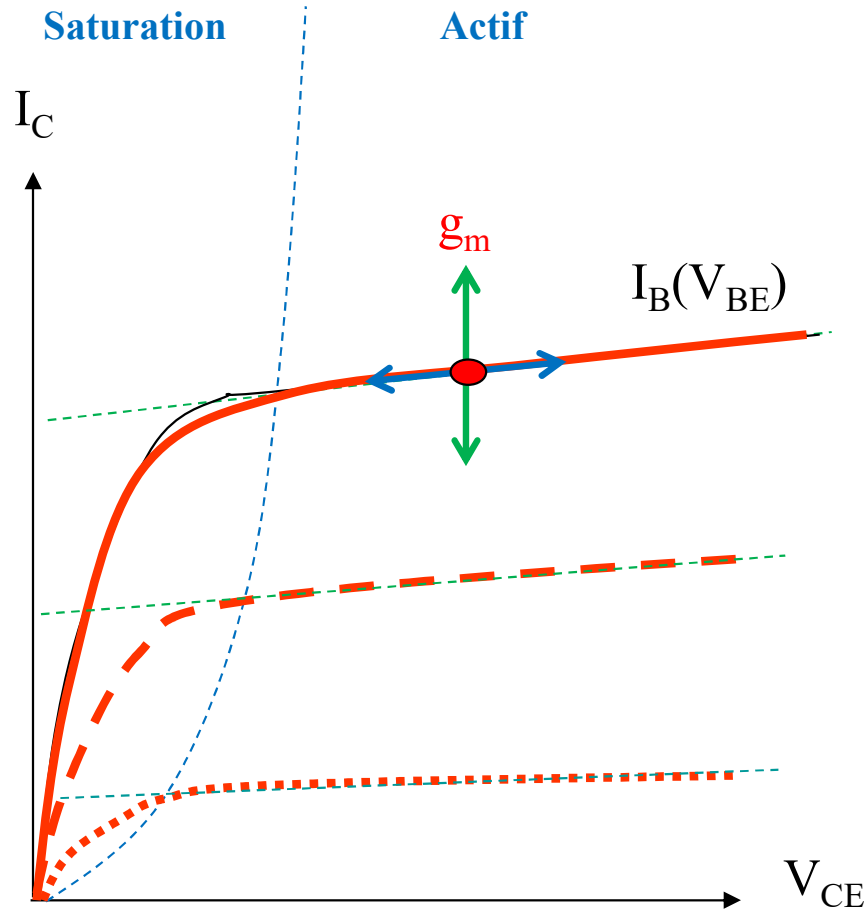
Conductance de sortie: $g_{out} \equiv \frac{\partial \text{courant de sortie}}{\partial \text{tension de sortie}} = \frac{\partial I_{out}}{\partial V_{out}}$

Trans-conductance: $g_m \equiv \frac{\partial \text{courant de sortie}}{\partial \text{tension d'entrée}} = \frac{\partial I_{out}}{\partial V_{in}} = \frac{\partial I_{out}}{\partial I_{in}} \cdot \frac{\partial I_{in}}{\partial V_{in}} = \beta \cdot g_{in}$

Résumé: BJT actif – caractéristique d'entrée en émetteur commun



Résumé: BJT actif – caractéristique de sortie en émetteur commun



$$I_C = \beta_F I_B \cdot (1 + \lambda V_{CE})$$

$$\beta_F = \frac{D_{nB}}{D_{pE}} \frac{W_E}{W} \frac{N_{DE}}{N_{AB}}$$

$$\lambda = \frac{1}{|V_A|}$$

Transconductance

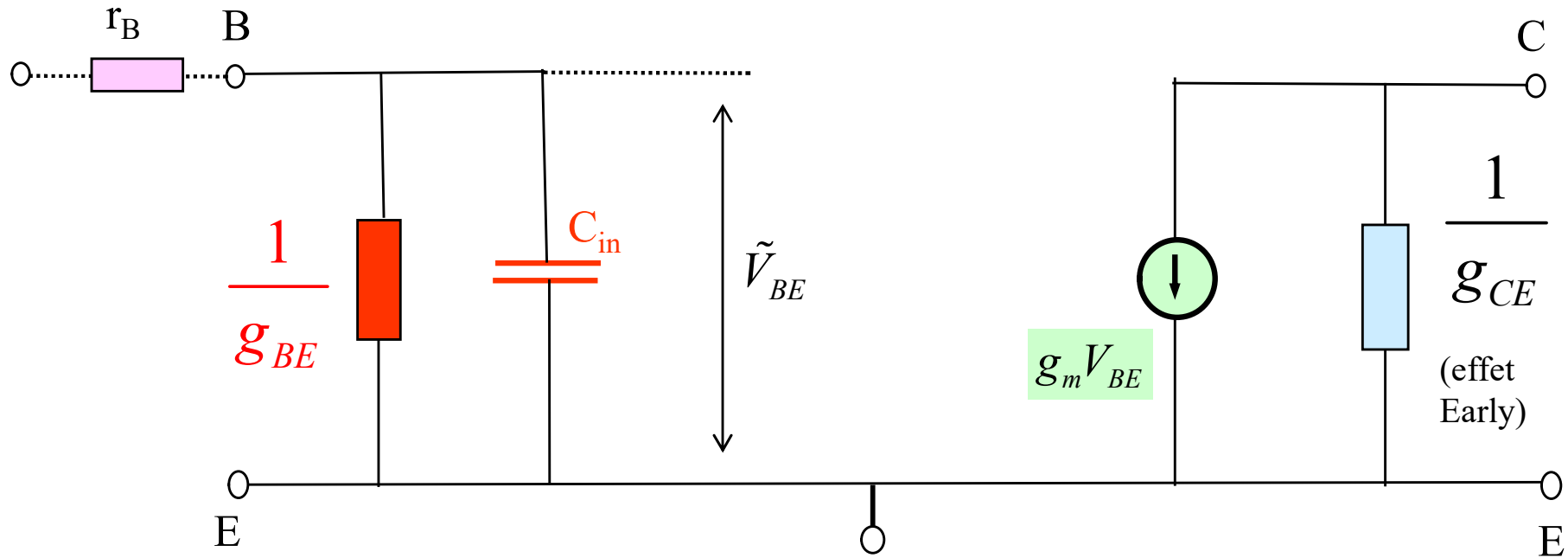
$$g_m = \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} = \frac{q}{kT} I_C = \beta_F \cdot g_{BE}$$

$$g_{CE} = \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} = \lambda \cdot I_C \approx \frac{I_C}{|V_A|}$$

Conductance de sortie

Circuit équivalent simplifié en émetteur commun

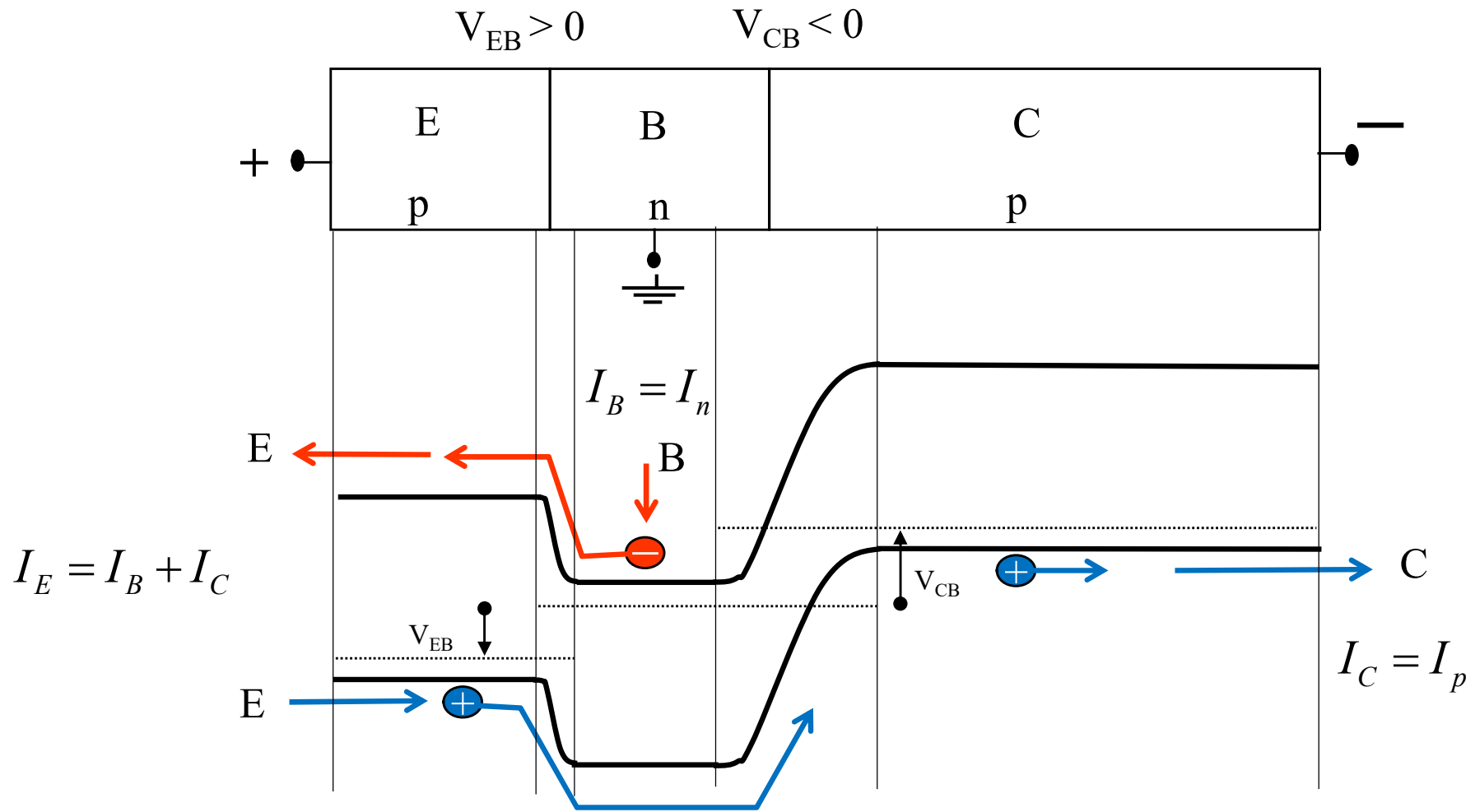
Modèle petits signaux en émetteur commun, mode actif



$$g_{BE} = \frac{q}{kT} I_B$$

$$g_m = \beta_F \cdot g_{BE} = \frac{q}{kT} I_C$$

$$g_{CE} = \lambda \cdot I_C \cong \frac{I_C}{|V_A|}$$



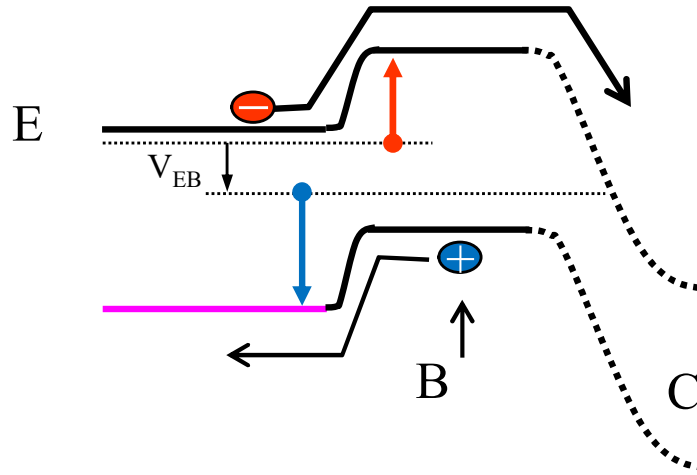
HBT

Hétéro Bipolar Transistor



Homo-jonction

nnp

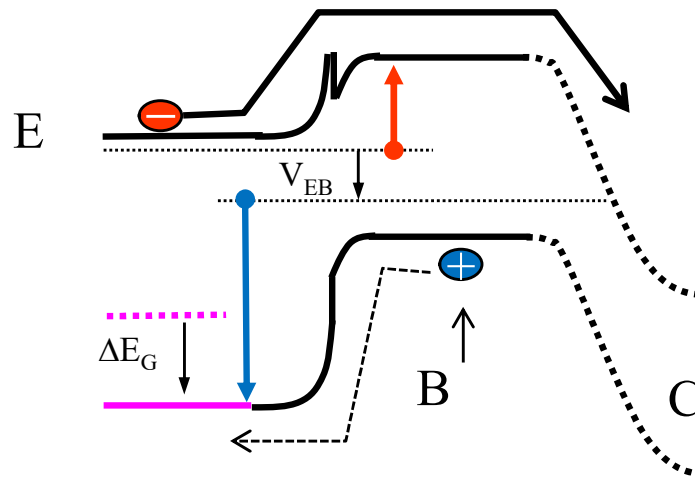


La barrière pour les électrons est plus petite que pour les trous à cause du dopage élevé dans l'émetteur.

→ β_F élevé mais pas optimal.

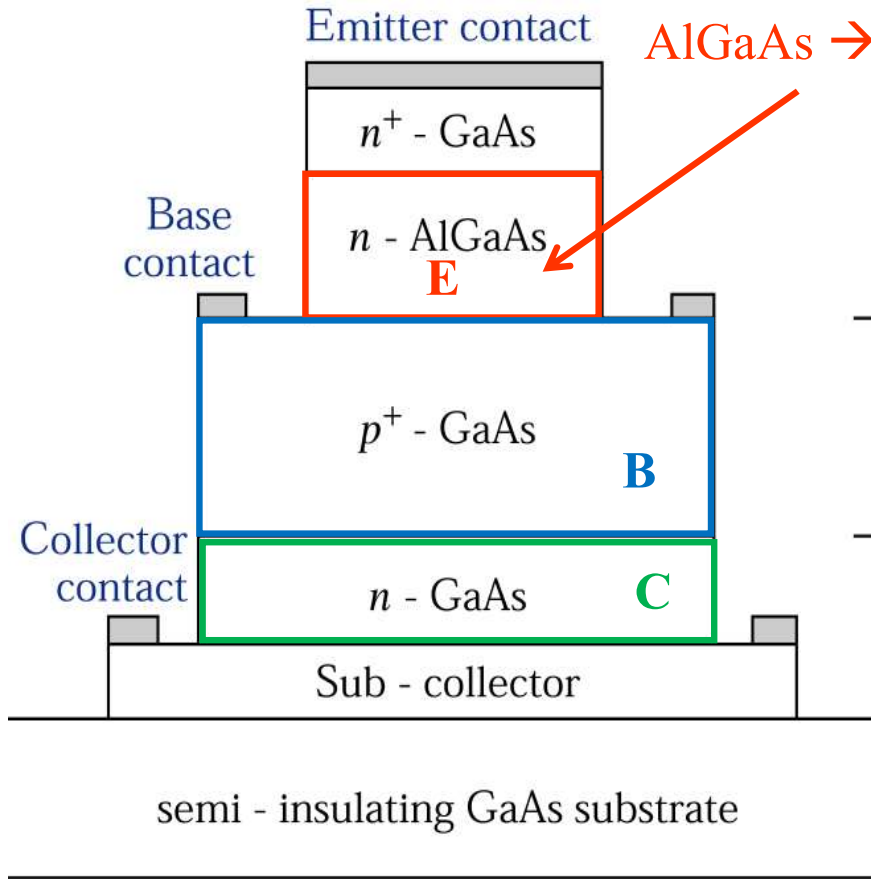
Hétéro-jonction

nnp

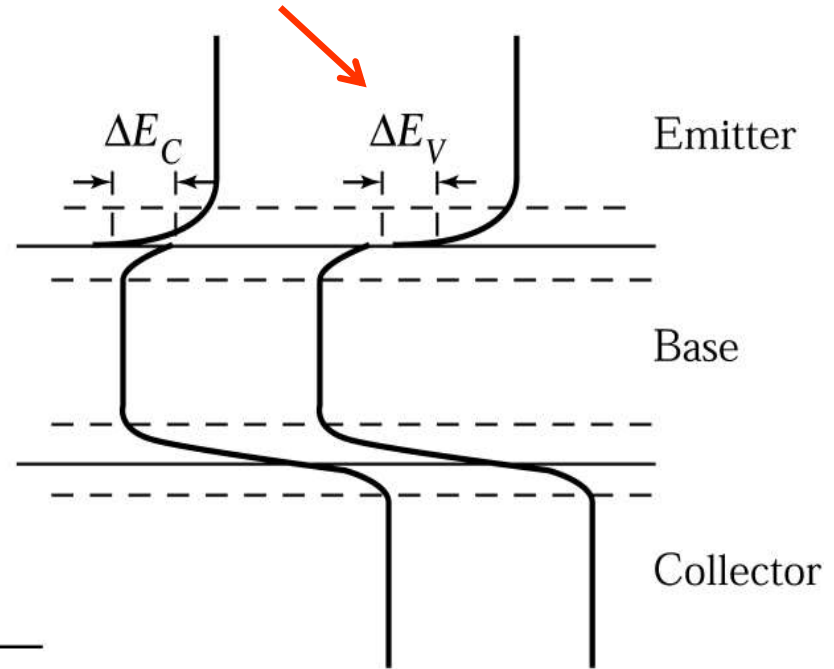


La barrière pour les trous est augmentée par l'agrandissement du gap ΔE_g dans l'émetteur.

→ β_F optimal et très élevé.



(a)

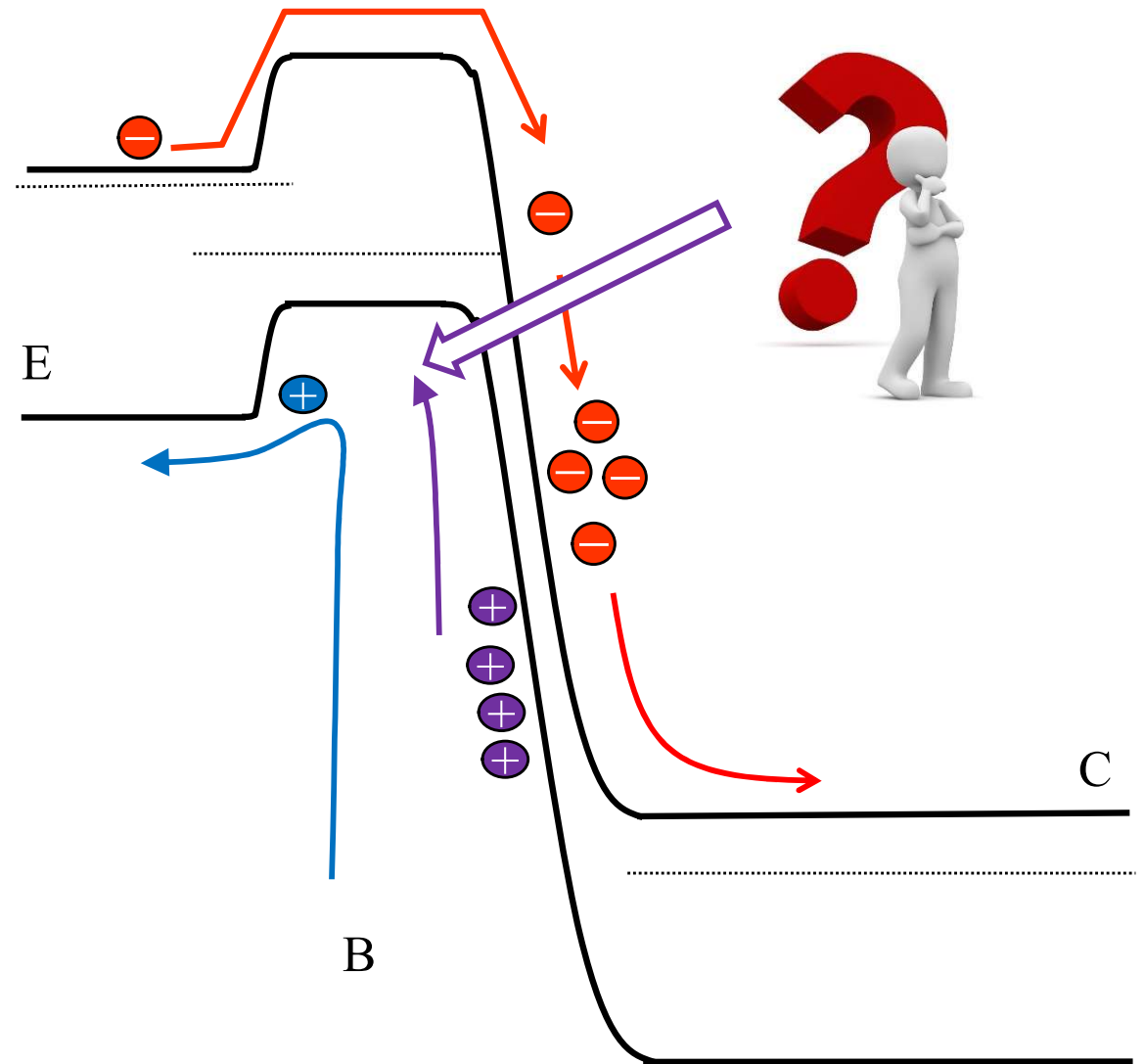
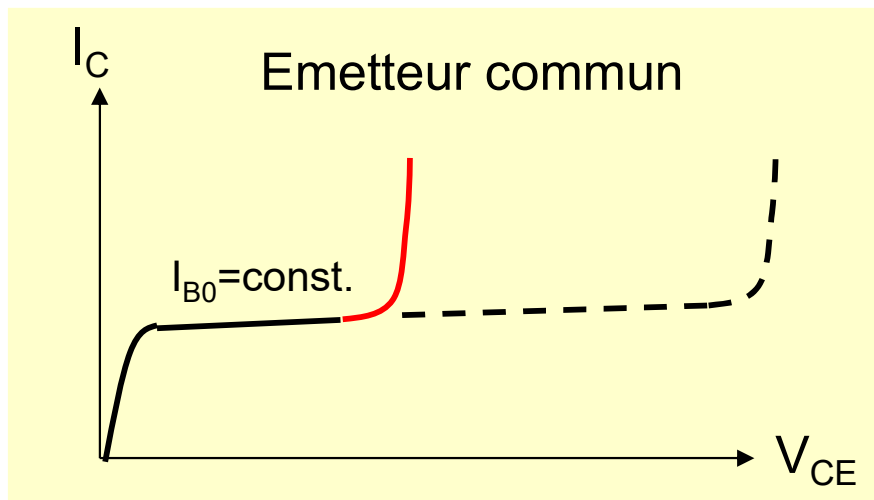
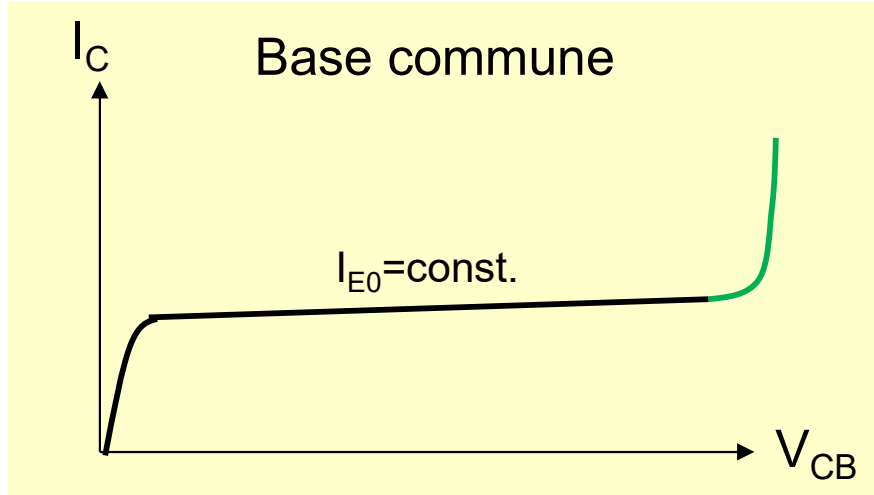


(b)

Semiconductor Devices,
2/E by S. M. Sze

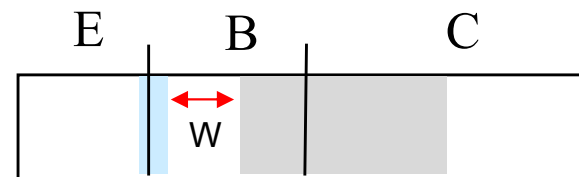
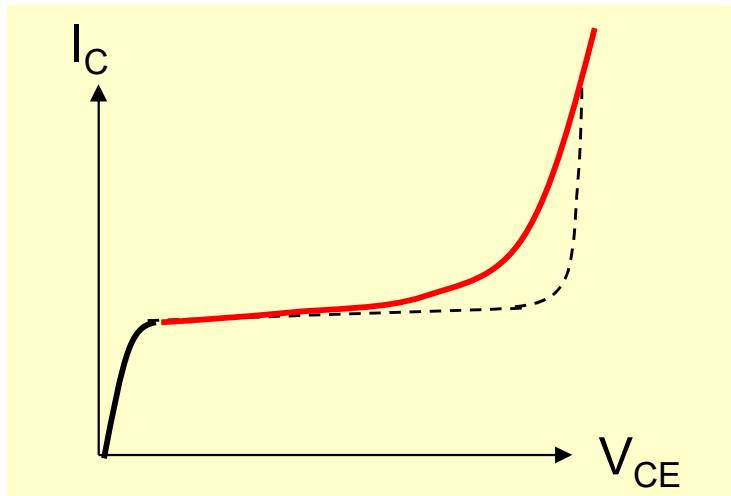
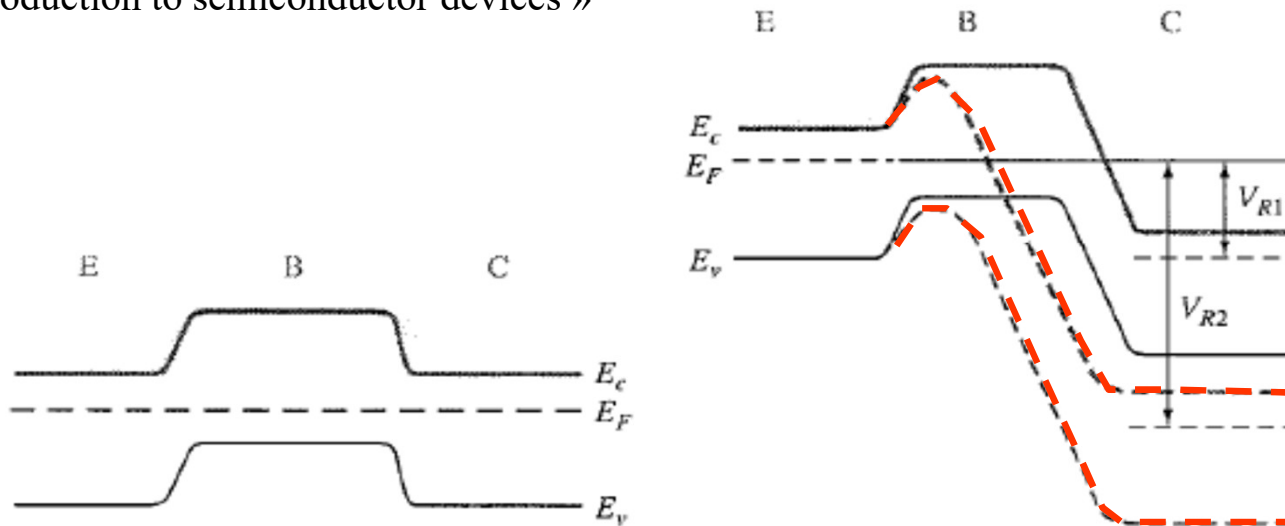
BJT

Parasitic effects

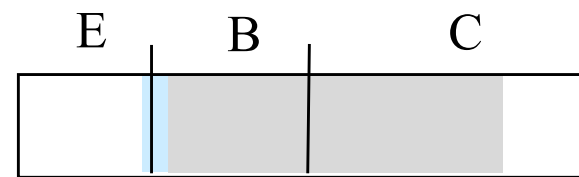




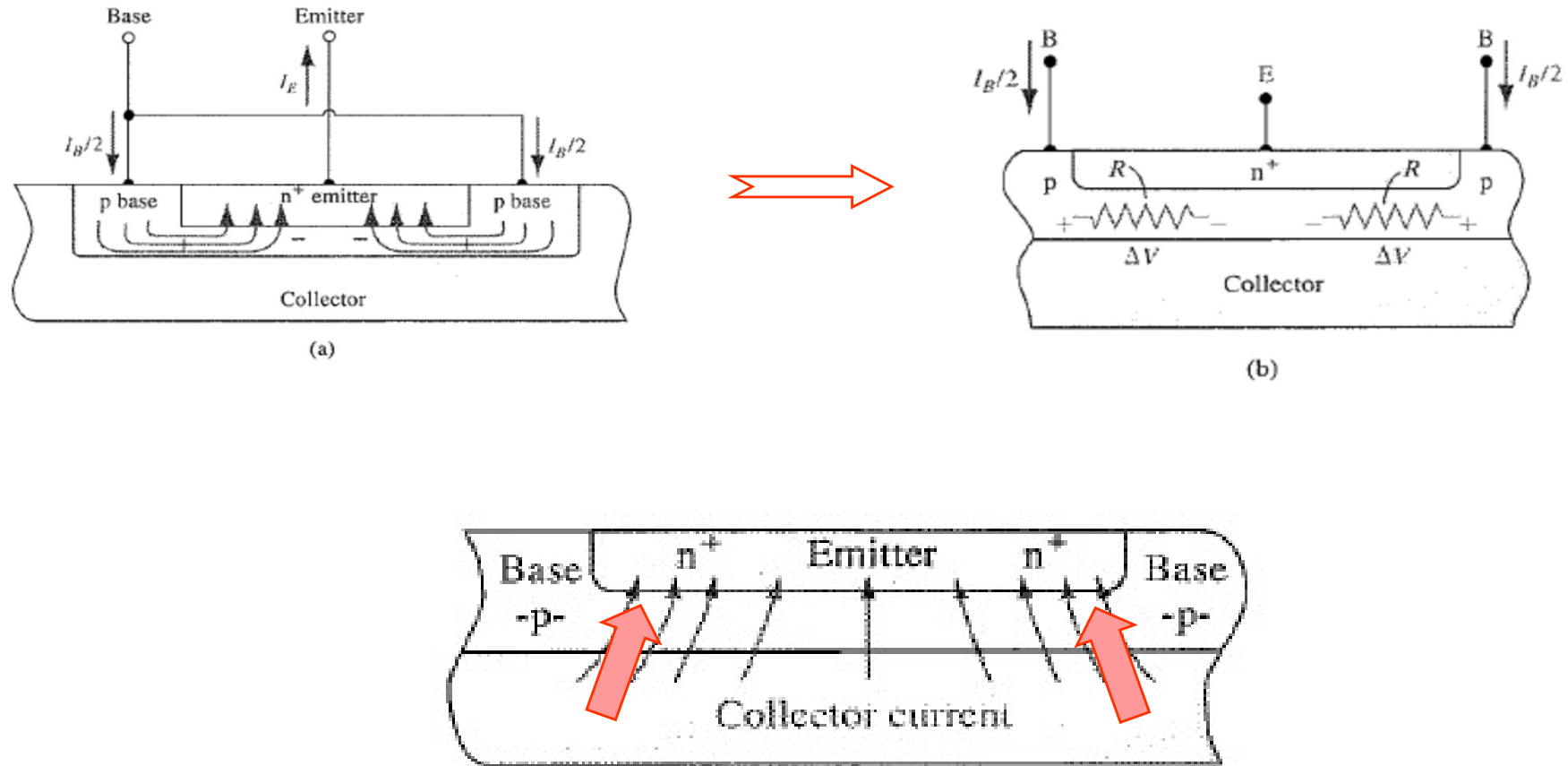
Neamen, « an introduction to semiconductor devices »



Normal

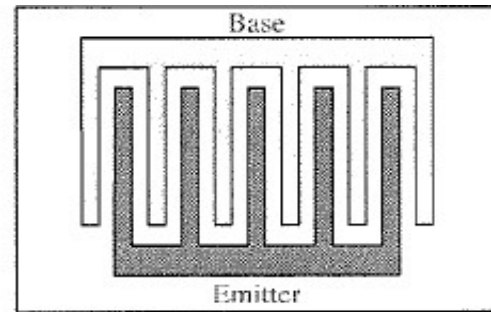


Punch-through

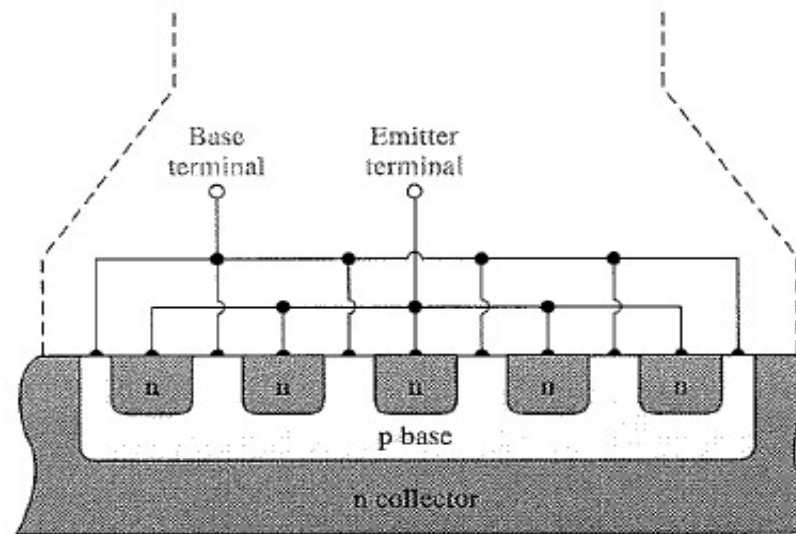


Neamen, « an introduction to semiconductor devices »

Transistor BJT de puissance, structure en peigne



(a)



(b)

Neamen,
« an introduction to
semiconductor devices »

Exercice E7.1-2: question de réflexion



Répondez aux questions de réflexion ci-dessous :

Attention la première question utilise un pnp, la seconde un npn !

7.1b	<p>Esquissez le schéma de bandes d'un transistor bipolaire pnp. À partir de ce schéma, expliquez les concepts de gain en configurations « base commune » et « émetteur commun ». Comment optimiser le gain ? Quel est l'effet limitant et pourquoi ?</p>
7.5b	<p>Définissez la transconductance d'un transistor bipolaire en mode émetteur commun. Utilisez un transistor nnp comme amplificateur de tension. Comment fixer le point de travail ? Comment introduire le signal AC ? Quel est le gain ? (Esquissez si possible une explication graphique).</p>