

Chapitre 6

Transistor bipolaire

Principe

Fonctionnement en mode normal

Gains

Caractéristiques statiques

Fonctionnement en fréquence

Plan du cours

1/3 bases	1. Introduction <ul style="list-style-type: none">- Caractéristiques physiques des semiconducteurs- Quels Matériaux pour quel type d'applications 2. Propriétés électroniques des semiconducteurs <ul style="list-style-type: none">- Structure de bandes- Statistiques d'occupation des bandes- Propriétés de transport- Processus de recombinaison
1/3 transport	3. Jonctions et interfaces <ul style="list-style-type: none">- Jonctions métal/semi-conducteurs- Jonction p-n à l'équilibre, Jonction p-n hors-équilibre 4. Composants électroniques <ul style="list-style-type: none">- Transistors bipolaires- Transistors à effet de champ- Dispositifs quantiques- Nouveaux matériaux
1/3 optique	5. Composants optoélectroniques <ul style="list-style-type: none">- Détecteurs- Diodes électroluminescentes- Diodes lasers- Lasers à émission par la surface- Lasers à cascade quantique

Un peu d'histoire... et de futur

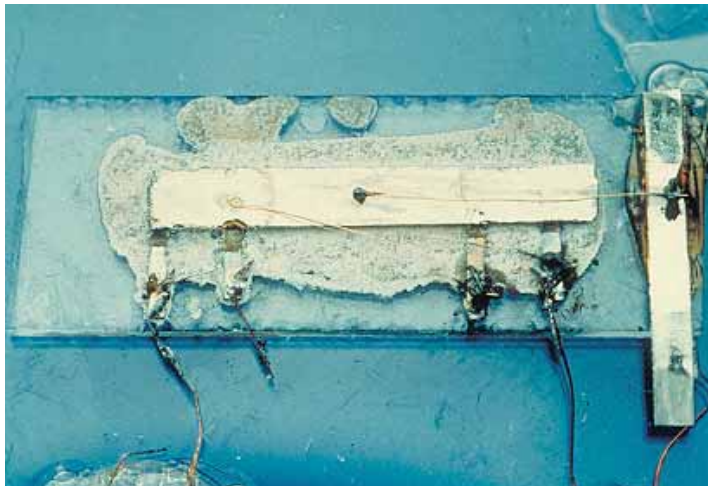
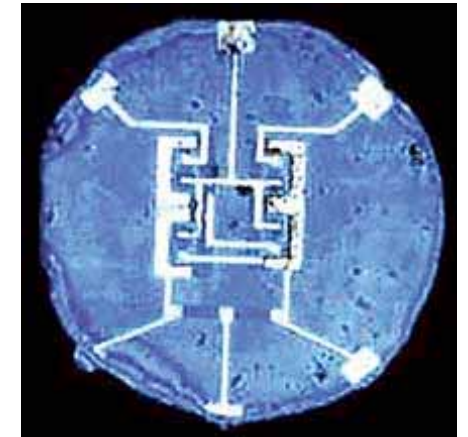
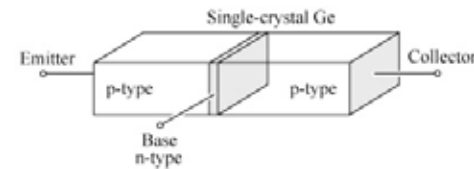
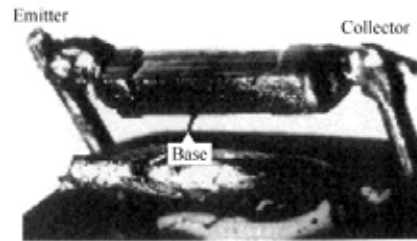
The first point contact transistor

William Shockley, John Bardeen, and Walter Brattain
Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey (1947)

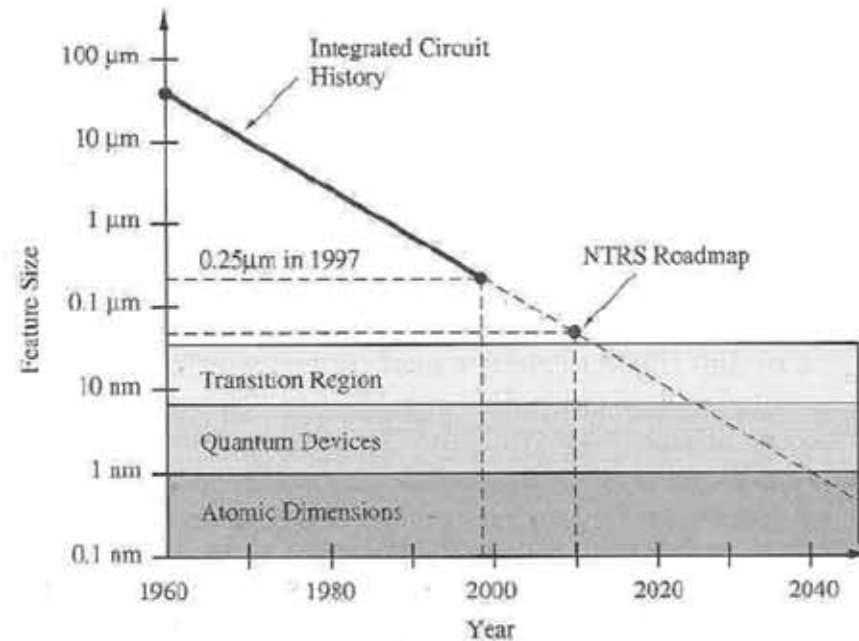


The First Junction Transistor

First transistor with diffused pn junctions by William Shockley
Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey (1949)



Premier circuit intégré (1 transistor)
Jack Kilby, TI - 1958 – Prix Nobel (2000)
Dimension: 11x1.6mm²



Actualités: lecteur/enregistreur DVD

Laser GaN à 405 nm

Technologie Blu-Ray

- DVD de 27 Go
(Sony, Philips, ...)

<http://www.blu-ray.com/players/>



Technologie HD DVD

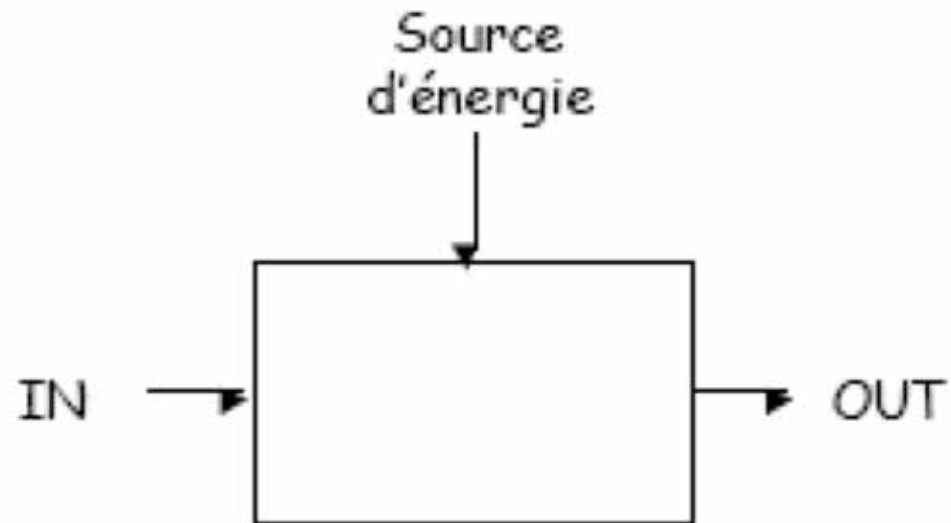
- DVD de 20 Go
(NEC, Toshiba, ...)

<http://www.toshiba.co.jp/hddvd/eng/index.htm>



fin 2006: 800-1500 US\$

Le transistor



Le transistor (contraction de *transfer resistor*) est un composant actif capable de modifier un signal par l'application d'un second.

Une des applications la plus répandue est l'amplification

Le transistor: fonctions

Analogiques:

- Fonctions linéaires pour transformer correctement les signaux (redressement, modulation)
- L'amplification qui est une fonction linéaire particulière permettant d'exploiter de faibles signaux
- Production de puissance pour transporter rapidement des signaux ou convertir ces signaux sous une autre forme d'énergie (lumineuse, acoustique, mécanique, ...)

Logiques:

- Circuits combinatoires à l'origine des blocs de calculs (numériques)
- Circuits séquentiels à l'origine des automates permettant d'exploiter la notion d'état et d'implémenter de véritables algorithmes de calcul sur des circuits intégrés silicium
- La mémorisation de données

Le transistor bipolaire:

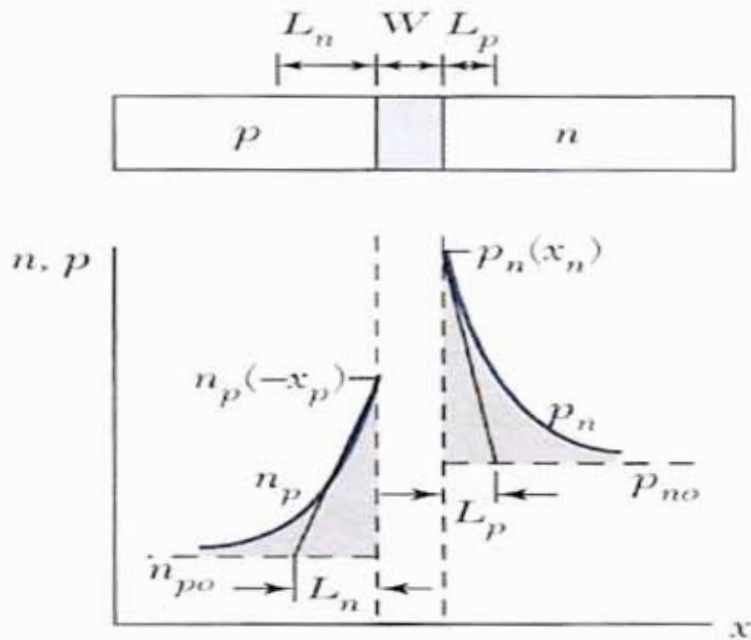
Points forts

- Forts courants (étage de sortie/puissance)
- Circuits logiques ultra-rapides
- Faible bruit (pré-ampli Hi-Fi)
- Linéarité
- Faible tension de fonctionnement

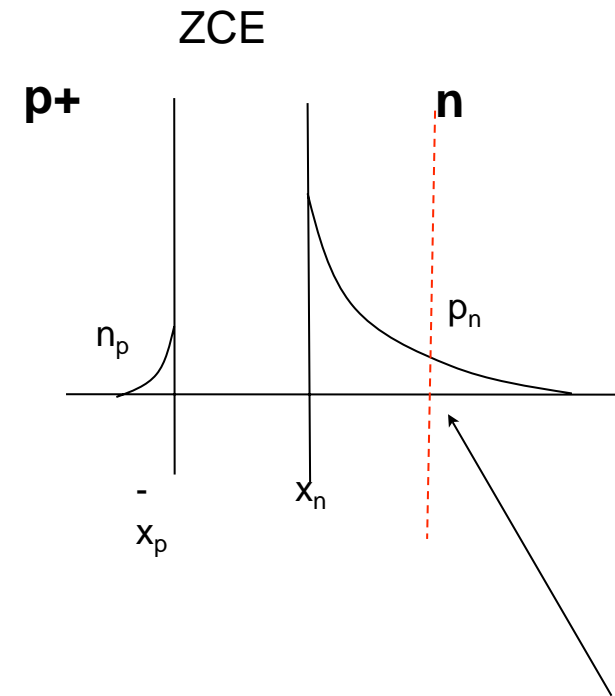
(0.7 V au lieu +/- 2V pour un MOS)

Transistor bipolaire: principe

jonction p-n



Jonction p+-n



Conclusions des calculs du cours sur la jonction p-n :

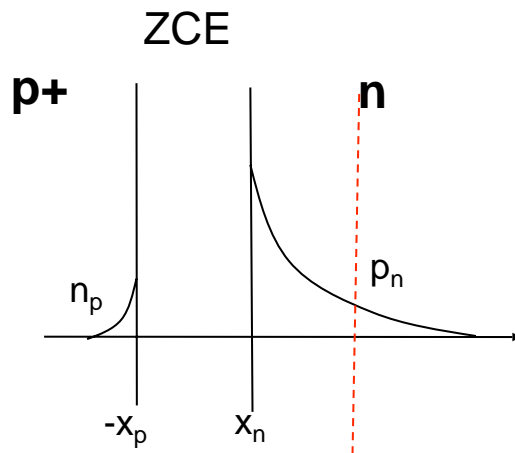
$$J = J_s (e^{qV/kT} - 1)$$

1 - Le courant J_s est essentiellement déterminé par l'injection des porteurs minoritaires

2 - Dans une jonction p+ - n, le courant dépend des trous et essentiellement de l'injection des trous dans la région n

Transistor bipolaire: principe

Jonction p+-n



$$J = J_s (e^{qV/kT} - 1)$$

$$J_s = J_n(-x_p) + J_p(x_n)$$

Conclusions des calculs du cours sur la jonction p-n :

1 - Le courant J_s est essentiellement déterminé par l'injection des porteurs minoritaires

2 - Dans une jonction p+ - n, le courant dépend des trous et essentiellement de l'injection des trous dans la région n

3 - Plus précisément le rapport $\frac{J_p(x_n)}{J_n(-x_p)}$

est constant (indépendant de V) et selon le choix de la structure peut être très grand ou très petit

$$\frac{J_p(x_n)}{J_n(-x_p)} = \frac{D_p}{D_n} \frac{p_{n0}}{n_{p0}} \frac{L_n}{L_p} = \frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{L_n}{L_p}$$

$$\frac{J_p(x_n)}{J_n(-x_p)} = \frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{L_n \operatorname{th}(d_p/L_n)}{L_p \operatorname{th}(d_n/L_p)} \rightarrow \frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{d_p}{d_n}$$

Admettre

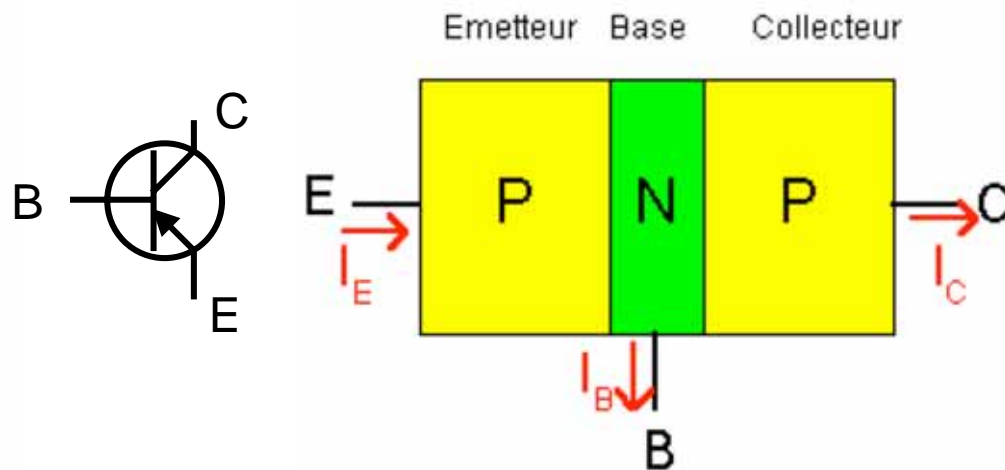
Note: dans le cas où l'épaisseur d n'est pas \gg longueur de diffusion

Transistor bipolaire: principe

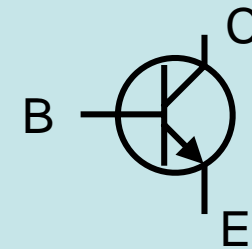
Objectif: contrôler J_n qui est petit afin de contrôler J_p qui est grand

Comment: en séparant ces deux courants dans deux boucles indépendantes

Comment bis: en plaçant une jonction n - p en inverse à proximité

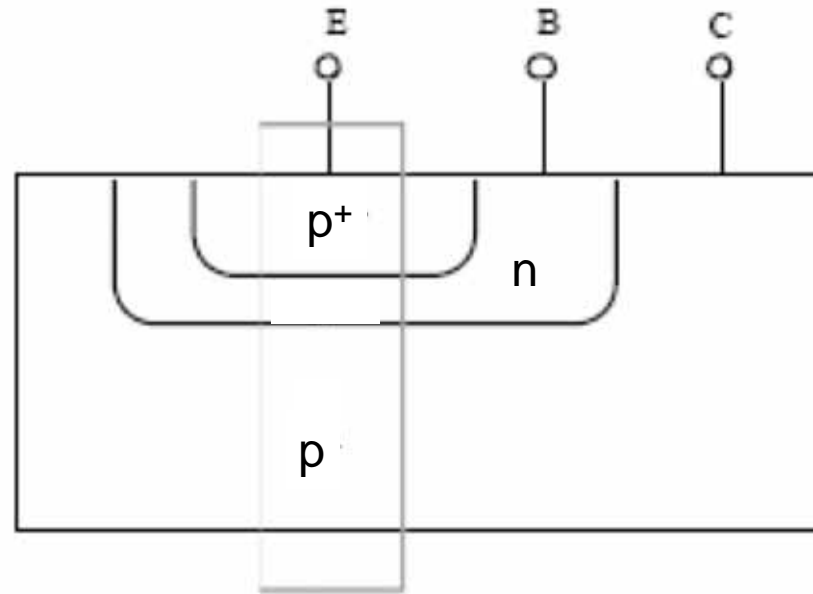


Note: transistor npn
le même discours s'applique en
intervertissant à chaque fois n et p



Composant constitué de trois régions npn ou pnp

Le transistor bipolaire: structure

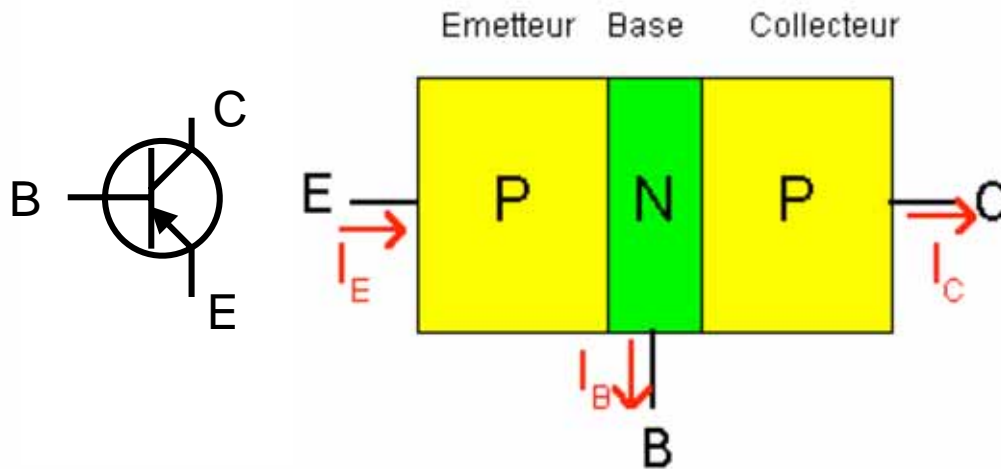


L'émetteur est impérativement plus dopé que la base:
⇒ détermine le gain en courant du transistor.

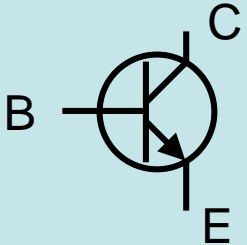
La base est une région extrêmement mince:
⇒ détermine les propriétés du transistor.

Le collecteur est faiblement dopé:
⇒ permet au transistor de supporter des tensions élevées.

Le transistor bipolaire



Note: transistor npn
le même discours s'applique en
intervertissant à chaque fois n et p



Fonctionnement normal :

la jonction émetteur-base est polarisée en direct,
la jonction collecteur-base est polarisée
en inverse

} analogique

Fonctionnement bloqué :

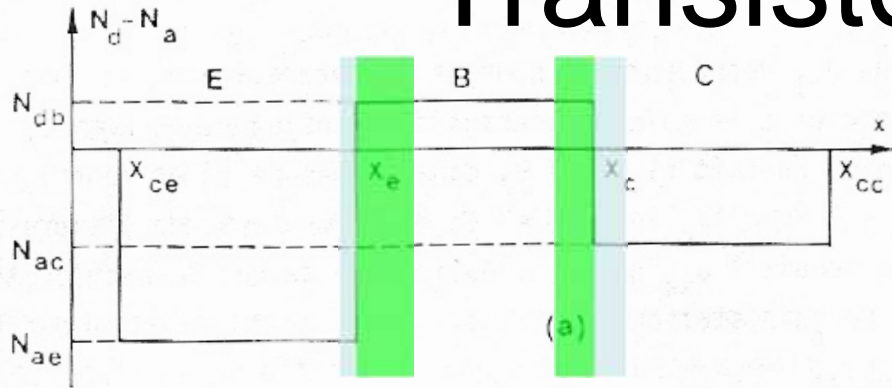
les 2 jonctions sont polarisées en inverse

Fonctionnement saturé :

les 2 jonctions sont polarisées en direct

} logique

Transistor bipolaire



La vie d'un trou depuis l'émetteur:

1 il passe la jonction émetteur-base qui est polarisée en direct

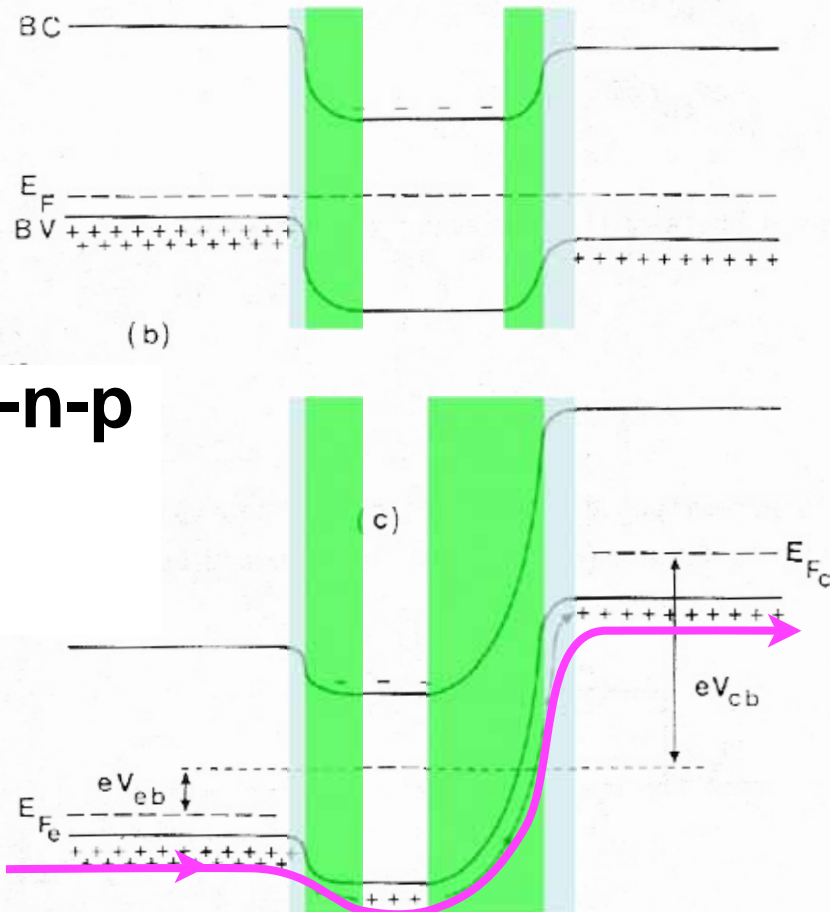
2 il se retrouve porteur minoritaire dans la zone neutre de la base, en régime de diffusion

3 le champ électrique de la jonction inverse base-collecteur happe les minoritaires qui parviennent jusqu'à elle (base courte)

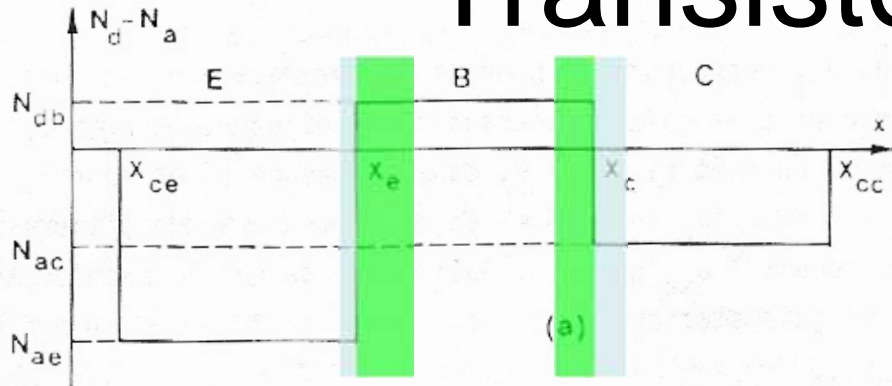
4 le trou redevient porteur majoritaire dans l'émetteur et il continue son parcours jusqu'au contact.

Idéalement $I_{\text{émetteur}} = I_{\text{collecteur}}$

P-n-p



Transistor bipolaire



La vie d'un trou depuis l'émetteur:

Idéalement $I_{\text{émetteur}} = I_{\text{collecteur}}$

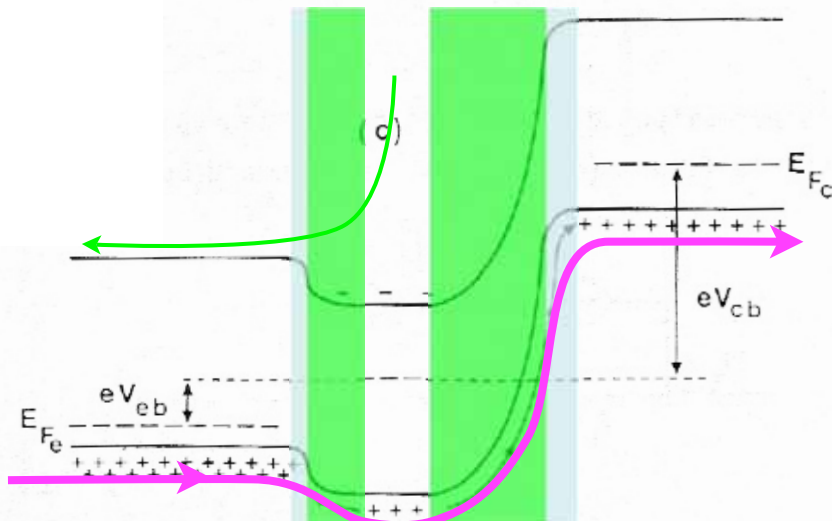
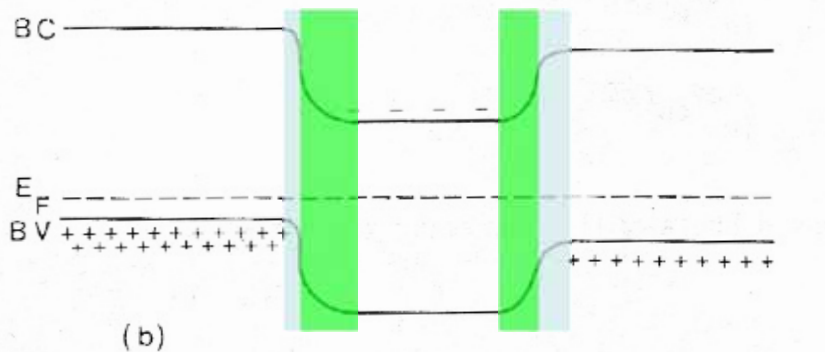
La vie d'un électron depuis la base:

1 il est porteur majoritaire dans la base et voit une grande barrière de potentiel vers le collecteur

2 il contribue uniquement au petit courant électronique de la jonction directe émetteur-base

Le rapport entre ces deux courants est lié et imposer l'un (I_{base}) permet de contrôler l'autre ($I_{\text{émetteur}}$)

$$\frac{J_p(x_n)}{J_n(-x_p)} = Cst$$



Le transistor bipolaire: gain

Mode normal

Gain en courant

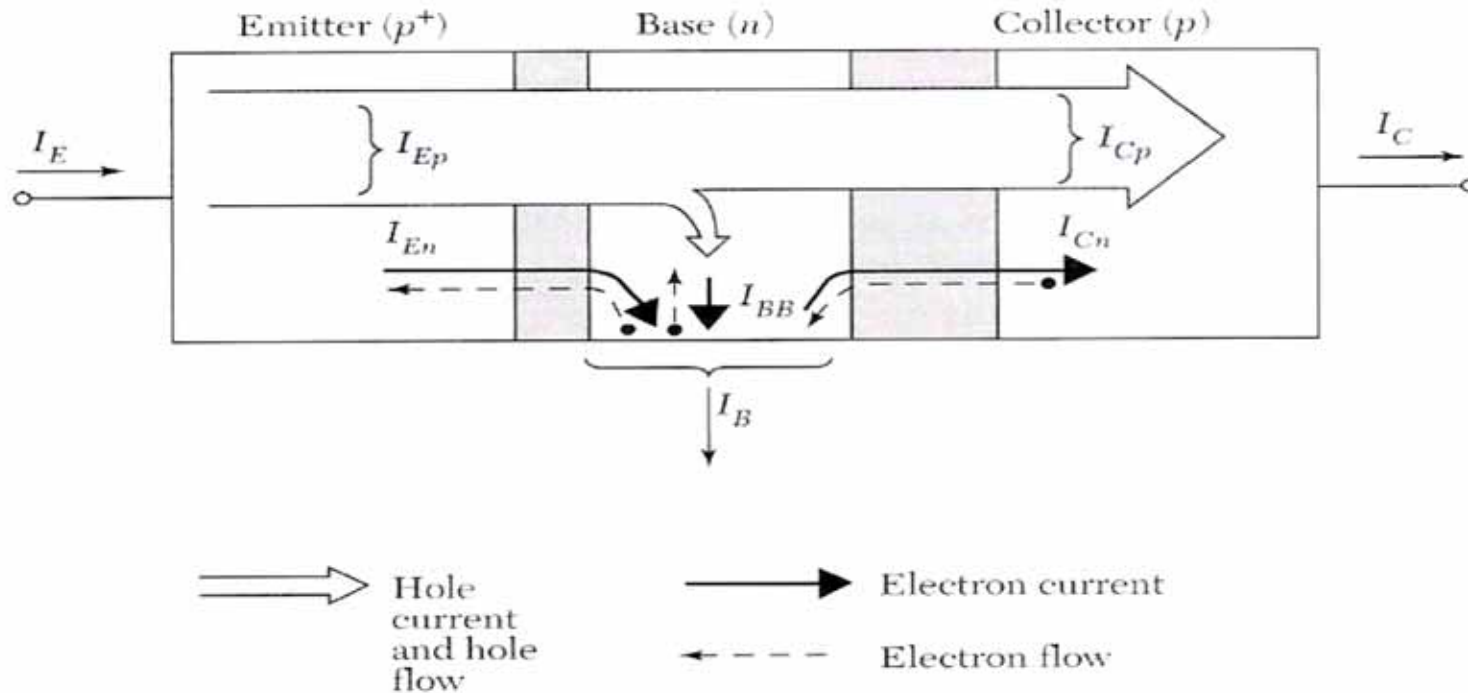
I_{Ep} : trous issus de l'émetteur

I_{Cp} : trous dans le collecteur

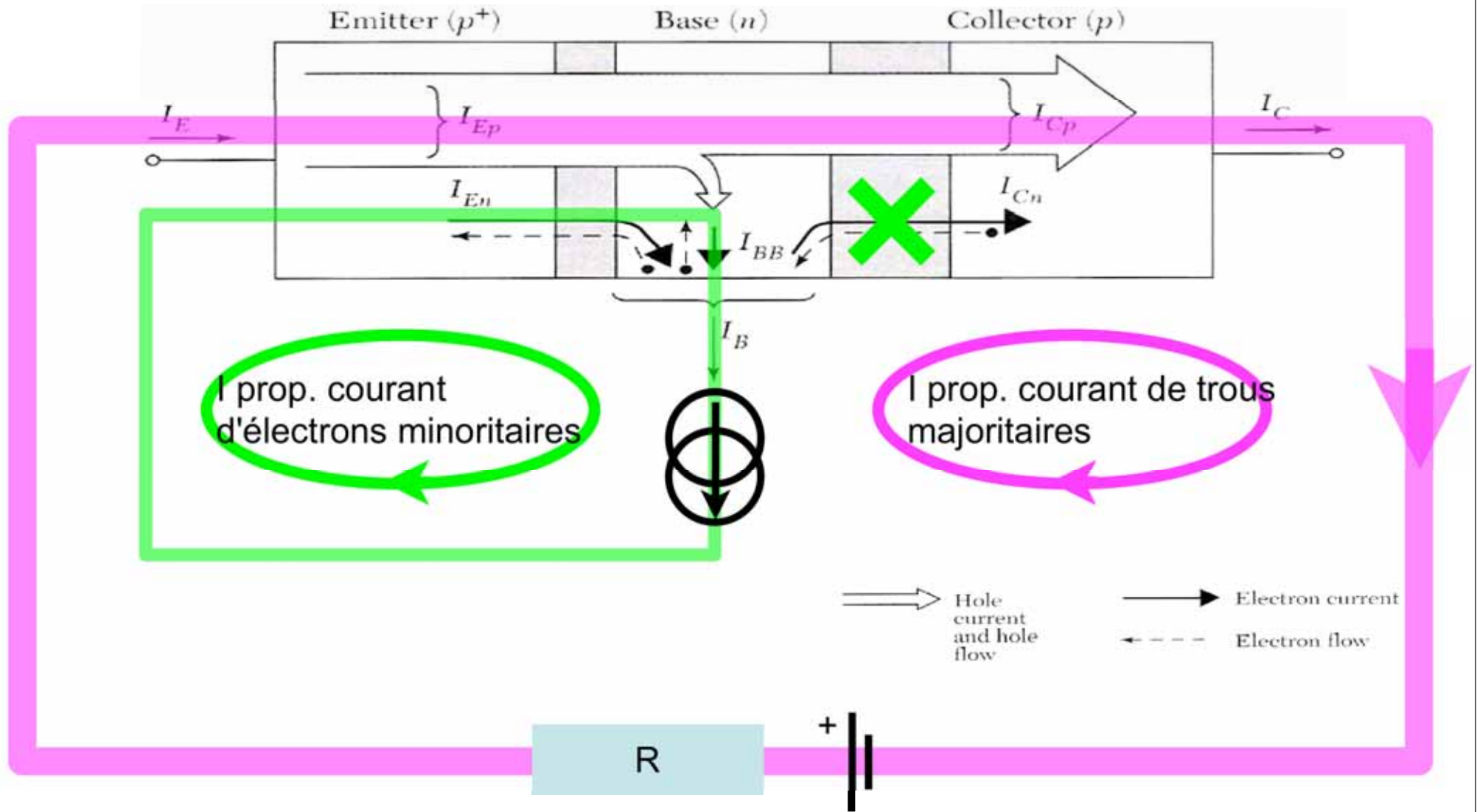
I_{En} : électrons vers l'émetteur venant de la base

I_{Cn} : électrons venant du collecteur par activation thermique

I_{BB} : électrons de la base compensant les électrons qui se sont recombinés avec les trous venant de E ($I_{BB} = I_{Ep} - I_{Cp}$)



Transistor bipolaire



On verra plus tard comment on boucle réellement le circuit

Le transistor bipolaire

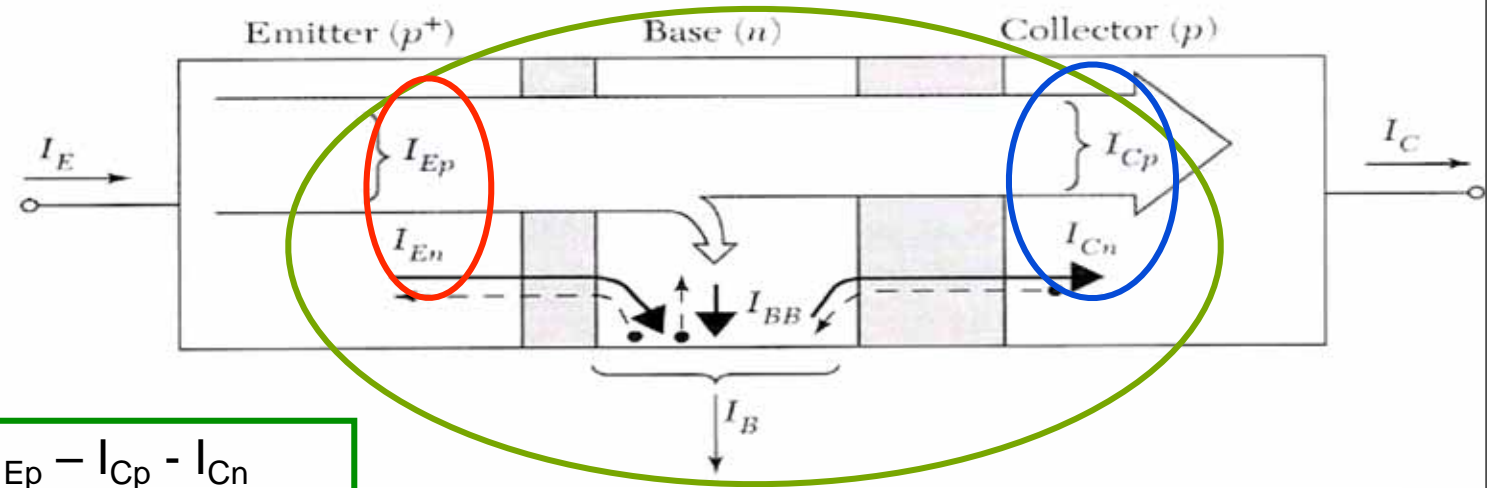
Mode normal

Gain en courant

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_E - I_C = I_{En} + I_{Ep} - I_{Cp} - I_{Cn}$$



Un paramètre important est le gain α

$$\alpha = I_{Cp} / I_E$$

$$\text{soit } \alpha = I_{Cp} / (I_{Ep} + I_{En}) = \underbrace{[I_{Ep} / (I_{Ep} + I_{En})]}_{\gamma \text{ efficacité de l'émetteur}} \underbrace{(I_{Cp} / I_{Ep})}_{\alpha_T \text{ facteur de transport de la base}}$$

γ doit être le plus proche possible de 1 $\Rightarrow I_{En}$ doit être le plus faible possible

Le transistor bipolaire

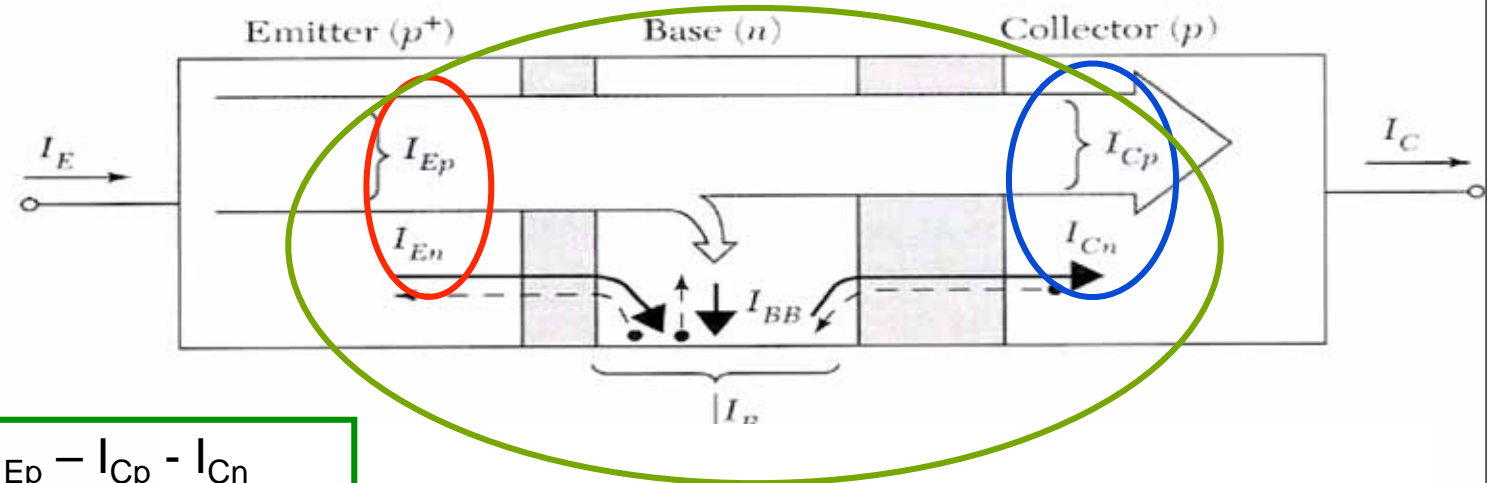
Mode normal

Gain en courant

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_E - I_C = I_{En} + I_{Ep} - I_{Cp} - I_{Cn}$$



Un autre paramètre important est le gain β en courant en émetteur commun

$$\alpha = I_{Cp}/I_E \qquad \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_{Cp}}{I_E - I_{Cp}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

β doit être le plus grand possible $\Rightarrow I_{En}$ doit être le plus faible possible

Le transistor bipolaire

Mode normal

Gain en courant

Les gains α et β dépendent de la géométrie du transistor et des paramètres du semiconducteur tels que dopages (niveaux et profils) et de la durée de vie des porteurs minoritaires.

On peut estimer β selon la relation (pour un pnp):

$$\beta = \frac{J_p(x_n)}{J_n(-x_p)} = \frac{D_p N_A L_n \operatorname{th}(d_p/L_n)}{D_n N_D L_p \operatorname{th}(d_n/L_p)} = \frac{\mu_p N_A L_n \operatorname{th}(d_p/L_n)}{\mu_n N_D L_p \operatorname{th}(d_n/L_p)} \rightarrow \frac{\mu_p N_A L_n \operatorname{th}(d_p/L_n)}{\mu_n N_D d_n}$$

De manière générale:

$$\beta = \frac{\mu_{\text{minoritaire, base}}}{\mu_{\text{minoritaire, émetteur}}} \times \frac{N_{\text{Emetteur}}}{N_{\text{Base}}} \times \frac{\min(L_{\text{minoritaire, émetteur}}, d_{\text{émetteur}})}{d_{\text{Base}}}$$

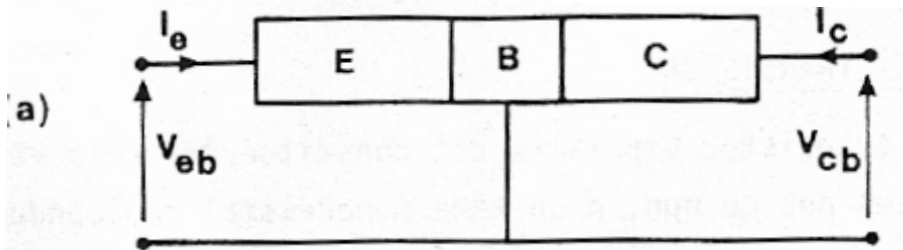
Choisir npn plutôt que pnp

Emetteur plus dopé que la base

Base courte

Le transistor bipolaire

Schémas équivalents



(a) = (b) + (c)

(b): $V_{eb} \neq 0$ et $V_{cb} = 0$.

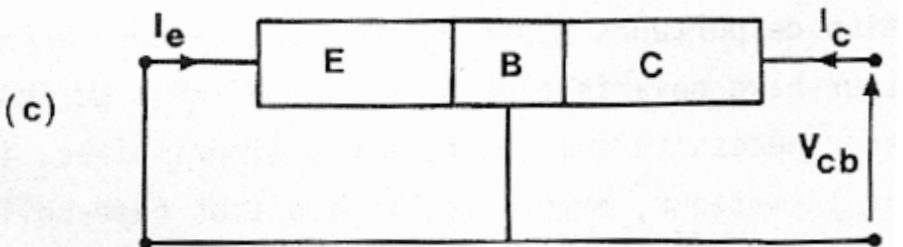
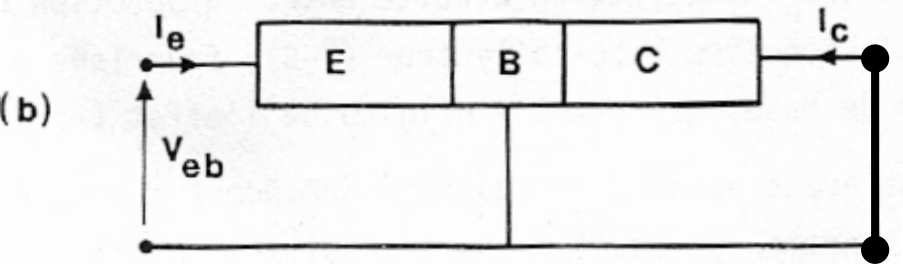
I_e est le courant d'une jonction p-n polarisée par V_{eb}

$$I_e = I_{sl} \left(e^{\frac{qV_{eb}}{k_B T}} - 1 \right)$$

I_e se distribue entre base et collecteur. Si la base est étroite, les porteurs sont préférentiellement happés par le champs de la jonction base-collecteur. Une petite portion se recombine et contribue au courant de base

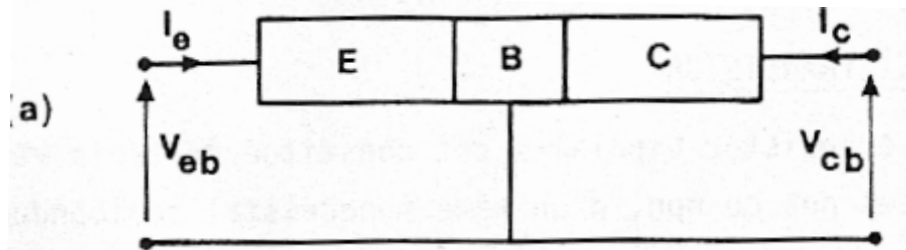
$$I_c = -\alpha I_e = -\alpha \left(e^{\frac{qV_{eb}}{k_B T}} - 1 \right)$$

α représente le gain en courant direct à tension collecteur-base nulle

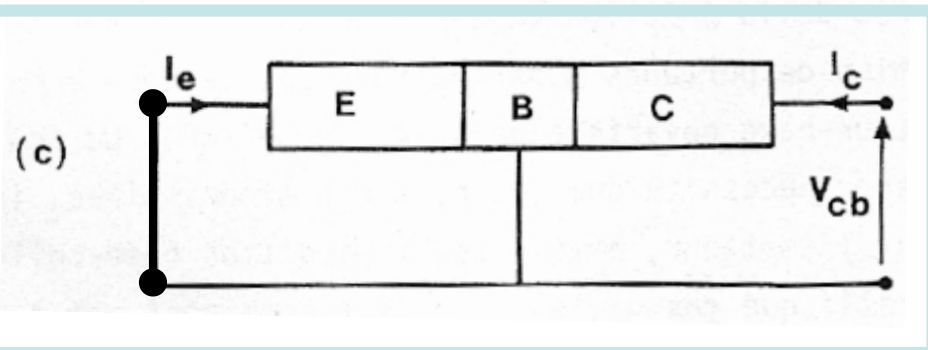
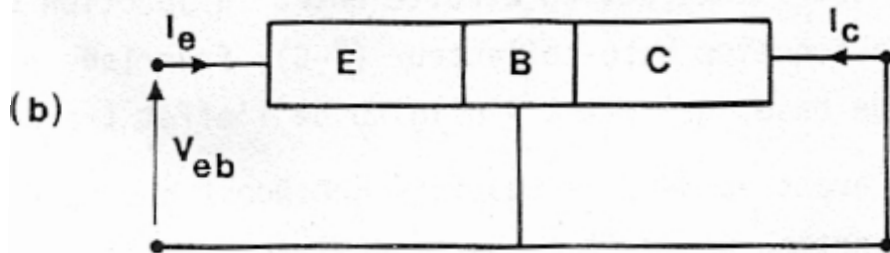


Le transistor bipolaire

Schémas équivalents



(a) = (b) + (c)



(c): $V_{eb} = 0$ et $V_{cb} \neq 0$.

C'est le régime inverse du précédent I_c est le courant d'une jonction p-n polarisée par V_{cb}

$$I_c = I_{s2} \left(e^{\frac{qV_{cb}}{k_B T}} - 1 \right)$$

De même I_c se distribue entre base et émetteur

$$I_e = -\alpha_i I_c = -\alpha_i I_{s2} \left(e^{\frac{qV_{cb}}{k_B T}} - 1 \right)$$

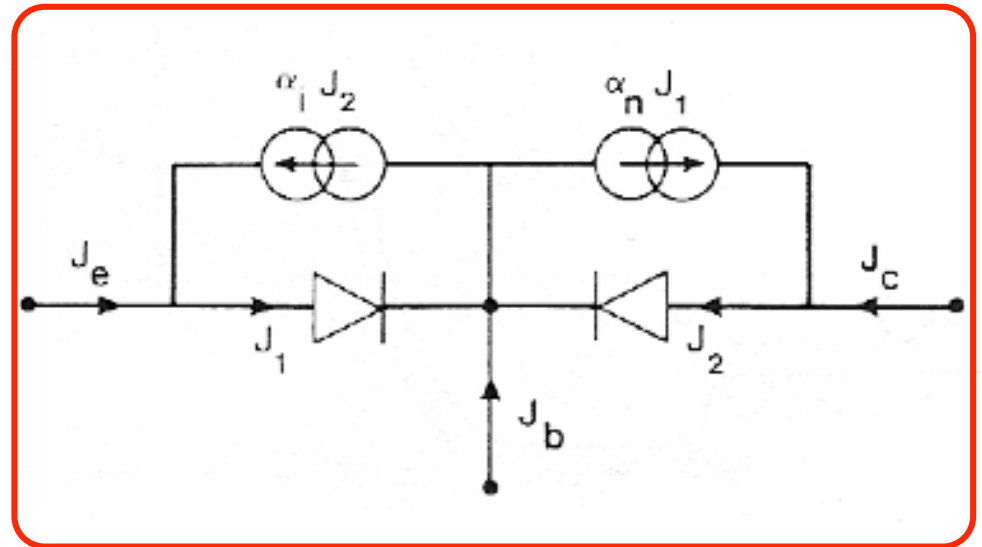
α_i représente le gain en courant inverse à tension émetteur-base nulle. Pour des raisons de dissymétrie des profils de dopage, il est beaucoup moins proche de 1 que α

Le transistor bipolaire

Schémas équivalents

(a) = (b) + (c)

$$I_e = I_{s1} \left(e^{\frac{qV_{eb}}{k_B T}} - 1 \right) - \alpha_i I_{s2} \left(e^{\frac{qV_{cb}}{k_B T}} - 1 \right)$$
$$I_c = -\alpha \left(e^{\frac{qV_{eb}}{k_B T}} - 1 \right) + I_{s2} \left(e^{\frac{qV_{cb}}{k_B T}} - 1 \right)$$



Equations d'Ebers-Moll

Remarque: il existe des démonstrations plus rigoureuses et beaucoup plus longues

Le transistor bipolaire

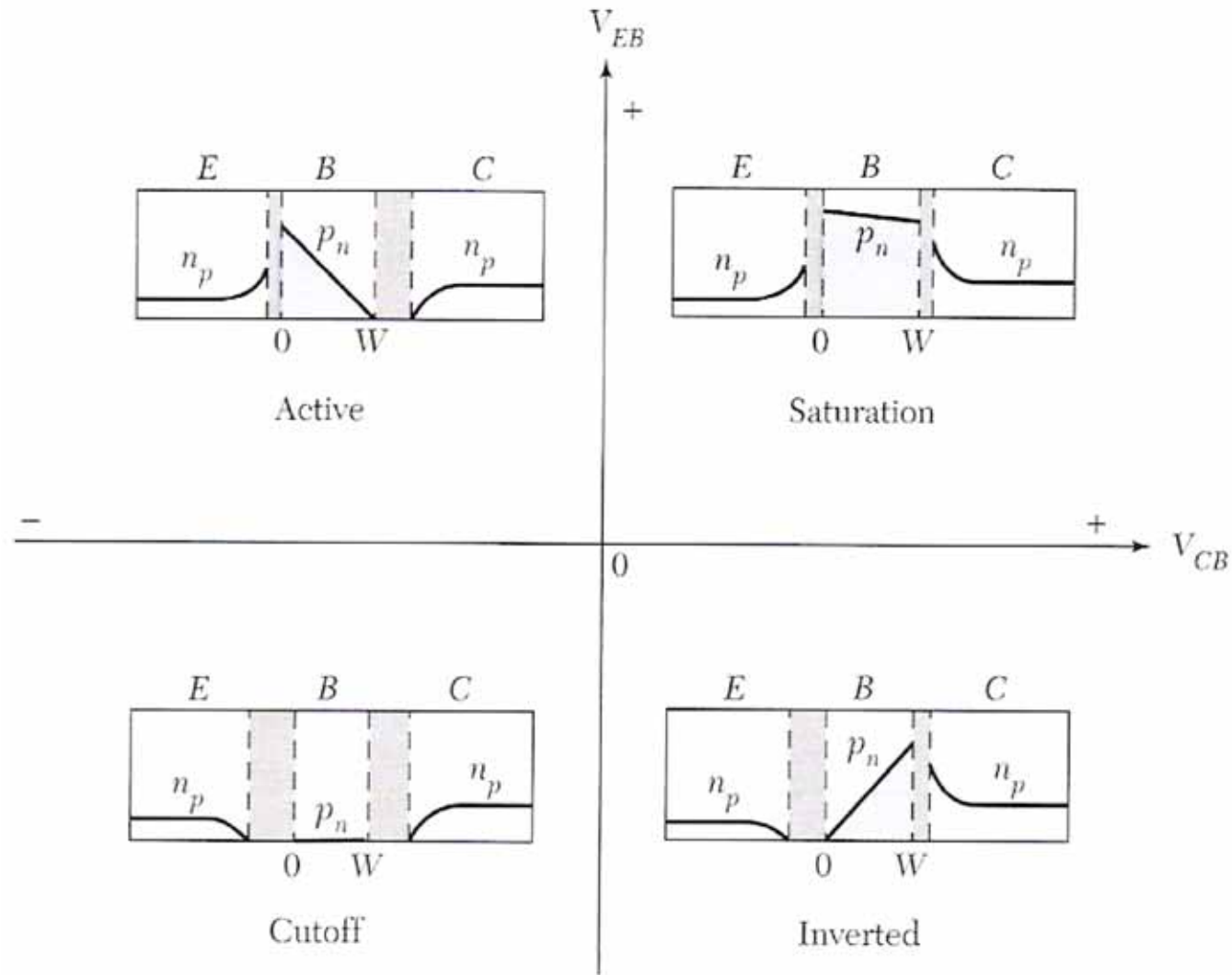
Modes d'opération du transistor bipolaire

Il existe 4 modes d'opération qui dépendent de la polarité des tensions appliquées aux jonctions émetteur/base et collecteur base.

Mode d'opération	E/B	C/B
Régime actif/normal	Direct	Inverse
Régime saturé	Direct	Direct
Mode de coupure/ bloqué	Inverse	Inverse
Mode inversé	Inverse	Direct

Le transistor bipolaire

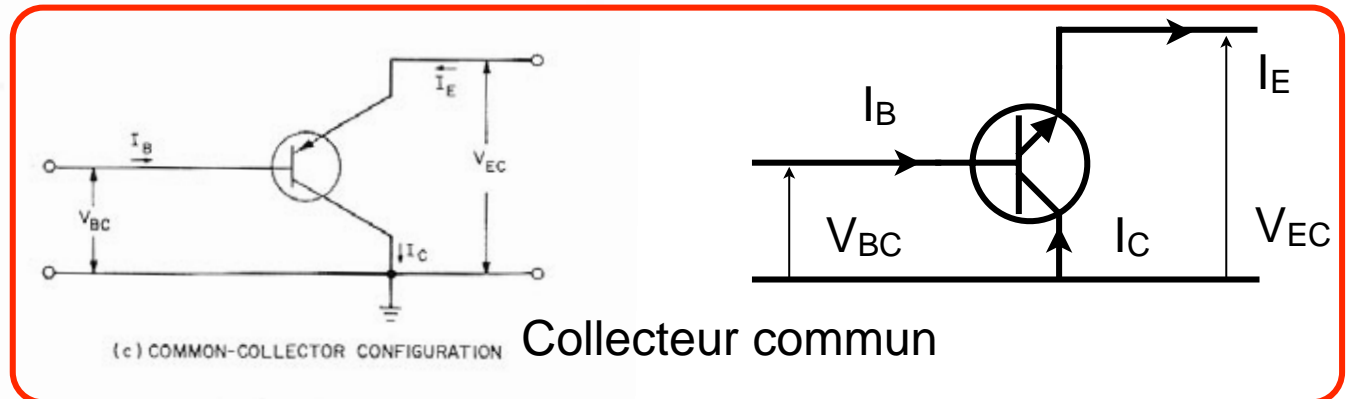
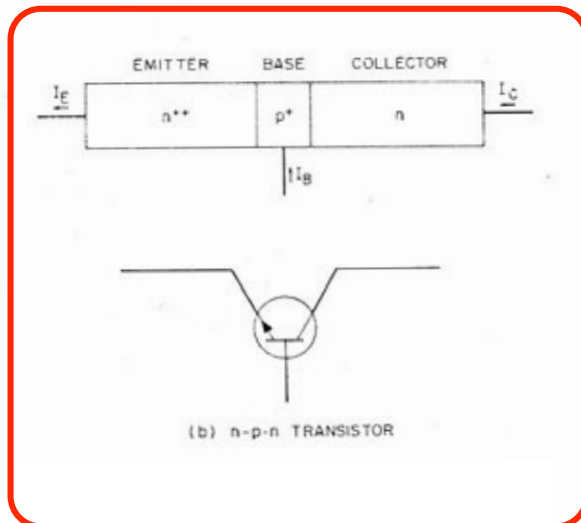
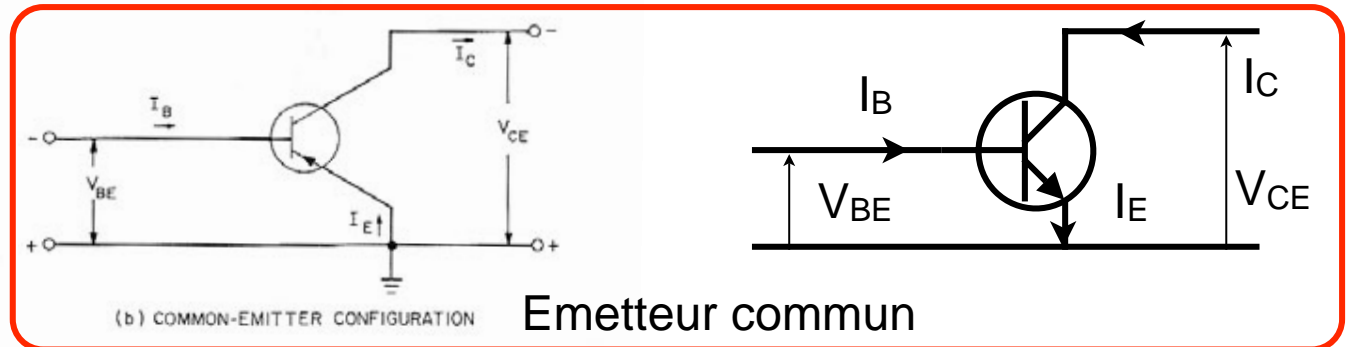
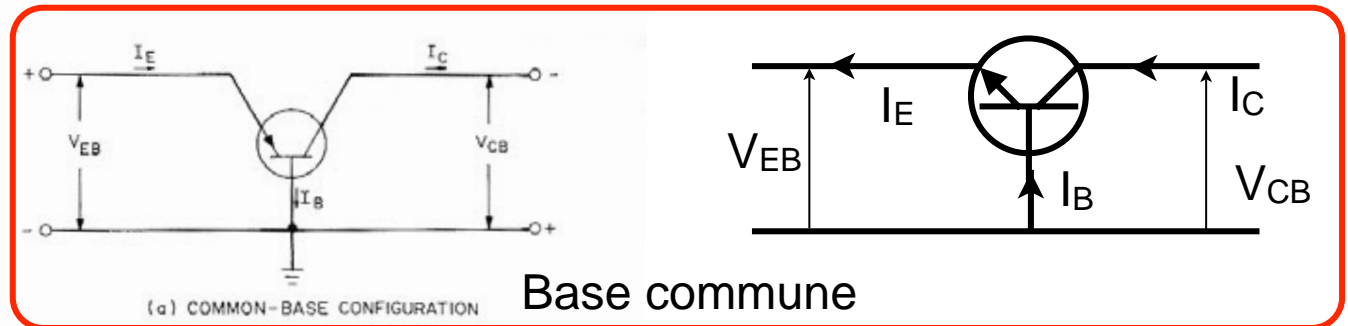
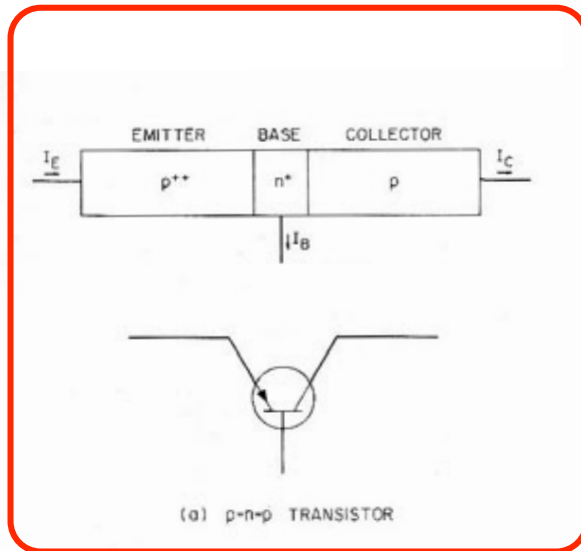
Modes d'opération du transistor bipolaire



Distribution des porteurs minoritaires

Le transistor bipolaire

Utilisation du transistor bipolaire en régime normal

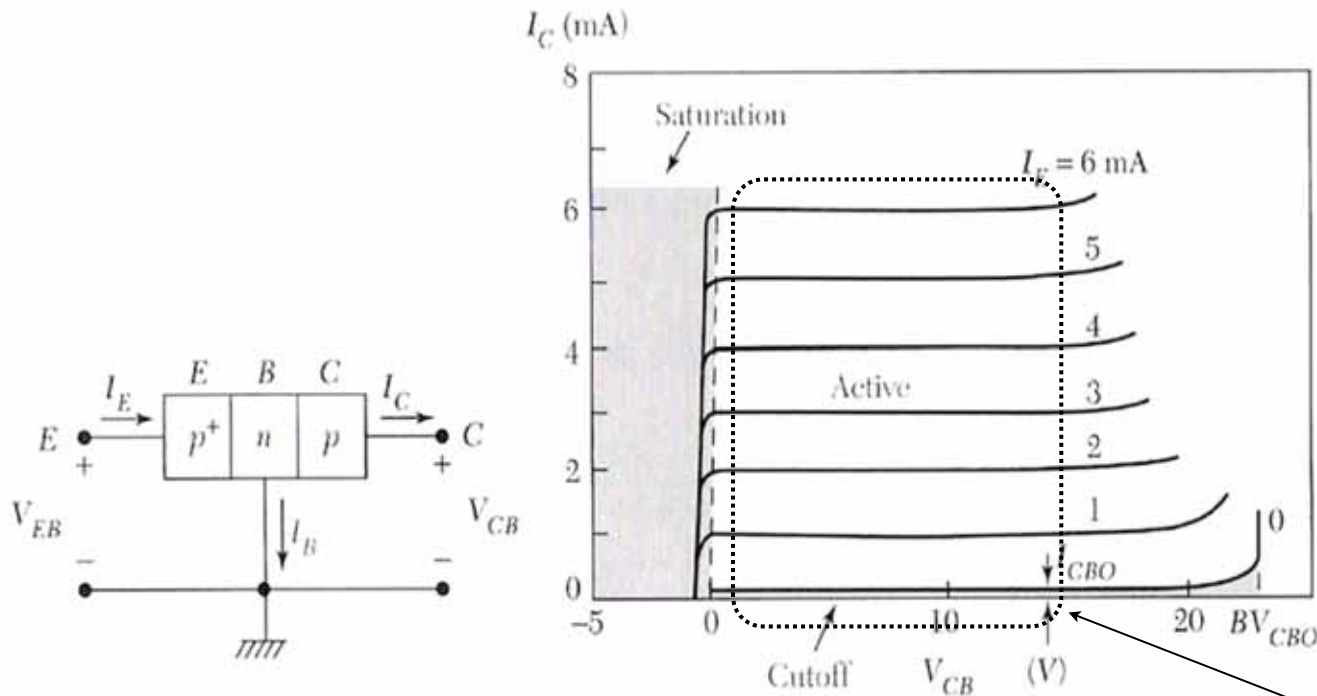


Le transistor bipolaire

Caractéristiques statiques

Base commune

Courant C en fonction de la tension entre B et C pour différents courants E



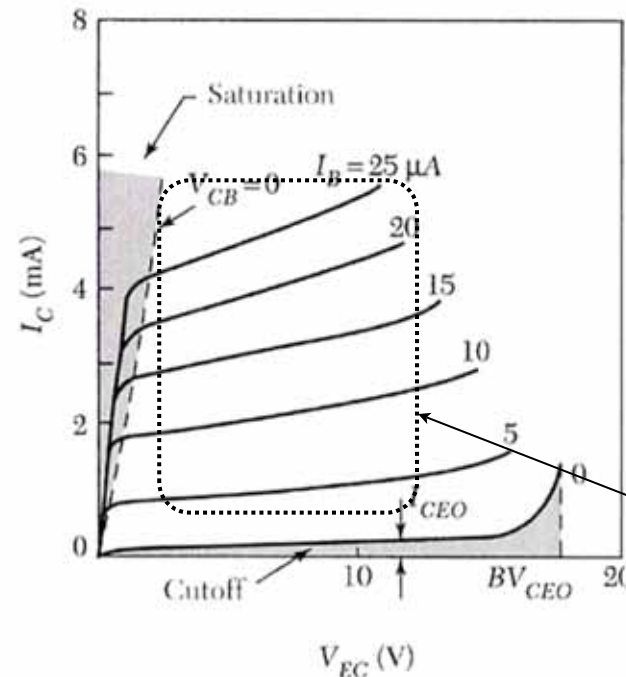
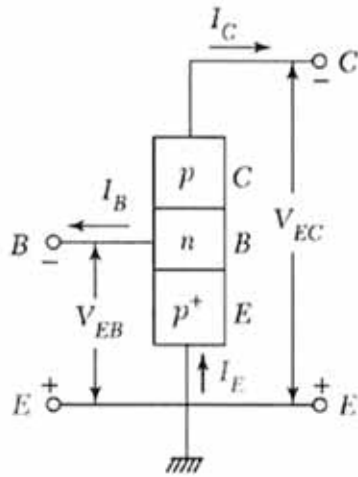
$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0}$$

Région $I_C \approx I_E$

Le transistor bipolaire

Caractéristiques statiques

Emetteur commun



Région $\beta \approx 200$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CB0} = \alpha (I_B + I_C) + I_{CB0} = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha}$$

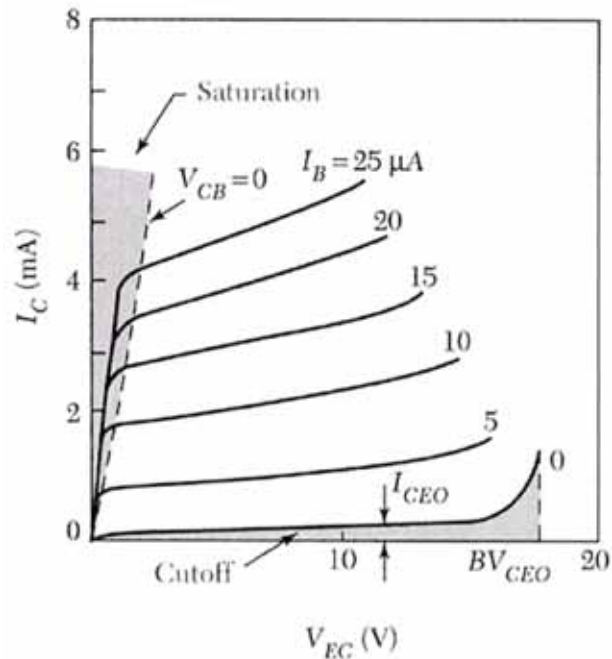
$$\text{En posant } \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ et } I_{CE0} = \frac{I_{CB0}}{1-\alpha}$$

$$\Rightarrow I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

β = gain en courant en émetteur commun

α est proche de l'unité donc β est très élevé

Le transistor bipolaire



Dans un transistor idéal, le courant I_C doit être constant pour un courant I_B donné lorsque V_{EC} varie

Or I_{BC} augmente quand V_{EC} augmente

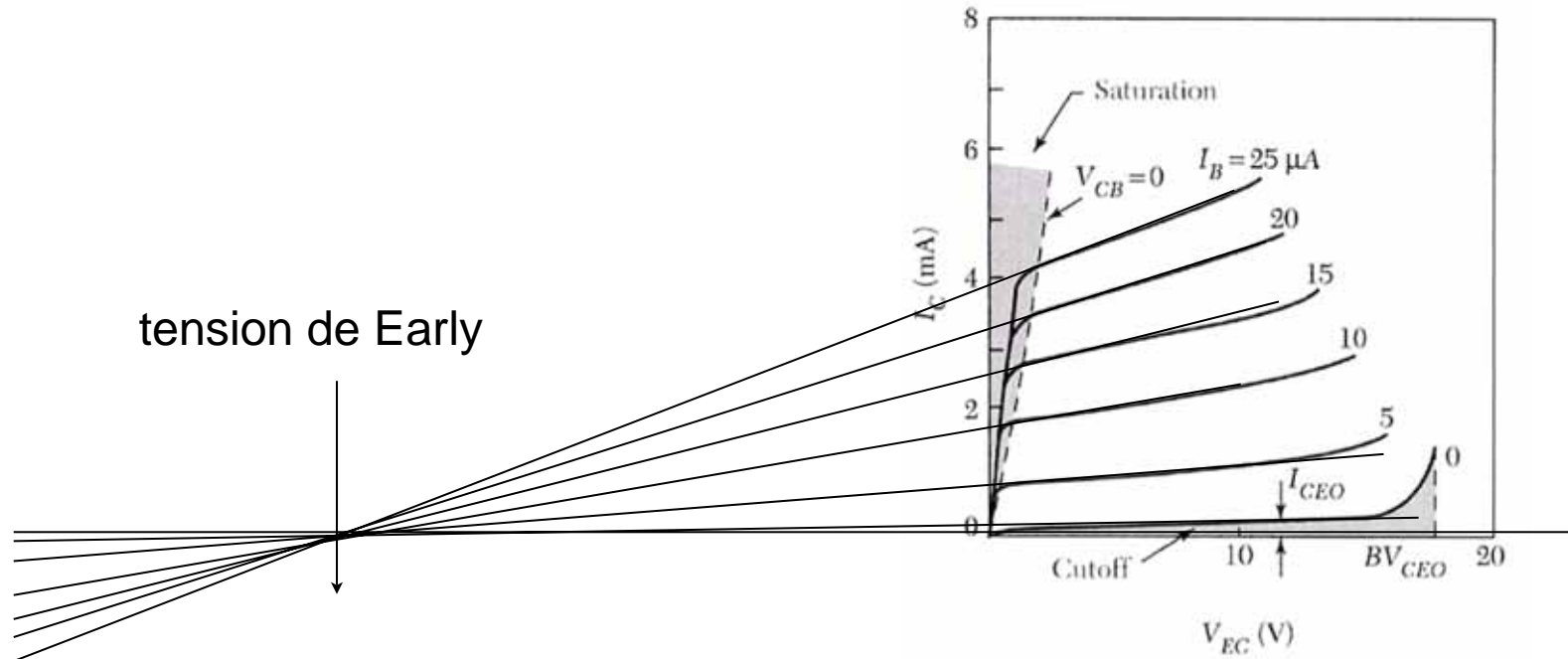
En fait, I_C n'est constant que si la largeur de la base est constante

or

La zone de charge d'espace entre B et C augmente lorsque V_{BC} augmente, cad V_{EC}

⇒ En conséquence, la largeur de la base diminue et le courant de diffusion (venant de l'émetteur) collecté à travers la base est plus grand (β est plus élevé)

Le transistor bipolaire



Cet effet est appelé effet Early (1952)

Si l'on extrapole le courant I_C pour une valeur nulle, la tension V_A ainsi déterminée est appelée « tension de Early ».

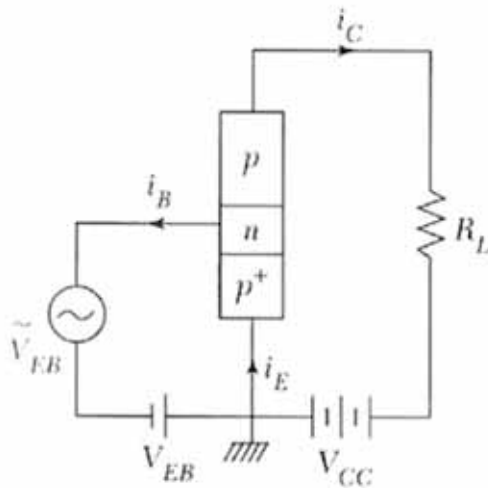
Plus V_A sera élevé plus la dépendance en tension du courant I_C sera faible

Le transistor bipolaire

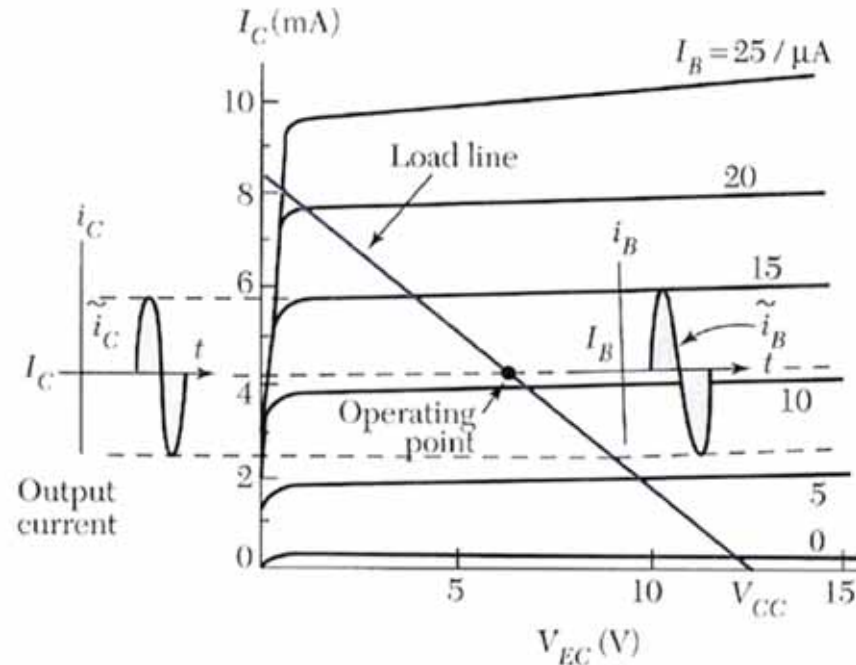
Comportement dynamique: réponse en fréquence

Différents modes d'opération possibles. Généralement, les transistors Bipolaires fonctionnent en mode normal (direct/inverse) dans les circuits analogiques. En logique, les quatre différents modes sont utilisés

Aperçu

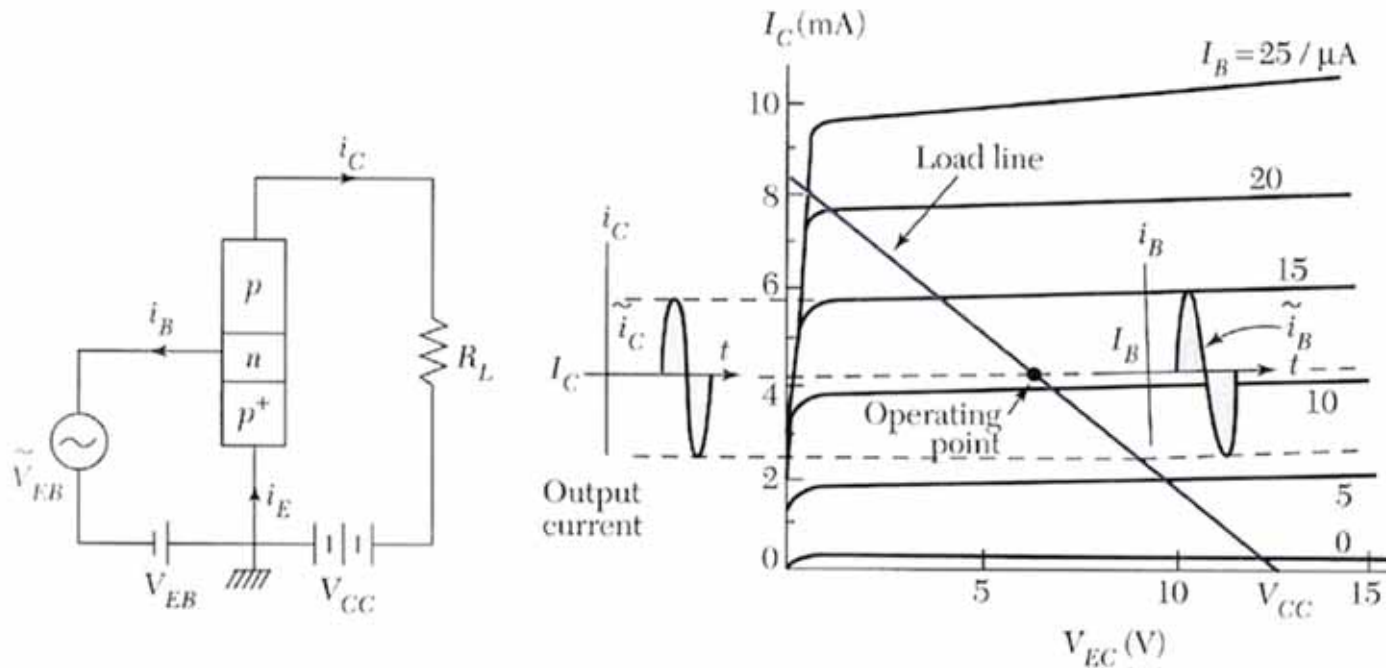


Emetteur commun



$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

Le transistor bipolaire

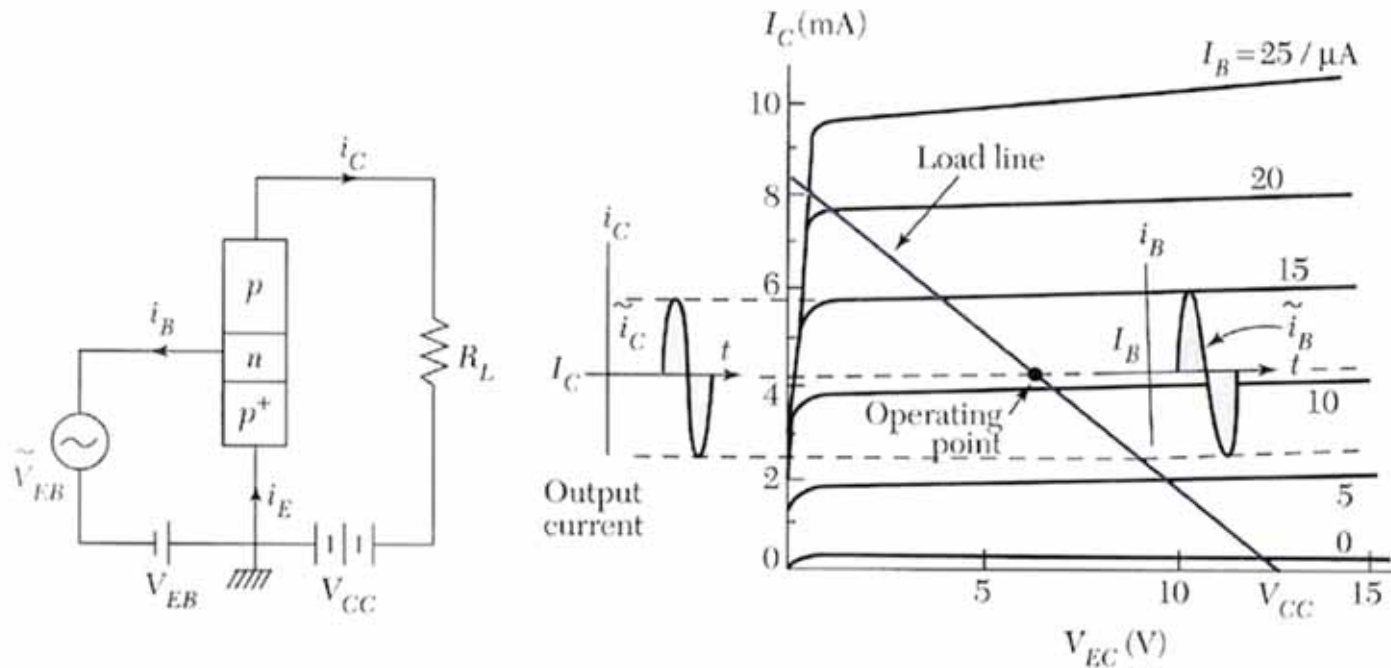


On superpose un faible signal (qq μA) appliqué à la base (V_{BC} ou I_B) à un signal continu (qq mA): le courant I_E

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

Le courant I_C est alors modulé avec la même fréquence que I_B : on a donc amplifié un signal alternatif

Le transistor bipolaire



Quand on applique une tension V_{EB} , les courants I_C et I_B s'établissent dans le transistor. Ils définissent le **point de fonctionnement** du transistor. Celui-ci dépend aussi de la résistance de charge R_L

$$V_{EC} = V_{CC} - R_L I_C \Rightarrow I_C = (V_{CC} - V_{EC}) / R_L$$

Ligne de charge varie en $-1/R_L$

Le transistor bipolaire

Comportement en fréquences

Lorsque le transistor fonctionne à hautes fréquences, il faut tenir compte des effets capacitifs.

Ceux-ci proviennent des jonctions entre la base et l'émetteur, et la base et le collecteur. Dans le circuit équivalent, il faut aussi tenir compte des différentes résistances de la base et du collecteur

La conséquence de ces différents paramètres est l'existence d'une **fréquence de coupure** au-delà de laquelle le transistor ne fonctionne plus correctement \Rightarrow le gain diminue

On peut écrire

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + j f / f_{\alpha})$$

avec α_0 gain en continu et f_c la fréquence de coupure

$f = f_{\alpha}$ est définie à $\alpha = 0.707 \alpha_0$ (-3 dB)

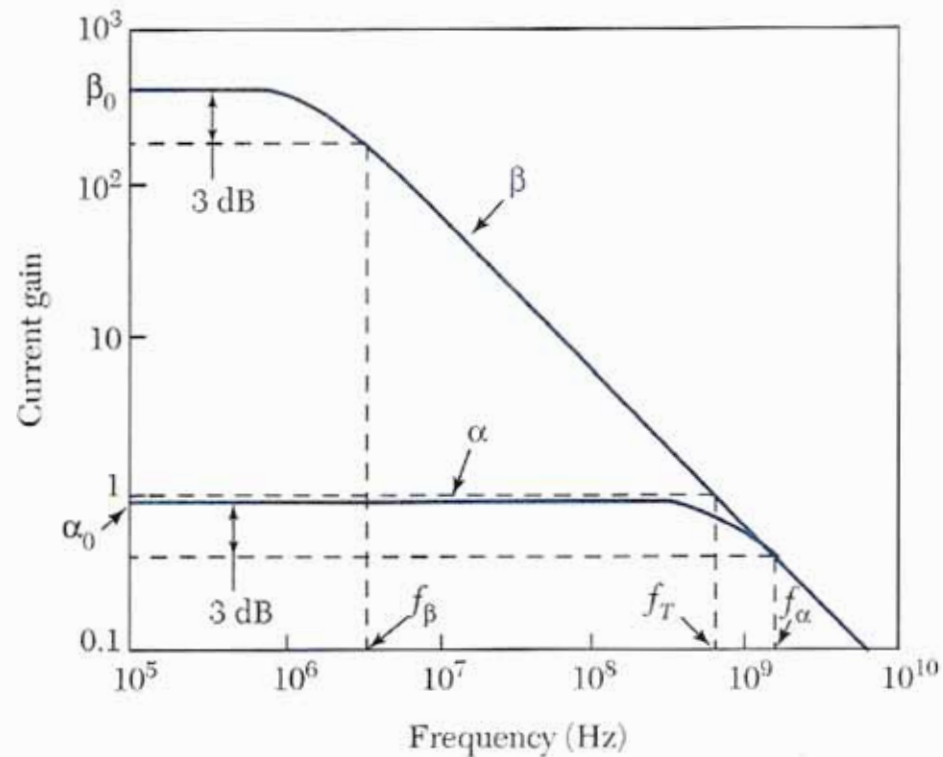
f_{α} fréquence de coupure en base commune

Le transistor bipolaire

$\beta = \alpha/(1-\alpha) = \beta_0/(1+j(f/f_\beta))$ f_β = fréquence de coupure en émetteur commun

$f_\beta = (1-\alpha_0)/f_\alpha$ avec $f_\beta \ll f_\alpha$ car $\alpha_0 \approx 1$

Une autre fréquence de coupure souvent utilisée pour caractériser un transistor est définie pour β (le gain en fréquence) = 1

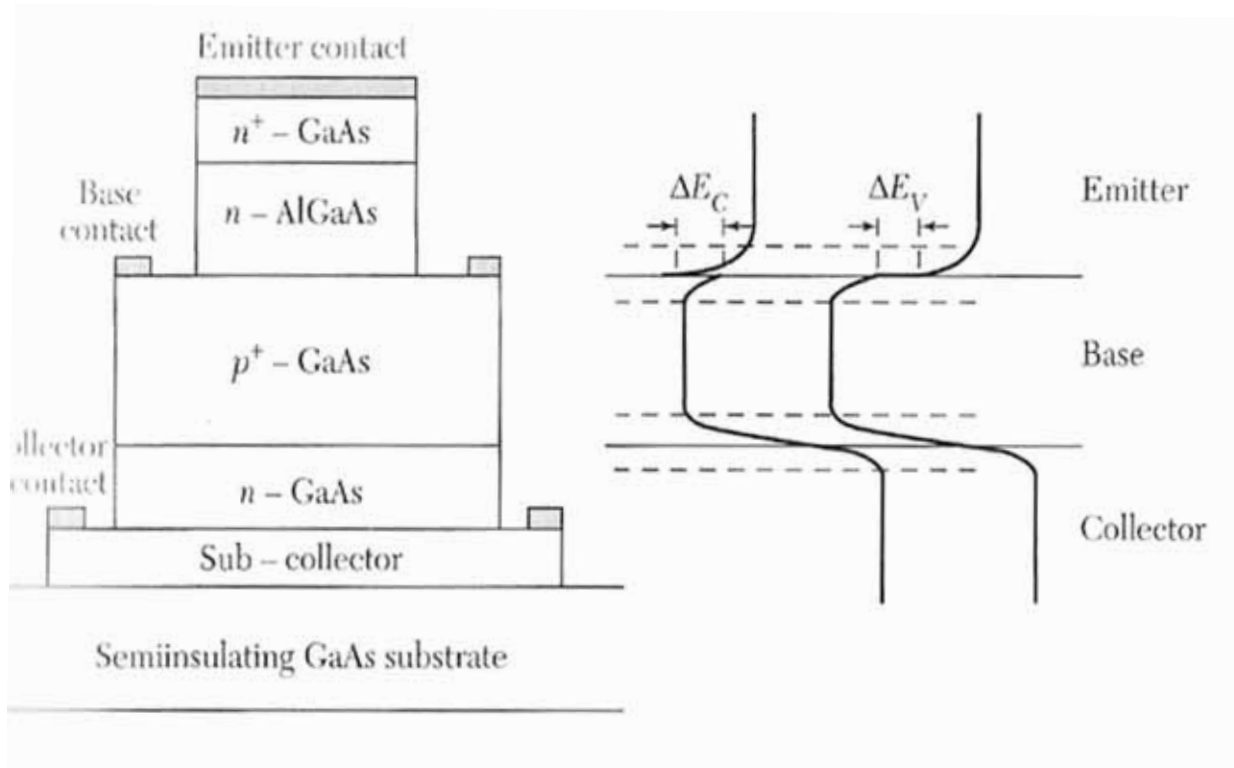


Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT)

Un transistor HBT met en jeu deux types de matériaux différents

L'une des caractéristiques principales est la très forte efficacité de l'émetteur (γ)

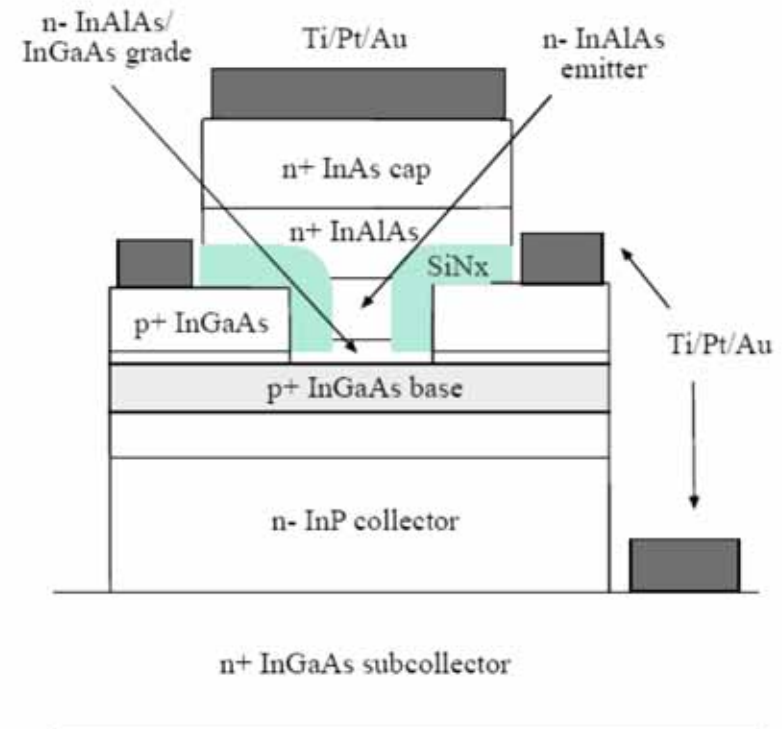
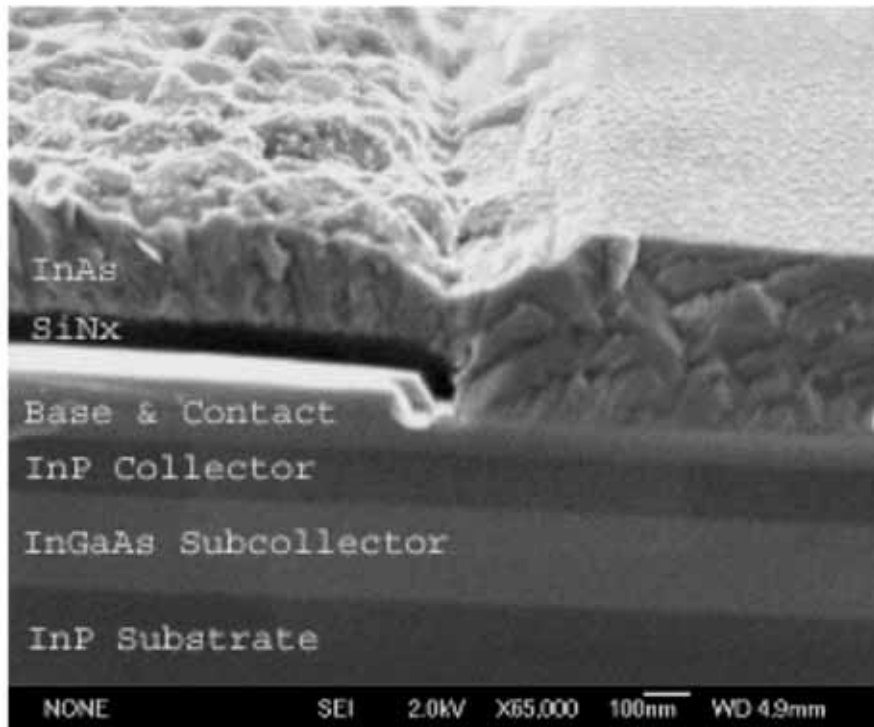
Les applications des HBTs sont similaires aux bipolaires classiques mais ils présentent de meilleures performances en fréquences et en modulation.



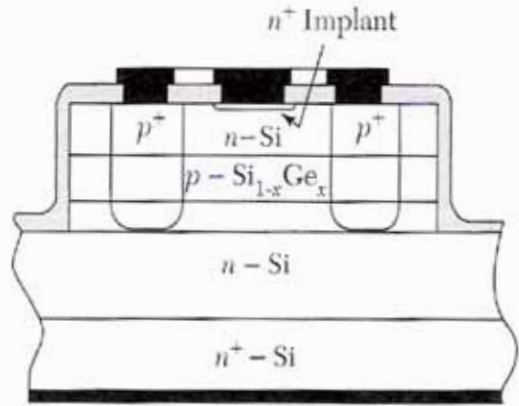
$$\beta_{\text{HBT}} = \beta_{\text{BT}} \exp(E_{gE} - E_{gB})$$

Transistor bipolaire à hétérojonction (HBT)

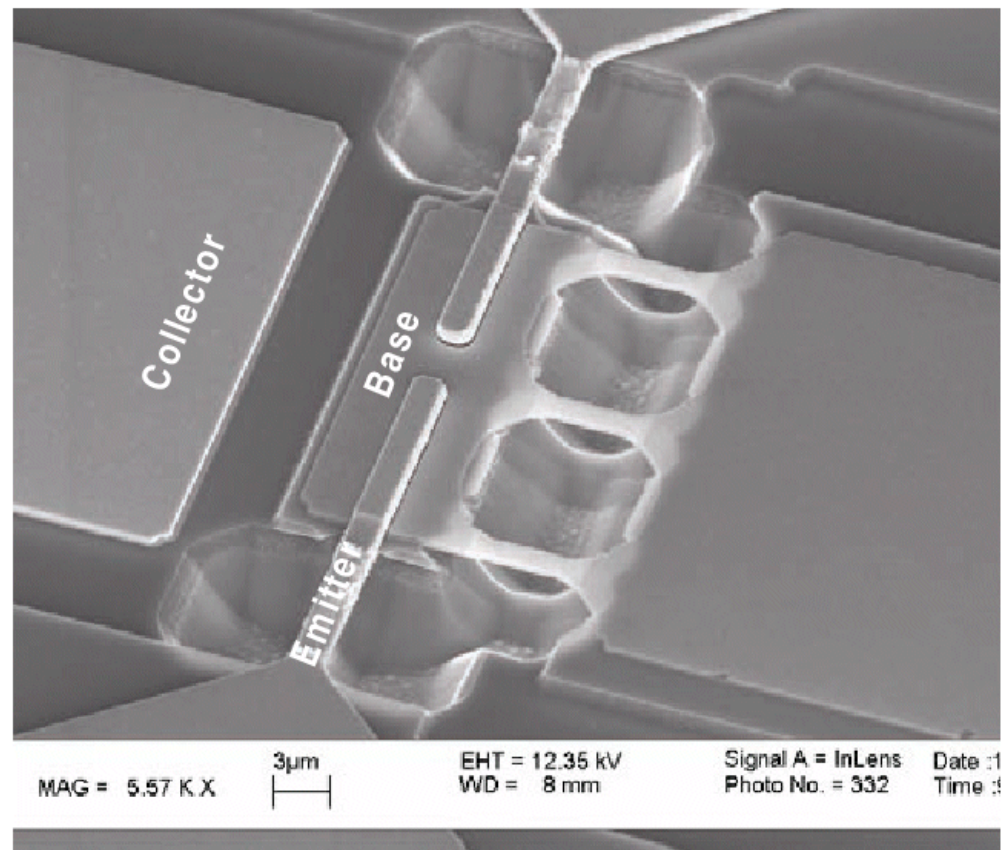
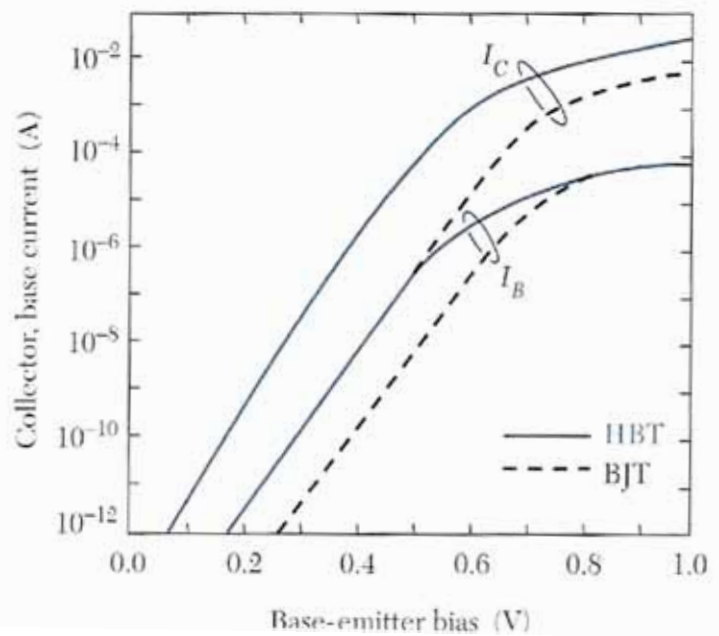
InP/InGaAs/InAlAs



HBT SiGe



(a)



Transistor Bipolaire: fabrication

