

Saphire 232 – Electronique analogique

Physique des semi-conducteurs

3^{ème} partie : les transistors

O. Villain (d'après le cours de B. Journet)

ENS Paris-Saclay, département N. Tesla (ex-EEA)

2023-24

I. Avant le transistor

II. Transistor bipolaire

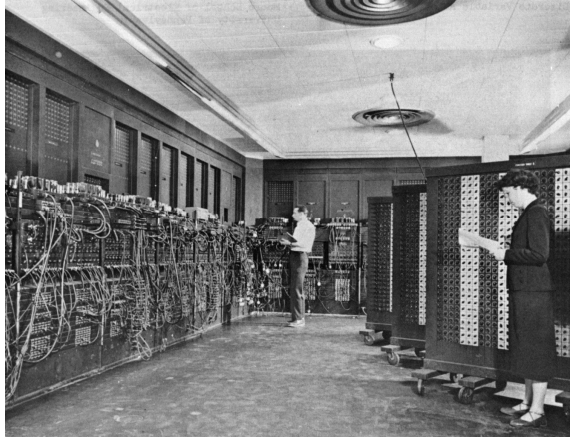
1. Principe de fonctionnement

2. Aspect macroscopique

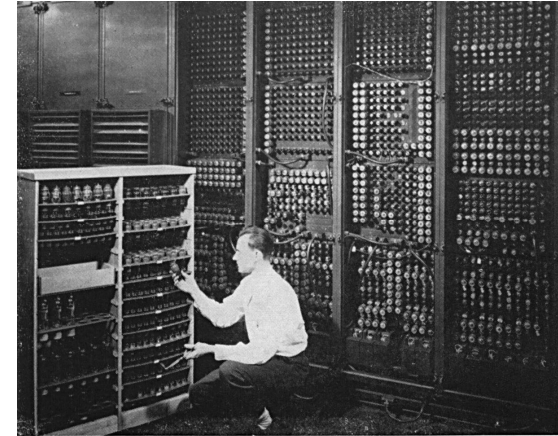
II. Le transistor à effet de champ

Avant le transistor

- 1946-1955 : ordinateurs à tube à vide et commutateurs



L'ENIAC entre 1947 et 1955,
source Wikipedia



Un technicien en train de changer un tube de l'ENIAC,
source Wikipedia

- 1947 : invention des transistors
- milieu des années 50 : utilisation des transistors dans les ordinateurs

Mini-ordinateur PDP-8,
source Wikipedia



- 1958 : invention des circuits intégrés, qui consistent en l'incorporation de nombreux transistors et autres composants électroniques dans un seul fragment de semi-conducteur

Le transistor bipolaire

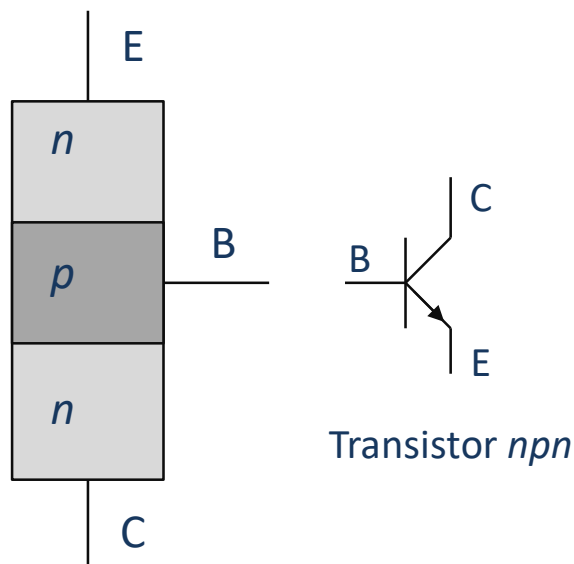
Le transistor a été inventé en 1947 par les chercheurs américains John Bardeen et Walter Brattain. Ils reçurent le Prix Nobel de Physique avec William Shockley en 1956.

Bardeen a reçu le prix Nobel à nouveau en 1975 pour ses travaux sur la supraconductivité.

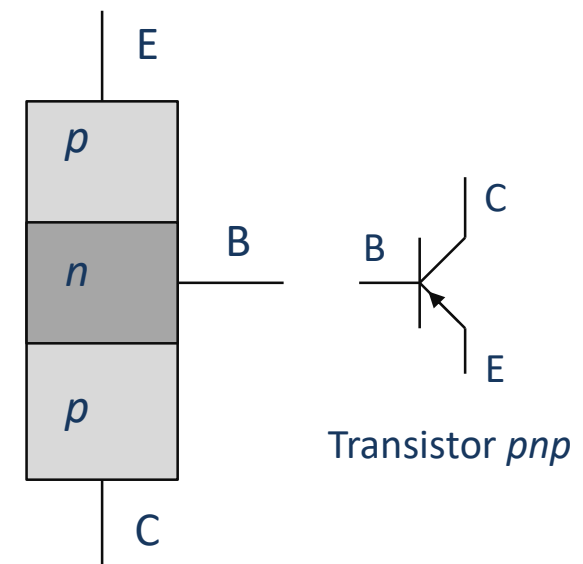
C'est l'élément fondamental de toute l'industrie de l'électronique amenant aux systèmes informatiques, télécommunications, aéronautique, multimédia ...

Aujourd'hui leur taille (plusieurs millions dans 1 cm^2), leur comportement en HF font que définir un modèle analytique simple est impossible ;

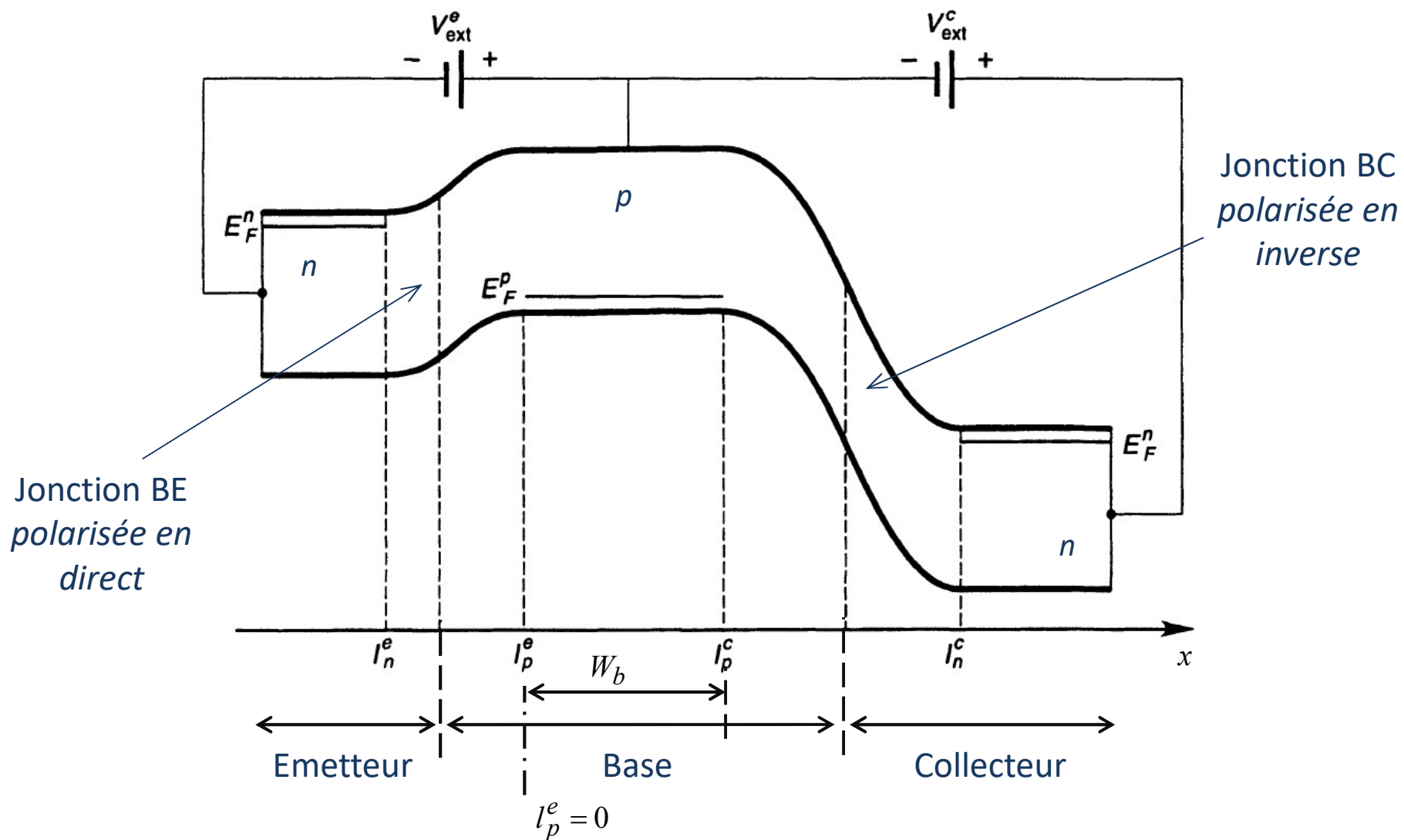
Seuls les modèles numériques sont réellement valables et permettent la conception de nouveaux composants.



E = émetteur
B = base
C = collecteur



Polarisation du transistor



Transistor *npn*

Concentration d'électrons dans la base

On cherche les concentrations des porteurs minoritaires.

Electrons dans la zone p

$$D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{n - n_{base}}{\tau_n} = 0 \quad \underline{D_n \tau_n = (L_n^b)^2} \quad n(x) = F_1 e^{x/L_n^b} + F_2 e^{-x/L_n^b} + n_{base}$$

Cas de la diode

$$n(-W_p) = n_p e^{q_e V_{ext} / k_B T}$$

$$\Rightarrow n(-x_p^e) = n_{base} e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} \quad \text{et} \quad n(l_p^e + W_b) = n_{base} e^{q_e V_{ext}^c / k_B T}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n(0) - n_{base} = \Delta n(0) = n_{base} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right) = F_1 + F_2 \\ n(W_b) - n_{base} = \Delta n(W_b) = n_{base} (e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} - 1) = F_1 e^{W_b / L_n^b} + F_2 e^{-W_b / L_n^b} \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow F_1 = \frac{\Delta n(W_b) - e^{-W_b / L_n^b} \Delta n(0)}{2 \sinh(W_b / L_n^b)} \quad \text{et} \quad F_2 = -\frac{\Delta n(W_b) - e^{W_b / L_n^b} \Delta n(0)}{2 \sinh(W_b / L_n^b)}$$

Concentration d'électrons dans la base

$$\Rightarrow n(x) = \frac{\Delta n(W_b) - e^{-W_b/L_n^b} \Delta n(0)}{2 \sinh(W_b/L_n^b)} e^{x/L_n} - \frac{\Delta n(W_b) - e^{W_b/L_n^b} \Delta n(0)}{2 \sinh(W_b/L_n^b)} e^{-x/L_n} + n_{base}$$

Influence de la largeur de la base ;

$$W_b \gg L_n^b \qquad W_b \rightarrow \infty \qquad n(x) = \Delta n(0) e^{-x/L_n} + n_{base}$$

C'est le résultat d'une simple diode (en fait il n'y a pas de communication entre la base et le collecteur).

Concentration de trous

Formule pour la diode : $p(W_n) = p_n e^{q_e V_{ext} / k_B T}$

Zone n de la jonction BE : $p(l_n^e) = p_{em} e^{q_e V_{ext}^e / k_B T}$

Zone n de la jonction BC : $p(l_n^c) = p_{coll} e^{q_e V_{ext}^c / k_B T}$

Concentrations de trous dans l'émetteur et le collecteur :

$$p(x) = \Delta p(l_n^e) e^{(x-l_n^e)/L_p^e} + p_{em} \quad \text{pour} \quad x < l_n^e < 0$$

$$p(x) = \Delta p(l_n^c) e^{-(x-l_n^c)/L_p^c} + p_{coll} \quad \text{pour} \quad x > l_n^c$$

⇒ Ces concentrations entraînent donc un courant de diffusion.

Détermination des courants

Courant de diffusion d'électrons : $J_n = q_e D_n^b \frac{\partial n}{\partial x}$

Courant de diffusion de trous dans l'émetteur : $J_p = -q_e D_p^e \frac{\partial p}{\partial x}$

Courant de diffusion de trous dans le collecteur : $J_p = -q_e D_p^c \frac{\partial p}{\partial x}$

Courant au niveau de l'émetteur : $I_E = I_{nE} + I_{pE} = A J_n(x=0) + A J_p(x=l_n^e)$

$$I_E = A q_e D_n^b \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{x=0} - A q_e D_p^e \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=l_n^e}$$

Courant au niveau du collecteur :

$$I_C = I_{nC} + I_{pC} = A J_n(x=W_b) + A J_p(x=l_n^c)$$

$$I_C = A q_e D_n^b \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{x=W_b} - A q_e D_p^c \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=l_n^c}$$

Expression des courants

$$I_E = -A \frac{q_e D_n^b n_{base}}{L_n^b} \coth\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) \left[\left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right) - \frac{1}{\cosh(W_b / L_n^b)} \left(e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} - 1 \right) \right]$$

$$- A \frac{q_e D_p^e p_{em}}{L_p^e} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right)$$

$$I_C = -A \frac{q_e D_n^b n_{base}}{L_n^b} \frac{1}{\sinh(W_b / L_n^b)} \left[\left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right) - \cosh\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) \left(e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} - 1 \right) \right]$$

$$+ A \frac{q_e D_p^c p_{coll}}{L_p^c} \left(e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} - 1 \right)$$

Compte tenu de l'orientation de l'axe Ox vis-à-vis des courants ceux-ci sont négatifs !

La jonction BC est polarisée en inverse donc $e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} \ll 1$

⇒ Les deux courants I_C et I_E sont contrôlés par la tension $V_{ext}^e = V_{BE}$

Courant base

Hypothèses :

jonction BC en inverse $e^{q_e V_{ext}^c / k_B T} \ll 1$

épaisseur de la base très faible $W_b \ll L_n^b$

$$\coth\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) = 1 / \tanh\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) \approx \frac{L_n^b}{W_b} \quad \cosh\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) \approx 1 \quad \sinh\left(\frac{W_b}{L_n^b}\right) \approx \frac{W_b}{L_n^b}$$

Courants en valeur absolue

$$I_E = A \frac{q_e D_n^b n_{base}}{W_b} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} \right) + A \frac{q_e D_p^e p_{em}}{L_p^e} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right)$$

$$I_C = A \frac{q_e D_n^b n_{base}}{W_b} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} \right) + A \frac{q_e D_p^c p_{coll}}{L_p^c}$$

Courant base : $I_B = I_E - I_C$

$$I_B = A \frac{q_e D_p^e p_{em}}{L_p^e} \left(e^{q_e V_{ext}^e / k_B T} - 1 \right) - A \frac{q_e D_p^c p_{coll}}{L_p^c}$$

Gain en courant du transistor

Le courant dans la base se comporte comme un courant diode et c'est bien le courant passant dans la jonction BE qui forme une diode.

On définit le gain en courant du transistor $\beta = h_{FE} = \frac{\partial I_C}{\partial I_B}$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{D_n^b n_{base}}{W_b} \frac{L_p^e}{D_p^e p_{em}}$$

$$\boxed{\beta = \frac{n_{base}}{p_{em}} \frac{D_n^b}{D_p^e} \frac{L_p^e}{W_b}} \quad \beta \approx \frac{n_{base}}{p_{em}} \frac{L_p^e}{W_b}$$

Le gain en courant β du transistor dépend de la température par l'intermédiaire des concentrations n_{base} et p_{em} mais aussi de W_b .

Le gain en courant β du transistor dépend aussi de la tension de polarisation inverse V_{CB} par l'intermédiaire de W_b .

I. Transistor bipolaire

1. Principe de fonctionnement

2. Aspect macroscopique

IV. Le transistor à effet de champ

Autres paramètres

Du fait du courant de base, et d'un certain nombre de recombinaisons, le nombre d'électrons qui arrive au collecteur est légèrement inférieur au nombre d'électrons qui entrent au niveau de l'émetteur.

$$\alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad \alpha = 0,99 \quad \beta = 99 \approx 100$$

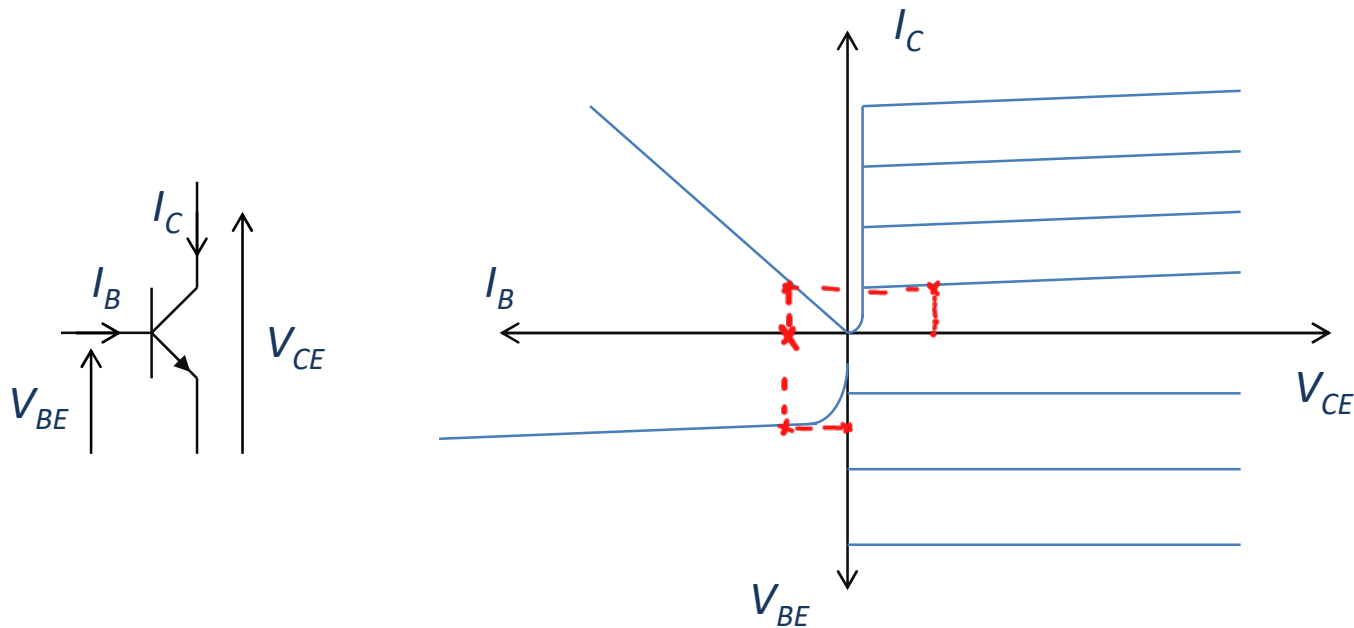
$$I_C = I_{CB0} + \alpha I_E \quad I_{CB0} \text{ est le courant collecteur quand l'émetteur est débranché}$$

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad I_{CE0} \text{ est le courant collecteur quand la base est débranché}$$

Caractéristiques statiques

On peut tracer plusieurs types de caractéristiques statiques :

- montage à base commune
- montage à émetteur commun
- montage à collecteur commun

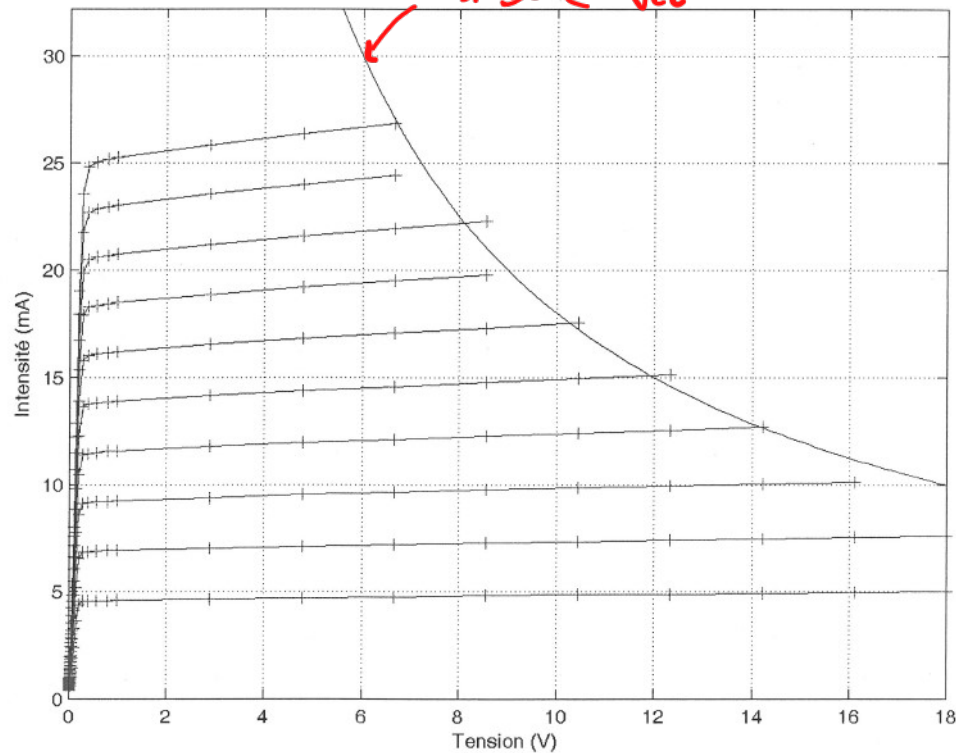


Caractéristiques en montage à émetteur commun

Exemples de caractéristiques en émetteur commun

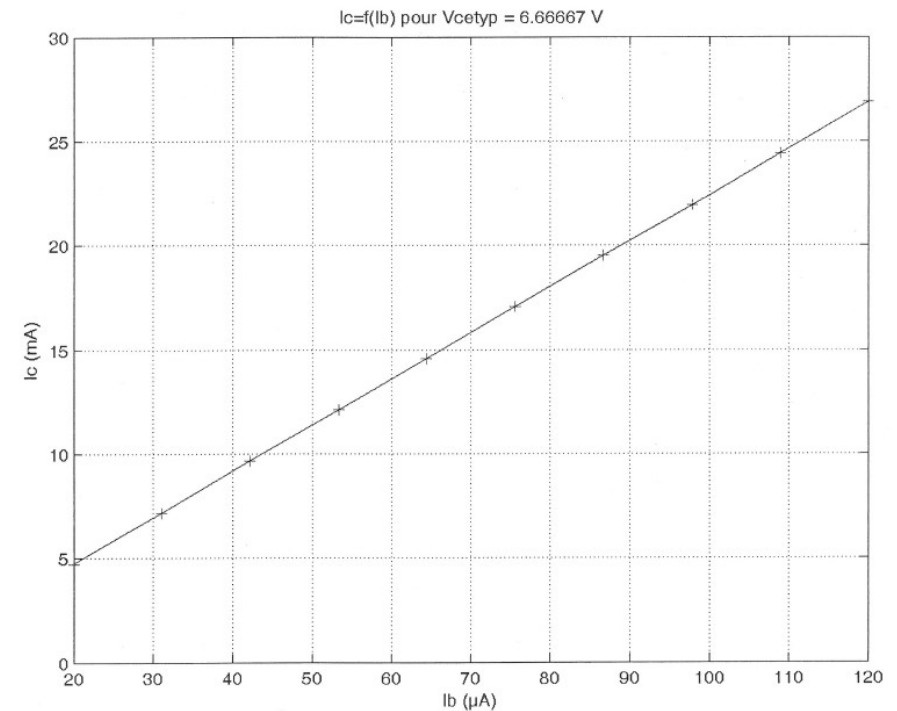
Transistor 2N2219A

On $I_C \times V_{CE} \leq P_{max}$
 $\Rightarrow I_C \leq \frac{P_{max}}{V_{CE}}$



Diff I_B

Caractéristique $I_C(V_{CE})$

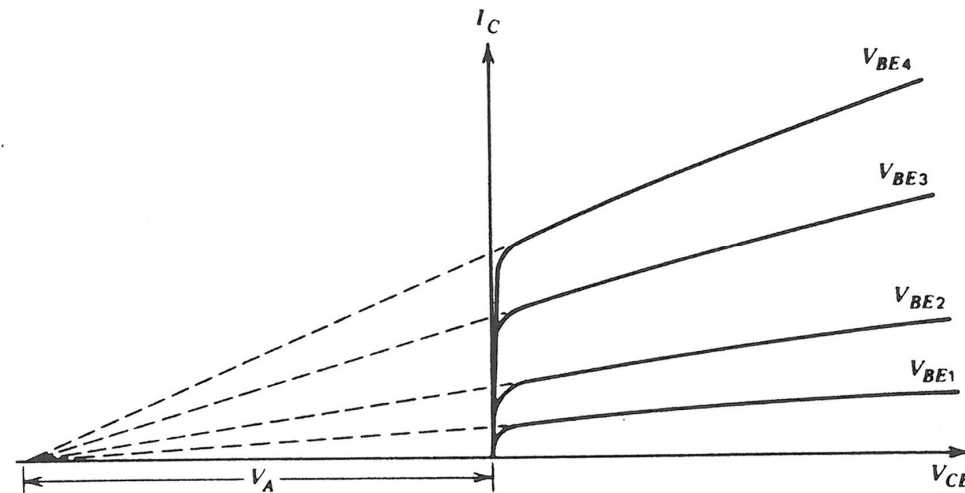


Courbe $I_C(I_B)$

Effet Early

Quand la tension de polarisation V_{CE} augmente la largeur de la ZCE de la diode CB en inverse augmente surtout dans la partie "collecteur" (plus faiblement dopée) mais quand même aussi dans la partie "base".

Donc la largeur de base effective diminue (voir la loi de variation de W avec la tension) donc le gain du transistor augmente un peu, donc le courant de sortie augmente aussi.



$$I_C = \beta \cdot I_B + K \cdot I_B \cdot V_{CE}$$

$$V_A = -\beta / K$$

Schéma équivalent petits signaux

On considère de petites variations autour du point de fonctionnement statique :

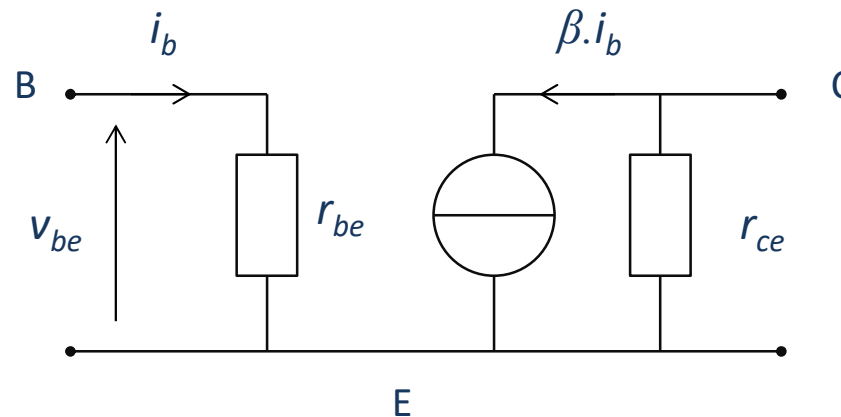
$$i_B = I_{B0} + i_b$$

$$v_{BE} = V_{BE0} + v_{be}$$

$$i_C = I_{C0} + i_c$$

On effectue un développement limité au premier ordre

$$r_{be} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{I_{B0}}$$
$$\left. \frac{\partial i_B}{\partial v_{BE}} \right|_{I_{B0}} = \frac{1}{k_B T} I_{B0}$$
$$r_{be} = \frac{k_B T}{I_{B0}}$$

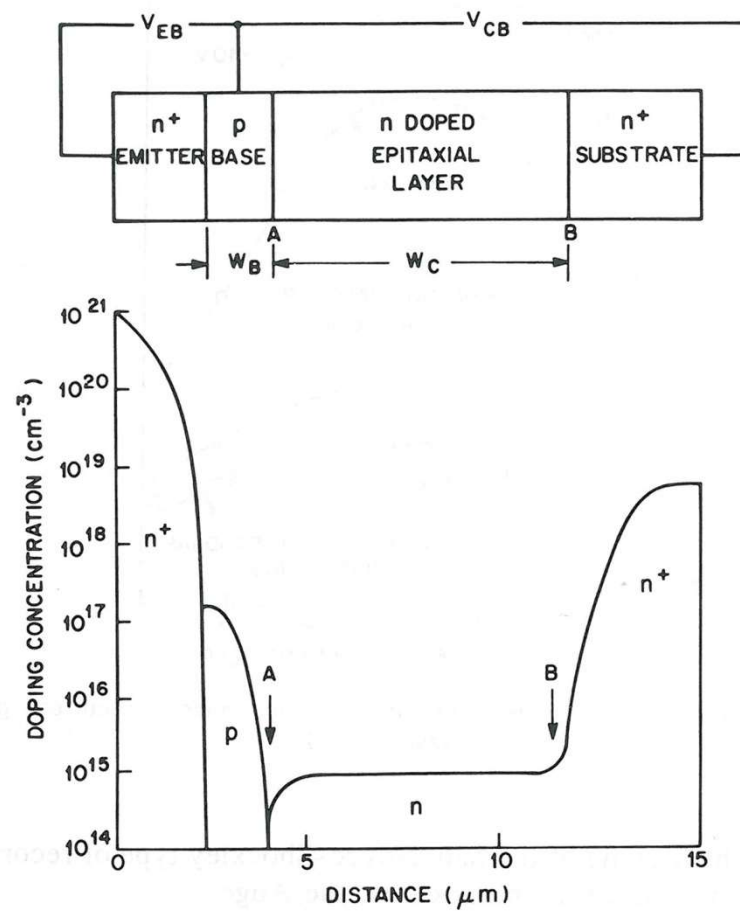


Effet Early
 $r_{ce} \approx 10^4 \text{ à } 10^5 \Omega$

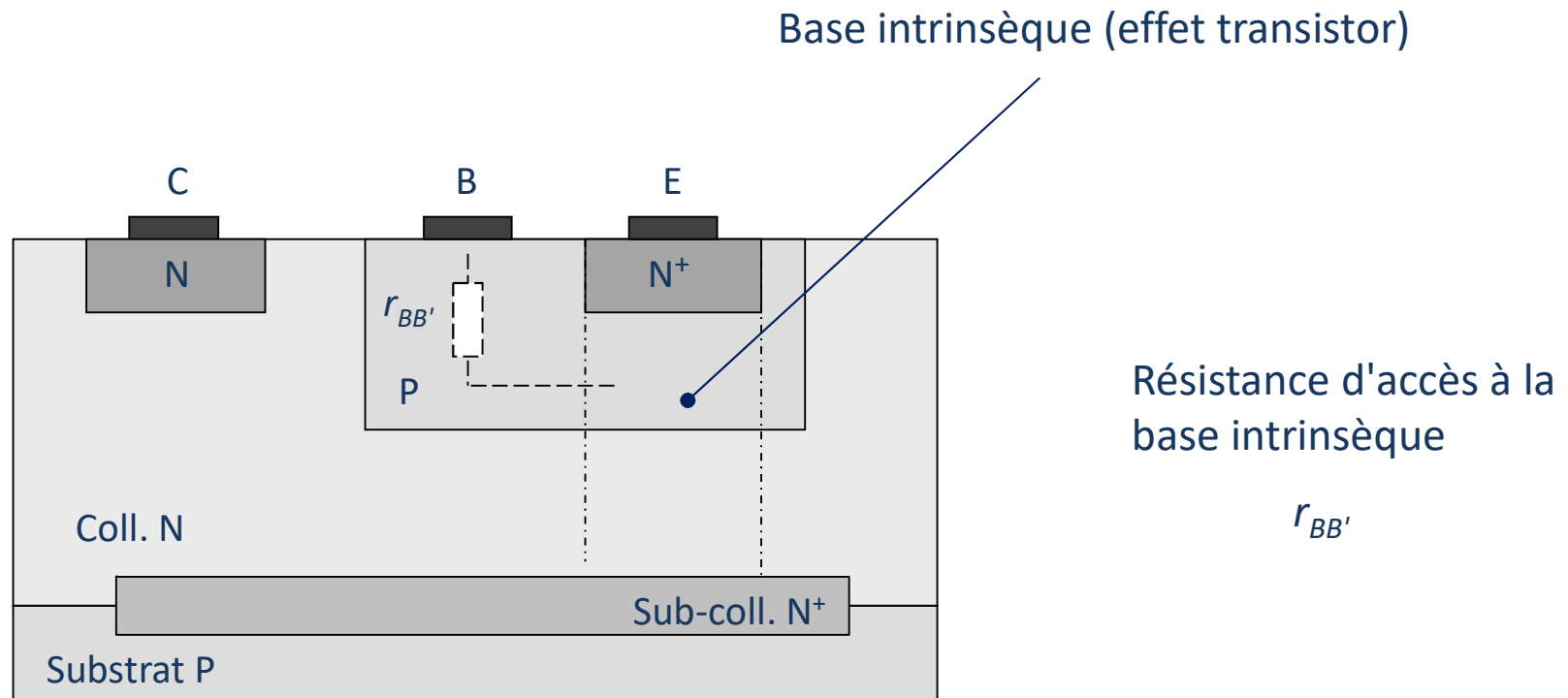
Schéma équivalent simplifié dit de "Giacoletto"

Dopage d'un transistor

Comment réaliser le transistor ?

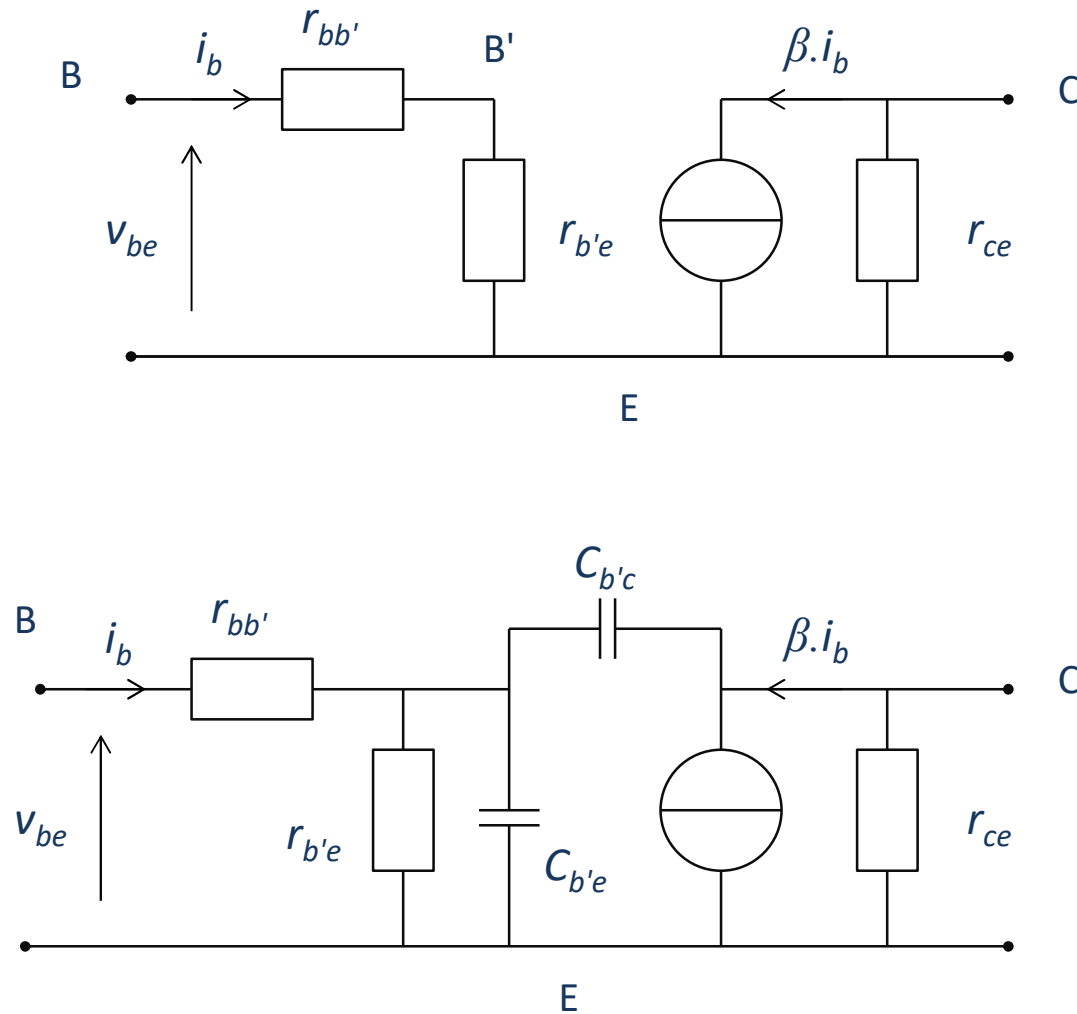


Structure à deux dimensions

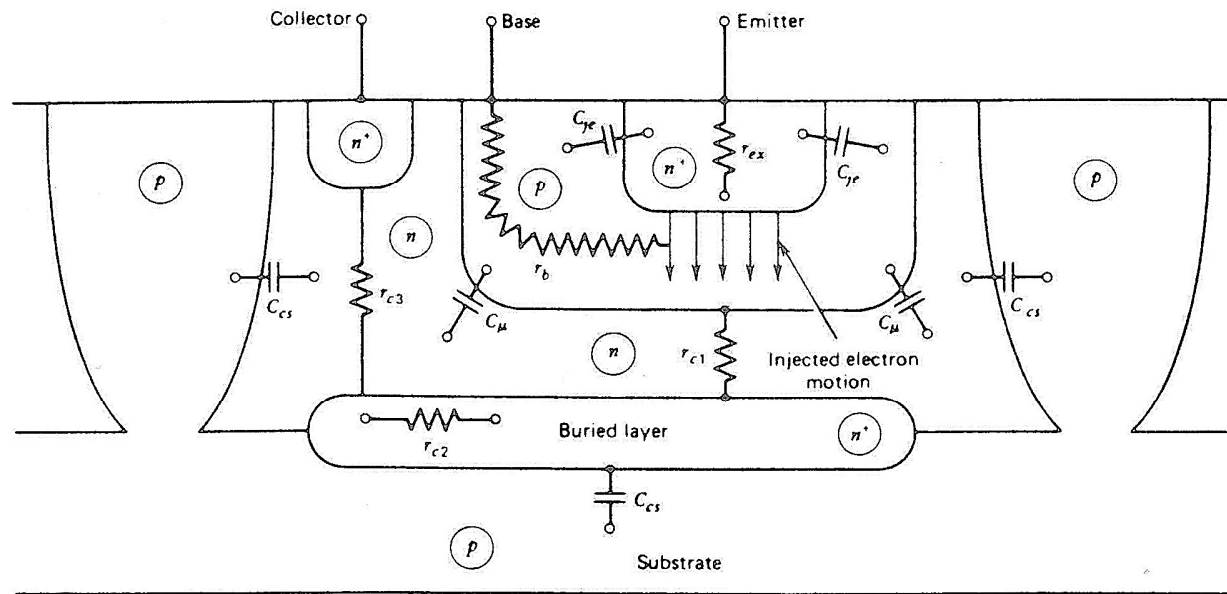


Réalisation en technologie planar

Amélioration du schéma équivalent



Éléments parasites



Éléments parasites dus à la structure et à prendre en compte pour un modèle de simulation

Modèle de simulation

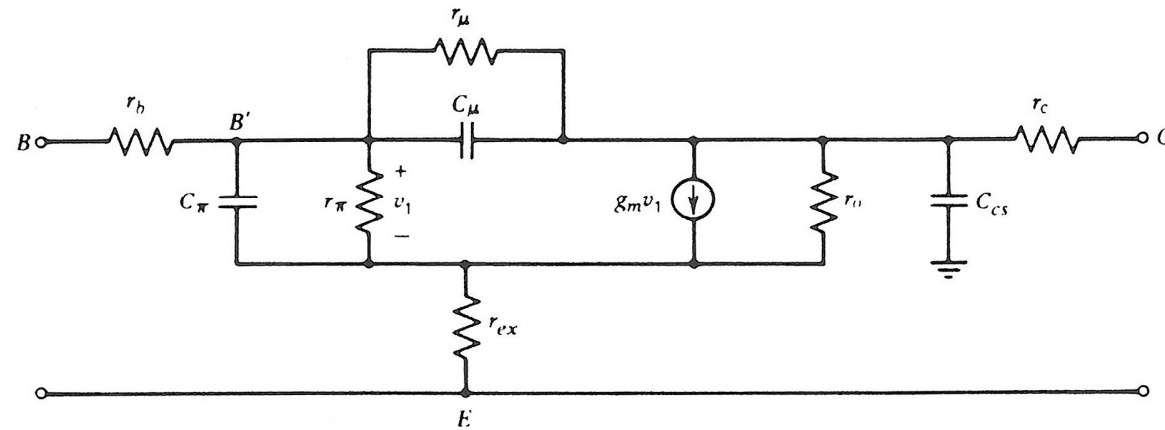
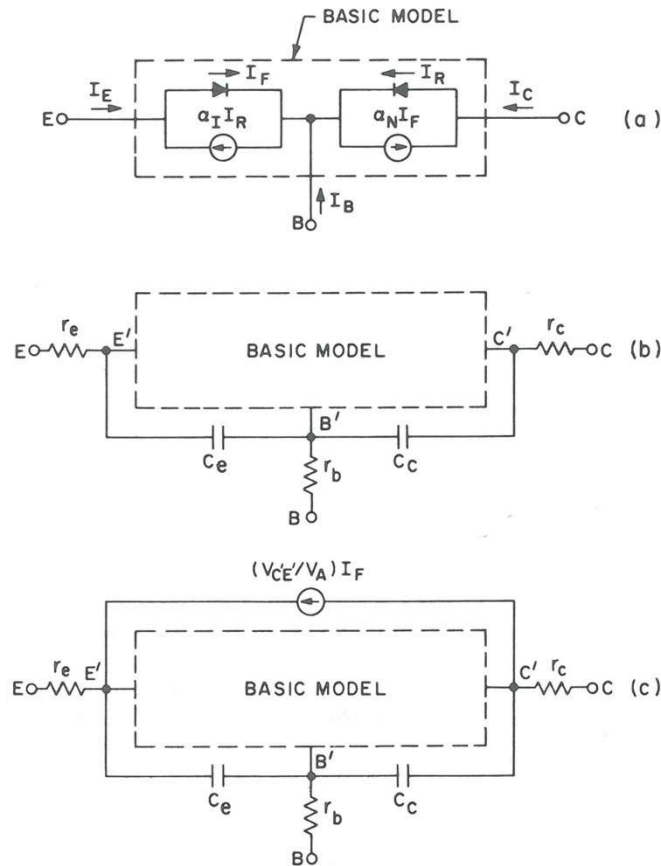


Schéma équivalent complet

Modèle d'Ebers-Moll



$$I_F = I_{F0} \left(e^{q_e V_{EB} / k_B T} - 1 \right)$$

$$I_R = I_{R0} \left(e^{q_e V_{CB} / k_B T} - 1 \right)$$

$$I_E = I_F - \alpha_I I_R$$

$$I_C = I_R - \alpha_N I_F$$

$$I_B + I_E + I_C = 0$$

$$I_E = A_{11} \left(e^{q_e V_{EB} / k_B T} - 1 \right) + A_{12} \left(e^{q_e V_{CB} / k_B T} - 1 \right)$$

$$I_C = A_{21} \left(e^{q_e V_{EB} / k_B T} - 1 \right) + A_{22} \left(e^{q_e V_{CB} / k_B T} - 1 \right)$$

D'où les quatre paramètres du modèle :

$$I_{F0} = A_{11}$$

$$-\alpha_I I_{R0} = A_{12}$$

$$-\alpha_N I_{F0} = A_{21}$$

$$I_{R0} = A_{22}$$

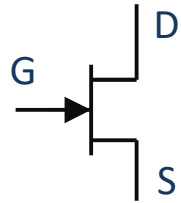
I. Transistor bipolaire

1. Principe de fonctionnement

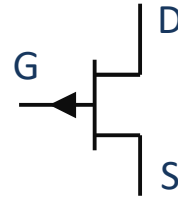
2. Aspect macroscopique

IV. Le transistor à effet de champ

Transistors à effet de champ



Transistor à
canal n



Transistor à
canal p

Le canal est constitué d'une portion de semiconducteur (type n ou p) dont les extrémités sont appelées le *drain* et la *source* (D et S). Une jonction p-n permet de contrôler le passage des porteurs qui sont donc ici les porteurs majoritaires correspondant au type de canal. Pour cette diode une des électrodes est reliée au canal (source) et l'autre à une électrode appelée la *grille* (ou *gate*).

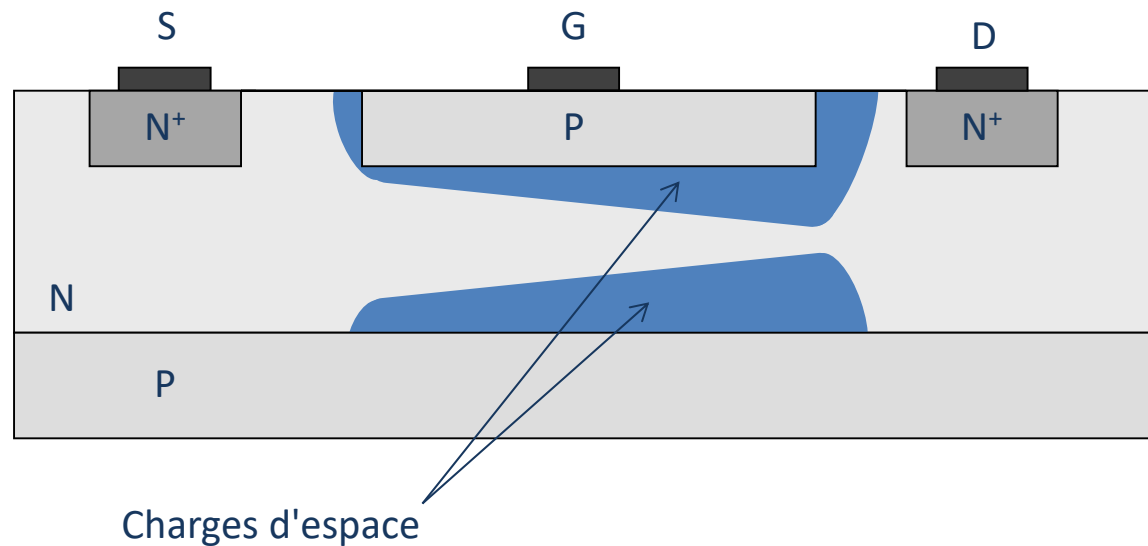
La tension inverse entre grille et source crée une zone de charge d'espace qui rétrécit le canal, et qui diminue le nombre de porteurs disponibles ce qui influe sur le courant drain-source. La commande est une commande en tension.

Conventionnellement les porteurs vont de la source vers le drain donc le sens du courant vis-à-vis de D et S dépend du type de transistor.

Transistor à effet de champ

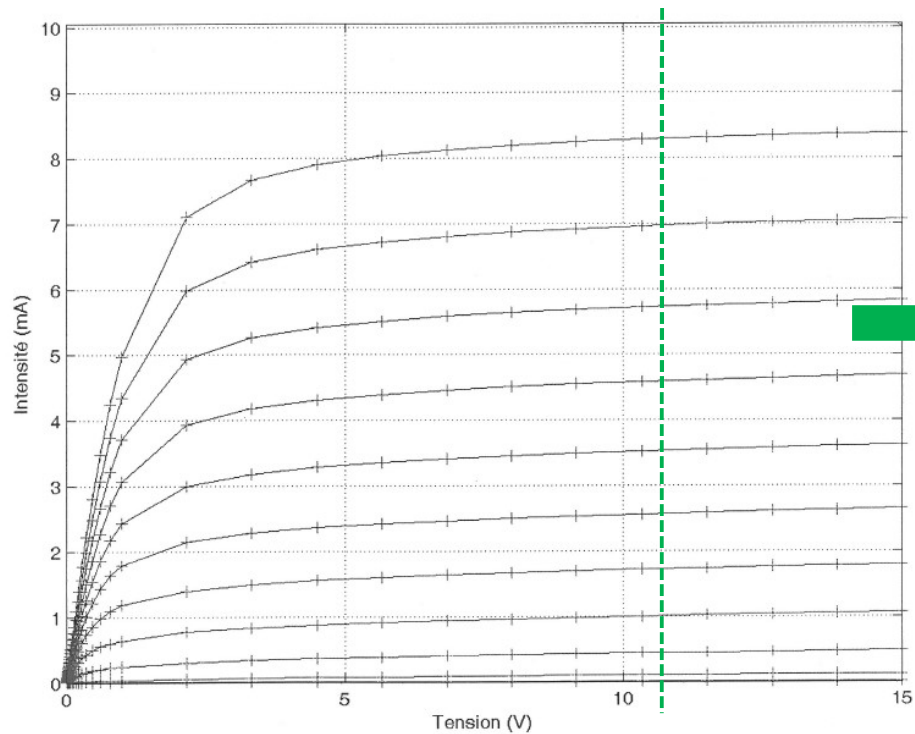
Pour les faibles valeurs de V_{DS} le canal reste assez ouvert et le canal se comporte comme une résistance, celle du canal : donc quand V_{DS} augmente le courant augmente linéairement.

Selon la valeur de V_{GS} il existe une valeur de V_{DS} dite V_{DSsat} pour laquelle la résistance du canal devient assez grande pour que le courant ne change pratiquement plus (saturation).



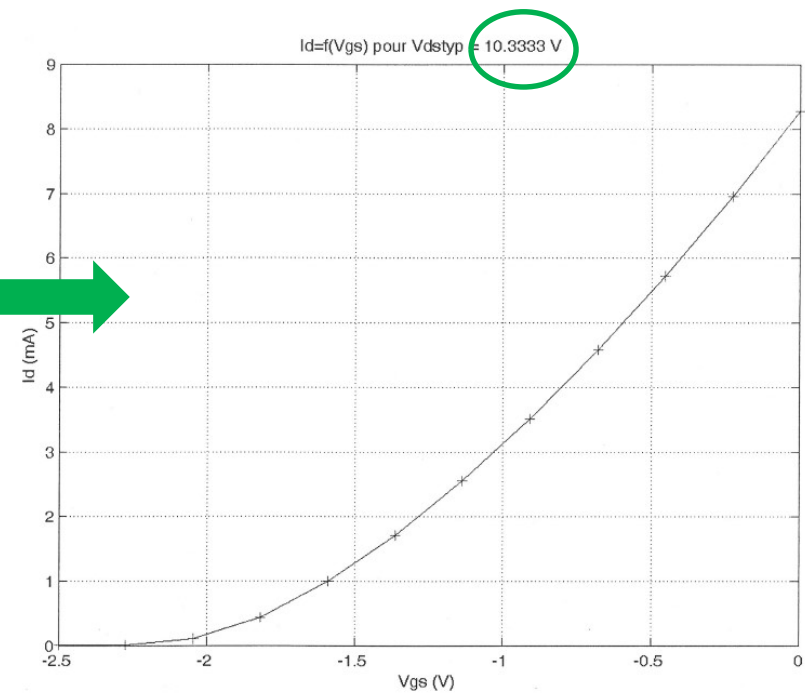
Caractéristiques du transistor à effet de champ

Transistor BF245



Caractéristique $I_D(V_{DS})$

V_{GS0} Tension de pincement



Caractéristique $I_{DSS}(V_{GS})$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS0}} \right)^2$$

Perspectives et bibliographie

Il resterait à parler de :

Jonctions semiconducteur métal

Jonctions semiconducteur isolant (oxyde)

Effets des contraintes

Effets des impuretés

....

Bibliographie

H. Mathieu, *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques*, Dunod.

S. M. Sze, *Physics of semiconductor devices*, Wiley.

J. Blot, *Les transistors*, Dunod.