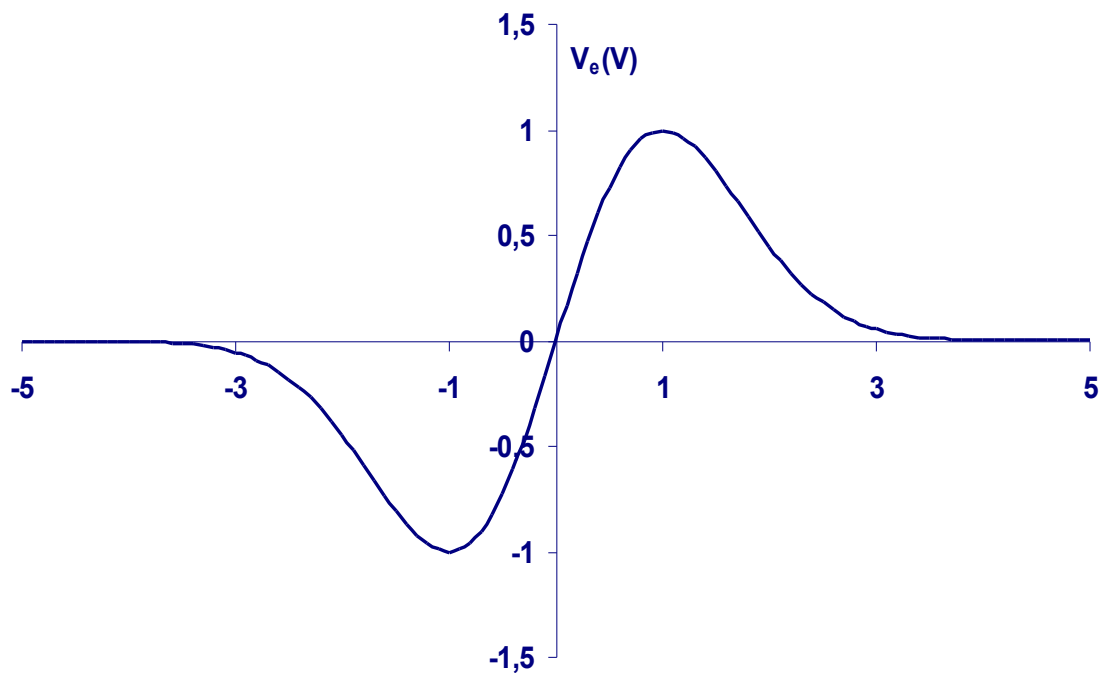
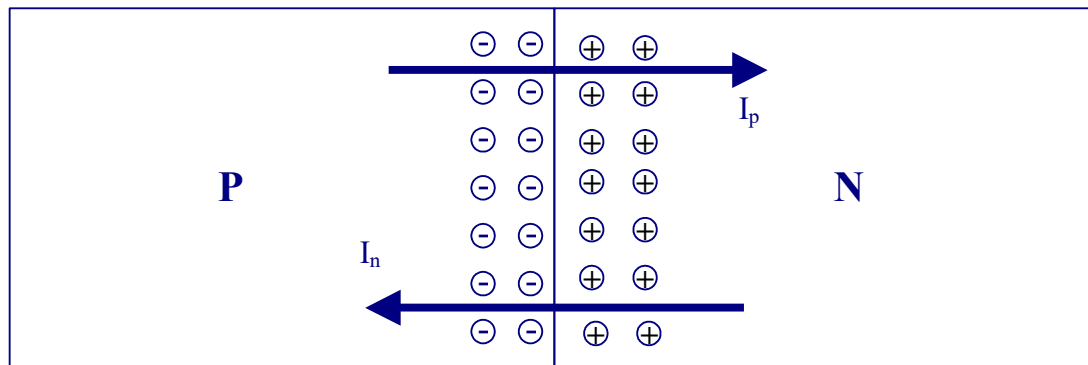


Par Gilbert Gastebois

## 1. La diode

### 1.1 Schémas



Au niveau de la jonction PN, des trous du côté P pénètrent spontanément du côté N et des électrons du côté N pénètrent spontanément du côté P. Ce faisant, le côté P se charge négativement et le côté N positivement.

Cela crée un potentiel électrostatique  $V_e$  qui freine ce transfert. Le potentiel se stabilise quand le passage des trous de P vers N est compensé par le retour libre des trous de N vers P. Même chose pour le passage des électrons de N vers P compensé par le retour de P vers N.

## 1.2 Étude de la jonction sous tension nulle

Nous faisons le raisonnement pour les trous, le raisonnement étant le même pour les  $e^-$ .  
 D'après la statistique de Maxwell-Boltzmann, la probabilité qu'un trou passe le potentiel  $V_e$  est proportionnelle à  $N_p \exp(-eV_e/kT)$   $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$   $T$  en K  
 $N_p$  densité de trous du côté P.

L'intensité correspondante est donc  $I_p = N_p e v \exp(-eV_e/kT)$   $v$  vitesse moyenne de déplacement des trous

En sens inverse, les trous passés du côté N revenant librement vers P donnent un courant d'intensité  $I_n = N_n e v$   $N_n$  densité de trous du côté N.

A l'équilibre,  $I_p = I_n$  donc

$$N_n = N_p \exp(-eV_e/kT)$$

## 1.3 Étude de la jonction sous tension U entre P et N

En imposant une tension U entre P et N, la tension à la jonction est modifiée de U.

On a donc :

$$I_p = N_p e v \exp(-e(V_e - U)/kT) \quad I_n \text{ n'est pas modifié.}$$

$$I_n = N_n e v = N_p e v \exp(-eV_e/kT)$$

$$I = I_p - I_n = N_p e v \exp(-eV_e/kT) (\exp(eU/kT) - 1) \quad \text{On pose } N_p e v \exp(-eV_e/kT) = I_{0p}$$

$$I = I_{0p} (\exp(eU/kT) - 1)$$

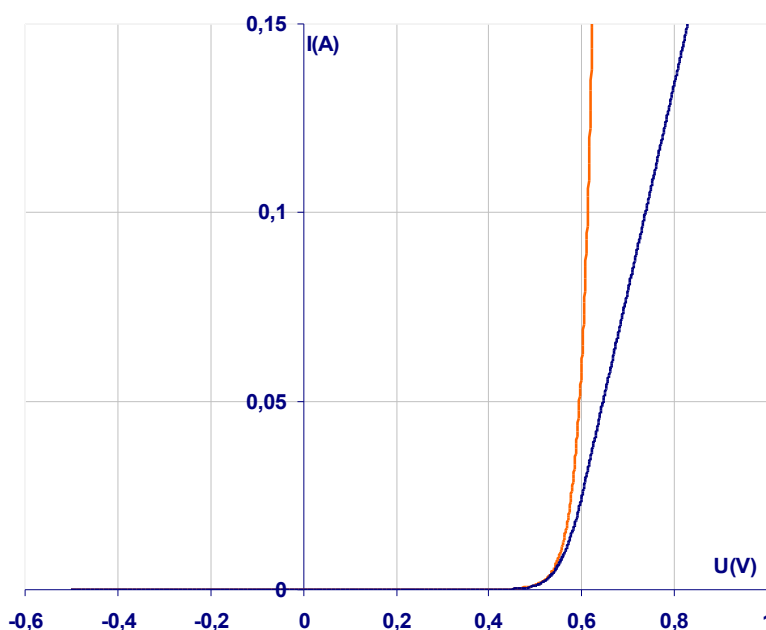
On a la même chose pour les électrons donc l'intensité totale est la somme des deux courants.

$$I = (I_{0p} + I_{0n})(\exp(eU/kT) - 1)$$

$$I = I_0 (e^{U/kT} - 1)$$

Cette formule suppose que la résistance  $r$  de la plaque est nulle (diode idéale). Si on tient compte de  $r$ , il faut tenir compte de la chute ohmique  $rI$  qui diminue U donc on obtient :

$$I = I_0 (e^{(U - rI)/kT} - 1)$$



$$T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$$

$$r = 1 \ \Omega$$

$$I_0 = 2,39 \cdot 10^{-12} \text{ A}$$

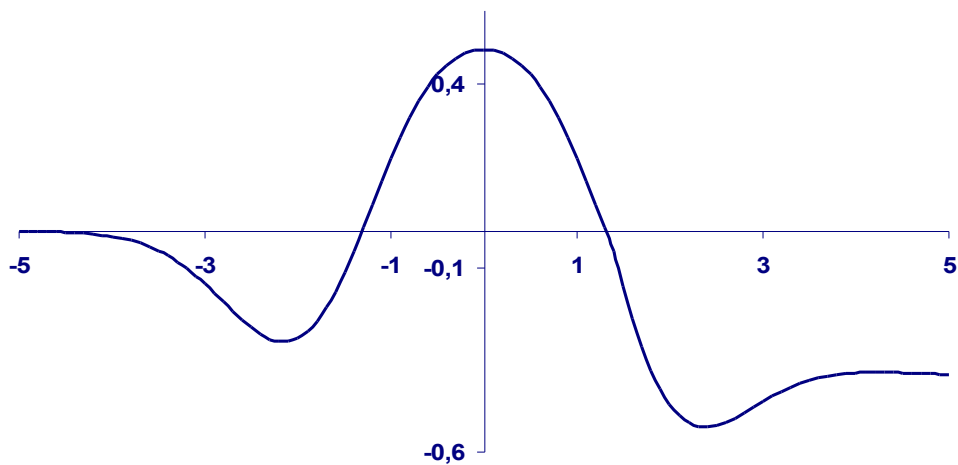
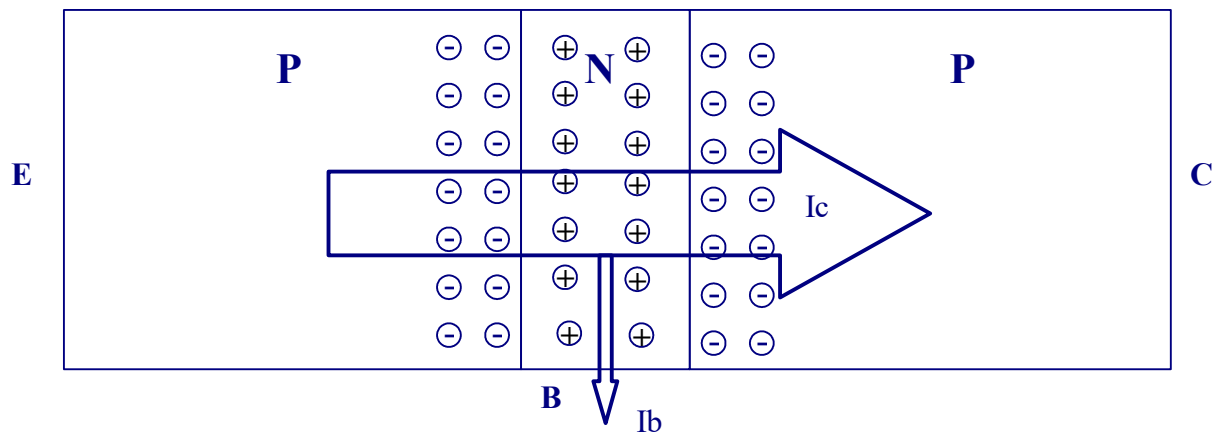
$$I = I_0 (e^{39,5(U - rI)} - 1)$$

La courbe orange représente la caractéristique de la diode idéale ( $r = 0$ )

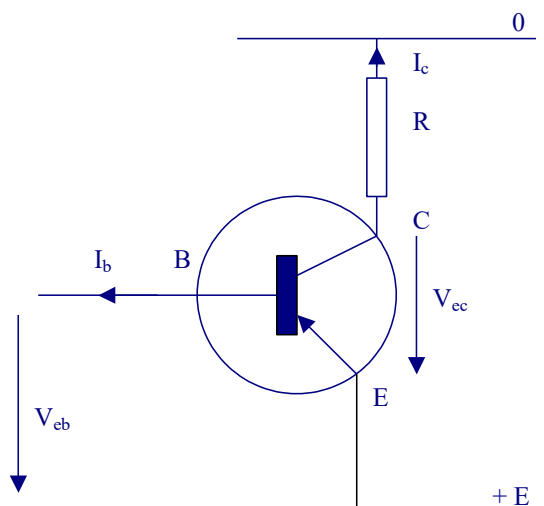
$$I = I_0 (e^{39,5U} - 1)$$

## 2. Le transistor

### 2.1 Schémas



Le transistor PNP est constitué de deux zones P séparées par une fine zone N. La zone P de gauche, l'émetteur E est fortement dopée, la zone N centrale, la base B est faiblement dopée et la zone P de droite, le collecteur C est moyennement dopé.



## 2.2 Gain en courant

La jonction PN entre E et B se comporte comme une diode, quand on impose une tension  $V_{eb}$  suffisante, un fort courant de trous circule entre E et B,  $I_e = I_0 (\exp(eV_{eb}/kT) - 1)$  mais comme la base est très fine, la grande majorité des trous la traverse sans s'annihiler et s'écoule vers le collecteur où ils trouvent un potentiel attractif. Seule une faible proportion participe au courant de base  $I_b$ . On a donc

$$I_b = I_c / \beta \quad (\beta \text{ étant, selon la largeur de la base, compris entre } 50 \text{ et } 200).$$

Le résultat est qu'un faible courant  $I_b$  "produit" un fort courant  $I_c$  qui lui est proportionnel.

Le transistor se comporte alors comme un amplificateur de courant.

$$I_c = \beta I_b \quad (I_e = I_c + I_b = (\beta + 1) I_b)$$

**Remarques :** Si  $I_b$  est nul,  $I_c$  n'est pas strictement nul car la résistance de l'ensemble n'est pas infinie, il y aura un "courant de fuite"  $I_{c0}$  donc une formule plus précise serait

$$I_c = I_{c0} + \beta I_b \quad \text{Cependant dans la pratique } I_{c0} \text{ est très faible et la formule } I_c = \beta I_b \text{ est tout à fait suffisante même pour } I_b = 0 \text{ (transistor bloqué) où } I_c = I_{c0} \simeq 0$$

D'autre part,  $\beta$  n'est pas exactement égal au rapport du nombre de trous qui atteignent le collecteur au nombre captés par la base car il est diminué par les électrons qui passent de la base à l'émetteur, ceux-ci augmentant  $I_b$  sans influencer sur  $I_c$ . On minimise cet effet en dopant faiblement la base ce qui y réduit la densité d'électrons.

## 2.3 Point de fonctionnement du transistor

En émetteur commun, on place une résistance  $R$  entre le générateur de tension  $E$  et le collecteur (cf Schéma). Dans ces conditions, l'intensité  $I_c$  vaudra  $I_c = (E - V_{ce})/R = \beta I_b$

$$I_c = \beta I_b$$

$$V_{ce} = E - \beta R I_b$$

C'est le point de fonctionnement du transistor. On choisit  $I_b$  pour avoir  $V_{ce}$  voisin de  $E/2$



$$\begin{aligned} E &= 10 \text{ V} \\ R &= 20 \Omega \\ V_{eb} &= 0,654 \text{ V} \\ I_b &= 2,5 \text{ mA} \end{aligned}$$

Point de fonctionnement

$$\begin{aligned} I_c &= 250 \text{ mA} \\ V_{ce} &= 5 \text{ V} \end{aligned}$$

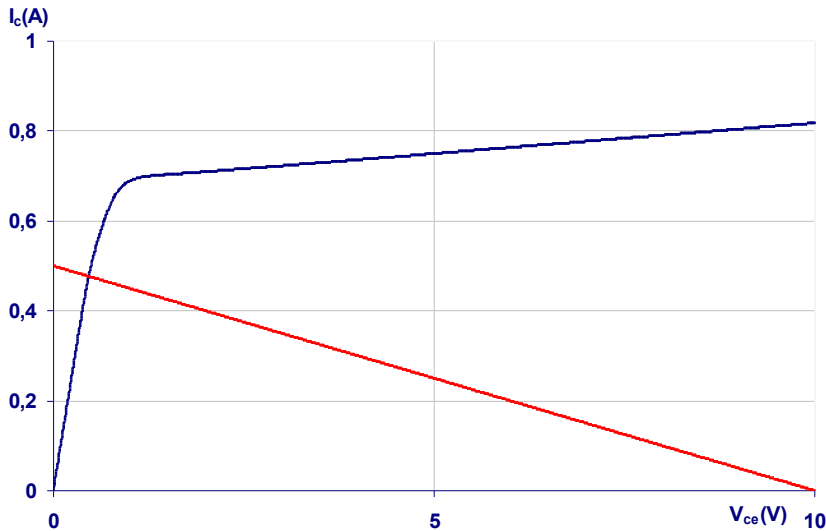
$$\beta = 100$$

## 2.4 Saturation du transistor

Quand on augmente  $V_{eb}$ ,  $I_c$  augmente et  $V_{ce}$  diminue jusqu'à tendre vers 0. A ce moment  $I_c$  ne peut plus augmenter, il atteint un maximum  $I_{c \max}$ .  $I_c$  ne dépend plus de  $I_b$ . On dit que le transistor est saturé.  $V_{ce}$  ne peut pas s'annuler car le transistor a une résistance interne  $r$  et donc à la limite :

$$V_{ce} = r I_{c \max} = E - R I_{c \max}$$

$$I_{c \max} = E / (R + r) \quad V_{ce} = r E / (R + r)$$



### Transistor saturé

$E = 10 \text{ V}$   
 $R = 20 \ \Omega$   
 $r = 1 \ \Omega$   
 $V_{eb} = 0,79 \text{ V}$   
 $I_b = 7,5 \text{ mA}$

Point de fonctionnement

$I_{cmax} = 476 \text{ mA}$   
 $V_{ec} = 0,476 \text{ V}$

## 2.4 Relation $\beta = f(V_{ec})$ . Tension d'Early

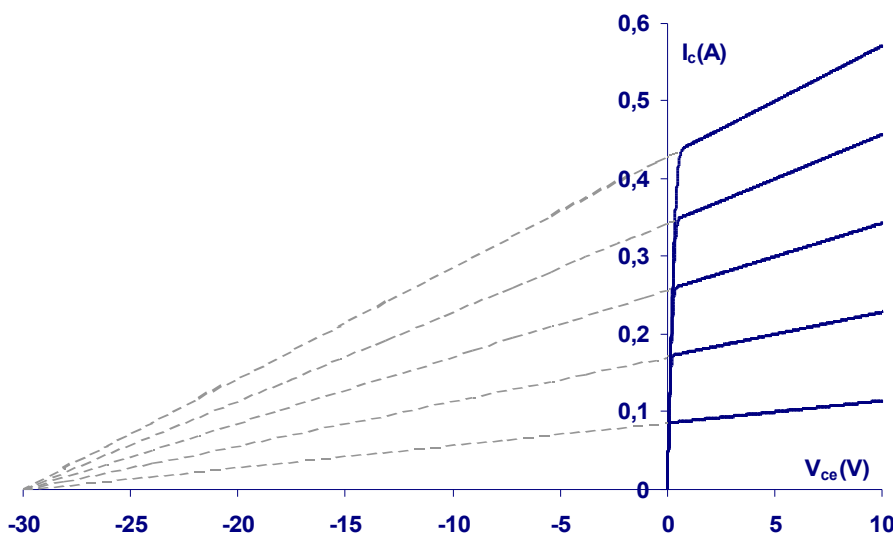
En principe, hors saturation, l'intensité  $I_c$  ne devrait dépendre que de  $V_{be}$  et pas du tout de  $V_{ec}$ , tant que  $V_{ec}$  est suffisant.  $\beta$  devrait être constant ( transistor idéal ).

Cependant l'expérience montre que  $I_c$  augmente un peu avec  $V_{ec}$  et donc que  $\beta$  augmente légèrement avec  $V_{ec}$ , ce qui veut dire que le pourcentage de trous qui traversent la base augmente avec  $V_{ec}$ .

L'explication est que la largeur effective de la base n'est pas exactement la largeur physique. Elle correspond plutôt à la zone contenant des charges +. Cette zone a tendance à rétrécir quand on augmente  $V_{ec}$ , cela réduit la largeur effective de la base et donc augmente le gain  $\beta$ .

Early a proposé la relation suivante (  $V_{ea}$  tension d'Early ) :

$$\beta = \beta_m (1 + V_{ec}/V_{ea})$$
 $V_{ea}$  étant quasiment une constante ( elle dépend légèrement de  $V_{eb}$  ).  
 $\beta_m$  est le gain minimum.



$V_{ea} = 30 \text{ V}$   
 (valeur faible pour mieux visualiser l'effet)  
 $\beta_m = 85,7$

Courbes correspondant à  $I_b = 1 \text{ mA}, 2 \text{ mA}, 3 \text{ mA}, 4 \text{ mA}$  et  $5 \text{ mA}$

En réalité, les droites ne sont pas parfaitement concourantes,  $V_{ea}$  varie un peu avec  $V_{eb}$  donc avec  $I_b$ .

Pour le transistor NPN, tout est identique à condition d'inverser les tensions.