

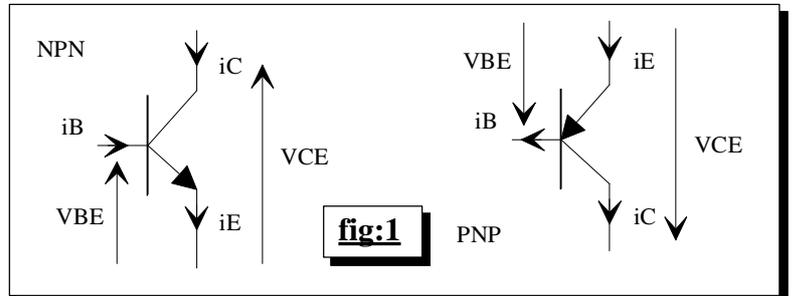
Le Transistor Bipolaire.

TRAN2-TJ

D) Présentation.

Le transistor a été élaboré pour la première fois en 1948. Il est composé de deux jonctions, placées en série, très proches l'une de l'autre et de polarité opposée.

On distingue le transistor NPN, et le transistor PNP, dont voici les symboles et conventions.



Avec les conventions fig:1.

❖ pour un NPN

i_C, i_E, i_B sont positifs. V_{CE}, V_{BE} sont positifs.

❖ pour un PNP

i_C, i_E, i_B sont positifs. V_{CE}, V_{BE} sont négatifs.

Nous allons étudier plus particulièrement le transistor NPN.

Il est constitué d'une jonction NP (Collecteur-Base) et d'une jonction PN (Base-Emetteur). Suivant le mode de polarisation de ces deux jonctions (bloquée = inverse ou passante = directe), quatre modes de fonctionnement du transistor peuvent apparaître:

Jonction collecteur-base	Jonction base-émetteur	Mode de fonctionnement
Inverse	Directe	Normal
Bloquée	Bloquée	Bloqué
Directe	Directe	Saturé
Directe	Inverse	Inverse

Enfin, il existe des relations entre les courants:

I_S : courant de "saturation"

$$\begin{aligned} &❖ i_E = i_C + i_B \\ &❖ i_C = \beta i_B + i_{CEO} \\ &❖ i_C = \alpha i_E + i_{CBO} \text{ avec } \alpha = \beta / (\beta + 1) \text{ et} \\ &i_{CEO} = (\beta + 1) i_{CBO} \\ &❖ i_E = I_S [\text{Exp}(V_{BE} / U_T) - 1] \end{aligned}$$

$$U_T = kT/q = 25\text{mV à } 300\text{K}$$

II) Etude des régimes statique et dynamique.

Etude dans le cas du transistor NPN monté en émetteur commun.

Le montage étant représenté fig:2.

II-1) Etude du régime statique.

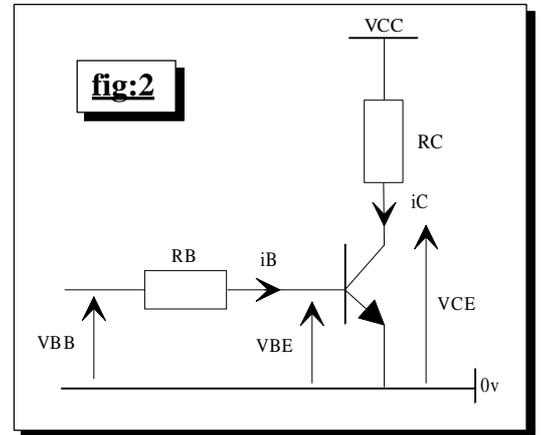
Les équations (lois des mailles pour les mailles d'entrée et de sortie) donnent:

$$1) V_{BB} = V_{BE} + R_B \cdot I_B$$

Soit $I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$ appelée: *Droite d'attaque*

$$2) V_{CC} = V_{CE} + R_C \cdot I_C$$

Soit $I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$ appelée: *Droite de charge*



Le point de fonctionnement (en régime statique) du transistor est ainsi obtenu par intersection de la droite d'attaque avec la caractéristique $I_b = f(V_{be})$ du transistor (utilisation de la caractéristique d'entrée du transistor). On utilise ensuite la caractéristique de transfert ($I_c = f(I_b)$). Enfin la caractéristique de sortie ($I_c = f(V_{ce})$ pour différentes valeurs de I_b) permet par intersection avec la droite de charge, d'obtenir le point de fonctionnement en sortie (V_{ce}).



Exercice: $V_{CC} = 10\text{V}$ $R_C = 360\Omega$ $V_{BB} = 1\text{V}$ pour $R_B = 5\text{k}\Omega$ puis $R_B = 1,4\text{k}\Omega$.

Déterminez graphiquement les points de fonctionnement relatifs à ces deux cas de polarisation (Transistor: 2N2222).

II-2) Etude en régime linéaire: schéma équivalent dynamique.

En régime dynamique (signaux de faible amplitude autour d'un point de fonctionnement fixe appelé point de repos), on peut décrire le comportement d'un transistor à l'aide des paramètres d'un quadripôle. On utilise de préférence les paramètres h (hybrides) et y (admittances).

Paramètres hybrides: (hybride signifie: issu de 2 espèces différentes = mélangé).

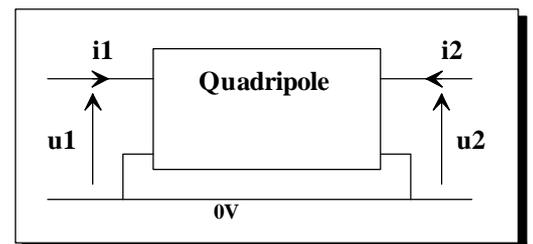
Ces paramètres sont appelés hybrides car ils donnent u_1 et i_2 (une tension et un courant, l'un d'entrée l'autre de sortie) à partir du produit de la matrice des paramètres hybrides et du vecteur formé par i_1 et u_2 (les deux autres grandeurs: courant d'entrée et tension de sortie)

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} i_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

Soit en développant:

$$u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2$$

$$i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2$$



Paramètres admittances y:

Ces paramètres sont appelés ainsi car ils donnent i_1 et i_2 à partir du produit de la matrice des paramètres admittance et du vecteur formé par u_1 et u_2 .

$$\begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$$

Attention les paramètres h et y dépendent du montage (émetteur commun ou base commune, car l'entrée se fait sur la base pour le premier et sur l'émetteur pour le montage base commune). On ajoute donc en indice sur les paramètres h ou y , les lettres e ou b pour indiquer le type de montage.

Le transistor monté en émetteur commun admet alors le schéma équivalent en dynamique (basse fréquence) représenté ci-contre.

Dans ce cas $i_1=i_b$, $u_1= v_{be}$, $i_2=i_c$ et $u_2=v_{ce}$

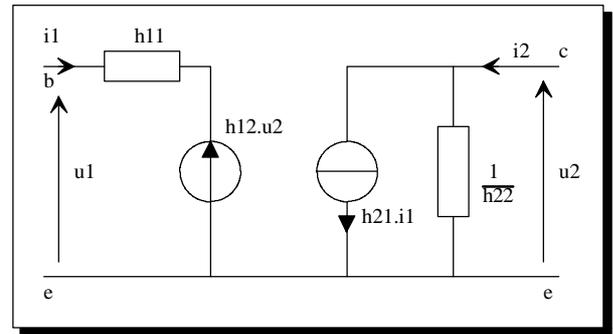
$$v_{be} = h_{11} \cdot i_b + h_{12} \cdot v_{ce}$$

$$i_c = h_{21} \cdot i_b + h_{22} \cdot v_{ce}$$

(Rem: il faudrait alors écrire h_{11_e} , h_{12_e} , h_{21_e} et h_{22_e}), ou:

$$v_{be} = h_{IE} i_b + h_{RE} v_{ce}$$

$$i_c = h_{FE} i_b + h_{OE} v_{ce}$$



En première approximation on néglige souvent $h_{12} \cdot v_{ce}$ devant $h_{11} \cdot i_b$, et $h_{22} \cdot v_{ce}$ devant $h_{21} \cdot i_b$. Le schéma équivalent du transistor correspond alors au schéma simplifié en basse fréquence représenté fig:3.

Ce schéma est défini par le système d'équation:

$$\begin{cases} v_{be} = h_{11} \cdot i_b \\ i_c = h_{21} \cdot i_b \end{cases}$$

❖ le paramètre h_{11} dépend du courant de polarisation I_C :

$$h_{11} = \frac{h_{21} U_t}{I_C}$$

$$U_t = kT/q = 25\text{mV à } 300\text{K}$$

I_C : Courant de repos

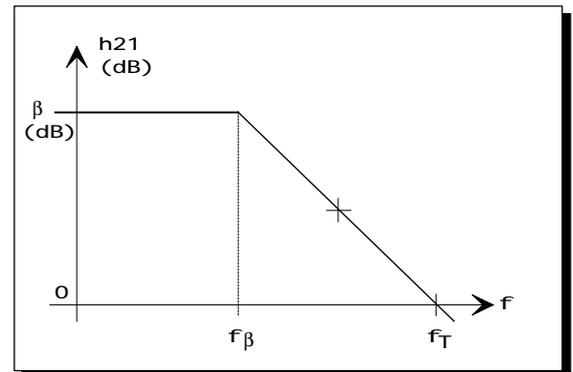
❖ le paramètre h_{21} n'est pas constant avec la fréquence. A partir d'une fréquence de coupure appelée f_β , il décroît de -20 dB/décade.

$$\text{Soit: } h_{21} = \frac{\beta}{1 + jf / f_\beta}$$

f_β est connu par l'intermédiaire de f_T (fréquence de transition) qui est une donnée constructeur.

$$h_{21} = 1 \text{ pour } f = f_T, \text{ soit } f_T = \beta f_\beta$$

Exemple: pour le 2N2222 $\beta_{\min} = 75$ et $f_{T\min} = 250$ MHz d'où $f_\beta = 3,3$ MHz .



II.3) Etude en régime de commutation.

❖ Le point de fonctionnement se trouve sur la courbe $I_C=f(V_{CE})$ pour $I_B=0$: c'est la zone de blocage du transistor. (Blocage $V_{BE} < 0,6\text{v}$)

❖ Le point de fonctionnement est en dessous de βi_B : c'est la zone de saturation du transistor. (Saturation $I_C < \beta_{\min} i_B$)



Repérez, sur le document caractéristique d'un transistor bipolaire 2N2222, les deux zones caractérisant le fonctionnement en régime de commutation.

II.3) Bilan énergétique.

La puissance totale dissipée dans un transistor est la somme des puissances dissipées au niveau de

la caractéristique d'attaque (puissance d'entrée: P_e) et au niveau de la caractéristique de charge (puissance de sortie: P_s). Dans la plupart des applications, la puissance dissipée en sortie est bien plus grande que celle dissipée en entrée!

$$P_{tot} = P_e + P_s = V_{BE}.I_B + V_{CE}.I_C \approx V_{CE}.I_C$$

Or la puissance que peut dissiper un transistor est limitée. Cette limitation est due à l'élévation de la température du silicium qui ne peut dépasser une valeur maximale, dite température maximale de jonction. Cette grandeur est une donnée caractéristique de chaque transistor. Cependant elle se situe le plus souvent dans la plage:

$$125^\circ\text{C} \leq T_{jmax} \leq 200^\circ\text{C}$$



Calculez la puissance totale dissipée dans le transistor 2N2222, pour le premier point de fonctionnement précédemment défini ($R_B=5\text{k}\Omega$) et vérifiez que $P_{tot} \approx V_{CE}.I_C$

Tracez sur le document caractéristique d'un transistor bipolaire $I_c=f(V_{ce})$, la courbe d'isopuissance maximale du transistor 2N2222: hyperbole de dissipation maximale.

Conclure sur le fonctionnement du transistor en régime de commutation.

Dans le cas où la température de jonction, calculée avec les paramètres de l'application dépasse la température maximale de jonction autorisée pour le semi-conducteur, il est nécessaire d'utiliser un dissipateur de chaleur appelé aussi refroidisseur ou radiateur, afin d'améliorer le transfert des calories de la jonction vers l'air ambiant (diminution de la résistance thermique entre la jonction et l'air ambiant R_{thja}):

$$T_j = T_j - T_{amb} = R_{thja}.P_{tot} \quad \text{avec } R_{thja} \text{ en K/W ou en } ^\circ\text{C/W}$$

Les performances thermiques des refroidisseurs dépendent de la conductivité thermique de la matière utilisée (le plus souvent de l'aluminium), des dimensions de la surface, de la masse, de la couleur et de la position de montage. Ces performances sont caractérisées par la **résistance thermique** R_{thra} du refroidisseur.

C'est cette valeur R_{thra} qu'il faut déterminer à partir des données de l'application et en utilisant la formule:

$$R_{thra} = \frac{T_{jmax} - T_{amb}}{P} - (R_{thjc} + R_{thcr})$$

P: Puissance totale que doit dissiper le transistor

T_{jmax} : Température de jonction maximale en $^\circ\text{C}$, donnée par le fabricant du semi-conducteur (à réduire de 20 à 30 $^\circ\text{C}$ comme coefficient de sécurité)

T_{amb} : Température ambiante en $^\circ\text{C}$ (à augmenter de 10 à 30 $^\circ\text{C}$ pour tenir compte de la radiation du refroidisseur)

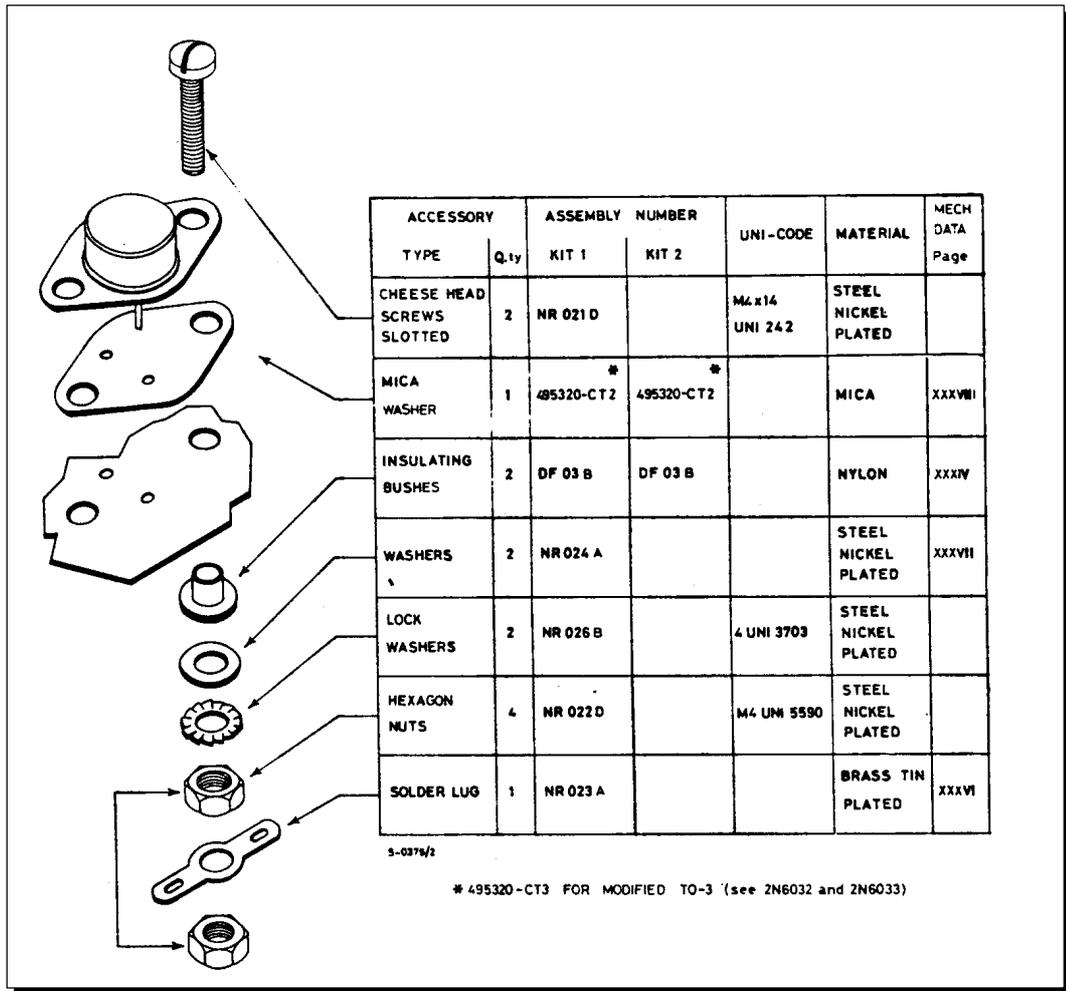
R_{thjc} : Résistance thermique jonction/boîtier (case), donnée par le fabricant du semi-conducteur, en $^\circ\text{C/W}$ ou en K/W

R_{thcr} : Résistance thermique boîtier/refroidisseur. Cette résistance dépend du montage du transistor sur le refroidisseur.

Rthra: Résistance thermique du refroidisseur.

Pour un boîtier TO3, voici quelques valeurs caractéristiques de Rthcr:

- ❖ Montage à sec, sans isolation: $0,05^{\circ}\text{C}/\text{W} \leq R_{thcr} \leq 0,2^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- ❖ Montage avec pâte thermique, sans isolation: $0,005^{\circ}\text{C}/\text{W} \leq R_{thcr} \leq 0,1^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- ❖ Montage avec mica (0,05 mm) et pâte thermique: $0,4^{\circ}\text{C}/\text{W} \leq R_{thcr} \leq 0,9^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- ❖ Montage avec entretoise en oxyde d'aluminium et pâte thermique: $0,2^{\circ}\text{C}/\text{W} \leq R_{thcr} \leq 0,6^{\circ}\text{C}/\text{W}$



Exemple: Un transistor 2N3055 doit dissiper 40 W, sous une température ambiante de 25°C. Le montage sur le refroidisseur s'effectue avec pâte thermique et isolation mica (0,05 mm). Les données du fabricant relatives au 2N3055 sont:

$$T_{jmax} = 200^{\circ}\text{C} \quad \text{et} \quad R_{thjc} = 1,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Détermination de la résistance thermique maximale du refroidisseur nécessaire:

$$R_{thra} = \frac{T_{jmax} - T_{amb}}{P} - (R_{thjc} + R_{thcr})$$

avec $T_{jmax} = 200 - 20 = 180^{\circ}\text{C}$ (par sécurité)

$$T_{amb} = 25 + 20 = 45^{\circ}\text{C}$$

$$R_{thcr} = 0,9^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

$$R_{thra} = 0,975^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

Ce refroidisseur peut être réalisé en profilé extrudé SK 30 (Fischer Elektronik), de longueur supérieure à 75 mm.

III. Résultats des principaux montages linéaires.

Les principaux montages et leurs résultats (émetteur commun, collecteur commun et base commune) figurent sur la page "Comparaison des Trois Montages Fondamentaux".

IV. Association de transistors.

Il existe deux associations principales qui permettent l'augmentation du rapport en courant $\beta = I_C/I_B$:

a) Montage darlington: (2 transistors de même nature).

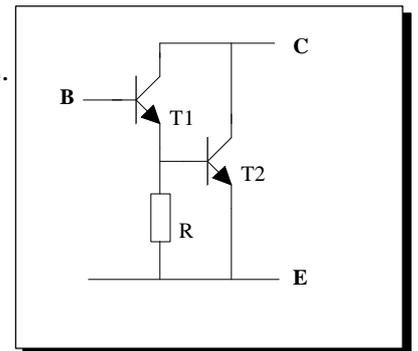
Le transistor équivalent est de même nature que les deux transistors.

Son gain β est égal à :

$$\beta = \beta_1 + \beta_2(\beta_1 + 1) \approx \beta_1\beta_2.$$

Mais, il a une tension V_{BE} équivalente de 2 V_{BE} .

La résistance R évite que le courant de fuite de T1 ne soit amplifié par T2, lorsque l'ensemble est bloqué, et permet l'amélioration de la commutation (passage de la conduction au blocage) par évacuation des charges stockées dans la base de T2.



b) Montage à source contrôlée: (2 transistors de nature différente).

La nature du transistor équivalent est du même type que celui du transistor de commande (T1).

Son gain β est égal à :

$$\beta = \beta_1 + \beta_2\beta_1 \approx \beta_1\beta_2$$

Par contre, la tension V_{BE} équivalente est égale à un V_{BE} , uniquement.

La résistance R assure un bon blocage de T2.

