

# LE TRANSISTOR

## 1) Structure

Le transistor se compose de deux semi-conducteurs d'un certain type séparés par une très fine lamelle de semi-conducteur de type opposé.

On obtient donc soit un transistor PNP, soit un transistor NPN (figure 1).

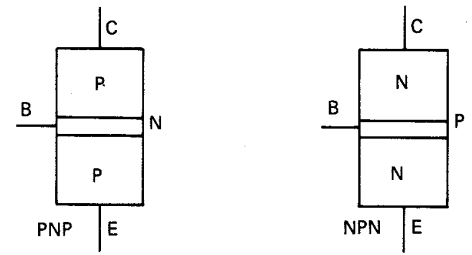


Fig. 1

## 2) Présentation

### a) Le transistor allié (figure 2)

Obtenu par fusion rapide de 2 billes d'indium sur un semi-conducteur dopé N. La fusion est mal contrôlée. Employé en grand public. Bon marché. (Abandonné).

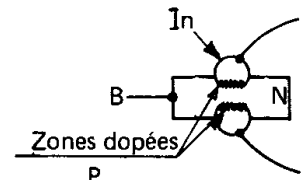


Fig. 2

### b) A jonction tirée

Obtenu par tirage d'un monocristal avec agent dopant introduit en temps utile en surface du bain. Dérivée: la structure Mésa.

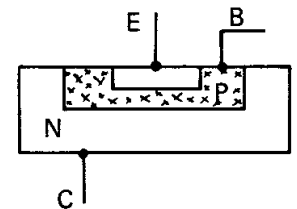


Fig. 3

### c) Structure planar (figure 3)

Cette structure s'obtient par diffusion à l'aide d'un système de masques. La diffusion est bien contrôlée. On obtient des semi-conducteurs professionnels reproductibles sans trop de dispersion.

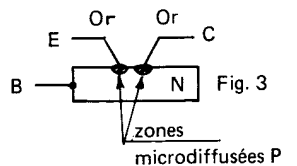


Fig. 4

### d) Le transistor à pointes

Totalement abandonné (figure 4).

## 3) Fonctionnement

Le transistor se présente comme 2 diodes en opposition. Chaque diode polarisée en direct conduira normalement. Chaque diode polarisée en inverse s'opposera au passage du courant.

Si on laisse en l'air le point milieu des 2 diodes (la **base**), et que l'on applique une tension entre les 2 connexions extrêmes (dites **collecteur** et **émetteur**), il ne passera aucun courant puisque l'une des deux diodes sera polarisée **en inverse**.

**Nota:** Le transistor NPN étant le plus répandu, nous raisonnerons toujours sur ce type, sachant que pour un PNP, il suffira d'inverser tous les sens des tensions et des courants.

Si l'on polarise la jonction base-émetteur dans le sens passant, elle sera traversée par un courant  $I_B$  (courant de base).

Mais on s'aperçoit qu'il passe un courant collecteur infiniment plus grand que le courant de base. C'est ce que l'on appelle **l'effet transistor**.

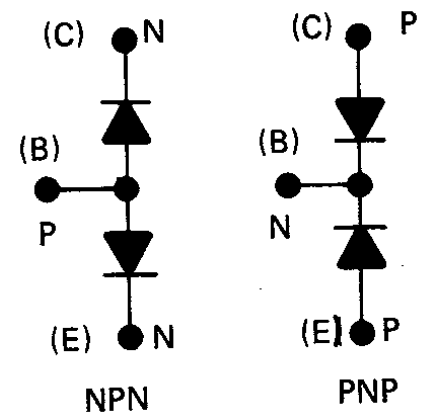


Fig. 5

### Explication :

Dans la figure 6, mettons initialement le curseur du potentiomètre P au potentiel d'émetteur: la jonction base-émetteur ne conduit pas (excepté le courant de fuite).

Lorsque l'on augmente progressivement la tension de base, on voit apparaître un courant  $I_B$  lorsque la tension base-émetteur est de l'ordre de 0,5 V. A ce moment apparaît un courant de collecteur.

Ceci s'explique par le fait que la base est très peu épaisse et très peu dopée. Elle est envahie par des

électrons qui ont beaucoup de difficultés à se déplacer vers l'alimentation de base.

Les électrons sautent la barrière de potentiel de la diode base-émetteur polarisée en inverse et produisent un courant collecteur qui peut être **10 à 500** fois supérieur au courant de base.

( notion de gain en courant :  $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \beta$  )

La jonction base-émetteur se comporte toujours en diode ; autrement dit, si le courant de base augmente dans de fortes proportions, la tension de base n'augmente pratiquement pas.

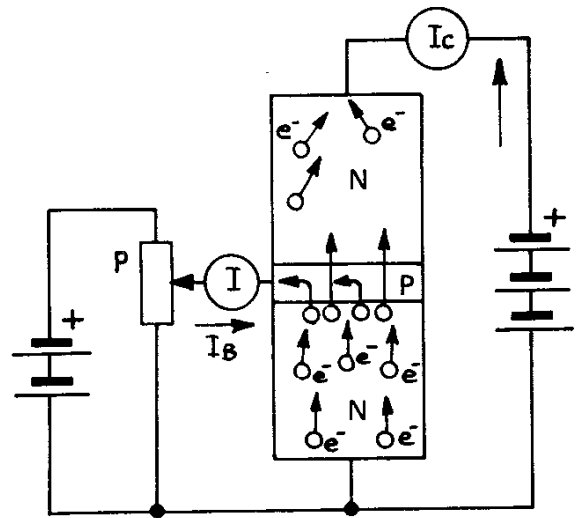


Fig. 6

Il est à noter que si l'on réalise le montage de la figure 7 (qui correspond à la structure du transistor) avec des diodes séparées, il sera strictement impossible d'obtenir un courant à travers la diode D2.

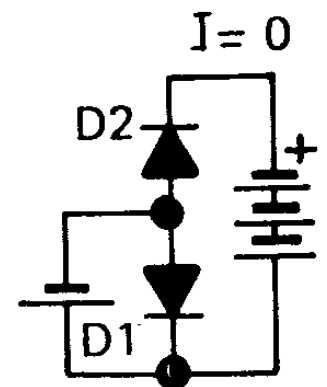


Fig. 7

#### 4) Symboles

L'émetteur est distingué par une flèche indiquant le sens conventionnel du courant (Figure 8)

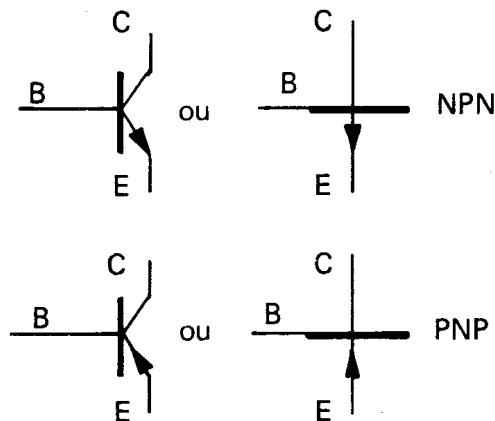


Fig. 8

#### 5) Courbes caractéristiques

Le montage de la figure 9 permet le relevé des caractéristiques d'un transistor.

La figure 10 regroupe, sur un seul graphique, les caractéristiques  $[V_{CE}, I_C]$ ,  $[I_C, I_B]$  et  $[I_B, V_{BE}]$ . On constate que, dès que  $V_{CE}$  dépasse quelques volts, le courant reste presque constant quelle que soit la valeur de  $V_{CE}$  (résistance interne très élevée ; le transistor se comporte comme un générateur de courant ; similitude de caractéristiques avec la pentode).

On constate aussi que la tension base-émetteur reste pratiquement constante quelle que soit la valeur de  $I_B$ .

On constate enfin que la caractéristique  $I_C, I_B$  est presque linéaire pour les faibles courants. Vers les forts courants,  $I_C$  augmente proportionnellement moins vite que  $I_B$ .

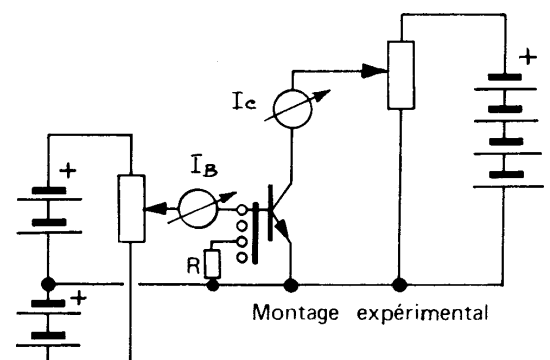


Fig. 9

Le rapport  $\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$  exprime le **gain en courant** statique du transistor commandé par sa base.

Courbes caractéristiques [ $V_{CE}$ ,  $I_C$ ], [ $I_C$ ,  $I_B$ ] et [ $I_B$ ,  $V_{BE}$ ].

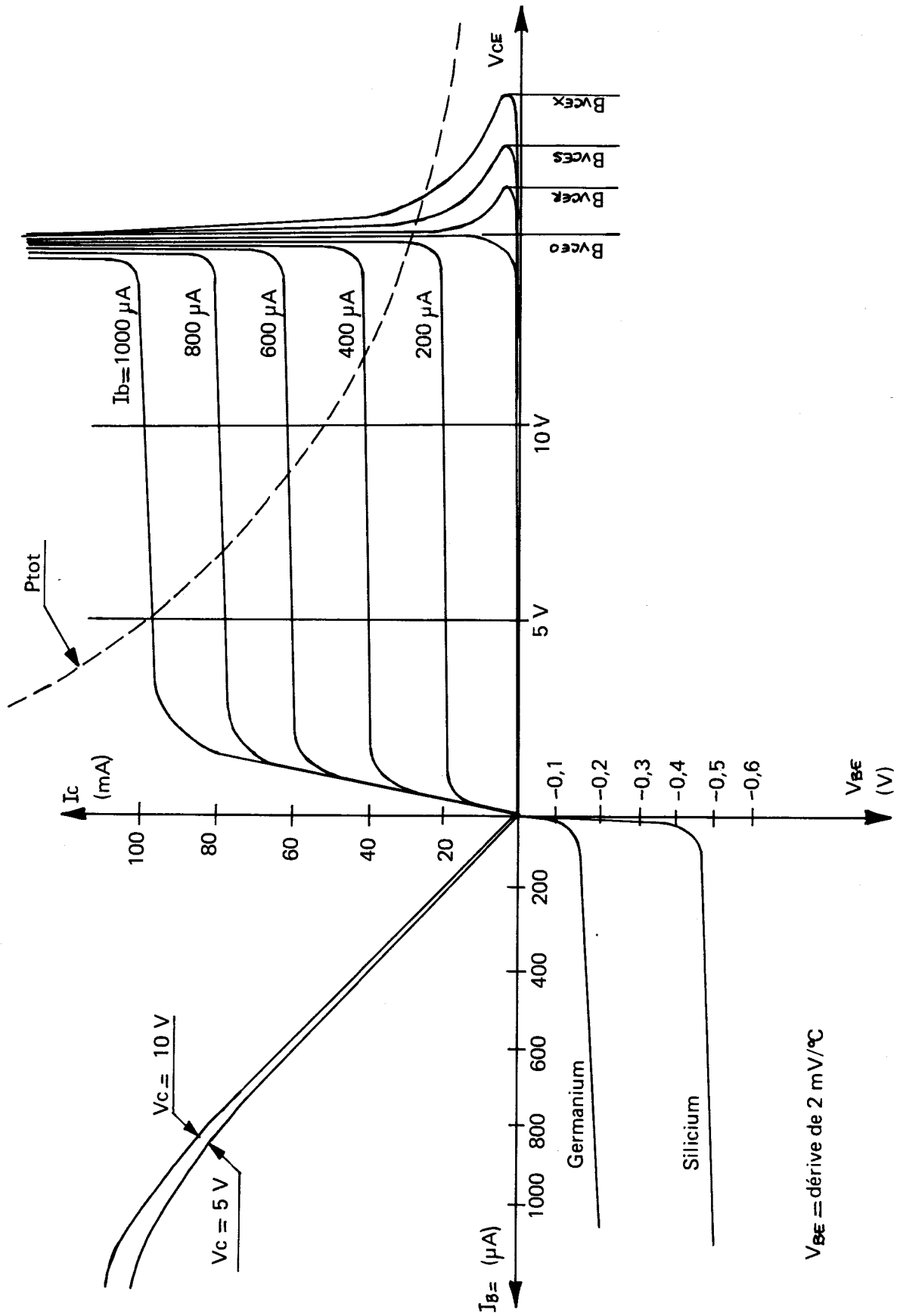


Fig. 10

## 6) Caractéristiques limites

Elles limitent les conditions d'emploi des transistors.

### 6-1) La température

- Température de stockage ( $T_s$  ou  $\theta_s$ ) inférieure et supérieure.
- Température de fonctionnement ( $T_j$  ou  $\theta_j$ ) : température limite que peut supporter la jonction lors de l'utilisation.

Nota :

- La température maximale de jonction ne doit pas être dépassé lors des opérations de soudure.
- Les températures inférieures les plus courantes indiquées par les constructeurs sont :  
 $0^\circ\text{C}$ ,  $-25^\circ\text{C}$ ,  $-40^\circ\text{C}$ ,  $-55^\circ\text{C}$ ,  $-65^\circ\text{C}$ .
- Les températures supérieures les plus courantes indiquées par les constructeurs sont :  
 $+90^\circ\text{C}$ ,  $+125^\circ\text{C}$ ,  $+175^\circ\text{C}$ ,  $+200^\circ\text{C}$ .

### 6-2) La puissance

- La puissance dissipée dans le transistor est  $I_C \cdot V_{CE}$ . Les conditions sont définies par le constructeur :
- avec ou sans radiateur.
  - en fonction de la température ambiante.
  - en régime continu ou impulsif.

Les limites de puissance peuvent être reportées sur les caractéristiques (cf. figure 8) (de 100 mW à 250 W suivant les types).

### 6-3) Le courant

- a) de **collecteur** :  $I_{CM}$ , valeur crête de courant collecteur à ne pas dépasser.  
b) de **base** :  $I_{BM}$ , courant maximal de base ( $V_{BE}$  polarisé normalement).

### 6-4) Les tensions ( $BV = \text{breakdown voltage} = \text{tension de claquage}$ )

- a) de **collecteur** : définie par  $BV_{CE}$  ou  $V_{(BR)CE}$  par le constructeur.

$BV_{CE} = \text{Breakdown voltage collector-emitter}$ .

$BV_{CEO} = V_{(BR)CEO} = \text{Breakdown voltage collector-emitter Open base (base ouverte) (employé pour le fonctionnement en amplificateur)}$ .

$BV_{CES} = V_{(BR)CES} = \text{Breakdown voltage collector-emitter Short base (base à la masse)}$ .

$BV_{CER} = V_{(BR)CER} = \text{Breakdown voltage collector-emitter pour base réunie à l'émetteur par une résistance } R \text{ indiquée (employé pour le fonctionnement en commutation)}$ .

$BV_{CEX} = V_{(BR)CEX} = \text{Breakdown voltage collector-emitter avec base polarisée sous } X \text{ volts inverse}$ .

On aura toujours:  $BV_{CEO} < BV_{CER} < BV_{CES} < BV_{CEX}$

Ces tensions peuvent varier de 15 à 700 V.

- b) de **base** : (définie par la tension de claquage zener de la jonction B-E).

### 6-5) Autres limites

- Humidité: Problème d'étanchéité: boîtier blessé, perles de verre des sorties fêlées.
- Chocs, vibrations qui brisent les raccordements aux sorties. Danger de certains nettoyages aux ultrasons.
- Chocs thermiques: Refroidissement brutal, soudures, causent des tensions mécaniques.
- Lumière ou autres rayonnements. Danger en particulier pour les phototransistors sous lumière trop vive.
- Erreurs de branchement: Tensions inacceptables, inversion des polarités d'alimentation.
- Ne jamais raccorder sous tension (certains problèmes de commutation).
- Electricité statique (destruction possible).

## 7) Fonctionnement du transistor . Droite de charge.

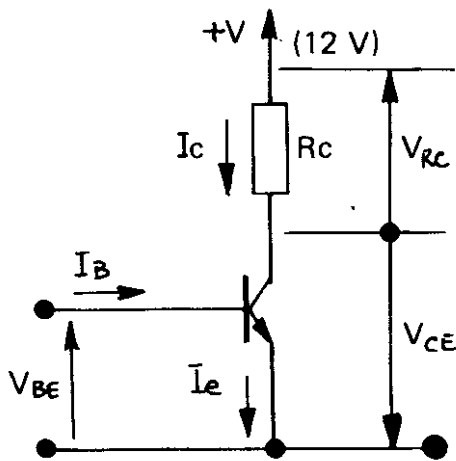


Fig. 11

Construction de la droite de charge. Supposons  $R_c = 100 \Omega$ .

a) Lorsque le transistor ne conduit pas,  $I_c = 0$ ;  $V_{RC} = 0$ .

$V_{CE} = +V_{\text{alimentation}} \rightarrow$  Point ( A ) (figure 11).

b) Lorsque l'on court-circuite (virtuellement) le collecteur à la masse,  $V_{RC} = +V_{\text{alim}}$  et  $V_{CE} = 0$ .

On a alors:  $I_c = \frac{V_{CR}}{R_c} = \frac{12 \text{ V}}{100 \Omega} = 120 \text{ mA} \rightarrow$  Point (B- Fig.12)

Nota: Lorsque le point ( B ) sort des limites des caractéristiques, on procède de la façon suivante: On suppose une certaine chute de tension dans  $R_c$  (par exemple 6 V). Il passe alors:

$$I_c = \frac{6 \text{ V}}{R_c} = \frac{6 \text{ V}}{100 \Omega} = 60 \text{ mA}$$

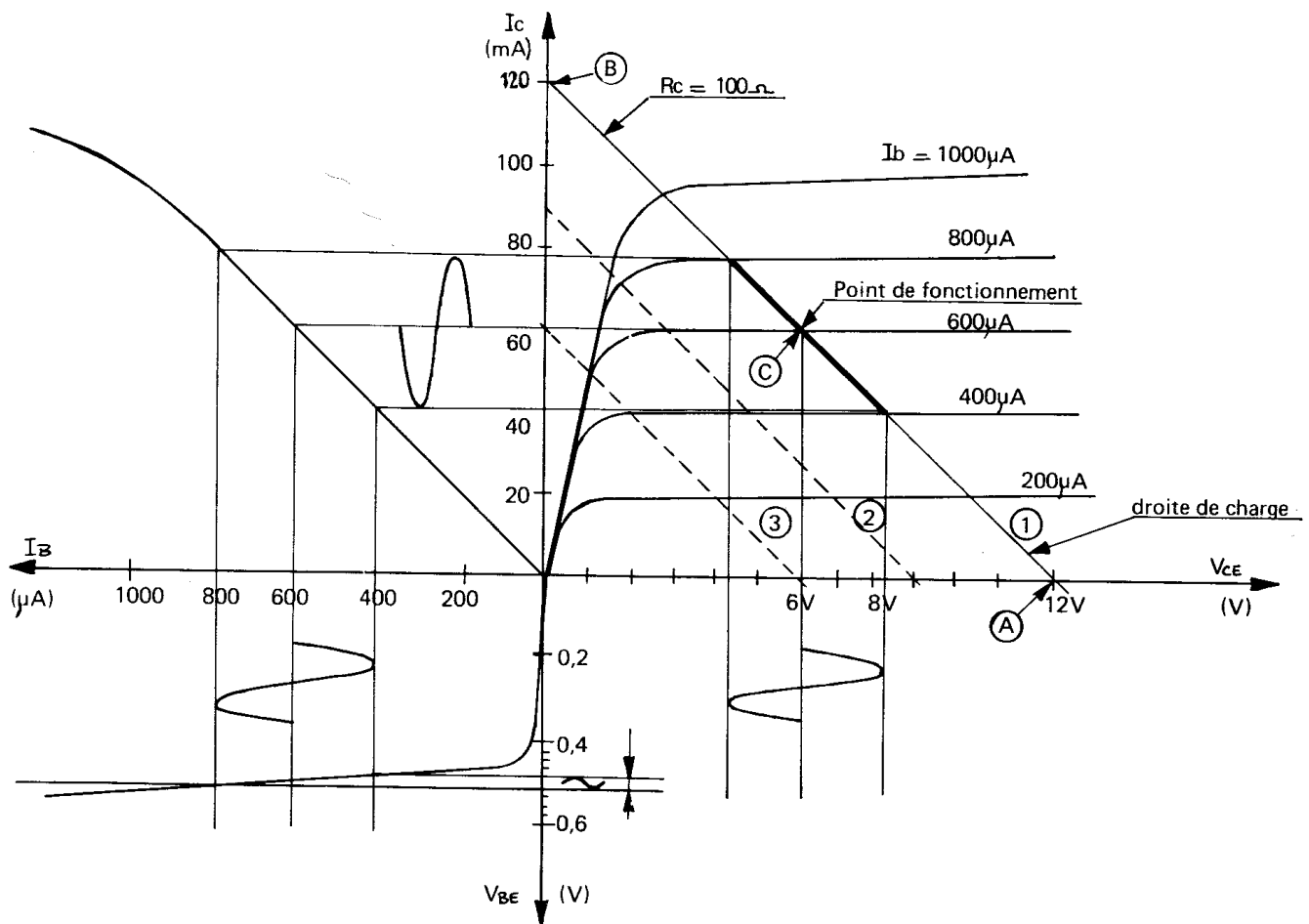


Fig. 12

Le potentiel de collecteur est alors  $+V_{\text{alim}} - V_{RC}$  soit ici  $12 - 6 = 6 \text{ V}$ .

Pour cette tension  $V_{CE}$  de 6 V, on a 60 mA de courant collecteur, ce qui définit le point ( C )

Nous allons choisir ce point ( C ) comme point de fonctionnement. Les caractéristiques indiquent que le courant de base de repos sera  $600 \mu\text{A}$ .

Si le courant de base varie de 400 à  $800 \mu\text{A}$ , le courant collecteur variera de 40 à 78 mA et la tension collecteur variera de 8 V à 4,2 V (légère non linéarité due au point de fonctionnement mal choisi). La tension de base aura varié de 0,5 V à 0,52 V, soit 20 mV.

Le gain en courant sera:  $\frac{78-40}{0,8-0,4} = \frac{38}{0,4} = 95$

Le gain en tension sera:  $\frac{8-4,2}{0,52-0,5} = \frac{3,8}{0,02} = 190$

Le gain en puissance est le produit des 2 gains précédents, soit 18050.

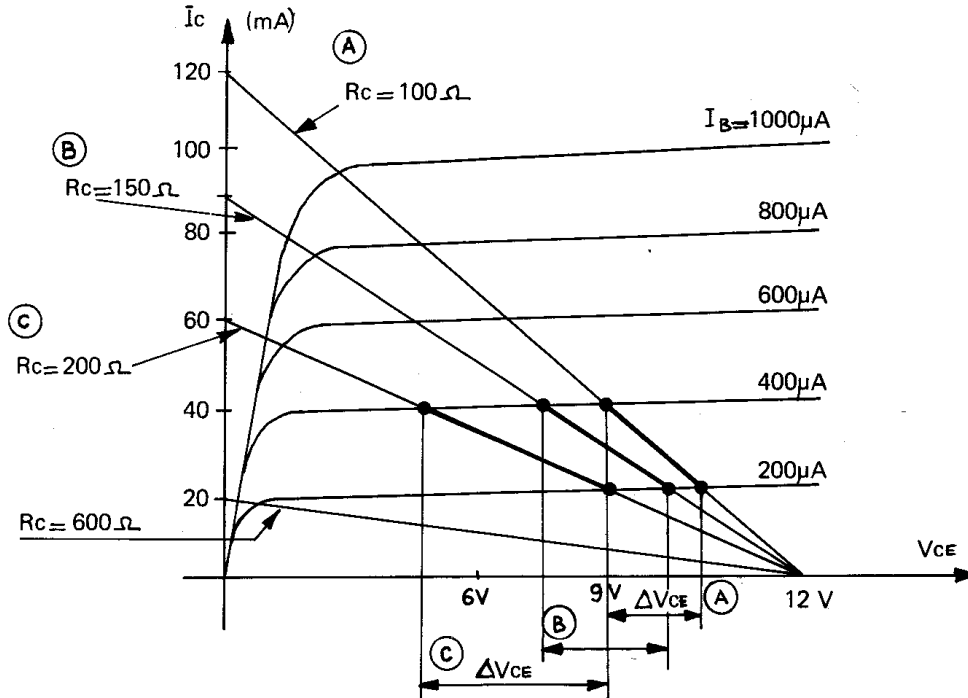


Fig.13

Nota 1 : En examinant la figure 11, on constatera que si l'on change uniquement la tension d'alimentation, la droite de charge se déplace parallèlement à elle-même (Position (1) pour 12 V alimentation, position (2) pour 9 V et position (3) pour 6 V). Le gain reste constant tant que l'on reste dans les zones de linéarité. Nota 2: Dans la zone linéaire, la variation de tension collecteur (pour un même  $\Delta I_B$ ) est proportionnelle à la résistance de collecteur (figure 13).

### 8) Observations sur l'emploi des caractéristiques.

En pratique, les courbes caractéristiques sont peu employées. En effet:

- Les constructeurs ne fournissent pas toujours les réseaux de caractéristiques.
  - La dispersion de fabrication est telle que les courbes ne peuvent être qu'une approximation. Dans la réalité, on peut se trouver assez éloigné du point de fonctionnement désiré. Exemple: ( $\beta$  variant entre 120 et 750 ! !).
  - Les variations de température ambiante peuvent complètement changer le fonctionnement d'un étage.
- Pratiquement, il faut stabiliser thermiquement le transistor.

### 9) Quelques caractéristiques intéressantes à signaler

$V_{be(sat)}$  : Tension de saturation base-émetteur (pour laquelle le courant collecteur ne peut plus augmenter). (Conditions de fonctionnement précisées par le constructeur).

$V_{ce(sat)}$  : Tension de saturation collecteur-émetteur, correspondant à

$C_{EB}$ ,  $C_{CE}$ ,  $C_{CB}$  : Capacités parasites internes. Respectivement émetteur-base, collecteur-émetteur et collecteur-base (Fig. 14). Rappelons que  $C_{CB}$  est la plus influente (effet Miller).

$C_{ob}$ : Capacitance de sortie en base commune pour émetteur ouvert (Fig.14).

$f_{hfb} = f_\alpha$  : Fréquence de coupure en base commune ( $\alpha$  baisse de  $\sqrt{2}$  soit 0,707 ou 3 dB).

$f_{hfe} = f_\beta$  : Fréquence de coupure en émetteur commun ( $\beta$  baisse de  $\sqrt{2}$  soit 0,707 ou 3 dB).

$F_T$  : Fréquence maximale d'oscillation (pour gain = 1) : Produit gain-bande.

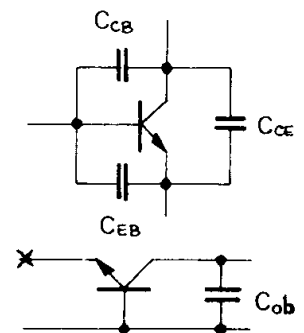


Fig. 14

### Caractéristiques en commutation (figure 15)

- $t_d$  : delay time : temps de retard à la mise en conduction.
- $t_r$  : rise time : temps de montée (entre 10 % et 90 %).
- $t_s$  : storage time : temps de stockage (de désaturation de base).
- $t_f$  : fall time : temps de chute (entre 10 % et 90 %).
- $t_{on}$  : turn-on time :  $t_d + t_r$
- $t_{off}$  : turn-off time :  $t_s + t_f$

### Caractéristiques thermiques:

- $\Theta_j$  ou  $T_j$  : Température de jonction.
- $R_{th}$  : Résistance thermique (s'exprime en  $^{\circ}C/W$ ) :
  - $R_{thA}$ : résistance thermique entre jonction et ambiante.
  - $R_{thC}$ : résistance thermique entre jonction et «case» (boîtier).

### Quelques exemples pour $R_{th}$ :

- Boîtier plastique (T092) : 200 à 500 $^{\circ}C/W$ .
- T018 : 200 à 500 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thA}$ , 80 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thC}$ .
- T05 : 200 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thA}$ , 40 à 60 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thC}$ '
- T0202 : 100 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thA}$ , 5 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thC}$ .
- T03: 1,5 $^{\circ}C/W$  de  $R_{thC}$ '

### Dérives:

- $I_{CBO}$  : Courant de fuite collecteur-base avec émetteur ouvert (non raccordé).
    - Il double tous les 10 $^{\circ}C$  pour le germanium (10  $\mu A$  à 25 $^{\circ}C$ ).
    - Il double tous les 7 $^{\circ}C$  pour le silicium (10 nA à 25 $^{\circ}C$ ).
  - $I_{CEO}$  : Courant de fuite collecteur-émetteur avec base ouverte.
  - $V_{BE}$  : Qui dérive de 2 mV/ $^{\circ}C$  (caractéristique très linéaire, souvent exploitée en utilisant un transistor en sonde de température.
- Le transistor s'utilise en diode: base et collecteur réunis).

### 10) Le transistor en commutation

Si l'on trace la droite de charge sur les caractéristiques, on trouvera deux points particuliers.

#### a) Le point B pour lequel $I_B = 0$ (Fig. 16).

Il ne passe aucun courant dans le transistor (excepté  $I_{CEO}$ ). Lorsque  $I_B = 0$ , on dit que le transistor est bloqué.

#### b) Le point S dit point de saturation (Fig. 16).

Il correspond à l'intersection de la droite de charge avec la partie coudée des caractéristiques.

Si l'on essaie d'augmenter le courant de base, la tension collecteur ne pourra plus baisser. Elle restera à une valeur  $V_{CE} = V_{CEsat}$  (comprise entre 0,1 et 1 V suivant le type de transistor).

Le transistor sera saturé si  $I_B > I_{Bmin}$  de saturation.

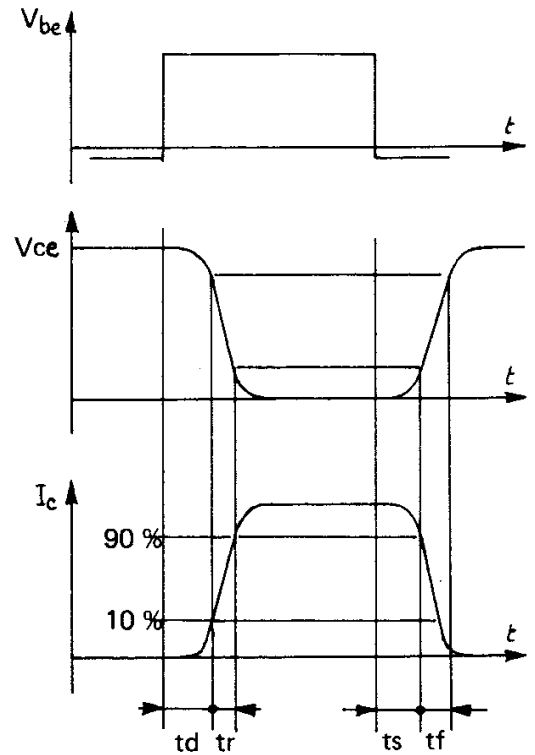


Fig. 15

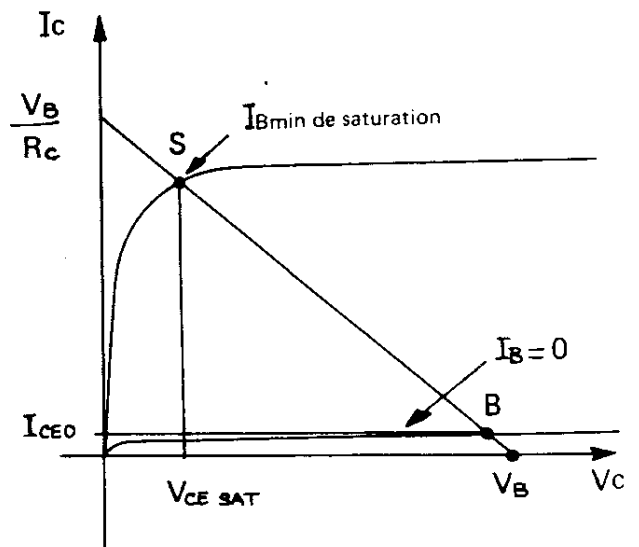


Fig. 16

Au blocage, le transistor se comporte comme un interrupteur ouvert (figure 17a).

A la saturation, il se comporte comme un interrupteur fermé (figure 17b).

Nota: Si le constructeur n'indique pas les caractéristiques de saturation d'un transistor, on peut les déterminer de façon approchée.

$$\text{On aura : } I_{CEsat} = \frac{V_+ - V_{CEsat}}{R_C};$$

$$\text{ou en approché : } I_{CEsat} = \frac{V_+}{R_C};$$

$$\text{et : } I_{Bmin} \text{ desaturation } I_{CEsat} = \frac{I_{CEsat}}{\beta_{min}}$$

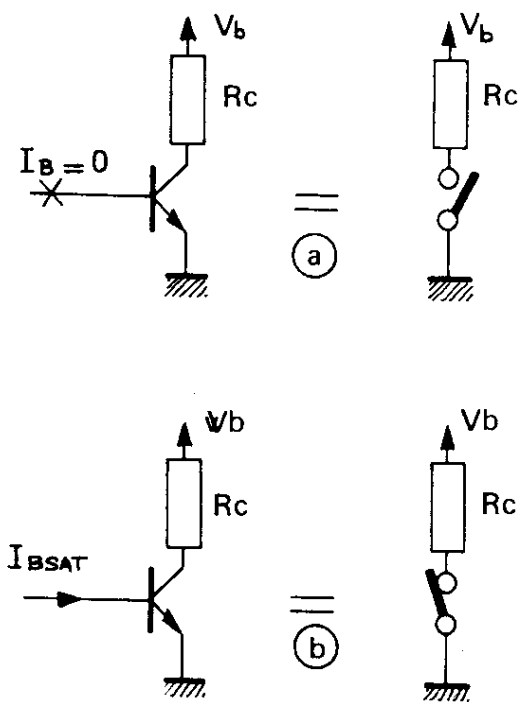
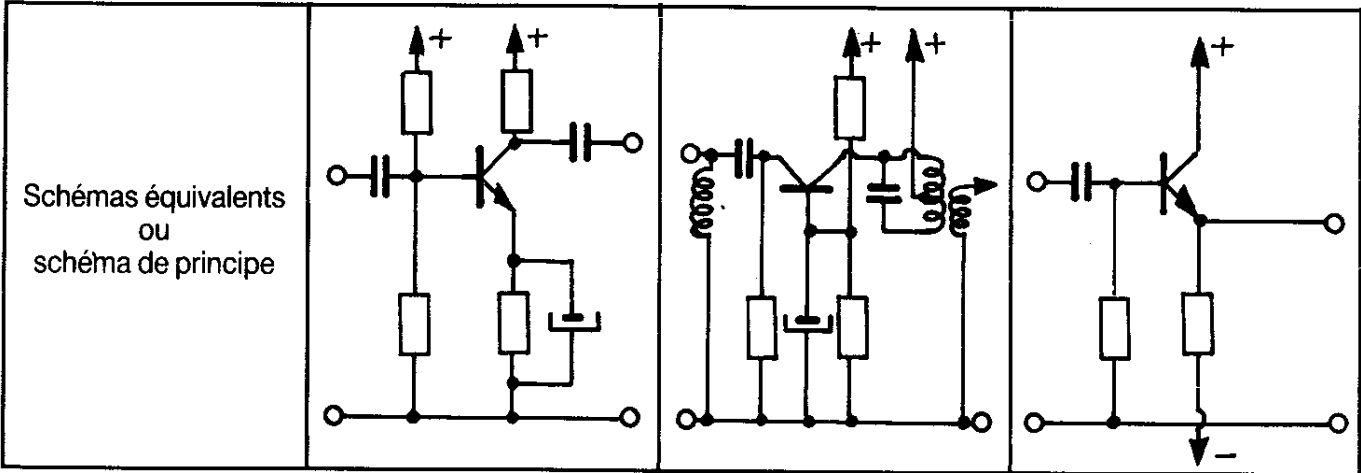


Fig. 17

# 11) Transistors, les montages fondamentaux

Signal de COMMANDE appliqué sur	Base	Emetteur	Base
SIGNAL RECUEILLI sur	Collecteur	Collecteur	Emetteur
Electrode neutre (du point de vue alternatif)	EMETTEUR	BASE	COLLECTEUR
TYPE	Emetteur commun	Base commune	Collecteur commun
Schéma de principe			
Relation de PHASE entre l'entrée et la sortie	OPPOSITION de phase	En phase	En phase

Gain en courant $\frac{I_s}{I_e}$	$\frac{I_c}{I_B} = \beta ( \gg 1 )$ <small>(50 à 750)</small> $\beta = h_{21e} = h_{fe}$	$\frac{I_c}{I_E} = \frac{I_c}{I_c + I_B} = \alpha$ $1 - \epsilon$ (0,99) $\alpha = \frac{\beta \cdot I_B}{\beta \cdot I_B + I_B} = \frac{\beta}{\beta + 1}$	Inutilisé $\frac{I_E}{I_B} = \frac{I_c + I_B}{I_B} = \frac{\beta \cdot I_B + I_B}{I_B} = \beta + 1 = \gamma$
Résistance d'entrée	Moyenne 300 à 1000 $\Omega$	Faible 25 à 300 $\Omega$	Forte 100 k $\Omega$ à 1 M $\Omega$ ou plus
Résistance de charge possible	Forte 100 k $\Omega$ à 1 M $\Omega$	Moyenne ou forte ~ 100 k $\Omega$	Assez faible 1 k $\Omega$ à 10 k $\Omega$
Gain en tension : $\frac{V_s}{V_e}$ ou $\frac{R_{sortie} \cdot I_{sortie}}{R_{entrée} \cdot I_{entrée}}$	Très grand $\frac{R_{grande}}{R_{moyenne}} \times \beta$ Ex. : 1000 x 100 = 10 <sup>5</sup>	Grand $\frac{R_{grande}}{R_{faible}} \times (1 - \epsilon)$ Ex. : 1000 x 1	$V_s = V_e - \Delta V_{BE}$ $\frac{V_s}{V_e} = 1 - \epsilon$
Gain en puissance $\frac{P_{sortie}}{P_{entrée}} = \frac{V_s}{V_e} \times \frac{I_s}{I_e}$	ENORME Ex. : 10 <sup>5</sup> x 10 <sup>2</sup> = 10 <sup>7</sup> (10 millions !)	GRAND ~ 1000	MOYEN 100 à 500
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplification importante en puissance et en tension.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible bruit.</li> <li>- Faible tendance à osciller.</li> <li>- Adaptation d'impédance en entrée HF.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Excellente adaptation d'impédance car Z entrée très élevée, ne perturbe pas les étages précédents.</li> <li>- Impédance de sortie faible donc peu sensible aux effets capacitifs.</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté d'adaptation d'impédance avec les étages suivants.</li> <li>- Risques d'accrochages fréquents.</li> <li>- Bruit relativement élevé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplification moins importante qu'en émetteur commun.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gain en tension inférieur à 1.</li> </ul>



ON5HQ