

LE TRANSISTOR

Etude statique

I- LE TRANSISTORS BIPOLAIRE

I-1 INTRODUCTION

L'élément de base dans un circuit électronique aussi complexe soit il est un composant actif appelé transistor. Il existe trois types de transistors: les transistors bipolaires et les transistors unipolaires ou la combinaison des deux. Cette classification est faite sur la base des types de porteurs de charge qui interviennent dans le fonctionnement de tels composants. Les transistors bipolaires font intervenir dans leur fonctionnement les deux types de porteurs de charges (électrons et trous). Ces transistors ont fait leur apparition en 1948, ils révolutionnaient le monde et ils constituent l'élément de base du plus simple au plus complexe circuit intégré. Hormis leur type de fabrication, les transistors sont répartis sur des classes suivant la gamme de fréquence de leur fonctionnement ou de leur puissance. On trouve actuellement une large gamme de transistors :

- Transistors basses fréquences
- Transistors hautes fréquences
- Transistors ultra hautes fréquences
- Transistors de puissance

I-2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

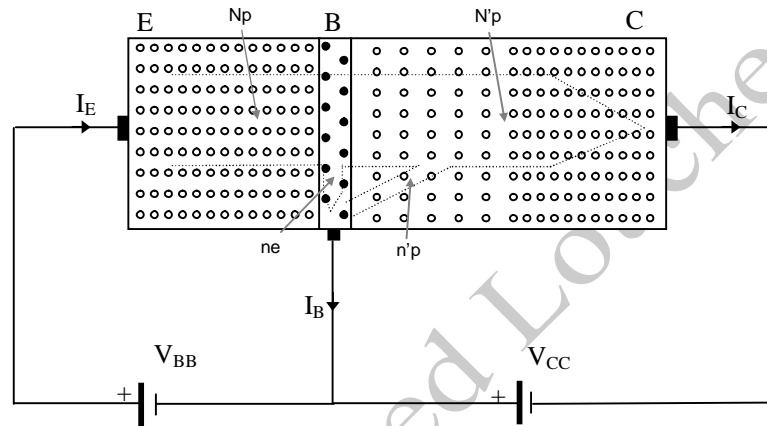
Le fonctionnement dit normale du transistor bipolaire, correspond à la polarisation en directe de la jonction Base-Emetteur et la polarisation en inverse de la jonction Base-Collecteur (Fig .1)

Dans ces conditions l'émetteur (E) injecte des porteurs (électrons cas 'a' et trous cas 'b') dans la base (B). Ces porteurs diffusent perpendiculairement dans la jonction Base-Emetteur et atteignent la zone de charge d'espace de la jonction Base-Collecteur.

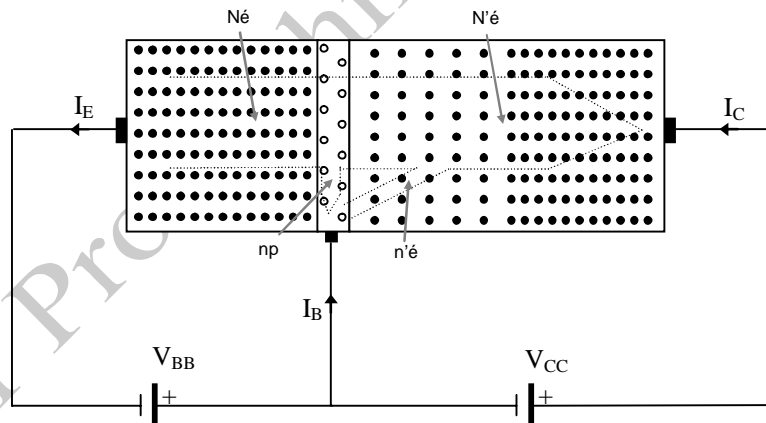
Le champ électrique de cette région est assez élevé car la jonction Base-Collecteur est polarisée en inverse. Par conséquent, une très grande fraction des porteurs de charge émis par l'émetteur et cumulés dans la base sera attirée vers la

région collecteur. Cependant, dans le cas où l'émetteur est laissé en l'air, la jonction Base-Collecteur qui est polarisée en inverse est parcourue par un courant de saturation dû aux porteurs de charge minoritaires. Ce courant de saturation, qui en générale de faible valeur, peut prendre des valeurs importantes quand la température augmente. Par ailleurs, on signale sur les fiches techniques de tous les composants électroniques leurs gammes de températures d'utilisation.

Le silicium est le matériau le plus utilisé car comparé avec le germanium; il présente une meilleur stabilité thermique.



a- Structure PNP



b- Structure NPN

Fig.1 : Condition normale de polarisation- Apparition de l'effet transistor-

La bipolarité de ce type de transistor impose une structure de mise en sandwich d'une zone P entre deux zones N ou une zone N entre deux zones P. La structure et Le symbole d'un transistor bipolaire sont donnés par les figures Fig.1-a et Fig.1-b respectivement pour le transistor PNP et NPN.

Prenons comme exemple le cas d'un transistor NPN et voyons ce que nous pouvons tirer comme relations entre les courants au niveau de ses trois bornes E, B et C.

Soit :

Né : nombre d'électrons émis par l'émetteur E dans la base B.

N'é : une très grande fraction de Né est accélérée vers le collecteur C.

n'é : une très petite partie de Né arrive à se recombiner avec les trous de la base pour sortir à travers la borne B.

n'é : les porteurs de charge minoritaires de la base qui sont attirés vers le collecteur par le champs de polarisation inverse de la jonction Base-Collecteur. Ces porteurs de charge minoritaires sont d'origine thermique.

Nous pouvons alors écrire :

$$Né = N'é + n'é$$

$$N'é = Né - n'é + n'é$$

$$\text{Comme } n'é \ll Né$$

On a

$$N'é \approx \alpha Né + n'é$$

Avec $\alpha \approx 1$

En traduisant le mouvement des porteurs de charges par les courants correspondants il en résulte :

$$Né = N'é + n'é \Rightarrow I_E = I_C + I_B \quad (1)$$

$$N'é = \alpha Né + n'é \Rightarrow I_C = \alpha I_E + I_{CB0} \quad (2)$$

$$(1) \text{ dans } (2) \Rightarrow I_C = \alpha (I_C + I_B) + I_{CB0}$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CB0} \quad (3)$$

$$\text{soit } \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \text{ alors } \frac{1}{1-\alpha} = \beta + 1 \text{ avec } \beta \gg 1$$

(3) devient

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CB0} \quad (4)$$

Le deuxième terme de l'équation (4) correspond à la valeur du courant circulant entre E et C quand la base est en l'air c'est pour cette raison qu'il est généralement noté par I_{CE0} . L'équation (4) devient dans ce cas :

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0} \quad (5)$$

Le courant I_{CB0} ou I_{CE0} sont dus aux porteurs de charge minoritaires d'où nous pouvons déduire :

- Qu'ils ont des valeurs très faibles.
- Ils dépendent de la température

Comme première approximation et en négligeant l'effet température, et ce qui est considéré généralement dans l'étude et la conception des circuits autour de transistors, nous aurons :

$$I_C = \beta I_B \quad (6)$$

$$I_E = (\beta + 1) I_B \approx \beta I_B = I_C \quad (7)$$

I-3 POLARISATION D'UN TRANSISTOR

La polarisation d'un transistor est l'application de sources continues aux transistors de façon à ce que l'effet transistor soit toujours obtenu. En d'autres termes le rôle des sources continues liées aux transistors est d'assurer la polarisation directe des jonctions Base-Emetteur et la polarisation inverse des jonctions Base-Collecteur. Des résistances seront associées aux circuits de polarisation pour limiter les courants maximaux au niveau de chaque borne du transistor et surtout elles permettent de bien choisir le point de fonctionnement du transistor.

On doit polariser le transistor de telle façon que la jonction base-emetteur soit polarisée en directe et la jonction Base-Collecteur en inverse. C'est la seule condition où l'effet transistor est obtenu.

I-3-1 POLARISATION PAR RESISTANCE DE BASE

I-3-1-1 SANS RESISTANCE D'EMETTEUR R_E

- DETERMINATION DU POINT DE FONCTIONNEMENT

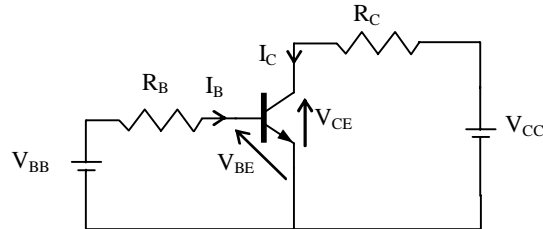


Fig .2 Polarisation d'un transistor

Connaître l'état de fonctionnement d'un circuit exige la connaissance des quatre variables : I_B , V_{BE} , I_C et V_{CE} qui correspondent respectivement aux coordonnées, dans le plan (courant I, tension V), des points de polarisation d'attaque et de charge.

$$V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE} \quad (8)$$

$$V_{CC} = R_C \cdot I_C + V_{CE} \quad (9)$$

$$\text{L'équation (8) donne } I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad (10)$$

$$\text{L'équation (9) donne } I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} \quad (11)$$

Avec

L'équation (10) $I_B=f(V_{BE})$ est appelée droite d'attaque statique

L'équation (11) $I_C=f(V_{CE})$ est appelée droite de charge statique.

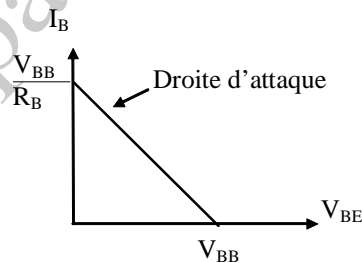


Fig .3 Droite d'attaque statique

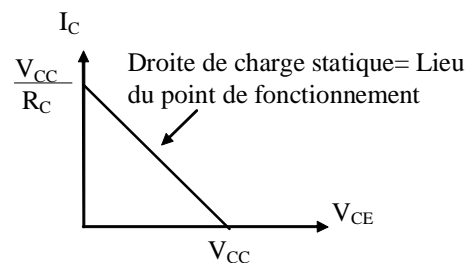


Fig .4 Droite de charge statique

Remarque

Les coordonnées (V_{BE}, I_B) et (V_{CE}, I_C) représentent respectivement les points de fonctionnement à l'entrée et à la sortie.

Le problème de polarisation peut se poser de deux façons :

- Connaissant les valeurs des composants du circuit on doit déterminer les coordonnées du point de fonctionnement $Q(V_{CE}, I_C)$.
- Connaissant les caractéristiques du transistor (type et β) et l'emplacement du point de fonctionnement sur la droite de charge, on doit déterminer les valeurs qu'il faut donner aux différentes résistances du circuit de polarisation.

Le point de fonctionnement peut aussi être déterminé graphiquement, il suffit de tracer la droite de charge dans le quadrant (I_C, V_{CE}) de la figure 5 et l'intersection avec la courbe, pour un I_B préalablement déterminé, définit le point de fonctionnement.

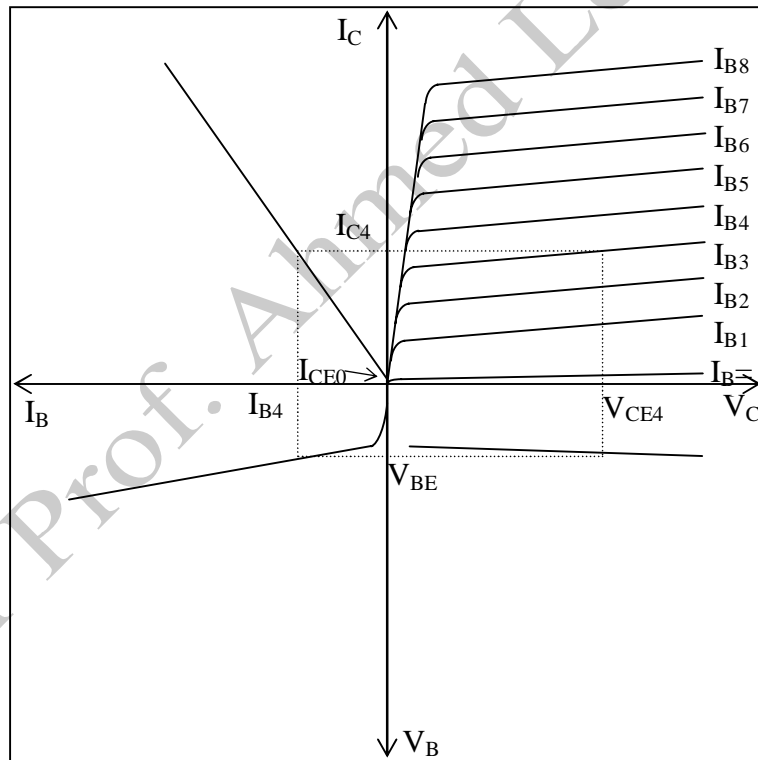


Fig .5 Caractéristiques d'un transistor monté en émetteur commun

• STABILITE THERMIQUE

On va prendre le cas d'un montage à transistor en émetteur commun avec :

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1)I_{CB0} \quad (12)$$

Où

I_{CB0} : Courant de fuite (émetteur en l'air)

β : le gain en courant

L'élévation de la température se traduit par l'accroissement de I_{CB0} multiplié par $(\beta+1)$ il provoque non seulement un effet cumulatif qui produit l'emballement thermique et détruit le transistor mais aussi l'instabilité du point de fonctionnement. Il faut donc le stabiliser vis à vis de la variation de la température.

Si ΔI_C est la variation de I_C sous l'effet de la température

ΔI_C est due essentiellement à ΔI_{CB0} mais aussi à ΔV_{BE}

On définit dans ce cas les facteurs de stabilité comme suit :

$$S_1 = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_{CB0}} \right|_{V_{BE}=\text{cte}} \quad (13)$$

$$S_2 = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta V_{BE}} \right|_{I_{CB}=\text{cte}} \quad (14)$$

S_1 est le facteur le plus important car il dépend des porteurs de charge minoritaire dont l'origine est l'effet température.

S_2 (mA/V) < 0

Donc la stabilité sera d'autant plus grande que les facteurs de stabilité auront des valeurs absolues faibles.

Dans le cas du circuit de la figure Fig.2 les coefficients de la stabilité thermique s'obtiennent par le principe de calcul suivant

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1)I_{CB0} \Rightarrow \Delta I_C = \beta \cdot \Delta I_B + (\beta + 1)\Delta I_{CB0} \quad (15)$$

$$\text{De l'équation (8), } V_{BE} = -R_B \cdot I_B + V_{BB} \Rightarrow \Delta V_{BE} = -R_B \cdot \Delta I_B$$

$$\Rightarrow \Delta I_B = -\frac{\Delta V_{BE}}{R_B} \quad (16)$$

Alors

$$\Delta I_C = -\frac{\beta}{R_B} \cdot \Delta V_{BE} + (\beta + 1) \cdot \Delta I_{CB0} \quad (17)$$

Par identification aux équations (13) et (14) on a:

$$S_1 = (\beta + 1) \text{ et } S_2 = -\frac{\beta}{R_B}$$

Ce montage n'est pas stable car S_1 est très élevée alors que S_2 peut être très faible pour les valeurs de R_B très grandes.

Dans la pratique une seule tension de polarisation est utilisée. Le montage donné sur la figure 2 sera dans ce cas celui de la figure 6.

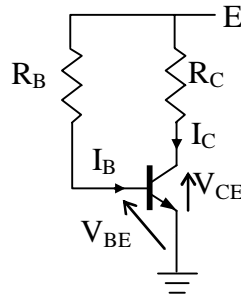
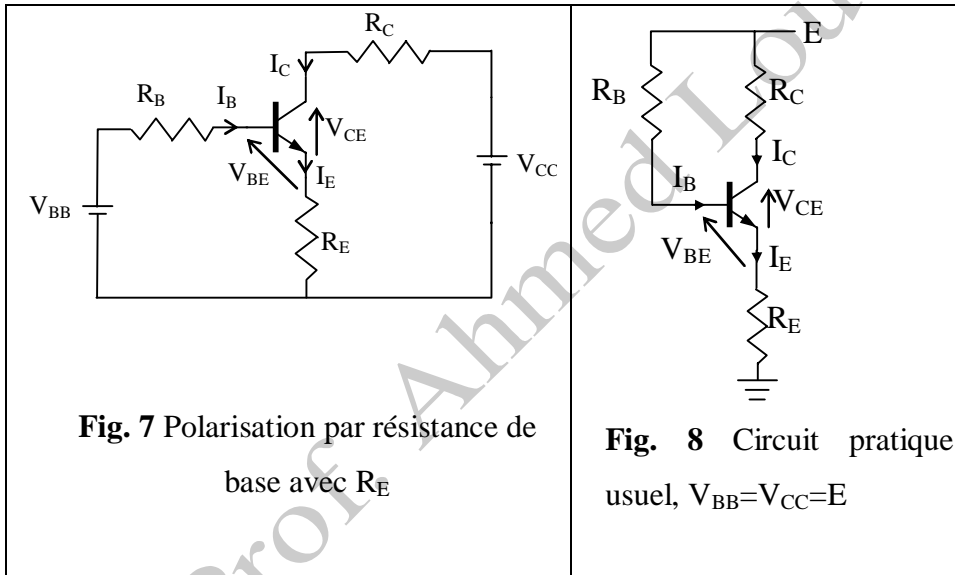


Fig. 6 Circuit pratique d'une polarisation par résistance de base
($V_{BB}=V_{CC}=E$)

I-3-1-2 POLARISATION PAR RESISTANCE DE BASE AVEC RE



Le principe de calcul du point de fonctionnement se fait de la même façon que dans le cas précédent où l'on doit tout d'abord trouver les expressions des équations de la droite d'attaque et de la droite de charge.

$$V_{BB} = R_B I_B + V_{BE} + R_E I_E \text{ avec } I_E = (\beta + 1) I_B$$

Donc

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} + \frac{V_{BB}}{R_B + (\beta + 1)R_E} \quad (18)$$

Avec l'approximation $I_E \approx I_C$ on a

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + \beta R_E} + \frac{V_{BB}}{R_B + \beta R_E} \quad (19)$$

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \quad (20)$$

Dans le cas de la figure 8, V_{CC} et V_{BB} seront remplacées dans les équations 19 et 20 par une seule tension d'alimentation E. Les équations 19 et 20 deviendront :

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + \beta R_E} + \frac{E}{R_B + \beta R_E} \quad (21)$$

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{E}{R_C + R_E} \quad (22)$$

- **STABILITE THERMIQUE**

Un calcul analogue donne :

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1)I_{CB0} \Rightarrow \Delta I_C = \beta \Delta I_B + (\beta + 1)\Delta I_{CB0}$$

$$V_{BE} = -R_B \cdot I_B + V_{BB} - R_E (I_C + I_B) \Rightarrow \Delta V_{BE} = -(R_B + R_E) \cdot \Delta I_B - R_E \Delta I_C$$

$$\Delta I_B = -\frac{\Delta V_{BE} + R_E \Delta I_C}{R_B + R_E} \quad (23)$$

Alors

$$\Delta I_C = -\frac{\beta}{R_B + R_E (\beta + 1)} \Delta V_{BE} + (\beta + 1) \frac{R_B + R_E}{R_B + R_E (\beta + 1)} \Delta I_{CB0} \quad (24)$$

Par identification aux équations (13) et (14) on a:

$$S_1 = (\beta + 1) \frac{(R_B + R_E)}{R_B + R_E (1 + \beta)} \quad \text{et} \quad S_2 = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

Application numérique:

$$\text{Pour } \beta=100, R_B=100K\Omega$$

$$R_E=1K\Omega \Rightarrow S_1=50$$

$$R_E=10K\Omega \Rightarrow S_1=10$$

Comme conclusion on peut retenir que plus R_E augmente et plus S_1 diminue et plus le circuit est stable thermiquement.

I-3-2 POLARISATION PAR RESISTANCES ENTRE BASE ET COLLECTEUR

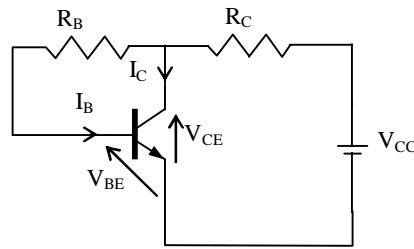


Fig-9 Polarisation par résistance entre Base et Collecteur

$$V_{BE} = -R_B \cdot I_B - R_C (I_C + I_B) + V_{CC}$$

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_C} + \frac{V_{CC}}{R_B + (\beta + 1)R_C} \text{ est la droite d'attaque}$$

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)R_C} + \frac{V_{CC}}{\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)R_C} \text{ et la droite de charge}$$

- **Stabilité thermique**

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1)I_{CB0} \Rightarrow \Delta I_C = \beta \cdot \Delta I_B + (\beta + 1)\Delta I_{CB0}$$

Du circuit on tire l'expression de V_{BE} en fonction des courants I_B et I_C

$$V_{BE} = -R_B \cdot I_B + V_{CC} - R_C (I_C + I_B)$$

$$\Rightarrow \Delta V_{BE} = -(R_B + R_C) \cdot \Delta I_B - R_C \Delta I_C \quad (25)$$

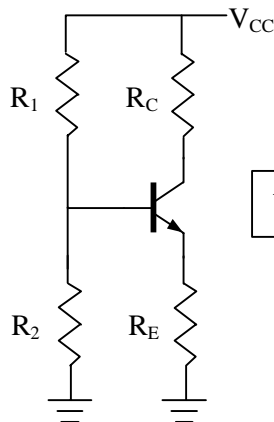
$$\Delta I_B = -\frac{\Delta V_{BE} + R_C \Delta I_C}{R_B + R_C} \quad (26)$$

$$\Delta I_C = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1)R_C} \Delta V_{BE} + \frac{(\beta + 1)(R_B + R_C)}{R_B + (\beta + 1)R_C} \Delta I_{CB0} \quad (27)$$

$$S_1 = (\beta + 1) \frac{R_B + R_C}{R_B + (\beta + 1)R_C} \text{ et } S_2 = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1)R_C}$$

Dans le cas où $R_B \ll R_C$, ça conduit à $S_1 \approx 1$ une amélioration importante de la stabilité thermique est notée.

I-3-3 POLARISATION PAR UN PONT DIVISEUR



Application du théorème de Thevenin

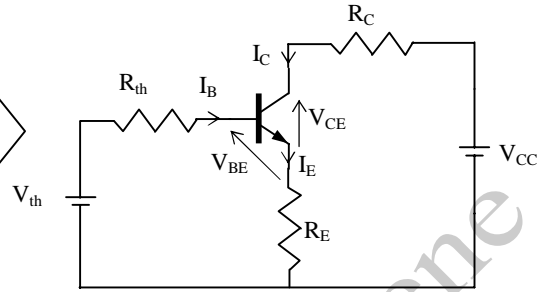


Fig. 10 Polarisation par pont de base

Fig. 11 Circuit équivalent par Thévenin

En appliquant le théorème de Thévenin pour le circuit vu par la base du transistor on obtiendra le schéma équivalent donné par la figure 11.

Avec

$$V_{th} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ et } R_{th} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_B = f(V_{BE}) = - \frac{V_{BE}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} + \frac{V_{th}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} \text{ est appelée Droite d'attaque}$$

statique.

$$I_C = f(V_{CE}) = - \frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \text{ est appelée droite de charge statique.}$$

Comme on peut le constater, le calcul des coefficients de stabilité s'obtient d'une façon identique à ceux obtenus dans le cas de la figure 2, il suffit de remplacer dans les deux expressions S_1 et S_2 la résistance R_B par la résistance équivalente de Thevenin R_{th} .

$$S_1 = (\beta + 1) \frac{(R_{th} + R_E)}{R_{th} + R_E (1 + \beta)} \text{ et } S_2 = - \frac{\beta}{R_{th} + (\beta + 1)R_E}$$

I-3-4 Exemples

I-3-4-1 Exemple-1

Etant donné le circuit de la figure 12; le transistor est en silicium et il a un gain statique en courant $\beta=100$. On demande de :

1. Déterminer le point de fonctionnement Q.
2. Calculer les coefficients S_1 et S_2 de stabilité thermique.

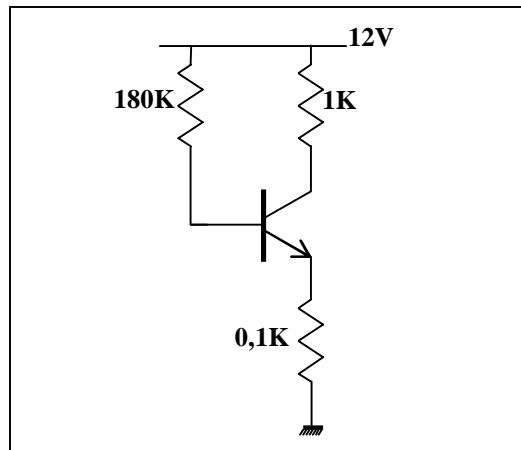


Fig. 12

Solution

Dans le but de travailler avec facilité et pour ne pas traîner les valeurs numériques, donnons des lettres aux différentes résistances et grandeurs électriques du circuit; ce qui permet de retracer le circuit comme :

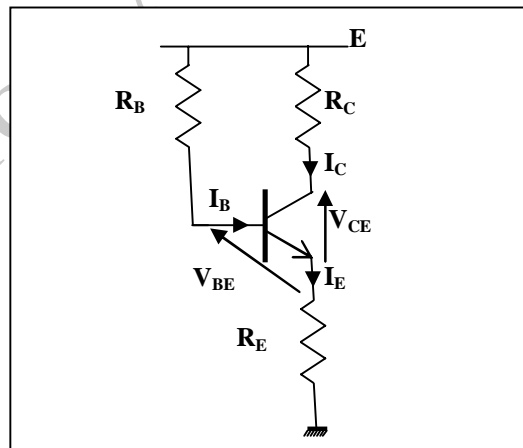


Fig. 13

1- Prenons la maille de sortie où I_C en fonction de V_{CE} exprime l'équation de la droite de charge statique:

Avec l'approximation $I_E \approx I_C$ on a

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{E}{R_C + R_E}$$

Pour tracer la droite de charge il nous faut deux points, prenons les deux points particuliers qui définissent les points d'intersection de la droite de charge statique avec les deux axes : l'axe des courants I_C et l'axe des tensions V_{CE} .

Le point S avec l'axe des courants :

$$V_{CE}=0 \Rightarrow I_C = \frac{E}{R_C + R_E} = \frac{12}{1,1 \cdot 10^3} = 10,9 \text{mA}$$

Le point B avec l'axe des tensions : $I_C=0 \Rightarrow V_{CE}=E=12\text{V}$.

Les lettres **S** et **B** sont choisies pour leur correspondance respectivement au point de Saturation et point de Blocage du transistor.

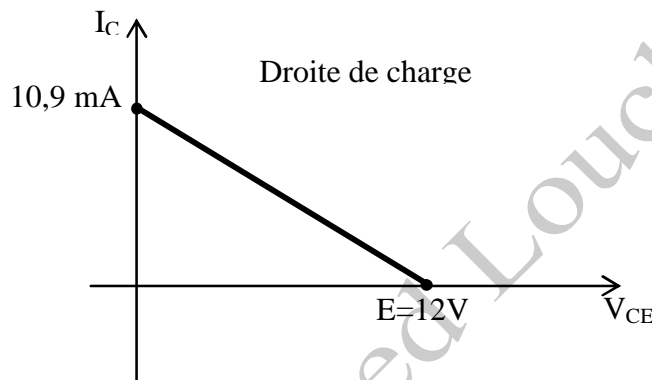


Fig. 14

Pour la détermination du point de fonctionnement, on fait appel au circuit d'attaque qui nous permet d'exprimer I_B en fonction de V_{BE} comme suit :

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} + \frac{E}{R_B + (\beta + 1)R_E}$$

Le transistor est en silicium ce qui nous permet de poser $V_{BE}=0,6\text{V}$.

Remplaçons dans l'équation de I_B :

$$I_B = \frac{E - V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{12 - 0,6}{180 \cdot 10^3 + 101 \times 0,110^3} = 60 \mu\text{A}$$

En remplaçant I_B par sa va valeur dans $I_C=\beta I_B$ on trouve :

$I_C=6\text{mA}$ nous amène à tirer la valeur de $V_{CE}=5,4\text{V}$ de l'équation de la droite de charge statique montrée sur la figure 15 .

Finalement le point de fonctionnement peut être donné par :

Q(5,4V, 6mA)

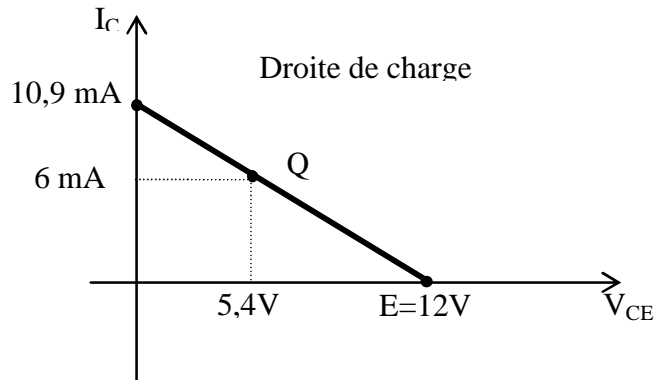


Fig. 15

2- Pour le calcul des coefficients de stabilité thermique on se limite à leurs expressions qui sont données par l'équation (24).

$$S_1 = (\beta + 1) \frac{(R_B + R_E)}{R_B + R_E(1 + \beta)} = 95,68$$

$$S_2 = -\frac{\beta}{R_B + (\beta + 1)R_E} = -5,2 \cdot 10^{-5}$$

I-3-4-2 Exemple-2

Dans le circuit de la figure 16, le transistor est polarisé par résistance de base. Le transistor est défini par le silicium comme matériau de base et par un gain statique en courant $\beta=200$. On demande de déterminer la valeur qu'il faut donner à la résistance de base pour que le point de fonctionnement soit au milieu de la droite de charge statique.

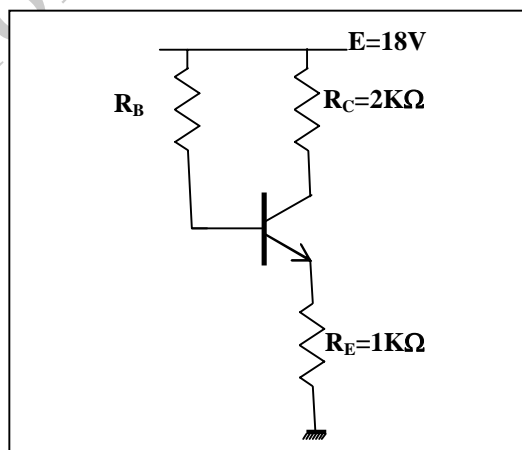


Fig. 16

Solution

Commençant par l'équation de la droite de charge statique qu'on peut tirer de la figure 17 où les grandeurs électriques au niveau des différentes bornes du transistor sont ajoutées.

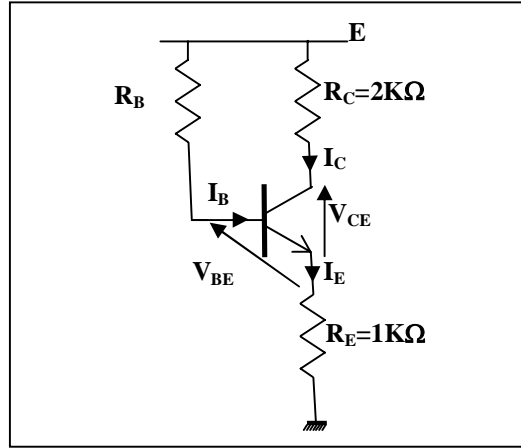


Fig. 17

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{E}{R_C + R_E}$$

Q(V₀, I₀) au milieu de la droite de charge statique

$$V_0 = \frac{E}{2} = 9V$$

$$I_0 = \frac{E}{2(R_C + R_E)} = 3mA$$

Pour calculer R_B on fait appel à la maille d'attaque :

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_B + (\beta + 1)R_E} + \frac{E}{R_B + (\beta + 1)R_E} = \frac{I_0}{\beta}$$

Par conséquent, I_B prend la valeur numérique 15 μA ce qui permet de calculer la valeur de R_B de l'équation (28) en remplaçant I_B par 15μA et V_{BE} par 0,6V.

$$R_B = \frac{\beta(E - V_{BE})}{I_0} - (\beta + 1)R_E \approx 1M\Omega$$

I-3-4-3 Exemple-3

Reprenons l'exemple-1 avec cette fois le même transistor polarisé par pont de base comme il est illustré par la figure 18.

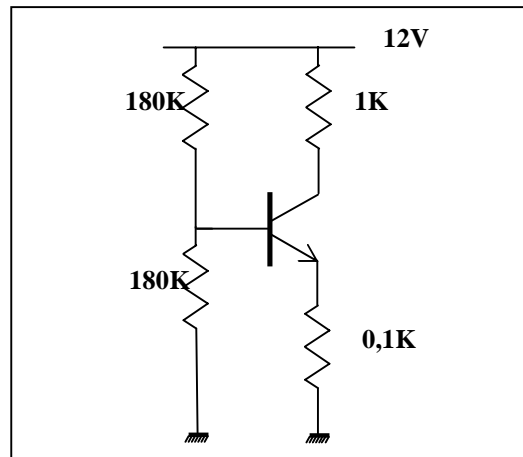


Fig. 18

Solution

1- Pour des raisons de simplicité, nous identifions les différentes résistances par des lettres et nous représentons les différentes grandeurs électriques au niveau des broches du transistor. Le circuit devient :

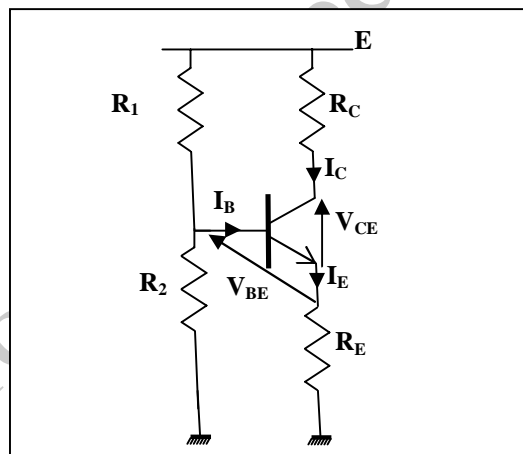


Fig. 19

Par application du théorème de Thévenin pour la partie du circuit vue par la base du transistor le circuit devient comme suit :

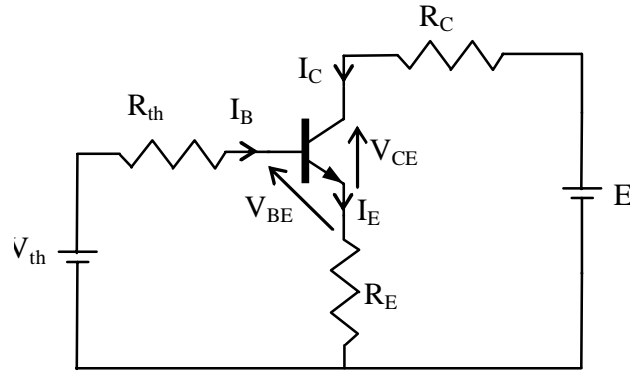


Fig. 20

Où

$$V_{th} = E \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 6V$$

$$R_{th} = R_1 // R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 90K\Omega$$

L'équation de la droite de charge statique :

$$I_C = -\frac{V_{CE}}{R_C + R_E} + \frac{E}{R_C + R_E}$$

L'équation de la droite d'attaque :

$$I_B = -\frac{V_{BE}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} + \frac{V_{th}}{R_{th} + (\beta + 1)R_E}$$

A.N. $I_B = 54 \mu A$

Ce qui permet de tirer la valeur du courant I_C de la relation $I_C = \beta I_B$

$I_C = 5,4mA$

En remplaçant I_C par sa valeur dans l'équation de la droite de charge on obtient

$V_{CE} = 6,06V$

D'où le point de fonctionnement peut être donné comme $Q(6,06V, 5,4mA)$

2-

$$S_1 = (\beta + 1) \frac{(R_{th} + R_E)}{R_{th} + R_E (1 + \beta)} = 91$$

$$S_2 = -\frac{\beta}{R_{th} + (\beta + 1)R_E} = -0,99$$

EXERCICES

EXERCICE-1

1. Tracer la droite de charge statique et la droite d'attaque statique du circuit de la figure 21.
2. Déterminer le point de fonctionnement Q.

On donne : $\beta=100$, $V_{BE}=0,7V$, $R_C=5K\Omega$, $R_B=1M\Omega$, $E_B=12V$, $E_C=20V$

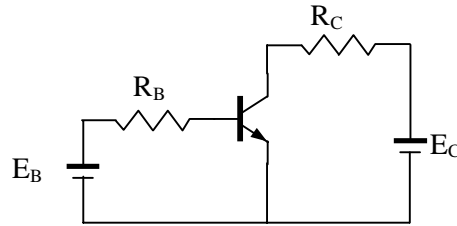


Fig. 21

EXERCICE-2

Tracer la droite de charge statique et donner le point de fonctionnement du circuit donné sur la figure 22.

$R_B=400K\Omega$, $\beta=100$, $V_{BE}=0,6V$, $E=20V$, $R_C=1,6K\Omega$

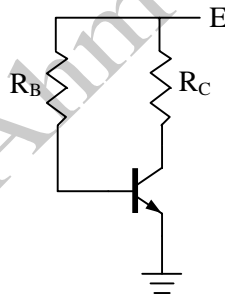


Fig. 22

EXERCICE-3

Soit le montage de la figure 23, tel que le point de fonctionnement est Q(8V, 5mA), $V_{BE}=0,6V$ et $\beta=100$, Quelles valeurs faut-il donner à R_B , R_E et E pour que le point de fonctionnement soit au milieu de la droite de charge statique.

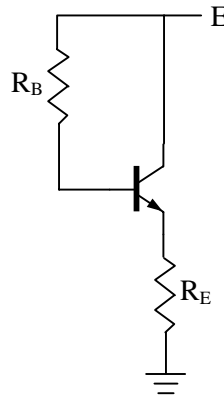


Fig. 23

EXERCICE-4

On se propose de stabiliser le transistor T de la figure 24 par une résistance R_B entre la base et le collecteur. On choisit le point de fonctionnement au milieu de la droite de charge statique. On donne $E=12V$, $R_C=2K\Omega$, $R_E=400\Omega$, $\beta=100$.

1. Déterminer I_B et R_B en négligeant V_{BE} .
2. Calculer le coefficient de stabilisation $S=\partial I_C/\partial I_{CBO}$ pour V_{BE} négligeable.

Quelle serait sa valeur si on relie R_B directement à E ?

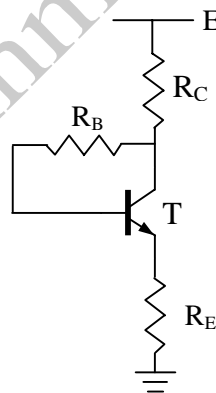


Fig. 24

EXERCICE-5

Soit le montage de la figure 25.

- 1/- Pour quelles conditions, le transistor se trouve bloqué ?
- 2/- A quelle valeur faut-il ajuster X pour que le transistor soit bloqué.

On donne : $R_B=10K\Omega$, $E=12V$, $V_{BE}=0,7V$.

- 3/- Quelle est alors la valeur la tension V_{CE} ?
- 4/- Que se passe t- il si $X > 619\Omega$
- 5/- Que se passe t- il si $X < 619\Omega$

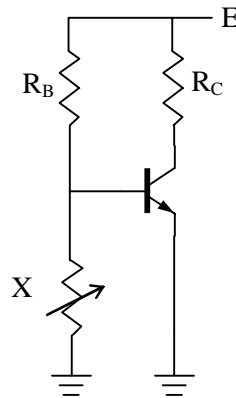


Fig. 25

EXERCICE-6

1/- Calculer dans le cas du montage, donné par la figure 26, la valeur de R_B pour que le transistor soit saturé.

On donne $E=12V$, $V_{CESAT}=0,1V$, $V_{BE}=0,7V$, $R_C=8,2K\Omega$, $\beta=100$.

2/- Que se passe t-il si on augmente R_B juste au dessus de la valeur calculée de saturation.

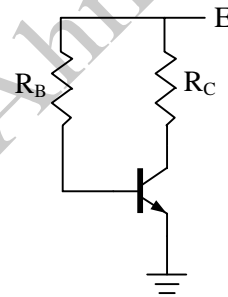


Fig. 26

EXERCICE-7

On considère le circuit de polarisation donné sur la figure 27, déterminer les valeurs à donner aux résistances de ce montage pour que le transistor soit polarisé par $V_{CE}=4V$, $I_C=4mA$, $V_{BE}=0,6V$ et $I_B=40\mu A$ et que les coefficients de stabilité thermique soient : $S=3$ et $S'=-3.10^{-3} \Omega^{-1}$. Le transistor est caractérisé par $\beta=100$.

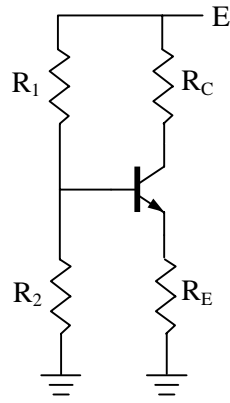


Fig. 27

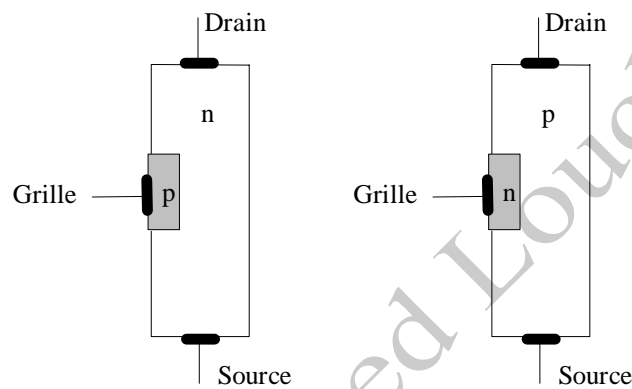
Par Prof. Ahmed Louchene

II- LES TRANSISTORS UNIPOLAIRES

II-1 INTRODUCTION

Les transistors unipolaires sont ainsi appelés parce qu'un seul type de porteur de charge intervient dans leur fonctionnement. Dans le cas où les porteurs de charge sont des trous, le transistor est dit transistor unipolaire canal P. Dans le cas contraire, il est dit du type canal N. Le principe de ces transistors est montré par la figure 12.

Bien que l'idée sur ces transistors a été imaginée dans les années trente par J. E. Lilienfeld, leur réalité ne s'est réalisée qu'en début des années cinquante.



(a) FET canal N

(b) FET canal P

Fig-12- Structure de base d'un FET

Le principe de fonctionnement est basé sur la variation ou modulation du courant dans un canal semi-conducteur par l'application d'un champ électrique transversal. Cette modulation de courant est due à la variation de la largeur de la zone de déplétion qui à son tour agit sur la section conductrice du canal d'où l'action directe sur la résistance du canal. Cet effet de champ est l'origine de l'appellation de ce genre de transistors, on trouve :

TEC : Transistor à Effet de Champ à jonction (appellation française)

JFET : Junction Field Effect Transistor (appellation américaine)

MOST : Metal Oxyde Transistors

MOSFET : Metal Oxyde Field Effect Transistor

IGFET : Insulated Gate Field Effect Transistor

Aujourd'hui le transistor MOS constitue, par sa simplicité de fabrication et ses petites dimensions, l'élément fondamental des circuits intégrés numériques à large échelle.

II-2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN JFET

On prend le cas d'un transistor à effet de champ canal N et on essaye de montrer son principe de fonctionnement comme il est montré par les figures -13.

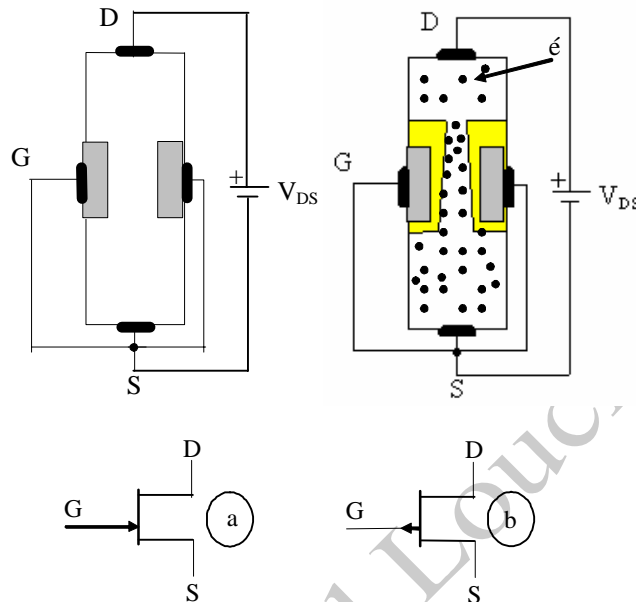


Fig-13- Principe et symbole d'un FET (a) canal N et (b) Canal P

A cause de la polarisation en inverse de la jonction grille substrat il y aura apparition d'une zone de déplétion dont la largeur croît de S vers D. Il est à constater que dans ce premier cas la tension V_{GS} est maintenue nulle.

Pour V_{DS} nulle le canal conserve sa largeur maximale donc sa plus faible résistance, quand V_{DS} commence à croître il y a génération de courant entre D et S et au même temps la largeur du canal diminue ce qui augmente la résistance de ce dernier et ça continue jusqu'à une valeur particulière V_P (tension de pincement) correspondante au pincement du canal. Au moment du pincement du canal, à toute variation de la tension V_{DS} entre drain et source ne lui correspond aucune variation du courant I_D entre drain et source. La courbe exprimée par I_D en fonction de V_{DS} pour un V_{GS} donné, qui est représentée sur la figure-14, illustre bien le principe de fonctionnement et surtout le contrôle du courant de drain par la tension entre grille et source.

Contrairement au transistor bipolaire, le transistor unipolaire est commandé par une tension; la tension V_{GS} qui à partir de la tension de pincement V_P , le Courant I_D dépend faiblement de la tension V_{DS} .

L'expression du courant de drain I_D en fonction de V_{GS} est donnée par :

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

V_P : tension de pincement du canal

I_{DSS} : courant de saturation

La figure montre un ensemble de courbes qui présentent les caractéristiques d'un FET avec un V_{GS} comme paramètre essentiel permettant de passer d'une courbe à une autre.

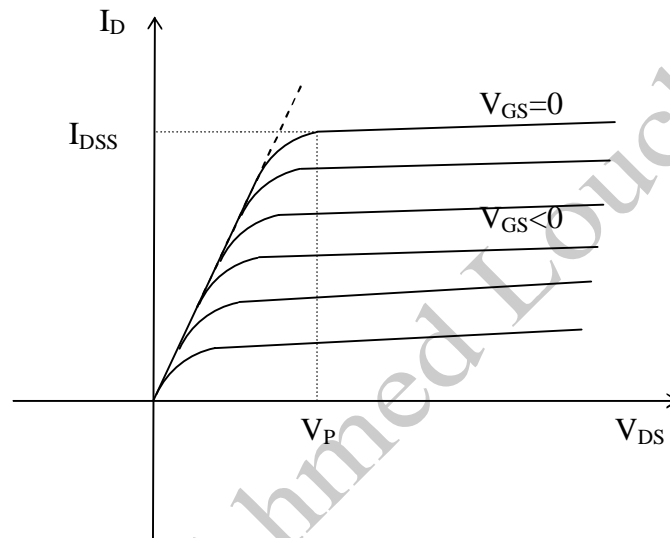


Fig-14 Caractéristiques $I_D=f(V_{DS})$ d'un FET

Sur les fiches techniques des transistors unipolaires, les constructeurs donnent la conductance mutuelle g_m . Cette caractéristique coefficient de dépendance de la variation du courant I_D en fonction de la variation de V_{GS} . Si on prend l'équation et on la différentie on obtient :

$$\frac{dI_D}{dV_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

C'est le rapport d'un courant à une tension qui correspond à une conductance. En plus c'est la sortie et fonction de l'entrée c'est pour ça qu'on la caractérise de transfert ou de mutuelle.

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{V_P} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

Avec

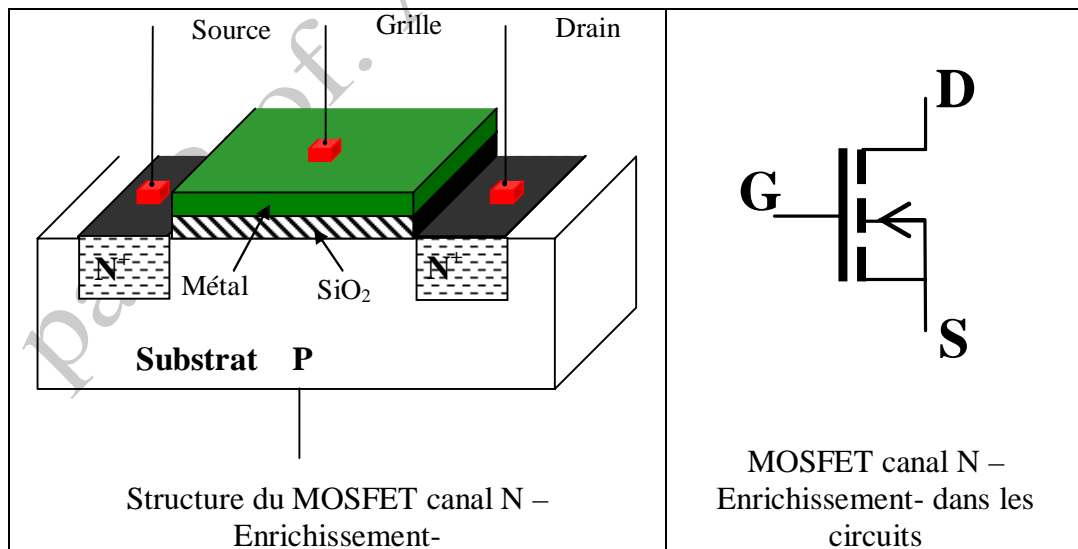
$$g_{m0} = -\frac{2I_{DSS}}{V_P}$$

Correspondant à $V_{GS}=0$. Finalement on obtient l'expression de la conductance mutuelle comme :

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)$$

II-3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN MOSFET

Le transistor MOS peut être vu comme un barreau semi-conducteur, appelé substrat; recouvert d'une couche d'oxyde sur laquelle est déposée l'électrode de grille (G). Deux autres régions, source S et drain D fortement dopées, ayant un dopage identique sont placées de part et d'autre du barreau. Par le biais d'une différence de potentiel appliquée entre la grille et le substrat, on crée, dans le barreau, un champ électrique qui a pour effet de repousser les porteurs majoritaires loin de l'interface oxyde-semiconducteur et d'y laisser diffuser des minoritaires venus de deux îlots de type complémentaire au substrat, la source (S) et le drain (D). Ce qui permet la formation d'une couche de charges mobiles appelées un canal. L'ensembles des schémas de la figure -15, illustrent d'une façon simplifiée la structure d'un transistor MOSFET et donnent son symbole dans les circuits électriques.



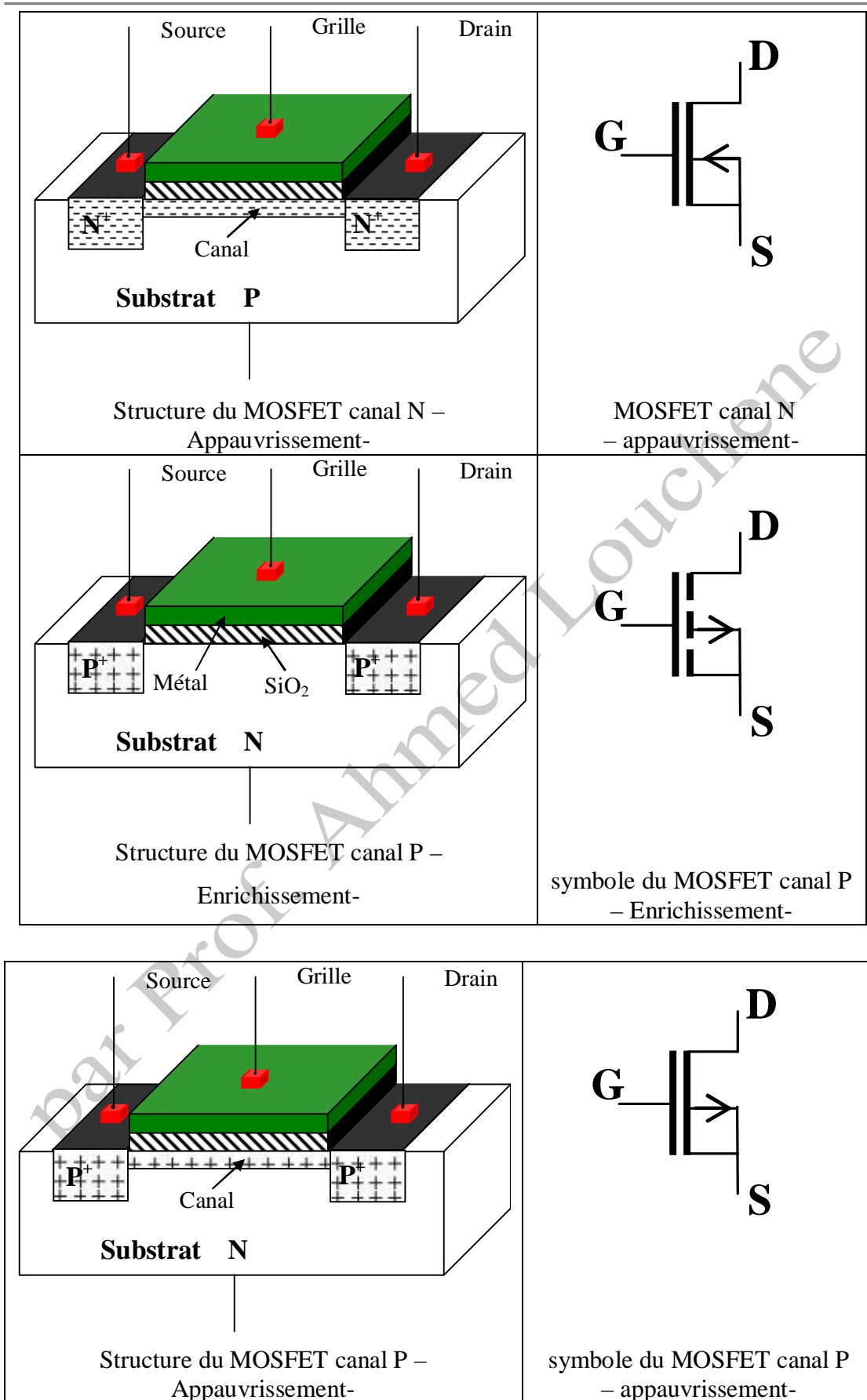


Fig-15 Principe de fonctionnement et symboles des MOSFET

Les MOSFET sont de type P ou N suivant la nature des porteurs de charges du canal formé entre la source et le drain. Le transistor est dit à enrichissement si le canal est produit par la tension Grille – Source. Cependant, il est dit à appauvrissement si le canal existe et le rôle de la polarisation est de l'appauvrir de ses charges. Les figures montrent les structures et leurs symboles électriques correspondants.

II-4 Polarisation d'un FET

Polariser un transistor revient à imposer les valeurs statiques des coordonnées du point de fonction $Q(V_{DS}, I_D)$ suivant le mode de fonctionnement dynamique désiré du montage à transistors. Nous allons donner, dans ce qui suit, quelques circuits de polarisation parmi les plus rencontrés en pratique.

II-4-1 Polarisation automatique

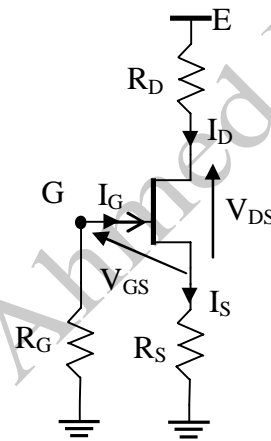


Fig-16 Polarisation automatique par résistance R_S

Nous commençons par écrire la droite de charge qui représente le lieu du point de fonctionnement.

Avec l'approximation qui est toujours vérifiée $I_D \approx I_S$ on a :

$$I_D = -\frac{V_{DS}}{R_D + R_S} + \frac{E}{R_D + R_S}$$

En appliquant la loi des mailles à l'entrée on a

$$V_G = V_{GS} + R_S I_S \text{ avec } V_G = R_G I_G \text{ où } I_G = 0$$

$$\text{D'où } V_{GS} = -R_S I_S$$

L'intersection des deux courbes $I_S = -\frac{V_{GS}}{R_S}$ et $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2$ donne le point de

polarisation donc comme on peut le constater sur la figure 17 il suffit d'ajuster la valeur de R_S pour obtenir la point de fonctionnement désiré.

Pourquoi on qualifie cette polarisation d'automatique, c'est parce qu'elle représente un contrôle de l'emplacement du point de fonction :

Si I_D croît $\Rightarrow I_S$ croît $\Rightarrow V_{GS}$ diminue $\Rightarrow I_D$ diminue

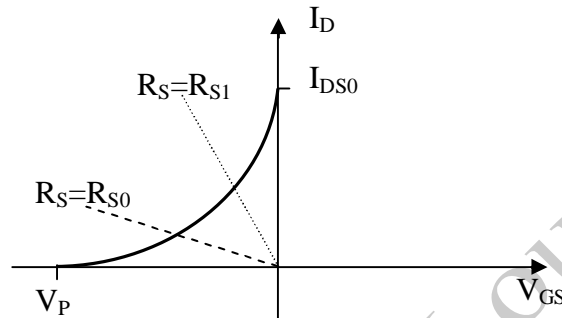


Figure-17 Caractéristique d'entrée

II-4-2 Polarisation automatique par tension auxiliaire

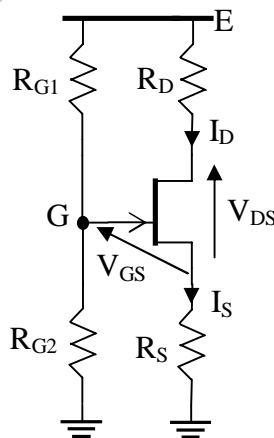


Figure-18 Polarisation avec tension auxiliaire

Le courant de grille I_G du transistor est nul, ce qui permet de prendre les deux résistances R_{G1} et R_{G2} en série. Par conséquent, le potentiel de la grille peut être déterminé par application du diviseur de tension :

$$V_G = \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} E$$

La loi des mailles nous permet d'écrire :

$$V_G - V_{GS} - R_S I_S = 0 \text{ d'où } I_D = -\frac{V_{GS}}{R_S} + \frac{R_{G2}}{R_{G1} + R_{G2}} \frac{E}{R_S}$$

Pour conserver la caractéristique d'une impédance d'entrée très grande dans le régime dynamique, une résistance de l'ordre du MΩ est insérée entre le point du diviseur de tension et la grille du FET. La figure 19 illustre ce cas.

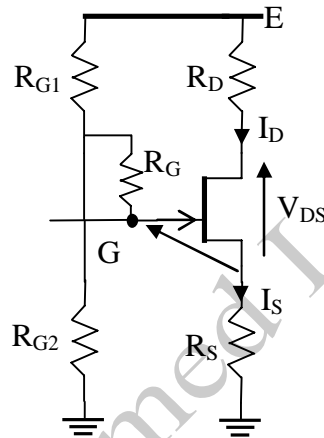


Figure-19 Polarisation avec tension auxiliaire et maintient de la résistance d'entrée très grande

II-4-3 Polarisation par une source de courant

Dans ce cas de polarisation le courant de polarisation I_D est fixé par le choix du courant électromoteur d'une source de courant placée au niveau de la source, comme il est illustré sur la figure 20.

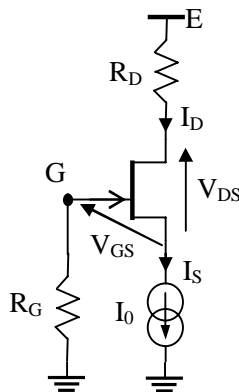


Figure-20 Polarisation avec une source de courant

Dans le cas pratique la source de courant par un montage à base de transistor bipolaire. Nous avons deux configurations possibles :

Cas de la figure 21

Dans ce cas une alimentation bipolaire (E, -E) est exigée.

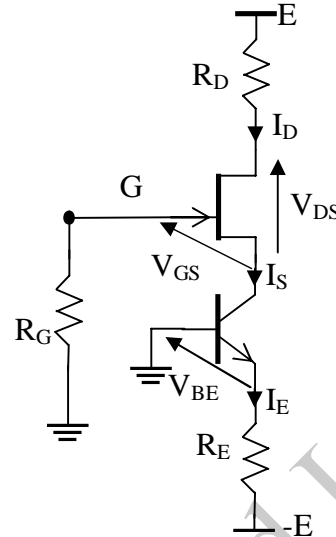


Figure-21 Polarisation avec une source de courant

Du circuit de la figure 21, nous tirons :

$$I_D = I_S = I_C = I_E$$

Donner une valeur à I_D revient à fixer la valeur du courant I_E ; courant définissant le courant électromoteur de la source du courant. La maille limitée par la base du transistor bipolaire et la tension $-E$ nous permet d'obtenir :

$$E - V_{BE} - R_E I_E = 0 \Rightarrow I_E = \frac{E - V_{BE}}{R_E}$$

Le type de matériau du transistor nous permet de déterminer la valeur de V_{BE} (0,6V pour le silicium et 0,2 V pour le germanium). Pour une tension de polarisation $-E$ connue, il suffit de choisir la valeur qu'il faut donner à la résistance R_E pour fixer la valeur de I_E qui correspond à la valeur de I_D recherché.

Cas de la figure 22

Pour remédier à l'inconvénient correspondant à la nécessité d'une alimentation bipolaire pour la polarisation du montage dans le cas de la figure 21, on applique une tension auxiliaire à la base du transistor bipolaire à partir d'une tension de polarisation unipolaire, comme il est illustré par la figure-22.

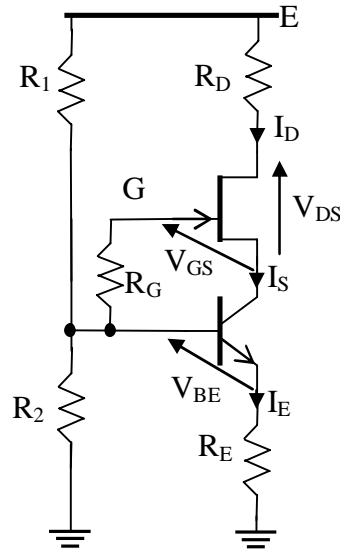


Figure-22 Polarisation avec une source de courant avec tension auxiliaire et maintien de la résistance d'entrée très grande

Grâce au diviseur de tension R_1 , R_2 , la base du transistor bipolaire dans la figure ci-dessus est portée au potentiel :

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

En appliquant la loi des mailles entre la base du transistor et la masse, on aboutit à la relation :

$$V_B - V_{BE} - R_E I_E = 0 \Rightarrow I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E}$$

Avec E et V_{BE} connues, I_E peut être ajusté par le choix de la valeur de la résistance R_E .

Exemple

Dans le cas d'une alimentation automatique d'un FET, on demande de donner le circuit ainsi que les valeurs des résistances et de leurs puissances. Sachant que sous une tension d'alimentation $E=30V$ nous avons :

$$V_{DS}=8V, I_D=2,5mA, \text{ et } V_{GS}=-2V.$$

Solution

Le circuit correspondant à une polarisation automatique donné sur la figure 23.

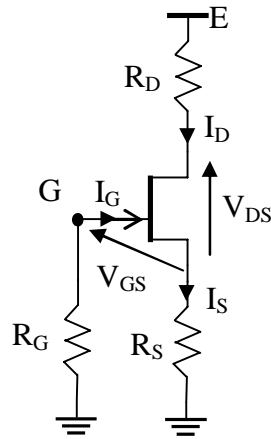


Fig. 23

Calcul de R_G

La résistance R_G est choisie très grande de l'ordre du $M\Omega$.

Calcul de R_S

La tension $V_{GS} = -2V \Rightarrow R_S I_S = R_S I_D = 2V \Rightarrow R_S = \frac{2}{2,5 \cdot 10^{-3}} = 800\Omega$

$$P_{R_S} = R_S I_D^2 = 5mW$$

Calcul de R_D

$$V_{R_D} = R_D I_D = E - V_{DS} - V_S \Rightarrow R_D = \frac{E - V_{DS} - V_S}{I_D}$$

$$R_D = 8K\Omega$$

$$P_{R_D} = R_D I_D^2 = 50mW$$