

INITIATION

A LA PRATIQUE DE L'ÉLECTRONIQUE

III - LES TRANSISTORS

Il serait inconvenable de vouloir manipuler les circuits électroniques sans connaître ni utiliser les transistors.

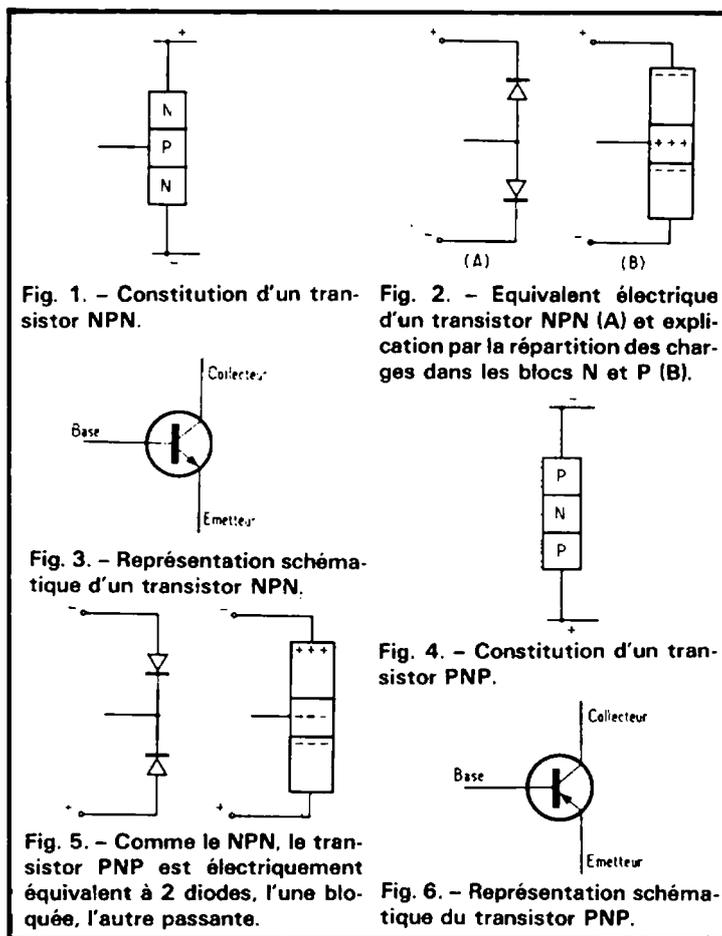
La découverte de l'effet transistor a permis une évolution considérable de l'électronique.

Cet article est une introduction aux circuits à transistors bipolaires. Nous parlerons des transistors à effet de champ une autre fois. Il faut d'abord savoir ce qu'est un transistor, connaître la différence entre les NPN et les PNP, entre les modèles au germanium et ceux au silicium, savoir que son numéro d'appellation donne une indication sur son utilisation possible.

Avant de le mettre sous tension, il est indispensable de prendre connaissance des quatre caractéristiques les plus importantes : V_{CEmax} , I_{Cmax} , P_{Cmax} et le gain de courant.

En cas de doute, deux manipulations sont facilement réalisées pour s'assurer que le composant est en bon état.

D'autres manipulations seront proposées pour mieux faire connaissance avec le transistor.



Présentation du transistor

Dans le précédent article, nous avons vu que la diode semi-conductrice était compo-

sée de deux blocs de semi-conducteurs, l'un étant du type N, l'autre du type P, et que, suivant la polarité de la tension appliquée, cette diode pouvait être « passante » ou « bloquée ».

En ajoutant un troisième

bloc, on obtient un transistor. Si le bloc ajouté est du type N, le transistor est du type NPN (fig. 1). Nous voyons que cet ensemble peut être comparé à deux diodes montées en série, l'une étant bloquée, l'autre passante, étant donné la polarité de la tension appliquée (fig. 2).

La représentation symbolique d'un transistor NPN est donnée sur la figure 3 avec le nom des électrodes : « collecteur », « base » et « émetteur ». Le collecteur d'un transistor NPN est connecté du côté positif de la tension d'alimentation. La jonction entre le collecteur et la base est toujours bloquée, celle entre la base et l'émetteur est toujours passante.

Si le troisième bloc ajouté à la diode est du type P, c'est un transistor PNP que nous obtenons (fig. 4). Ce transistor aussi est équivalent à deux diodes en série (fig. 5), dont l'une est bloquée, l'autre passante, suivant la polarité appliquée au transistor. Le collecteur d'un transistor PNP se trouve du côté négatif de l'alimentation. La figure 6 représente le symbole d'un transistor PNP. Le sens de la flèche n'est pas le même que pour un NPN. Cette flèche indique le sens du courant : du + au -.

Un transistor, qu'il soit PNP ou NPN est monté dans un boîtier qui peut être en plastique ou métallique. Les trois fils de sortie correspondent aux trois électrodes : émetteur, base et collecteur (fig. 7). Si le transistor doit supporter des puissances importantes, son boîtier, qui est métallique, doit être fixé sur une plaque de refroidissement, d'où l'existence de deux trous de fixation dans le boîtier.

Ce type de transistor de puissance ne possède que deux fils de sortie, le collecteur étant relié électriquement au boîtier.

L'effet transistor

Après cette présentation, voyons comment fonctionne un transistor, et pour cela nous prendrons un modèle du type NPN (fig. 8). Le bloc de base a été représenté beaucoup plus mince, tel qu'il est en réalité. Avec seulement une tension appliquée entre collecteur et émetteur, aucun courant ne passera, puisque la jonction collecteur-base est bloquée, donc équivalente à un circuit ouvert. Mais si nous appliquons entre base et émetteur une tension U_{BE} légèrement supérieure au seuil de la diode « base-émetteur », telle que le pôle + soit relié à la base, un courant traverse la jonction base-émetteur. Les électrons du bloc N de l'émetteur sont attirés par le côté positif de U_{BE} .

L'épaisseur de la base étant très mince, une grande partie des électrons arrivant dans cette zone sont happés par la tension U_{CE} beaucoup plus élevée que la tension appliquée sur la base.

Pour une centaine d'électrons quittant l'émetteur, 99 atteignent le collecteur, un seul électron sort par la base.

On doit donc se souvenir que pour avoir un bon fonctionnement d'un transistor, la tension de polarisation appliquée sur la base doit rendre passant l'espace base-émetteur. Cette tension doit être supérieure à

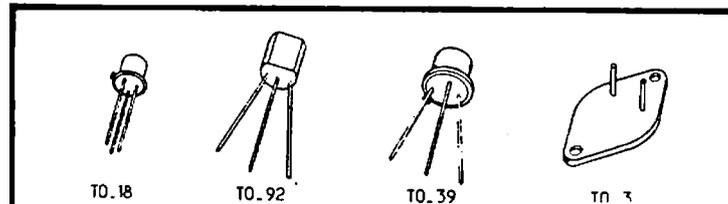


Fig. 7. - Boîtiers des transistors cités sur le tableau II.

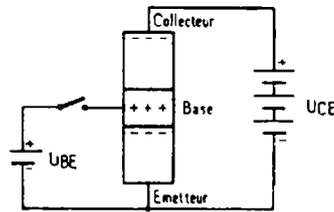


Fig. 8. - Explication du fonctionnement d'un transistor.

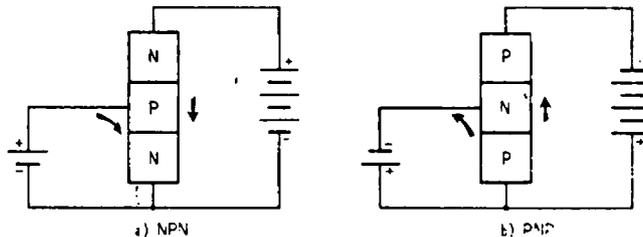


Fig. 9. - Le courant collecteur est beaucoup plus élevé que le courant base.

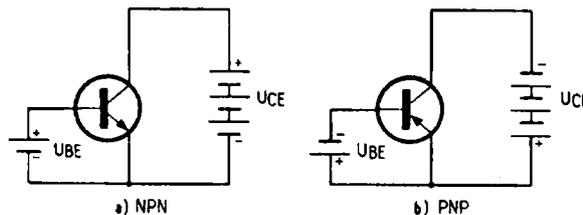


Fig. 10. - Polarité des tensions appliquées à un transistor.

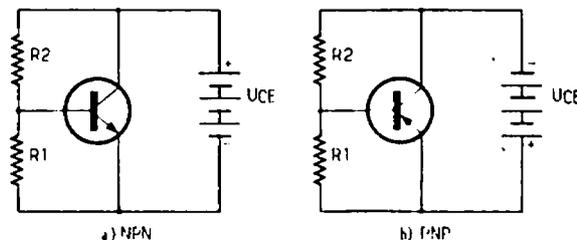


Fig. 11. - Transistor alimenté par une seule alimentation.

la tension de seuil qui est de 0,7 V pour les transistors silicium et entre 0,1 à 0,3 V pour ceux au germanium. Il faut se rappeler également que la polarité de la tension appliquée au collecteur doit être telle que la jonction collecteur-base soit bloquée. Malgré cela un courant passera à travers cette jonction (effet transistor).

La figure 10 indique la polarité des tensions appliquées aux deux types différents de transistor. Pour n'utiliser qu'une seule source, il est tout à fait courant d'utiliser un pont de résistances. La tension aux

bornes de R_1 doit être légèrement supérieure à la tension de seuil, soit $U_{R_1/R_1 + R_2} > U_{\text{seuil}}$ (fig. 11).

Caractéristiques des transistors

Les transistors sont utilisés pour l'amplification BF ou HF, certains peuvent effectuer une amplification de puissance assez forte. D'autres sont utilisés en commutation comme nous le verrons.

Chaque transistor a une appellation différente grâce à laquelle il est possible de savoir le type de matériau qui a été utilisé pour sa fabrication (germanium ou silicium) et son utilisation (HF, BF, puissance, etc.). Il est malheureusement impossible d'après cette appellation, de savoir si le transistor est PNP ou NPN.

Vous trouverez sur le tableau I le code des transistors et des diodes utilisées le plus couramment. Si un transistor est marqué BF 255, nous savons ainsi qu'il s'agit d'un modèle HF au silicium utilisé dans les appareils « grand public » (radio, télévision, magnétophone). Si nous lisons sur un composant : AA 119, il s'agit d'une diode de détection au germanium. Une diode marquée BAY 93 est réservée à l'usage professionnel.

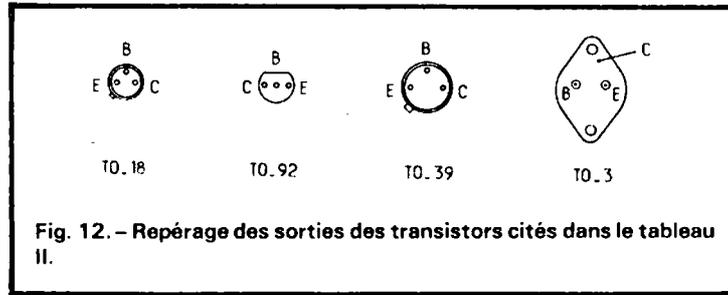
Beaucoup de fabricants de semi-conducteurs n'utilisent pas ce code, et on est obligé de consulter un lexique pour avoir

TABLEAU I Code pour reconnaître les diodes et les transistors		
1 ^{re} lettre	2 ^e lettre	N ^o d'ordre
A = Germanium B = Silicium	A = diode de détection B = diode « varicap » C = transistor BF D = transistor BF de puissance F = transistor HF S = commutation petite puissance Y = diode de puissance Z = diode Zener	3 chiffres (pour matériel « grand public ») 1 lettre (X, Y, Z) + 2 chiffres (pour équipements professionnels)

des précisions. Un grand nombre de diodes ont une appellation commençant par 1 N... Beaucoup de types de transistors sont dénommés 2 N... suivi d'un numéro d'ordre.

Chaque transistor a des caractéristiques bien précises concernant son gain et ses limites d'utilisation. On conçoit qu'un composant semi-conducteur ne peut pas supporter une tension trop élevée. Il existe quatre caractéristiques qu'il faut respecter absolument pour obtenir une bonne fiabilité. Ce sont :

- la tension collecteur-émetteur maximale, $V_{CE \max}$;
- le courant collecteur maximal, $I_{C \max}$;
- la puissance collecteur maximale, $P_{C \max}$;
- le gain de courant B ou β (let-



tre grecque bêta), suivant qu'il s'agit du gain en continu ou en alternatif.

Vous trouverez sur le tableau II les caractéristiques de quelques transistors silicium d'un emploi très courant. En lisant les pages publicitaires du « Haut-parleur », on peut être effrayé par le grand nombre de transistors proposés. En fait on utilise toujours les mêmes types, comme ceux

que vous trouverez sur le tableau I. Il s'agit de transistors basse fréquence que nous avons divisé en quatre classes d'utilisation : la classe « standard » concerne les applications les plus courantes pour lesquelles on ne demande au montage aucune contrainte sévère. Les transistors faible bruit sont employés dans le premier étage d'amplificateurs basse fréquence. La série 1 A

rend possible une amplification d'une certaine puissance. Enfin les transistors de commutation ont une utilisation bien spéciale.

Dans la colonne « gain de courant » vous remarquerez que ce gain peut varier, par exemple, entre 125 et 900. Certains transistors peuvent être triés en gain et comporter une lettre A, B, C suivant la fourchette de gain. Ainsi le transistor BC 108 A a un gain compris entre 125 et 260. Celui du BC 108 B se trouve entre 240 et 500, tandis que celui du BC 108 C est situé entre 450 et 900.

La dernière colonne du tableau indique le type de boîtier du transistor. Ce boîtier peut être en plastique (TO-92) ou métallique (TO-18, TO-39 et TO-3). La désignation des sorties est donnée sur la figure 12, ces transistors étant vus du dessous. Il faut noter que la disposition indiquée n'est valable que pour les types cités dans le tableau II, l'ordre des sorties n'étant pas toujours le même pour le même type de boîtier. Ainsi, pour certains transistors avec boîtier TO-92, les sorties B et E sont interverties.

TABLEAU II
Caractéristiques principales des transistors
Silicium BF les plus courants

Utilisation	Structure	Types	Caractéristiques limites			Gain de courant	Boîtier
			$V_{CE \max}$	$I_{C \max}$	$P_{C \max}$		
Standard	NPN	BC107	45 V	100 mA	0,25 W	125-900	TO-18
		BC108	20 V			125-900	
		BC109	20 V			240-900	
	PNP	BC237	45 V	100 mA	0,25 W	125-900	TO-92
		BC238	20 V			125-900	
		BC239	20 V			240-900	
Faible bruit	NPN	BC177	45 V	100 mA	0,25 W	125-900	TO-18
		BC178	25 V				
		BC307	45 V	100 mA	0,25 W	125-900	
	PNP	BC308	25 V				TO-92
		BC558	30 V				
		BC414	50 V	100 mA	0,25 W	125-900	
Série 1 A	NPN	BC140	40 V	1 A	0,65 W	40-250	TO-39
		BC141	60 V				
	PNP	BC160	40 V	1 A	0,65 W	40-250	TO-39
		BC161	60 V				
Commutation	NPN	2N1613	50 V	500 mA	3 W*	40-120	TO-39
		2N1711				100-300	
	PNP	2N3055	60 V	15 A	115 W*	20-70	TO-3
		2N2905	60 V	600 mA	3 W*	100-300	TO-39

* avec radiateur.

Comment contrôler un transistor ?

La mesure complète des caractéristiques d'un transistor, dont nous n'avons donné que les quatre plus importantes, est un travail énorme demandant un appareillage complexe et coûteux. Il est cependant facile de savoir si un transistor est en bon état, en utilisant un matériel très réduit. Deux contrôles peuvent être aisément effectués : l'état des jonctions et l'amplification du transistor.

Le meilleur moyen de s'exercer pour ces contrôles est de tester d'abord un transistor que nous savons en bon état.

Pour ces manipulations, nous utiliserons une planche de connexion, une ou deux piles de 4,5 V, quelques résis-

tances et un contrôleur universel.

Nous commencerons par le contrôle de la jonction émetteur-base. En fait, il suffit de mettre en série une pile de 4,5 V, le contrôleur branché en mesure d'intensité, la jonction émetteur-base et une résistance afin de limiter le courant. Le branchement est indiqué sur la figure 13. Le transistor que nous avons testé était un BC 108 A, donc un NPN dont le courant collecteur maximal est 100 mA. Puisque la jonction émetteur-base est plus fragile que la jonction collecteur-base, nous limiterons le courant direct à 40 mA. Le calcul de la résistance de protection est facile à faire, c'est une application de la loi d'Ohm : tension aux bornes de la résistance divisée par le courant la traversant. La tension aux bornes de R est la tension de la pile (4,5 V) moins la chute de tension dans la jonction (0,7 V) soit 3,8 V. Le courant dans R est le courant limite max. de 40 mA. Le rapport donne 95Ω . Nous prendrons la valeur normalisée de 100Ω .

La jonction émetteur est bonne si nous avons un courant dans le contrôleur, la borne + de la pile étant du côté de la base. En inversant le branchement de la pile, le courant doit être nul.

Le contrôle de la jonction collecteur-base se fait d'une façon identique, il suffit de déconnecter le contrôleur de l'émetteur et de le brancher sur le collecteur. La constatation doit être la même que pour la première manipulation, le courant ne devant passer que dans un sens.

La mesure peut être encore simplifiée si nous remplaçons le contrôleur et la résistance par une petite ampoule de 4 V, 40 mA, celle-ci ne s'allume que dans le sens passant.

Il est évident que pour le contrôle d'une jonction il est toujours indispensable de faire deux tests, le deuxième étant l'inversion de la tension appliquée. Si dans les deux cas nous avons un courant, il y a court-circuit. Si le courant est nul dans les deux cas, la jonction est coupée.

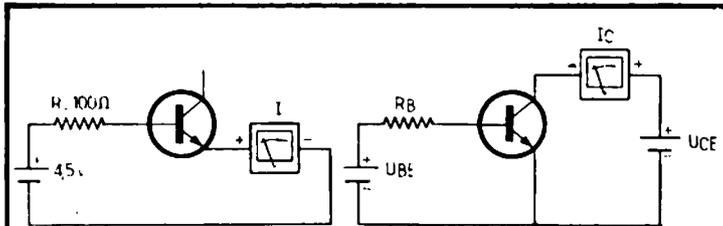


Fig. 13. - Contrôle de la jonction base-émetteur.

Fig. 14. - Mise en évidence de l'effet transistor.

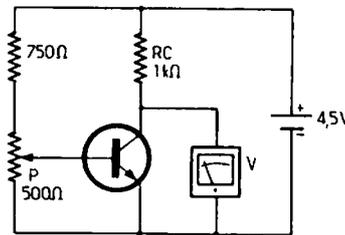


Fig. 15. - Montage d'un amplificateur.

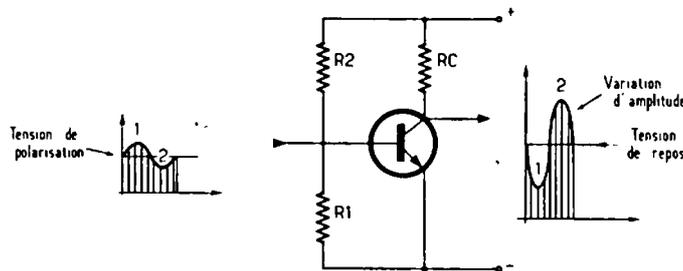


Fig. 16. - Variations de tension à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur.

Mise en évidence de l'effet transistor

Le schéma que nous utilisons est représenté figure 14. Comme le courant de base est toujours faible par rapport au courant collecteur, et que sa mesure est difficile, nous ne brancherons pas le contrôleur dans le circuit de base. Ce courant I_B sera déduit d'après la tension appliquée et la résistance insérée. Autrement dit, nous ferons varier I_B en changeant de résistance. Le contrôleur, branché en milliampèremètre sera inséré dans le circuit collecteur.

Le calcul de la résistance R_B a été indiqué dans le paragraphe précédent. Si nous ne branchons pas la base (base « en l'air ») le courant collecteur est nul. En faisant passer dans la base un courant I_B de 0,1 mA :

$$R_B = \frac{4,5 - 0,7}{0,1} = 45 \text{ k}\Omega.$$

En insérant une résistance normalisée de 47 kΩ en série avec la pile nous lisons sur le contrôleur un certain courant collecteur, soit par exemple 13 mA. Le gain du transistor est égal au rapport courant collecteur sur courant de base, soit :

$$\frac{13 \text{ mA}}{0,1 \text{ mA}} = 130$$

ce qui est normal pour un BC108A.

La mesure peut être refaite avec d'autres valeurs de résistance, donc de courant base. On évitera cependant de ne pas dépasser la valeur limite de courant collecteur de 100 mA. Vous remarquerez que le gain est variable en fonction du courant collecteur. Pour le BC108 par exemple, le maximum de gain est situé entre 10 et 20 mA.

Ce montage de mise en évidence de l'effet transistor peut être simplifié en n'utilisant qu'une seule pile. La résistance R_B peut être déconnectée de la source U_{EB} et être branchée sur le pôle positif de la pile U_{CE} .

Amplification de tension

Une des applications des transistors est l'amplification de tension. Sur la figure 15 est représenté un transistor monté en amplificateur de tension. La résistance R_C dans le circuit collecteur permet de recueillir la tension amplifiée. La tension à amplifier est celle entre base et émetteur. Le contrôleur branché en voltmètre est placé entre collecteur et émetteur. Le réglage du potentiomètre est tel que la tension entre collecteur et émetteur est égale à la moitié de la tension de la source, soit $4,5 \text{ V}/2$ ou 2,25 V. Cette tension est appelée « tension de repos ». De même, la tension continue entre base et émetteur est appelée « tension de polarisation ». Une variation de tension appliquée entre base et émetteur se traduit par une variation amplifiée de tension entre collecteur et émetteur. Autrement dit, la variation de tension de part et d'autre de la tension de polarisation se retrouve amplifiée de part et d'autre de la tension de repos (fig. 16).

En manipulant le curseur du potentiomètre P nous pouvons faire les remarques suivantes : en faisant varier très légèrement la tension à l'entrée (entre base et émetteur) nous avons une forte variation à la sortie (entre collecteur et émetteur). D'autre part, en augmentant la tension à l'entrée (curseur du potentiomètre vers le + de la pile) la tension lue sur le voltmètre diminue. On dit qu'il y a « opposition de phase » entre l'entrée et la sortie. Ceci est représenté sur les signaux de tension de la figure 16, l'alternance positive (1) à l'entrée se traduit par une alternance négative à la sortie.

Avant de démonter votre circuit, nous voudrions vous indiquer un moyen de contrôler facilement un transistor dans un circuit sans être obligé de le dessouder.

Il suffit de court-circuiter, avec un petit bout de fil, la base

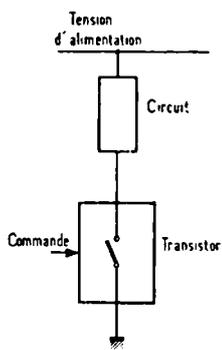


Fig. 17. - Circuit commandé par un transistor de commutation.

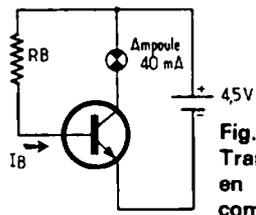


Fig. 18. Transistor en commutation.

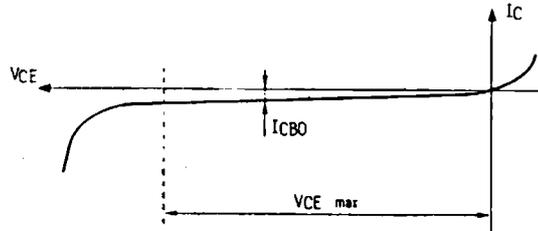


Fig. 19. - Courant parasite collecteur.

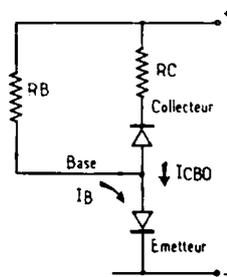


Fig. 20. - Effet de I_{CBO} et I_B .

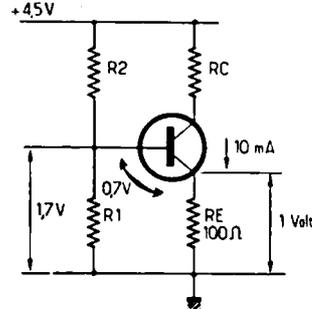


Fig. 21. - Stabilisation d'un circuit transistorisé.

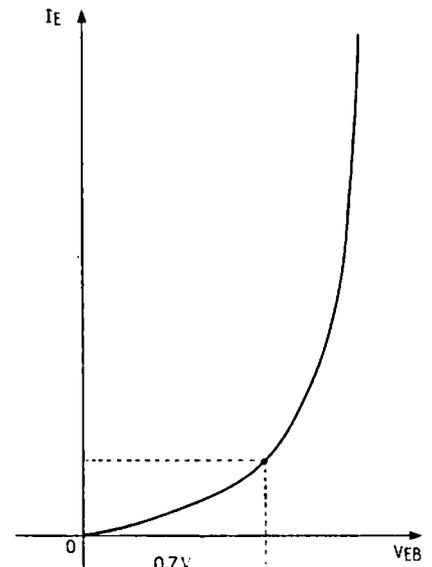


Fig. 22. - Caractéristique du circuit émetteur.

et l'émetteur. Si le transistor est en bon état, la tension collecteur variera. Le fait de court-circuiter la base et l'émetteur est sans danger pour le transistor. Le courant base est alors nul, entraînant la suppression du courant collecteur. S'il n'y a plus de courant collecteur, la chute de tension aux bornes de R_c disparaît et le voltmètre indique la tension d'alimentation, ici 4,5 V.

courant du collecteur divisé par le gain du transistor.

Le schéma d'un transistor en commutation est donné sur la figure 18. Vous pouvez en faire l'expérimentation facilement. Lorsque le courant de base est nul, l'espace collecteur-émetteur est considéré comme un circuit ouvert (transistor bloqué). En appliquant une tension entre base et émetteur, le courant I_B , s'il est suffisant, fera apparaître dans le collecteur un courant I_C élevé. L'espace collecteur-émetteur est alors équivalent à un émetteur fermé (transistor saturé). On dit que le transistor fonctionne en « tout ou rien ». En mesurant la tension aux bornes de la charge, ici une ampoule, on a soit 0 V, soit 4,5 V.

Les transistors utilisés en commutation sont des modèles spéciaux (voir le tableau II) dont la résistance entre collecteur et émetteur est très faible lorsqu'ils sont saturés, et très élevés lorsqu'ils sont bloqués. Pour un circuit tel que celui de la figure 18, un transistor standard (BC107 ou 108) fait tout à fait l'affaire.

Sachant que l'ampoule est allumée pour 40 mA, et connaissant le gain de courant du transistor (gain = 130), nous calculons I_B (toujours la loi d'Ohm !) puis la valeur de R_B . Le courant I_B est 0,3 mA. La tension aux bornes de R_B

est égale à la tension de la pile moins la tension de seuil de la jonction base-émetteur. Puisqu'il s'agit d'un transistor silicium, nous avons : $4,5 \text{ V} - 0,7 \text{ V} = 3,8 \text{ V}$.

La résistance R_B est alors :

$$\frac{3,8}{0,3} = 12,6 \text{ k}\Omega.$$

Pour être sûr d'avoir un courant de commande suffisant, nous prendrons une résistance R_B égale à 10 k Ω .

Stabilisation en température

La jonction base-collecteur est comparable à une diode polarisée en sens inverse. Comme toute diode, elle possède un courant de fuite extrêmement faible augmentant avec la température (fig. 19). Ce courant est désigné par I_{CBO} , qui sont les initiales de Intensité Collecteur-Base (avec circuit émetteur) Ouvert. Il peut augmenter considérablement et gêner ainsi le bon fonctionnement de l'étage.

Ce courant I_{CBO} passe dans la jonction base-émetteur et s'ajoute au courant I_B (fig. 20). Ce surcroît de courant augmente la température du transistor, d'où nouvel accroissement de I_{CBO} . Ce cercle vicieux pouvant aller jusqu'à la destruction du transistor. Pour

combattre cela, on utilise différents moyens pour stabiliser le courant dans le transistor.

L'emploi d'un pont de résistances dans le circuit de base est déjà un remède pour avoir une tension base constante. Une amélioration est obtenue par l'adjonction d'une faible résistance dans le circuit émetteur (fig. 21).

L'explication de ce système de régulation est simple. Lorsqu'il y a augmentation de ce courant parasite dans le circuit émetteur, la tension aux bornes de la résistance R_E augmente et compense ainsi l'augmentation de la tension base-émetteur. En regardant l'allure du courant émetteur en fonction de la tension émetteur-base (fig. 22), on se rend compte que l'augmentation du courant a pour effet d'augmenter la tension V_{BE} . La tension aux bornes de R_1 étant constante, le fait d'augmenter la tension aux bornes de R_E a pour effet de compenser cette augmentation de V_{BE} .

Plus la résistance R_E sera élevée, meilleure sera la compensation. Une forte valeur de cette résistance sera à éviter pour deux raisons. D'abord une certaine puissance est perdue dans R_E , ensuite la tension de sortie du transistor est réduite à cause de cette tension aux bornes de R_E .

J.-B. P.