

Initiation à la pratique de l'électronique

LE TRANSISTOR DE COMMUTATION

LE TRANSISTOR UTILISE EN COMMUTATION

Le transistor est souvent utilisé en commutation. Il est alors comparable à un interrupteur pouvant ouvrir ou fermer un circuit de courant fort, en réponse à une commande de faible puissance. Le schéma équivalent d'un circuit électrique commandé par un transistor de commutation est représenté sur la figure 1.

L'intérêt de l'emploi d'un tel transistor est qu'il est possible de commander un composant de puissance (relais, moteur...) à partir d'un composant ne pouvant fournir qu'un faible courant (photodiode...), et cela sans procédé mécanique.

Le montage de base d'un transistor en commutation est donné sur la figure 2. On retrouve la tension d'alimentation U , le circuit à commuter (R_C) et l'interrupteur (un transistor NPN). La commande s'effectue à travers une résistance (R_B). Celle-ci peut être reliée soit au zéro volt, soit à la tension positive $+U$.

Sur la position 1 de l'interrupteur de commande, le transistor est bloqué. On dit aussi qu'il est au « cut-off ». Le courant collecteur est nul, le circuit représenté par R_C n'est pas alimenté.

Sur la position 2, un courant circule à travers la résistance R_B et l'espace base-émetteur. On sait

Le but de cet article est de montrer ce qu'est un transistor de commutation, d'expliquer son fonctionnement et d'indiquer comment calculer les composants qui lui sont associés, afin d'obtenir un montage fiable et de bon rendement.

La connaissance des caractéristiques de la charge et du signal de commande est nécessaire avant de commencer tout calcul.

La détermination des éléments de l'étage est en fait assez simple quand il s'agit de montages d'amateurs. Mais si la puissance demandée par la charge est élevée par rapport à celle du signal de commande, un circuit à deux transistors est peut-être nécessaire. De même, si l'application exige des temps de commutation assez courts, il y aura sans doute intérêt à employer des transistors spéciaux et à veiller à la valeur du courant de base.

D'autres conseils sont vitaux pour le bon fonctionnement du montage (charge selfique, moteur).

que plus la base d'un transistor NPN est positive par rapport à son émetteur, plus le courant traversant l'espace émetteur-collecteur est élevé. A un certain moment, le courant base a beau augmenter, le courant collecteur cesse de croître. On dit qu'il y a « saturation ».

Dans un montage de commutation, le transistor est soit bloqué (cut-off), soit saturé. Si le circuit est correctement calculé, le courant de base est juste suffisant pour saturer le transistor. Un surcroît de courant dans la base

rend plus difficile l'évacuation de cette zone du transistor lorsque celui-ci passe au cut-off.

CALCUL D'UN ETAGE DE COMMUTATION

L'interrupteur proprement dit est l'espace collecteur-émetteur du transistor. Il ne peut couper qu'un courant inférieur à la valeur $I_{C\max}$ autorisée par le constructeur.

Sa commande est le courant de base I_B . Celui-ci doit être au moins égal, pour fermer l'interrupteur, au courant collecteur divisé par le gain de courant (bêta ou h_{FE}) du transistor.

Prenons comme exemple le schéma de la figure 3. On ne peut imaginer plus simple comme circuit à commuter, puisqu'il s'agit d'une ampoule 4,5 V/ 40 mA. Le $I_{C\max}$ du transistor doit être supérieur à 40 mA.

Quant au courant de base, il doit être supérieur à cette valeur divisée par le gain du transistor. Mettons que ce gain soit de 130, le courant I_B doit être au moins égal à 0,3 mA.

Le circuit de commande est une résistance (R_1) dont l'extrémité E est reliée soit à 0 V, soit à la borne positive de la pile 4,5 V. Lorsque E est reliée à 0 V, le courant de base est nul, l'espace collecteur-émetteur est considéré comme un circuit ouvert, le transistor est bloqué.

En reliant le point E au + 4,5 V, le courant I_B fait apparaître dans le collecteur un courant I_C qui, s'il est assez élevé, rend incandescent le filament de la lampe. L'espace collecteur-émetteur est alors équivalent à un interrupteur fermé, le transistor est saturé.

En mesurant la tension aux bornes de la charge, dans notre cas une ampoule, nous lisons sur le voltmètre soit 0 V, soit un peu moins de 4,5 V.

Le calcul de la résistance R_1 est simple. Si nous commandons le circuit en reliant le point E au + 4,5 V, nous voyons que la tension aux bornes de R_B est égale à la tension de la pile moins le seuil de la jonction base-émetteur.

Puisque le transistor considéré est au silicium, nous avons 4,5 - 0,6, soit 3,9 V. La valeur de R_B est obtenue par la loi d'Ohm :

$$\frac{3,9}{0,3} = 13 \text{ k}\Omega$$

Afin d'être sûr d'avoir un courant de commande suffisant, nous prendrons une résistance R_B égale 10 k Ω . La marche à suivre pour le calcul du montage est donc la suivante :

1. - Il faut d'abord connaître la tension et le courant à commuter, autrement dit, la tension et le courant demandé par la charge. Dans notre premier exemple, ce sont 4,5 V et 40 mA.

2. - On en déduit le type de transistor T à choisir (valeurs V_{CE} et I_C). Se reporter au paragraphe « Quels transistors utiliser ? ».

3° Le plus délicat est le calcul de I_B . Sa valeur est donnée par la formule : $I_B = I_C / \beta$, β étant le gain de courant du transistor, qui peut varier dans de grandes proportions. Il est préférable de mesurer β expérimentalement.

4° La valeur de R_B est donnée par la formule :

$$R_B = \frac{\text{tension de commande} - V_{BE}}{I_B}$$

La tension de commande est celle à laquelle on relie le point E pour obtenir la saturation. Dans l'exemple, elle est égale à 4,5 V.

La tension V_{BE} est égale à 0,6 V pour les transistors au silicium, ou 0,2 V pour ceux au germanium, qui se font de plus en plus rares... Le plus souvent, on négligera V_{BE} , qui est petit par rapport à la tension de commande.

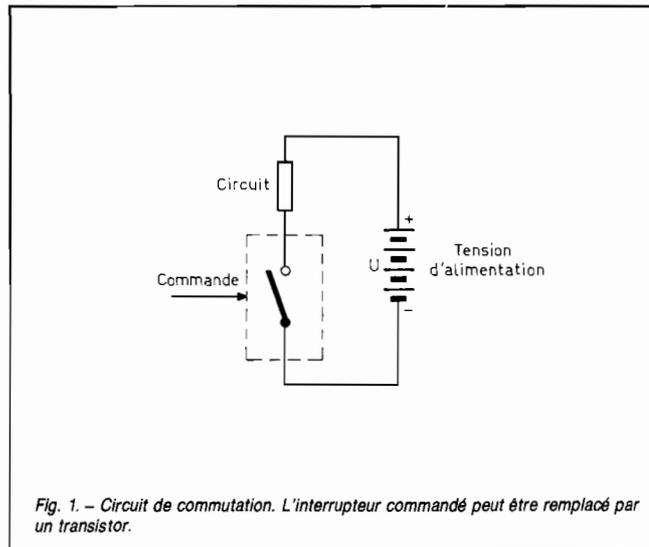


Fig. 1. - Circuit de commutation. L'interrupteur commandé peut être remplacé par un transistor.

REMARQUES PRATIQUES

Le gain d'un transistor pouvant varier dans de grandes proportions, il est préférable de mesurer son gain, ou d'obtenir expérimentalement la valeur de R_B à l'aide du montage représenté sur la figure 4. L'appareil de mesure à employer est soit un voltmètre, soit un milliampèremètre. Le potentiomètre P permet de trouver la valeur optimale de R_B pour atteindre une saturation correcte. La tension U_1 est celle qui alimente la charge R_C ; U_2 est la tension de commande du transis-

tor. Dans l'exemple, nous avons $U_1 = U_2 = 4,5 \text{ V}$.

Preons un autre exemple pour le mode d'emploi du montage. La charge R_C doit être alimentée sous 10 V ; sa consommation doit être de 100 mA. La tension de commande est de + 5 V. Le transistor a un gain pouvant se situer entre 40 et 120.

On en déduit $U_1 = 10 \text{ V}$,
 $U_2 = 5 \text{ V}$

et $R_C = \frac{10}{0,1}$ soit 100 Ω .

Suivant la valeur du gain, I_B peut varier entre 0,83 et 2,4 mA, et la valeur optimale de R_B peut se si-

tuer entre 1,7 et 5,3 k Ω . Nous placerons dans le circuit de base une résistance R de 1,5 k Ω , en série avec un potentiomètre P de 5 k Ω monté en résistance variable, le curseur étant réglé pour avoir la totalité de la résistance. Les tensions U_1 et U_2 étant branchées, nous tournons l'axe du potentiomètre tout en suivant des yeux l'aiguille des appareils. Celle du milliampèremètre augmente jusqu'au palier de saturation, tandis que celle du voltmètre diminue jusqu'à une valeur pratiquement égale à zéro. On arrête le réglage du potentiomètre dès que la saturation est atteinte. On connaît alors la valeur de R_B en mesurant, avec un ohmmètre, la résistance de R et de P. Supposons que la valeur mesurée soit 4,7 k Ω , nous connaissons alors la valeur de R_B . Nous pouvons aussi savoir quelle est la valeur de I_B pour mettre le transistor à l'état saturé. Ce courant est donné par la loi d'Ohm :

$$I_B = \frac{5 - 0,6}{4,7 \text{ k}\Omega} = 0,94 \text{ mA}$$

Nous pouvons en déduire le gain du transistor :

$$B = \frac{I_C}{I_B} = \frac{100}{0,94} = 106$$

Revenons à notre montage, commandant l'allumage d'une ampoule à filament incandescent. La résistance à froid d'une telle lampe est faible, ce qui occasionne une surintensité risquant

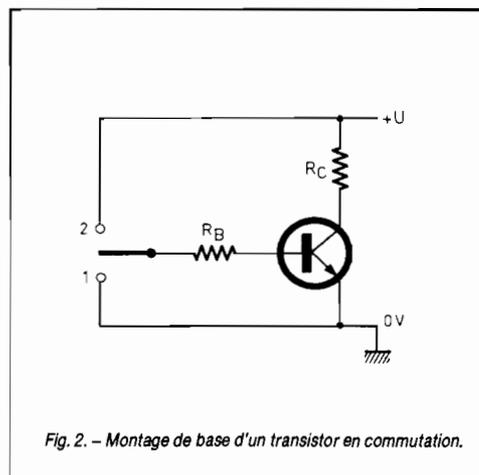


Fig. 2. - Montage de base d'un transistor en commutation.

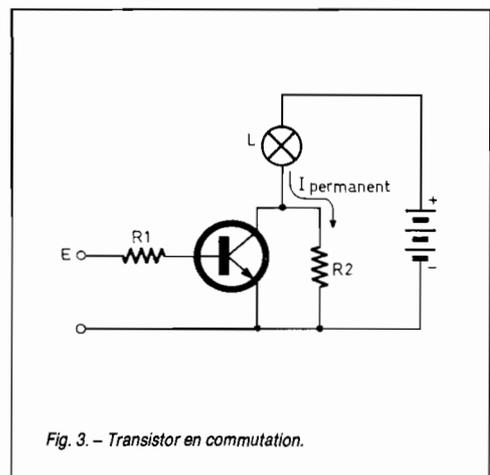
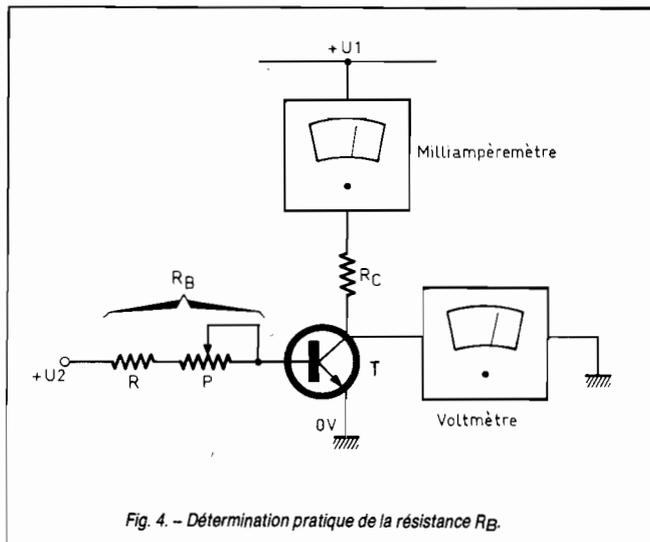


Fig. 3. - Transistor en commutation.



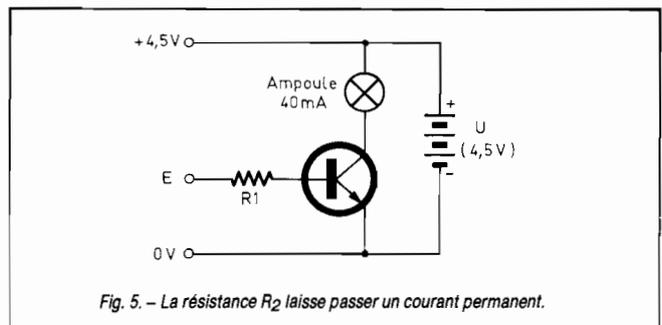
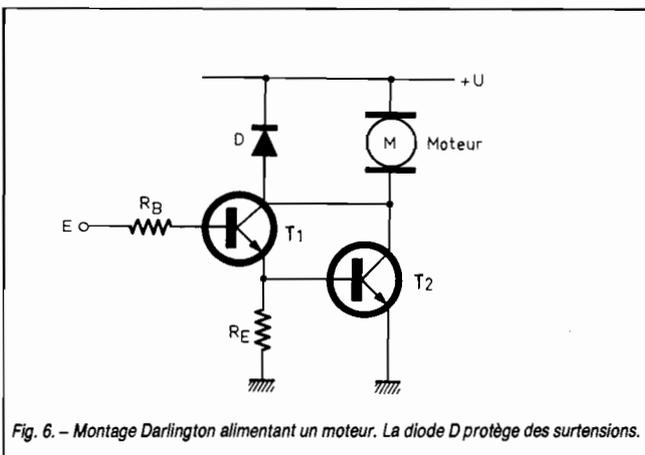
de détériorer le transistor. Un remède consiste à préchauffer le filament en laissant passer en permanence un courant dans celui-ci (fig. 5). Ce courant ne doit pas être trop élevé pour ne pas rendre lumineux le filament au repos et ne pas consommer trop d'énergie.

Nous avons pris comme exemple la commutation d'une lampe ; celle-ci peut être remplacée par un moteur, un relais ou tout autre dispositif alimenté en courant continu. Si la charge est inductive (relais ou moteur), les surtensions sont évitées par l'emploi d'une diode placée aux bornes de la charge et dont la cathode sera disposée du côté « plus » de l'alimentation (fig. 6).

MONTAGE DARLINGTON

Parfois, le courant de commande est trop faible, ou le gain du transistor n'est pas assez élevé. Une solution consiste à employer un montage Darlington. Le gain total de courant est égal au produit du gain de chacun des transistors (fig. 6).

Certains constructeurs se sont ingénies à placer un transistor Darlington dans un même boîtier. Citons le BSR50, Darlington d'usage général NPN, dont le schéma interne est donné sur la figure 7. Il se présente en boîtier plastique du type TO-92. Son



gain de courant (pour un courant I_C de 500 mA) est supérieur à 1 000.

TEMPS DE COMMUTATION

L'électronicien, qui utilise un transistor de commutation dans un circuit où la rapidité est primordiale, doit se rappeler qu'en passant de l'état bloqué à l'état passant le signal à la sortie du transistor apparaît avec un certain retard et présente une légère distorsion. Et cela même si le signal appliqué sur la base présente des flancs bien abrupts.

La figure 8 nous montre un tel étage avec les signaux s'y rapportant. On remarque que le courant collecteur ne démarre pas instantanément, mais que c'est au bout d'un certain temps, généralement dénommé « t_d » (delay time) que le courant collecteur n'atteint que les 10 % de son amplitude totale. Le temps de croissance « t_r » (rise time) est le temps nécessaire pour passer des 10 % aux 90 % du signal complet.

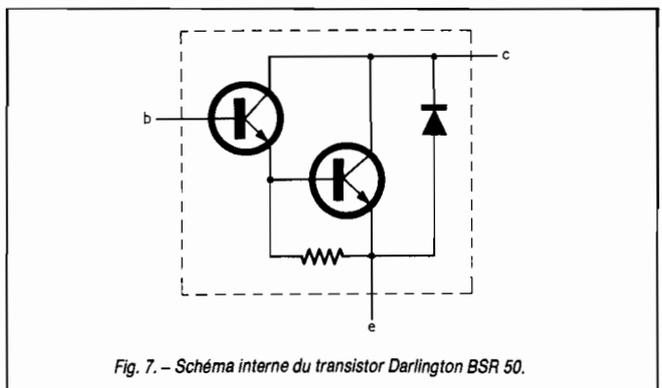
Le temps d'établissement « t_{on} » est égal à la somme du temps de retard et du temps de croissance ($t_{on} = t_d + t_r$).

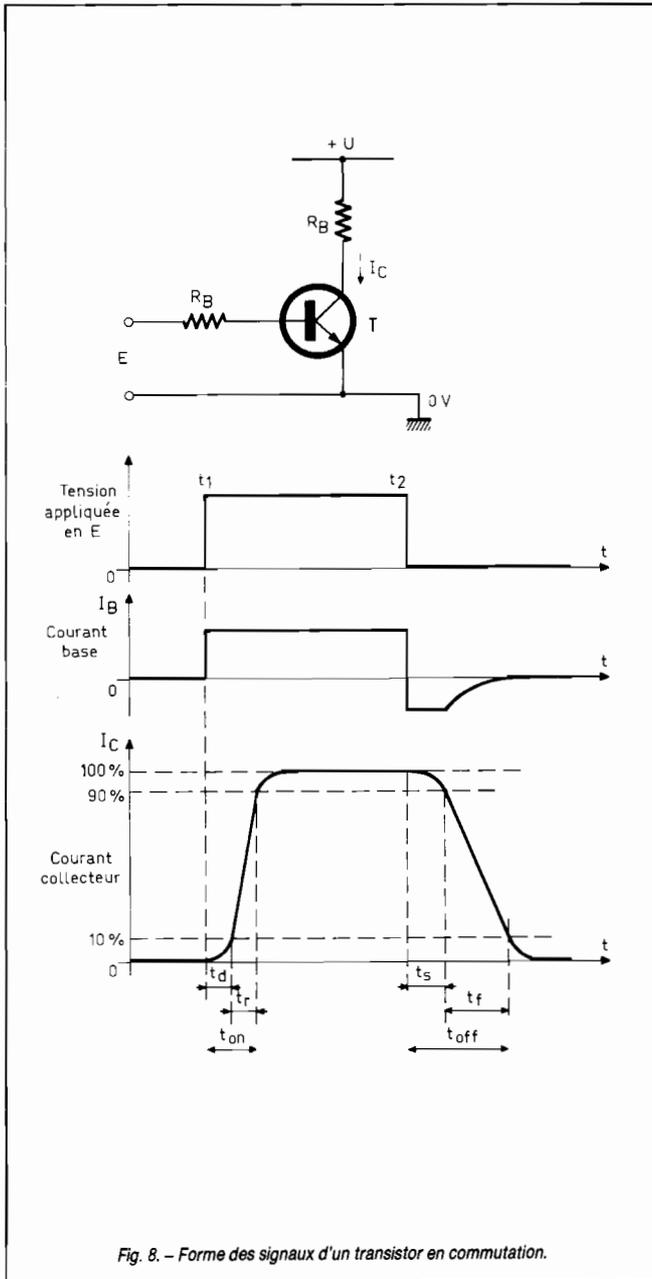
De même, lorsque la tension en E disparaît, le courant I_C prend un certain temps à disparaître. Le temps de coupure t_{off} est plus long que le temps d'établissement.

Ce temps de coupure est égal à la somme du temps de stockage (t_s) et du temps de décroissance (t_f) (storage time et fall time). Ce temps plus long est dû à l'évacuation des porteurs présents dans la base lorsque le transistor était passant. Ceci explique la forme de I_B au temps t_2 ; la partie négative montre que ces porteurs sortent de la base.

QUELS TRANSISTORS UTILISER ?

Pour les montages simples (clignotants, interrupteurs à commande manuelle...), n'importe quel transistor courant peut être utilisé (BC 108 par exemple).





Lorsque le montage doit être plus poussé et que l'on exige une puissance plus élevée et un temps de commutation relativement court, il est conseillé de choisir des transistors spécialement conçus pour le type d'application. Le tableau I indique les caractéristiques de quelques transistors de commutation courants. Cer-

tains caractéristiques sont particulièrement capitales : le temps d'établissement (t_{on}) et le temps de coupure (t_{off}). Ce dernier est donné pour un courant collecteur bien précis puisque plus le courant est élevé, plus long est le temps d'évacuation des porteurs. Une autre valeur qui a son importance est celle de la tension résiduelle collecteur-émetteur, le

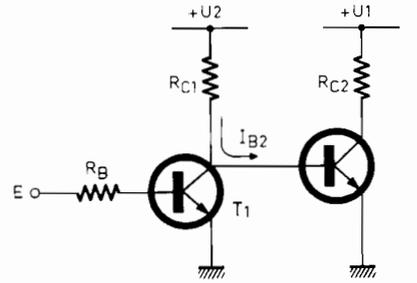


Fig. 9. - Commutation à deux étages.

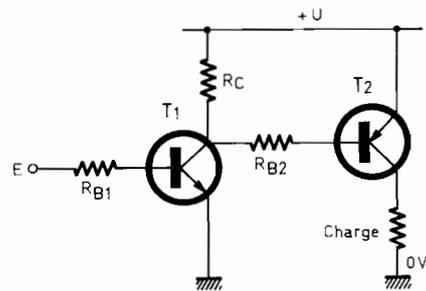


Fig. 10. - La charge a un point commun avec la masse.

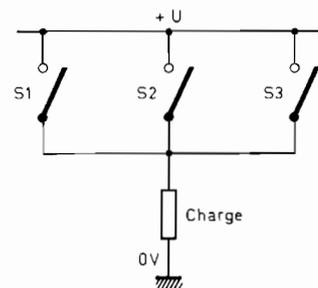


Fig. 11. - Les interrupteurs S1, S2 et S3 représentent des transistors commandant la même charge.

transistor étant passant. Elle est désignée par $V_{CE\text{sat}}$ et est donnée pour une certaine valeur de I_C correspondant à l'état passant.

INTERRUPTEURS A DEUX TRANSISTORS

Lorsque la charge demande un courant élevé, la commutation peut se réaliser avec un transistor (T_2) commandé par un transistor de petite puissance (T_1). Ces deux transistors (fig. 9) peu-

vent être alimentés par des tensions de valeurs différentes. Il ne s'agit pas de montage Darlington puisque les collecteurs ne sont pas reliés. Quand T_1 est bloqué, T_2 est passant, et inversement. Quant au calcul, on doit partir des caractéristiques de la charge et de celles du transistor T_2 , afin de calculer le courant de base I_{B2} et la résistance R_{C1} . Si l'intensité dans la charge est de 1 A et que le gain de T_2 est 100, R_{B2} sera calculé pour limiter I_{B2} à 100 mA,

$$\text{soit } R_{C1} = \frac{U_2}{I_{B2}}$$

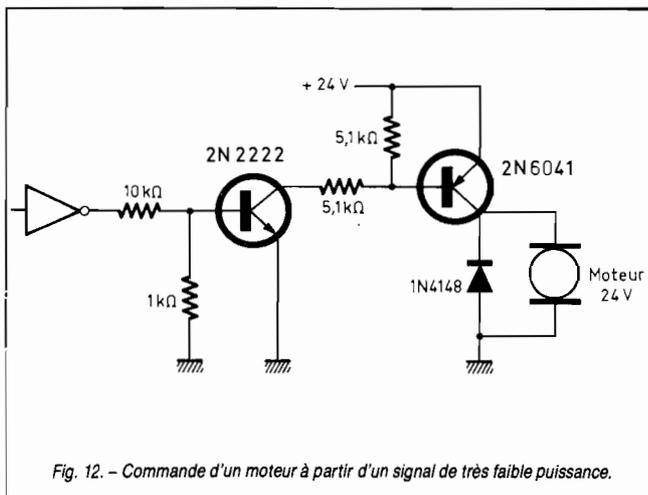


Fig. 12. - Commande d'un moteur à partir d'un signal de très faible puissance.

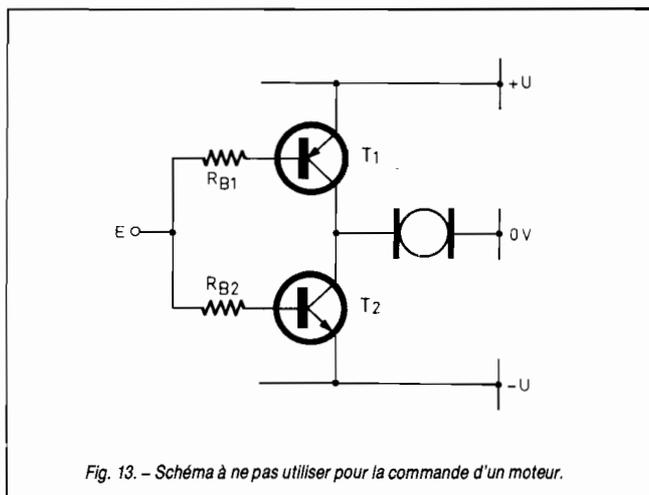


Fig. 13. - Schéma à ne pas utiliser pour la commande d'un moteur.

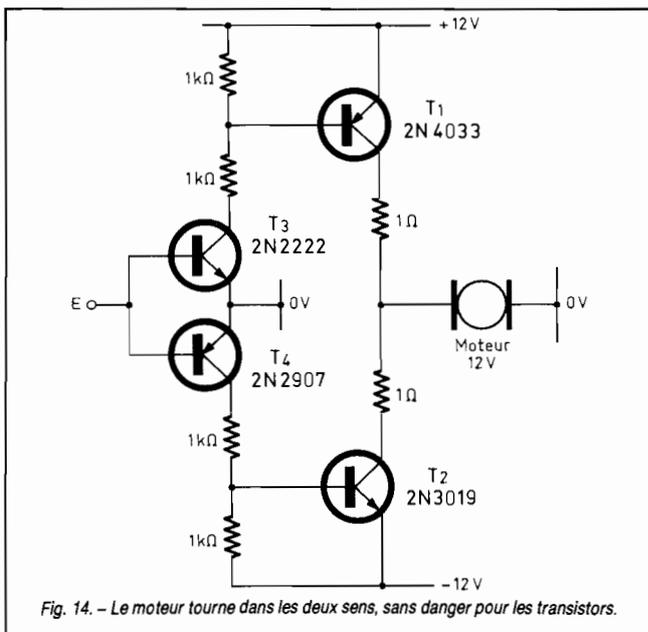


Fig. 14. - Le moteur tourne dans les deux sens, sans danger pour les transistors.

Un autre montage intéressant (fig. 10) utilise un PNP et un NPN. Un gros avantage est qu'une extrémité de la charge est reliée à la masse (le zéro volt). Au repos, le courant dans la charge est nul. La résistance R_{B2} limite le courant de base de T_2 quand T_1 est passant.

La charge, ayant un point commun, peut être commandée par plusieurs circuits de commutation indépendants les uns des autres, comme cela est montré schématiquement sur la figure 11.

Un autre schéma de commutation à deux étages est donné sur la figure 12. La commande est faite par un circuit C-MOS.

Nous avons montré (fig. 6 et 12) des schémas pour la commande de moteur à courant continu. Pour changer le sens de rotation du moteur, le moyen le plus sim-

ple est d'utiliser des transistors complémentaires (PNP/ NPN) et une alimentation double. On pense au schéma de principe de la figure 13, dans lequel soit T_1 , soit T_2 devrait être passant. Or ce montage est dangereux pour les transistors, puisque, si jamais l'un des transistors se met à conduire lorsque l'autre n'est pas complètement au cut-off, il y a risque de court-circuit entre +U et -U, entraînant la mort immédiate de T_1 et T_2 .

De plus, pour $E = 0$, il existe un courant collecteur permanent de +U à -U, dû au courant de base drainé par R_{B1} et R_{B2} .

Le schéma couramment utilisé est celui de la figure 14. Il utilise quatre transistors. L'un d'eux (T_1 ou T_2) ne devient passant que lorsque l'autre est vraiment bloqué.

J.-B. P.

Structure	Type	$P_{C \max}$ (à 45 °C)	$V_{CE \max}$	$I_{C \max}$	$V_{CE \text{ sat}}$	pour I_C	h_{FE}	pour I_C	t_{on}	t_{off}	pour I_C	Boîtier
NPN	2N2222	0,43 W	30 V	0,8 A	$\leq 1,6$ V	0,5 A	100-300	150 mA	25 ns	150 ns	150 mA	TO-18
	BC 140	0,65 W	40 V	1 A	0,6 V	1 A	40-120	100 mA	≤ 250 ns	≤ 800 ns	100 mA	TO-39
	2N2219	0,7 W	30 V	0,8 A	$\leq 1,6$ V	0,5 A	100-300	150 mA	25 ns	180 ns	150 mA	TO-39
	2N3055	115 W*	60 V	15 A	1,1 V	4 A	20-70	4 A	2,8 μ s	8,7 μ s	4 A	TO-3
PNP	2N2905	0,53 W	40 V	0,6 A	$\leq 1,6$ V	0,5 A	100-300	150 mA	< 45 ns	< 100 ns	150 mA	TO-39
	2N2907	0,35 W	40 V	0,6 A	$\leq 1,6$ V	0,5 A	100-300	150 mA	< 45 ns	< 100 ns	150 mA	TO-18
	BCY79	0,35 W	45 V	0,2 A	$\leq 0,25$	0,01 A	120-450	2 mA	≤ 150 ns	≤ 800 ns	10 mA	TO-18
	BSW40	0,7 W	80 V	1 A	$\leq 0,75$	1 A	40-400	100 mA	50 ns	300 ns	500 mA	TO-39

* avec radiateur