

## Initiation à la pratique de l'électronique

# Amplification

## à transistor

**L**ES amplificateurs basse fréquence se divisent en deux classes : les amplificateurs de puissance, comme ceux destinés à la haute-fidélité et dont la puissance délivrée va de quelques watts à plusieurs dizaines de watts, et les amplificateurs dits « de signaux faibles », c'est-à-dire ceux amplifiant des signaux de petite amplitude dont la puissance maximale de sortie ne dépasse pas le watt.

C'est par les amplificateurs basse fréquence à un seul étage que nous commencerons ce mois-ci.

Nous avons déjà parlé du calcul des composants nécessaires à la polarisation d'un transistor. Nous n'y reviendrons pas. En revanche, outre le calcul du gain des différents types d'amplificateurs, nous devons insister sur les problèmes d'adaptation et des organes de liaison. En effet, l'amplificateur est inséré dans une chaîne, il doit apporter une certaine amplification sans dégrader d'autres caractéristiques de cette chaîne.

rectangles. Il peut s'agir pour le premier d'un pré-amplificateur, d'une cellule photoélectrique ou d'une tête de lecture d'un électrophone. De toute façon, les caractéristiques doivent être connues : tension  $v$  du signal disponible et résistance interne  $R_i$  de la source (fig. 2). Ce circuit est relié à l'entrée de l'amplificateur qui, lui aussi, possède des caractéristiques précises d'entrée ( $R_e$ ) et de sortie ( $v_s$  et  $R_s$ ). La sortie de l'amplificateur est reliée à l'étage suivant dont l'impédance  $Z_L$  doit être connue.

Notons que  $v$  est la tension du transducteur (tête de lecture, par exemple) ou

la tension amplifiée de l'étage précédent ;  $v_s$  est la tension amplifiée par l'amplificateur lui-même.

Il se pose ici un problème d'adaptation. L'impédance  $R_i$  de la tête de lecture ne doit pas être court-circuitée par la faible impédance d'entrée  $R_e$  de l'ampli. Si celle-ci est vraiment trop basse, il serait souhaitable d'insérer entre les deux blocs un étage d'adaptation (transistor monté en collecteur commun). Du côté sortie, l'impédance  $Z_L$  du haut-parleur (ou l'impédance d'entrée de l'étage suivant) doit être adaptée à la résistance  $R_s$  de l'amplificateur. On se souvient que : « Le maxi-

### Les données du problème

Il n'y a pas de formule unique pour le calcul d'un amplificateur BF. Chaque application a sa solution particulière.

Le cas le plus simple est celui de l'amplificateur dont on recherche un gain précis, sans prendre en considération les circuits l'environnant. On utilise alors un seul transistor avec contre-réaction si le gain demandé n'est pas trop grand, ou deux étages (ou plus) si l'amplification totale doit être élevée.

Le plus souvent, l'amplificateur est inséré dans une chaîne dans laquelle on doit

tenir compte des impédances, des tensions et des courants. Dans de nombreux cas, la charge du transistor est imposée. C'est par exemple un haut-parleur dont la valeur ohmique est donnée, et il s'agira d'obtenir en sortie la plus grande possible.

L'ensemble peut être représenté par un schéma synoptique composé de trois rectangles : la « source », aux bornes de laquelle se trouve le signal à amplifier, l'amplificateur lui-même, et la « charge », qui peut être la fin de la chaîne (écouteur, relais, etc.) ou l'entrée d'un autre amplificateur (fig. 1).

Revenons sur ces trois



Fig. 1. — L'amplificateur est inséré dans une chaîne. Le signal fourni par la source se retrouve amplifié dans la charge.

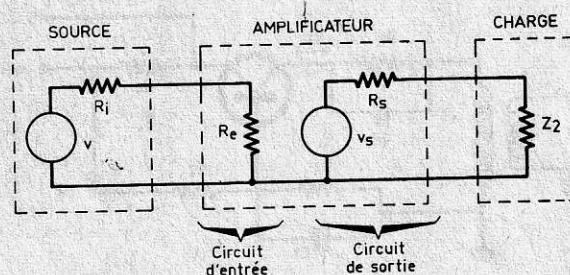


Fig. 2. — Les caractéristiques des différents éléments de la chaîne doivent être connues.

mum de puissance est transmis si les deux circuits ont des impédances identiques. » S'étant assuré que  $R_o \approx R_i$  et  $R_s \approx Z_L$ , on calcule ensuite les éléments de l'amplificateur pour obtenir le gain désiré.

## Le transistor : un amplificateur de courant

De ce que nous venons de dire, la conclusion est la suivante : il est indispensable de bien connaître les données du problème, c'est-à-dire les performances exigées, les caractéristiques des étages situés en amont et en aval de l'amplificateur, ainsi que la tension de la source d'alimentation imposée.

Ce qu'il est également bon de savoir, ce sont les caractéristiques du ou des transistors utilisés : leur gain de courant, leurs valeurs limites de tension, de courant et de puissance.

On se souvient que le gain du transistor n'est pas constant et qu'il est maximal pour une certaine valeur de  $I_c$ . De même, si l'amplificateur est destiné à la haute-fidélité, le bruit du transistor est minimal pour un courant précis, celui-ci n'étant pas forcément celui fournissant le maximum de gain. Il se pose ainsi un problème de choix.

Le transistor est un amplificateur de courant. A

une variation de courant  $\Delta I_B$  dans sa base, correspond une variation, plus grande,  $\Delta I_C$  dans son circuit collecteur. Le rapport  $\Delta I_C / \Delta I_B$

définit le gain  $\beta$ , ou  $h_{fe}$ , du transistor. Il ne faut pas confondre cette variation de courant avec le courant de polarisation circulant dans le transistor, et qui est présent même s'il n'y a pas de signal à l'entrée. Ce courant de repos est absolument nécessaire pour éviter les distorsions en sortie.

## Impédance d'entrée de l'amplificateur

Cette impédance d'entrée est généralement faible. Pour un transistor monté en base commune, cette impédance est approximativement égale au rapport  $25/I_E$  avec  $I_E$  exprimé en milliampères. Pour un courant  $I_E$  de 5 mA, la résistance interne émetteur-base est de l'ordre de 5  $\Omega$  (fig. 3).

L'impédance d'entrée d'un montage émetteur commun est déjà plus élevée, puisqu'elle est multipliée par le gain  $\beta$  du transistor. Ainsi, avec un transistor dont le  $\beta$  est de 200, et dont  $I_E = 5$  mA, l'impédance d'entrée qui est de 5  $\Omega$  en base commune, passe à 1 000  $\Omega$  en émetteur commun (fig. 4).

Dans un montage collecteur commun, l'impédance d'entrée est encore plus grande. Elle est sensiblement égale à  $\beta R_E$  (fig. 5). Toujours avec le même transistor (de  $\beta = 200$ ) chargé par une résistance  $R_E$  de 4,7 k $\Omega$ , l'impédance d'entrée est de l'ordre de 940 k $\Omega$ . Si celle-ci est encore trop basse, la meilleure solution est de choisir le montage Darlington dont l'impédance d'entrée monte à  $\beta_1 \beta_2 R_E$  (fig. 6).

En résumé, se souvenir que l'impédance d'entrée d'un montage (émetteur commun ou collecteur commun) est d'autant plus grande que l'impédance dans le circuit émetteur est élevée. L'impédance d'entrée est égale au produit de  $\beta$  par cette impédance. Cette dernière est la résistance  $R_E$  de la figure 5.

En ce qui concerne le montage de la figure 4, dont nous disions que l'impédance d'entrée était de 1 000  $\Omega$ , nous pouvons augmenter cette impédance d'entrée en insérant une résistance  $R_E$  non découplée entre émetteur et masse (point A de la fig. 4). Avec  $R_E = 100$   $\Omega$ , l'impédance d'entrée du circuit monte à 20 k $\Omega$ . En shuntant cette résistance  $R_E$  par un condensateur  $C_E$ , cette impédance diminue. Pour la connaître, on a besoin de calculer la réactance de  $C_E$  à la fréquence du signal. Cette réactance,

en parallèle sur  $R_E$ , donne l'impédance  $Z_E$  entre émetteur et masse. L'impédance d'entrée, à la fréquence du signal, est alors égale à  $\beta Z_E$ . Nous reviendrons plus tard sur ce problème.

Autre point à ne pas oublier pour le calcul de l'impédance d'entrée : les résistances  $R_1$  et  $R_2$  de polarisation. Sur la figure 4, si  $R_1 = 10$  k $\Omega$  et  $R_2 = 50$  k $\Omega$ , la résistance ajoutée en parallèle sur l'entrée est :

$$\frac{50 \times 10}{50 + 10}$$

soit 8,33 k $\Omega$ , et l'impédance d'entrée du montage, dont le calcul donne 1 000  $\Omega$ , chute à 893  $\Omega$ .

## Gain de tension d'un étage émetteur commun

Le gain de tension est le rapport de tension de sortie sur la tension à l'entrée, soit :

$$G = \frac{V_s}{V_o}$$

C'est cette formule que l'on applique lorsque l'on injecte un signal à l'entrée et que l'on observe la tension à la sortie à l'aide d'un oscilloscope cathodique.

Le calcul du gain peut se poser autrement : on a sous les yeux un schéma dont on souhaiterait connaître le gain d'après la valeur des résistances et les caractéristiques du transistor. Nous donnons, sur

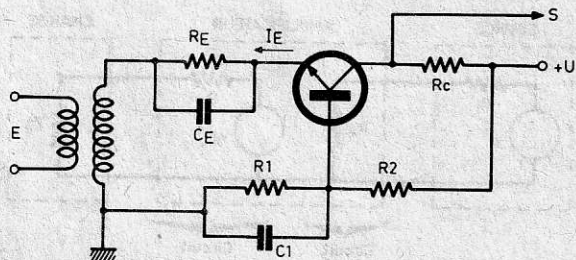


Fig. 3. — Montage base commune. Son impédance d'entrée est égale à  $25/I_E$ ,  $I_E$  étant exprimé en milliampères.

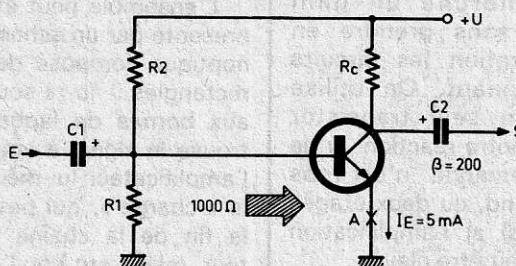


Fig. 4. — Montage émetteur commun. Si aucune résistance n'est insérée en A, son impédance d'entrée est égale à  $25 \beta / I_E$ .

la figure 7, trois circuits de transistors montés en émetteur commun.

Si l'on considère les résistances du circuit, le gain de tension est sensiblement égal au rapport « résistance collecteur sur résistance émetteur », formule qui découle directement de celle du rapport des tensions.

Le premier schéma (a), dont le courant émetteur est de 2 mA, présente une résistance interne  $r_e$  de valeur  $25/I_E$  soit  $12,5 \Omega$ . En prenant en considération les valeurs de  $R_1$  et  $R_2$ , cette résistance  $r_e$  ne change pratiquement pas. Le rapport  $R_c/r_e$  nous donne un gain de tension de 376. Cette formule n'est qu'approximative. Pour le deuxième montage (b) le calcul est plus précis. Le gain est égal au rapport  $R_c/R_E$  soit, avec les valeurs données,  $G = 10$ . Quant au troisième montage (c), la réactance du condensateur  $C_E$  est faible ; on est ramené au premier montage, puisque l'émetteur du transistor se trouve au potentiel commun (la masse) en alternatif.

Imaginons que cet étage soit inséré dans un ensemble devant amplifier des signaux dont la fréquence doit varier de 50 Hz à 10 kHz. A la fréquence la plus basse de la bande passante, le condensateur  $C_E$  de  $500 \mu F$  a une réactance capacitive de  $6,4 \Omega$  à 50 Hz :

$$X_c = \frac{1}{6,28 \text{ CF}}$$

L'émetteur est pratiquement au potentiel de la masse.

Pour les fréquences plus élevées, la réactance de  $C_E$  est évidemment encore plus faible et on peut considérer que le gain est constant pour toute la bande passante.

Un moyen facile de cal-

culer de tête la réactance d'un condensateur est de se souvenir que : « 1 microfarad à 100 hertz fait 1 600 ohms. » On sait que la réactance  $X_c$  est inversement proportionnelle à la fréquence et à la capacité, ou, en d'autres termes, que la réactance est d'autant plus petite que la fréquence et la capacité sont plus élevées. Ainsi, pour notre exemple précédent, puisque « 1  $\mu F$  à 100 Hz fait 1 600  $\Omega$  », 100  $\mu F$  à 100 Hz nous donne 16  $\Omega$ , 500  $\mu F$  à la même fréquence : 3,2  $\Omega$  et 500  $\mu F$  à 50 Hz présente une réactance de 6,4  $\Omega$ .

### Les condensateurs de liaison

Un autre point important est le choix de la valeur des condensateurs de liaison. Pour avoir une bonne transmission, la réactance de  $C_1$  (fig. 4) doit être faible par

rapport à l'impédance d'entrée du transistor (le condensateur  $C_1$  et l'impédance d'entrée constituant un diviseur de tension). Si cette impédance d'entrée ( $= \beta R_E$  ou  $\beta r_e$ ) est de 1 000  $\Omega$ , on aura intérêt à choisir un condensateur dont la réactance, à la fréquence la plus basse de la bande passante, soit inférieure ou égale au dixième de cette impédance d'entrée, soit dans votre cas 100  $\Omega$ .

Quant au condensateur  $C_2$ , son choix dépend de l'impédance d'entrée de l'étage suivant. Ce condensateur, également, devra présenter une réactance 10 fois plus faible par rapport à cette impédance.

La polarité du condensateur doit aussi attirer notre attention. L'armature positive est placée du côté du potentiel le plus positif. On suppose que le circuit précédant ce transistor est pratiquement au potentiel

de la masse. Ainsi, l'armature « plus » se trouve côté base (tension positive égale à 0,6 V, ajoutée à la chute de tension aux bornes d'une éventuelle résistance  $R_E$ ). Il va de soi que, si le transistor est du type PNP (alimenté par une tension négative), la polarité des condensateurs est inversée.

### Comment augmenter l'impédance d'entrée d'un étage

Une des caractéristiques d'un amplificateur à transistor est sa faible impédance d'entrée. Ceci pose souvent des problèmes d'adaptation.

C'est pour cette raison que le montage base commune est assez peu rencontré dans les circuits usuels. Nous avons vu

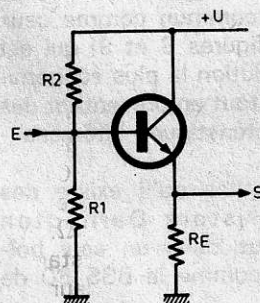


Fig. 5. — Montage collecteur commun. Son impédance d'entrée (sans tenir compte de  $R_1$  et  $R_2$ ) est égale à  $\beta R_E$ .

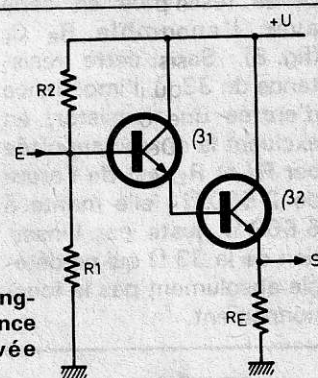


Fig. 6. — Montage Darlington. Il possède l'impédance d'entrée la plus élevée ( $= \beta_1 \beta_2 R_E$ ).

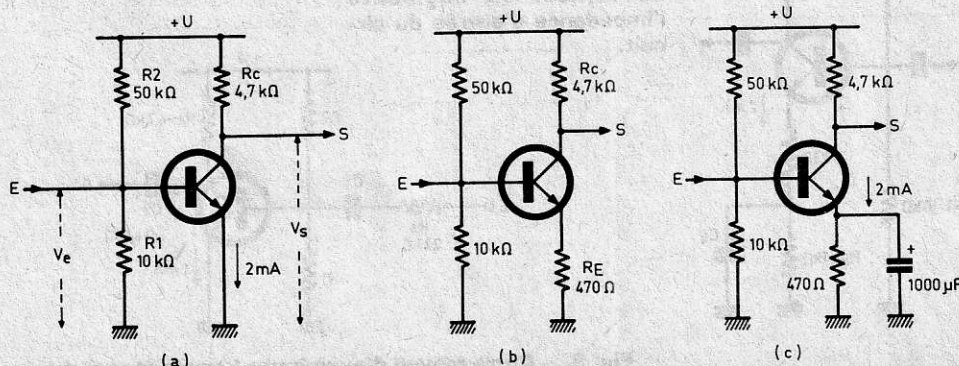


Fig. 7. — Différentes variantes du montage émetteur commun.

qu'en base commune cette impédance est plutôt faible :

$$r_e = \frac{25}{I_E}$$

tout juste égale à quelques dizaines d'ohms. Le montage base commune est d'ailleurs employé comme premier étage des récepteurs VHF ou UHF, pour adapter facilement le câble de 75  $\Omega$  relié à l'antenne. En basse fréquence, on l'utilise rarement, sauf, par exemple, pour adapter un micro électrodynamique de quelques centaines d'ohms de résistance interne.

Le montage base commune est donc plutôt délaissé pour celui à émetteur commun. L'impédance d'entrée est bien plus élevée puisque le gain  $\beta$  entre en ligne de compte, et il est courant d'avoir au moins 1 000  $\Omega$ . Cette valeur est encore trop petite pour certaines applications. Une astuce consiste à insérer une petite résistance en série avec l'ensemble  $R_E$   $C_E$  (fig. 8). Sans cette résistance de 33  $\Omega$ , l'impédance d'entrée du transistor, en excluant la charge apportée par  $R_1$  et  $R_2$ , est de l'ordre de 2 500  $\Omega$  ; elle monte à 6 600  $\Omega$ , juste par l'insertion de la 33  $\Omega$  qui ne dérègle absolument pas le fonctionnement.

Une autre méthode, également utilisée, consiste à placer une résistance  $R_S$  en série dans le circuit d'entrée (fig. 9). Cette nouvelle résistance a une valeur élevée (22 k $\Omega$ ) par rapport à l'impédance d'entrée du transistor lui-même. On peut donc dire que l'impédance d'entrée de ce montage est de 22 k $\Omega$ . Quant au gain de tension de l'amplificateur, il est égal à :

$$\beta = \frac{R_c}{R_s}$$

soit 42,7 dans notre exemple.

Si cette solution est encore insuffisante, le meilleur remède consiste à faire précéder l'étage émetteur commun par un montage collecteur commun comme celui représenté sur la figure 5. L'impédance d'entrée est alors égale au produit gain de courant du transistor par la charge dans l'émetteur. Cette charge est constituée par  $R_E$  en parallèle sur la résistance d'entrée  $R'$  de l'étage suivant. On veillera à ce que les résistances de polarisation  $R_1$  et  $R_2$  soient assez grandes afin de profiter au maximum de l'impédance d'entrée élevée du transistor. On remarque que, souvent,  $R_1 = R_2$ , ce qui amène à avoir une tension de repos sur l'émetteur égale à la moitié de la

tension d'alimentation  $U$ , pour fonctionner en classe A et obtenir, en sortie, un signal d'amplitude maximale.

Il faut se rappeler aussi que ce montage collecteur commun possède un gain de tension inférieur à l'unité, égale au rapport :

$$\frac{R_E}{r_e + R_E}$$

$R_E$  représentant la valeur de la résistance dans le circuit émetteur, en parallèle avec l'impédance  $R'$  de l'étage suivant.

Une impédance d'entrée encore plus élevée est possible avec un montage Darlington (fig. 6). Ces types de circuit résolvent ce problème d'impédance d'entrée élevée, par l'adjonction d'un transistor supplémentaire. C'est à l'utilisateur de décider s'il est préférable d'avoir deux transistors (collecteur commun + émetteur commun) et de profiter d'une impédance et d'un gain élevés, ou bien d'un seul transistor (émetteur commun comme ceux des figures 8 et 9) qui est la solution la plus économique, tout en présentant des caractéristiques intéressantes.

Notons qu'il existe des transistors Darlington vendus dans un seul boîtier, comme le BSS 50 de RTC.

## La pente du transistor

La pente est parfois utilisée pour le calcul du gain d'un étage émetteur commun. On sait que la pente indique la variation de courant  $\Delta I_c$  pour une valeur donnée de variation de tension sur la base. Ainsi, un étage dont la pente est de 80 mA/V recevant une variation de 0,1 V à l'entrée donne un  $\Delta I_c$  de 8 mA.

Il existe une formule pour obtenir la pente, valable pour tous les transistors bipolaires :  $S = 40 I_c$ . La lettre S désigne la pente exprimée en mA/V si  $I_c$  est en milliampères. C'est-à-dire que, si nous avons un transistor parcouru par un courant de repos  $I_c$  égal à 1 mA, la pente se trouve être de 40 mA.

Une autre forme de la formule de la pente est :

$$S = \frac{1}{r_e}$$

ou encore :

$$S = \frac{1}{r_e + R_E}$$

si une résistance  $R_E$  non découplée se trouve dans le circuit émetteur. Pour notre exemple ( $I_c = 1$  mA) :

$r_e = 25 / 1$ , soit 25  $\Omega$ , et :

$$S = \frac{1}{r_e} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ A/V}$$

ou 40 mA/V. Si une résistance de 470  $\Omega$  est insérée dans l'émetteur, la pente S est alors égale à :

$$S = \frac{1}{25 + 470} = 2 \text{ mA/V}$$

Connaissant la pente, on peut calculer le gain de tension par la formule :

$G = S \times R_c$ . Toujours avec un courant  $I_c$  de 1 mA, une charge  $R_c$  de 4,7 k $\Omega$  et un signal de 10 mV à l'entrée, le gain de tension est de 40 mA/V  $\times$  4,7 k $\Omega$  = 188, et la tension de sortie est de 188  $\times$  10 mV = 1 880 mV ou 1,9 V.

J.-B. P.

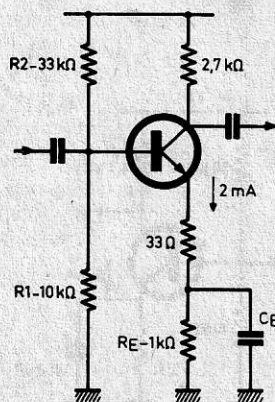


Fig. 8. — Pour l'insertion de la résistance de 33  $\Omega$  non découplée, on augmente l'impédance d'entrée du circuit.

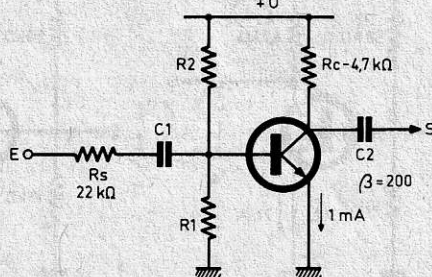


Fig. 9. — Autre moyen d'augmenter l'impédance d'entrée, tout en profitant d'un gain de tension acceptable.