

INITIATION

A LA PRATIQUE DE L'ÉLECTRONIQUE

VI - LES AMPLIFICATEURS A TRANSISTORS

NOTRE but aujourd'hui est de définir un schéma d'amplificateur à transistor.

Avant de commencer, il est primordial de définir en premier lieu les performances exigées. S'agit-il d'une amplification de courant ou de tension ? Faut-il que l'entrée ait une résistance élevée ? Le bruit doit-il être pris en considération ?

Ensuite il est indispensable de connaître les caractéristiques limites des transistors que l'on va utiliser.

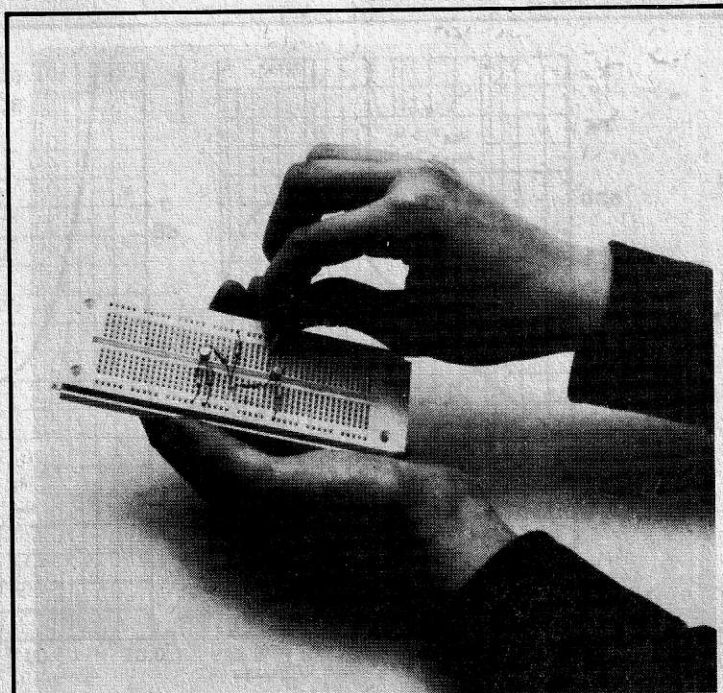
On passe ensuite au stade du calcul des composants pour une polarisation correcte, avant de s'attacher à la réalisation pratique. Celle-ci se fera de préférence sur une plaque de connexions pour modifier aisément le montage. Un voltmètre continu, un générateur BF et un oscilloscope seront utiles pour contrôler les résultats.

Nous ne parlerons aujourd'hui que des amplificateurs de faibles signaux, basse fréquence, n'utilisant

que des transistors bipolaires. Les amplificateurs de puissance seront traités ultérieurement, de même que les transistors à effet de champ.

Schéma de base

Dans le numéro 1660 du Haut-Parleur, nous avons présenté le transistor comme



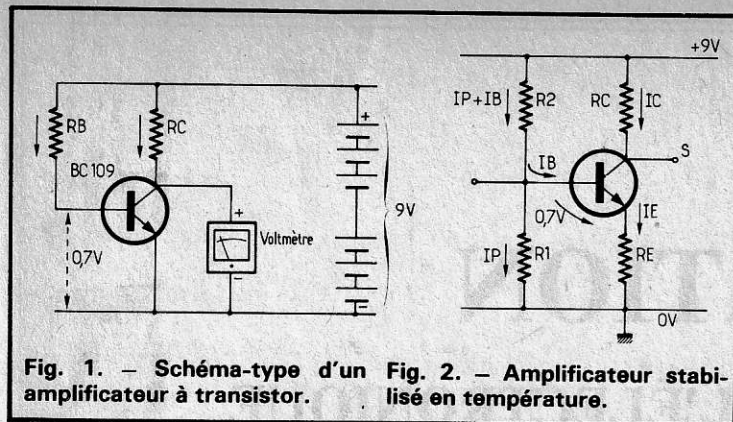
Une plaque de connexions permet un assemblage rapide.

un dispositif amplificateur de courant.

Reprenons d'abord le schéma type d'un amplificateur à transistor (fig. 1). Nous voyons premièrement qu'il utilise un transistor au silicium (cas le plus fréquent actuellement). La tension est de 0,7 V pour une polarisation normale. Ce montage ne comporte que deux résistances R_C et R_B dont les valeurs dépendent de la tension d'alimentation, du type de transistor et du courant collecteur choisi par le concepteur.

Si nous disposons de deux piles de 4,5 V, d'une résistance de 4,7 k Ω , et que nous savons que notre transistor a un gain de courant β égal à 250, il nous faut encore définir le courant collecteur, ou la tension collecteur, pour calculer la résistance R_B . Si $I_C = 1$ mA, le courant de base sera I_C/β soit 4 μ A. Etant donné que la jonction base-émetteur d'un transistor silicium est de 0,7 V, et en application de la loi d'ohm, on sait que la résistance R_B doit être de 2 M Ω .

En fait un schéma aussi



simple est à déconseiller, d'abord pour sa mauvaise tenue en température ; puis aussi pour la raison suivante : si nous remplaçons le transistor par un autre du même modèle, nous n'obtiendrons pas forcément la même tension en sortie. En effet, le bêta d'un transistor peut varier parfois dans un rapport de 1 à 3.

Nous avons vu que les semi-conducteurs sont sensibles à la température, et qu'une augmentation de celle-ci entraîne une surintensité dans le transistor, créant à son tour une élévation de température, d'où la création d'un cercle vicieux. Le composant ne fonctionne plus dans des conditions normales. Il pourrait également être détruit de cette façon.

En branchant un voltmètre entre collecteur et masse, et en approchant du boîtier du transistor un fer à souder ou une autre source de chaleur comme un sèche-cheveux, l'augmentation du courant collecteur sera telle que le voltmètre nous indiquera une chute de tension collecteur.

En plaçant une résistance \$R_E\$ dans le circuit émetteur, nous obtenons une stabilisation en température. Aux bornes de la source d'alimentation, se trouve un pont de résistance \$R_1\$ et \$R_2\$ pour fixer le potentiel de base.

Avant de calculer les éléments, il faut rechercher les caractéristiques principales du transistor dans le catalogue du constructeur ou dans un lexique. Notre choix étant un BC109B, nous voyons que les caractéristiques sont :

- $V_{CE\text{ max.}} = 20\text{ V}$
- $I_{C\text{ max.}} = 100\text{ mA}$

- $P_{C\text{ max.}} = 0,25\text{ W}$
- $\beta = 200\text{ à }450$.

C'est à nous maintenant de choisir les paramètres du montage amplificateur, notamment les courants et les tensions de polarisation. Ces paramètres étant définis, nous pourrions calculer les résistances du montage, puis, en passant à la phase pratique, contrôler le montage.

La tension d'alimentation choisie étant de 9 V, nous sommes bien en-dessous de la valeur limite.

Pour le choix du courant collecteur, nous avons à prendre en considération le fait que le gain de courant du transistor est maximal entre 10 et 20 mA, comme le montre la courbe de la figure 3. Si le montage est destiné à une amplification

BF, il faut savoir que le bruit F est minimal, toujours pour un BC 109, si le courant collecteur se situe entre 0,2 et 0,4 mA (voir fig. 4). Faisons un compromis et choisissons 1 mA comme courant collecteur.

Mesure du gain de courant

Ouvrons une parenthèse au sujet du gain de courant des transistors. Sa valeur est donnée par le constructeur. Néanmoins nous pouvons très bien le mesurer à l'aide du montage de la figure 1. Il suffit de choisir successivement pour \$R_B\$ plusieurs valeurs connues de résistance, et de noter la tension recueillie aux bornes de \$R_C\$. Toujours en employant la loi d'Ohm, nous pouvons savoir quelles sont les valeurs des courants \$I_B\$ et \$I_C\$, dont le rapport \$I_C/I_B\$ est le gain de courant. Rappelons que ce rapport est le gain en continu \$\beta\$, qu'il ne faut pas confondre avec le gain en alternatif \$\beta\$, égal à

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

pour lequel on ne considère que les variations de courant.

Celles-ci sont superposées aux courants de repos \$I_B\$ et \$I_C\$. En pratique, les valeurs de \$\beta\$ et de \$\beta\$ sont peu différentes. Dans certains catalogues, \$\beta\$ est remplacé par le 21. Pour le moment nous évitons de parler de ces paramètres h afin de ne pas rebuter les novices en électronique.

Calcul des éléments du circuit

La valeur du courant \$I_C\$ étant choisie, nous prenons comme valeur de tension collecteur 4,5 V. Nous allons repasser un peu plus loin du choix de cette valeur. Connaissant \$I_C\$ et \$V_C\$, il nous est facile de calculer \$R_C\$, égale à 4,5 V.

La résistance \$R_E\$ est traversée par deux courants, l'un venant du collecteur (\$I_C\$) et l'autre de la base (\$I_B\$). Ce dernier étant faible par rapport au premier, nous pouvons écrire que \$I_E = 1\text{ mA}\$.

Une bonne valeur pour la tension \$V_E\$ étant 1 V, la valeur de \$R_E\$ est 1 V/1 mA soit 1 k\$\Omega\$.

La tension entre base et masse est égale à la somme des chutes dans \$R_E\$ et dans la

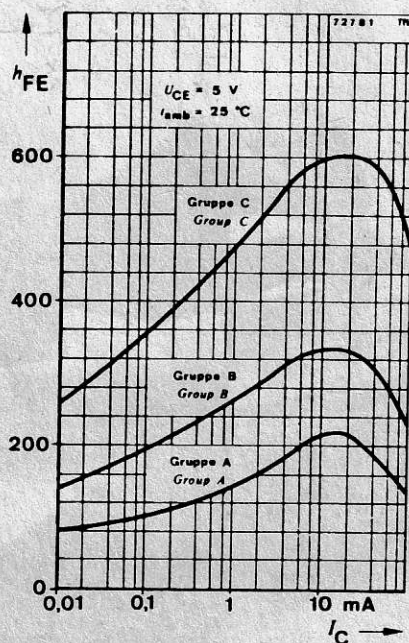


Fig. 3. — Variation du gain du transistor BC 109 en fonction du courant collecteur.

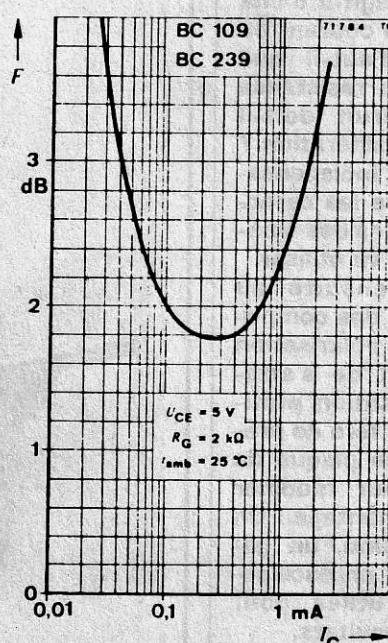


Fig. 4. — Variation du bruit F du transistor BC 109 en fonction du courant collecteur.

jonction base-émetteur (0,7 V). Cette tension, qui se retrouve aux bornes de R_1 , est égale à 1,7 V. Une soustraction, $(9 - 1,7)$ nous donne la valeur aux bornes de R_2 (7,3 V). Il reste à calculer le pont de base. Le courant I_b le traversant est également choisi arbitrairement. Une bonne formule est $I_b = 10 \times I_E$, de telle manière que si il y a variation de I_b , le point de polarisation (potentiel sur la base) ne varie pas. Si le gain du transistor est de 200, le courant de base est égal à

$$\frac{1 \text{ mA}}{200}, \text{ soit } = \frac{1\,000 \mu\text{A}}{200}$$

ou $5 \mu\text{A}$. D'après ce que nous venons de dire $I_b = 50 \mu\text{A}$. Les résistances R_1 et R_2 sont facilement calculées puisque la tension à leurs bornes et le courant les traversant sont connues ($R_1 = 34 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 133 \text{ k}\Omega$).

Voici quelques remarques à propos de ce montage. La stabilité en température est d'autant meilleure que R_1 et R_2 ont une valeur faible. Si le montage devait fonctionner dans une ambiance de grande variation de température, il aurait fallu augmenter I_b , ce qui aurait diminué la résistance du pont et augmenté l'énergie demandée à la source. Les piles auraient été utilisées plus rapidement. De même, la compensation en température est d'autant plus efficace que R_E est plus élevée. Mais si R_E a une forte valeur, la tension à ses bornes est plus élevée, ce qui restreint la tension disponible en sortie.

Ce montage, tel qu'il est représenté sur la figure 2 est appelé montage émetteur commun, l'émetteur étant commun à l'entrée et à la sortie.

Les trois montages fondamentaux

Sur le tableau ci-contre sont représentés les trois montages fondamentaux d'un transistor. On re-

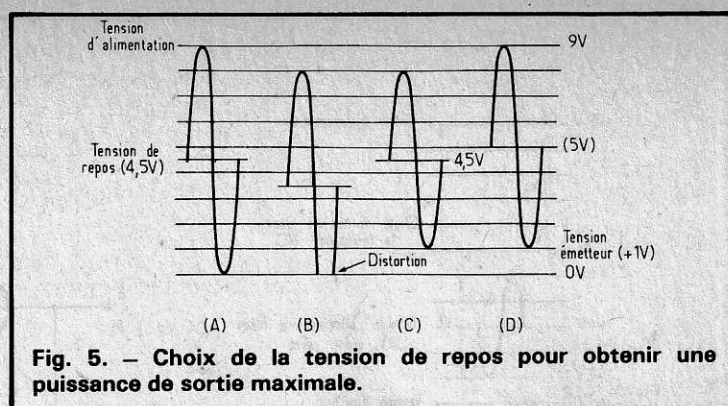


Fig. 5. — Choix de la tension de repos pour obtenir une puissance de sortie maximale.

marque que la valeur des résistances reste la même pour les montages émetteur commun et base commune. La résistance R_E (montage EC) est découplée par un condensateur afin de ne pas chuter le signal à amplifier, injecté entre émetteur et base. L'étage BC représente un amplificateur haute fréquence couplé à l'étage pré-

cédent par transformateur. Le montage base commune est surtout employé en haute fréquence. La base étant fixe au point de vue alternatif, elle est découplée par un condensateur, afin que ce point soit au potentiel de la masse en HF.

En ce qui concerne l'étage CC, la charge ne se trouve plus dans le circuit collecteur

mais du côté émetteur. De ce fait les résistances R_1 et R_2 du pont doivent être recalculées. Dans le circuit collecteur, on trouve parfois une petite résistance découplée par un condensateur de forte valeur. Au point de vue de l'alternatif, le collecteur est au potentiel de la masse.

Calcul de la charge

Occupons nous maintenant de la tension de sortie de notre amplificateur alimenté sous 9 V. La figure 5 nous montre l'amplitude de la tension amplifiée, ainsi que la valeur des tensions continues de repos. La première forme de signal (A) est celle de la tension amplifiée maximale à la sortie d'un étage

Les trois montages fondamentaux		
Emetteur commun	Base commune	Collecteur commun
Amplification de tension : Elevée	Elevée	Légèrement inférieur à 1
Amplification de courant : Elevée	Légèrement inférieur à 1	Elevée
Amplification de puissance : La plus élevée	Elevée	Légèrement inférieur à 1
Résistance d'entrée : Moyenne	Faible	La plus élevée
Résistance de sortie : Elevée	Très élevée	Très faible
Déphasage entrée/sortie : 180°	0°	0°
Type d'application : BF et HF	HF	Adaptation d'impédance

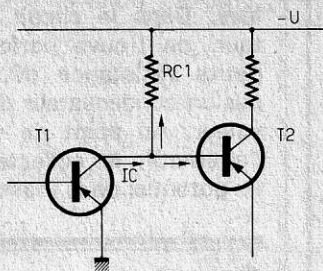


Fig. 6. — Couplage de deux transistors PNP. Une partie seulement de I_C atteindra T_2 .

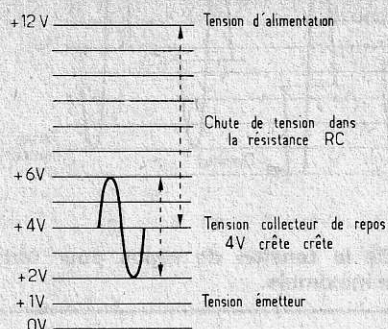


Fig. 7. — Conditions de fonctionnement du circuit collecteur.

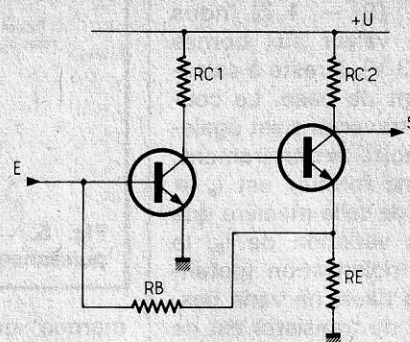


Fig. 8. — Amplificateur de tension à deux étages.

sans résistance d'émetteur. C'est le maximum que nous pouvons obtenir. Mais si la température vient à augmenter, le point de repos va se déplacer et il y aura écrêtage de l'alternance négative (B).

Le mieux est de prévoir une résistance R_E . Si nous gardons la même polarisation, nous obtenons en sortie un signal plus faible (C), mais le point de fonctionnement est beaucoup plus stable si la température ambiante vient à croître.

Cette tension de sortie pourra être légèrement augmentée si nous déplaçons un peu le point de fonctionnement (D).

Considérons la forme du signal A ; ses caractéristiques sont les suivantes : Tension crête à crête : 9 V, valeur crête : 4,5 V, tension efficace : $4,5 \times 0,7$ soit 3,15 V.

La résistance R_C , aux bornes de laquelle apparaît cette tension, est traversée par un courant ayant la même forme, et dont la valeur est calculée par la loi d'Ohm.

Si $R_C = 1 \text{ k}\Omega$, le courant efficace est dans l'exemple choisi de 3,15 mA.

La puissance de sortie, en watt, est égale au produit des valeurs efficaces du courant et de la tension, soit : $3,15 \times 3,15 \approx 10 \text{ mW}$.

En insérant une résistance R_E chutant 1 V, la tension maximale n'est plus que 7 V crête-crête, soit 2,45 V efficaces. La puissance de sortie

maximale ne sera plus que 6 mW, soit une perte de 40 % de la puissance de sortie.

En réajustant le point de fonctionnement (D), le calcul nous montre que cette chute n'est plus que légèrement supérieure à 20 %.

Couplage de l'amplificateur

Cet amplificateur ne servirait à rien s'il restait isolé. Il faut que son entrée soit reliée au circuit dont le courant ou la tension est à amplifier. Sa sortie doit être couplée soit à une charge extérieure qui peut être un composant, comme un écouteur,

ou bien elle doit être reliée à un deuxième amplificateur si le gain du premier n'est pas suffisant.

Mais étudions d'abord le problème posé par le couplage à un autre étage.

La figure 6 représente deux transistors PNP. Le courant venant du collecteur de T_1 se divise en deux parties. Une fraction de courant seulement se dirige vers la base de T_2 afin d'être amplifiée à nouveau. Il en découle que si on souhaite une amplification de courant la plus grande possible la résistance R_{C1} doit avoir une valeur élevée par rapport à la résistance d'entrée du second transistor. Malheureusement cette augmentation de résistance dimi-

nue le courant I_C total, entraînant une baisse de gain de courant dans ce transistor. Un compromis est à faire. Le mieux est de baisser le plus possible la tension de repos du collecteur, en accordance avec le signal maximal à transmettre. Si celui-ci est de 4 V crête-crête (fig. 7), et la tension sur l'émetteur de 1 V, une bonne valeur de tension de repos est de +4 V.

Le problème change si T_1 doit transmettre un signal à un circuit dont la résistance est très élevée. La solution est, non pas de fournir un courant le plus fort possible, mais de donner une tension la plus élevée sans distorsion. C'est le cas où on est polarisé en classe A et où la tension de sortie crête-crête est égale à la tension d'alimentation moins la chute dans R_E . Mais il faut savoir que dans ce cas d'amplification en tension, celle-ci est proportionnelle à la résistance de charge. Ainsi nous chercherons également à avoir une résistance de charge collecteur la plus élevée possible.

Parfois le problème se pose autrement lorsque la charge est imposée. Par exemple un écouteur de 2 000 Ω pouvant donner une puissance de 10 mW. C'est au concepteur de choisir une tension d'alimentation, puis d'en déduire le courant et la tension de repos collecteur.

Ce qui vient d'être dit peut

être mis en évidence si on a la chance d'avoir sous la main un oscilloscope et un générateur basse-fréquence.

Amplificateur de courant

Continuons notre démarche pour réaliser un amplificateur de courant. Nous savons que la résistance R_{C1} doit être élevée. Le collecteur du premier transistor est en liaison directe avec la base du second. Nous désirons une amplification de courant de 100, et le circuit doit être doté d'une bonne stabilisation en température.

Le schéma pourrait être celui de la figure 8. La résistance R_B du transistor d'entrée est relié à l'émetteur de l'autre. Si une augmentation intempestive de la température fait augmenter I_{C1} , il s'en suit un accroissement de la chute de tension aux bornes de R_{C1} , d'où une diminution de la tension collecteur-émetteur de T_1 . La réduction de la tension positive sur la base de T_2 entraîne une diminution de I_{C2} . Et puisque celui-ci traverse R_E , la tension entre émetteur et base diminue et de ce fait le courant de polarisation I_{B1} devient plus faible, d'où la stabilisation en température du montage.

Calculons maintenant le gain de courant de l'ensemble. A la sortie de l'émetteur de T_2 le courant se divise en

deux. La majeure partie traverse R_E . C'est en fait le courant de sortie de l'ampli. L'autre partie passe par R_B pour retourner à la masse à travers la fonction base-émetteur de T_1 . C'est le courant d'entrée de l'ampli.

Ainsi le gain de courant est donné par le rapport :

$$\text{Gain en courant} = \frac{R_B}{R_E}$$

que nous démontrons dans l'annexe à la fin de l'article.

Tout en respectant les conditions de polarisation des deux transistors, nous avons un gain déterminé par les valeurs de R_E et R_B . Comme nous voulons un gain de 100, et que la résistance $R_E = 100 \Omega$, il suffit que $R_B = 10 \text{ k}\Omega$.

En conclusion, un amplificateur de courant à un seul étage a un gain inférieur au β du transistor. Un gain plus important est obtenu avec deux étages stabilisés en température. Le gain est déterminé par un rapport de résistances.

Un amplificateur de ce type possède une résistance d'entrée faible et une résistance de sortie élevée. Il est utilisé lorsqu'à la sortie on a besoin d'une certaine puissance.

Amplificateur de tension

Voyons maintenant quel est le gain de tension d'un étage émetteur commun

classique. Le gain de tension est donné par le rapport entre la tension de sortie V_s et la tension d'entrée V_e . En ce qui concerne la tension de sortie, nous savons qu'elle est égale à $R_C \times I_C$. Quant à celle de l'entrée, c'est la somme des chutes de tension dans R_E et dans la jonction base-émetteur.

Nous savons que celle-ci est équivalente à une diode polarisée en direct dont la caractéristique n'est pas du tout linéaire. Cet inconvénient pourrait être minimisé en donnant à R_E une valeur élevée (fig. 9A) de telle façon que la résistance présentée par la jonction soit négligeable par rapport à la chute de tension dans R_E . Mais la contrepartie est que la tension de sortie est plus faible.

Une résistance en série peut être placée en série avec l'entrée, comme R_S sur la figure 9B. La tension à l'entrée est alors égale à $I_B \times R_S$. Le gain de tension est alors

$$\frac{R_C I_C}{R_S I_B}, \text{ soit } \beta \frac{R_C}{R_S}$$

Il est bon de faire remarquer que sur la base, le courant de polarisation est donné par R_B . De part et d'autre, nous avons une variation de courant d'entrée qui est appliquée à travers R_S . Cette variation de courant d'entrée, multipliée par β devient le courant de sortie I_C de cette dernière formule.

L'insertion de R_S réduit certes le gain, mais augmente aussi la linéarité de l'amplificateur. Pour être effi-

cace, cette résistance doit être de l'ordre de $20 \text{ k}\Omega$. Si $R_C = 4,7 \text{ k}\Omega$, et si le gain β est de 200, l'amplification de tension est de :

$$200 \times \frac{4,7 \text{ k}\Omega}{20 \text{ k}\Omega} = 47$$

Sachant que β pour un même type de transistor est variable d'un échantillon à un autre, le gain sera changé si nous remplaçons le transistor. Le mieux est de recourir à un circuit à deux transistors dont le gain est aussi déterminé par un rapport de résistances.

Notre montage pourrait être celui de la figure 10 avec la réapparition de la résistance R_E aux bornes de laquelle se trouve la presque totalité de la tension d'entrée. Celle-ci, amplifiée, est recueillie entre collecteur et émetteur de T_2 soit, ce qui revient au même, aux bornes de l'ensemble des résistances R_E et R_2 (résistance de liaison).

Nous en déduisons la formule du gain de tension de ce montage, égal au rapport

$$\frac{R_L + R_E}{R_E}$$

Puisque R_2 est beaucoup plus élevé que R_E , nous avons :

$$\text{Gain en tension} = \frac{R_L}{R_E}$$

Si $R_E = 100$, et si le gain souhaité est 100, R_2 aura la valeur $10 \text{ k}\Omega$.

Ce montage possède aussi l'avantage d'être stabilisé en

température. Une augmentation du courant collecteur de T_1 fait diminuer la tension collecteur de ce transistor. Il en résulte une diminution de I_{C2} , d'où augmentation de la tension aux bornes de R_E , bloquant davantage la jonction base-émetteur de T_1 .

Le schéma sera complété par un circuit de polarisation de base de T_1 , et une résistance dans le circuit émetteur de T_2 si nécessaire. On peut aussi améliorer les performances par l'adjonction d'un étage collecteur commun en sortie. Le schéma est donné figure 11. La résistance de liaison R_L , élevée par rapport à R_{E1} apporte une stabilisation en température. Le gain de tension est égal à R_L/R_{E1} .

En conclusion un amplificateur de tension à un seul étage sera linéaire si il comporte une résistance R_E dans son circuit émetteur, ou une résistance R_S en série dans l'entrée. Dans le premier cas le gain de tension est égal à R_C/R_E (schéma A de la fig. 9). Dans l'autre version (schéma B de la même figure), le gain est

$$\frac{R_C}{R_S} \times \beta.$$

Un gain de tension plus important est obtenu avec deux ou trois étages stabilisés en température. Le gain est alors déterminé par un rapport de résistance.

Un amplificateur de ce type possède une résistance d'entrée élevée, égale au produit $R_E \times \beta$, et une résistance de sortie faible.

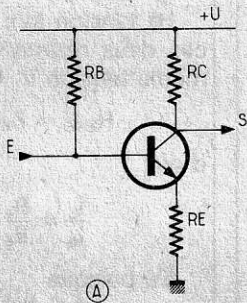


Fig. 9. — Amplificateur de tension à un étage.

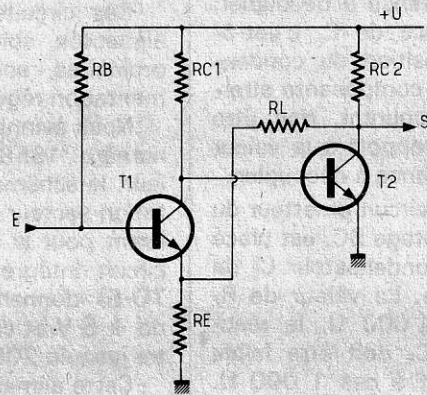
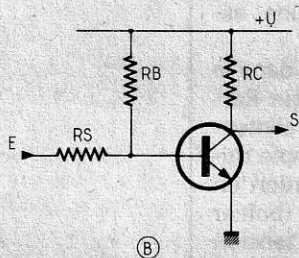


Fig. 10. — Amplificateur de tension à deux étages.

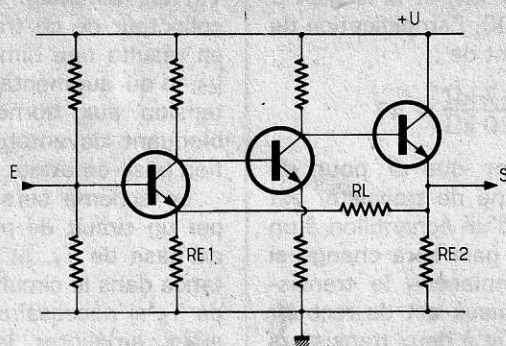


Fig. 11. — Amplificateur de tension utilisant en sortie un étage collecteur commun.

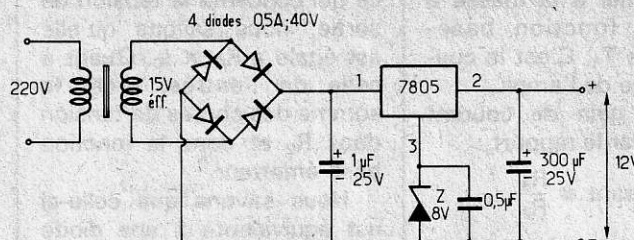


Fig. 12. — Une alimentation stabilisée.

Découplage

On entend par découplage le fait de mettre un condensateur en parallèle sur un circuit dans le but de faire dévier un signal alternatif (HF ou BF) à travers ce condensateur.

Le découplage d'un point de circuit permet de mettre ce point à la masse en alternatif, tout en conservant le même potentiel continu existant.

Sur le schéma d'amplificateur base commune du tableau « Les trois montages fondamentaux », la base du transistor est découplée afin que cette électrode soit au potentiel zéro en ce qui concerne la haute fréquence, mais la base conserve une polarisation correcte.

Le choix de C dépend de la fréquence du signal et aussi de la résistance à découpler. La réactance de C, c'est-à-dire l'opposition du condensateur à la composante alternative du courant, doit être faible par rapport à la valeur de la résistance à découpler.

Dans le circuit émetteur du même montage BC, est placé un autre condensateur C_E de découplage. La valeur de R_E étant de $1\,000\,\Omega$, la réactance de C_E doit être faible par rapport à ces $1\,000\,\Omega$. Sa valeur, à la fréquence considérée, ne devra pas dépasser le dixième ou le vingtième de cette valeur.

Un condensateur sert aussi à coupler deux étages sans modifier les tensions continues du circuit. Le collecteur du premier étant à $4,5\text{ V}$ (tension de repos) doit être relié à la base du suivant qui est à $+2\text{ V}$. Inséré entre ces deux points, un condensateur laissera passer le signal alternatif sans « démolir » la polarisation de ces étages.

Afin de ne pas apporter d'affaiblissement du signal, la réactance du condensateur devra être très faible, comparé à la résistance d'entrée de l'étage suivant.

Nous reviendrons plus tard sur les problèmes occasionnés par les ensembles résistance-condensateur.

Alimentation de l'amplificateur

Ces circuits peuvent être alimentés, soit par des piles ordinaires, soit par une alimentation régulée.

Nous avons donné dans le numéro 1658 du Haut-Parleur, le schéma d'une alimentation secteur très simple utilisant pour la stabilisation un circuit intégré 7805 (boîtier TO-5) donnant une tension de $+5\text{ V}$ et capable de débiter jusqu'à 200 mA .

Cette alimentation peut facilement être modifiée pour fournir une autre tension, par l'adjonction d'une diode zener ($1/4$ de watt).

La figure 12 donne un tel schéma. En reliant directement le point 3 à la masse, la tension donnée est de $+5\text{ V}$. En insérant une diode zener de 4 V avec la polarité indiquée, la tension de sortie sera de $+9\text{ V}$. Celle-ci serait de $+12\text{ V}$ avec une diode zener de 7 V . Il importe aussi que le transformateur d'alimentation donne au secondaire une tension efficace supérieure d'au moins 3 V à la tension continue donnée par l'alimentation, soit 15 V efficaces au secondaire pour $+12\text{ V}$ continus. La diode zener est shuntée par un condensateur.

Ce procédé est un moyen économique pour avoir plusieurs tensions régulées avec un seul circuit intégré.

J.-B. P.

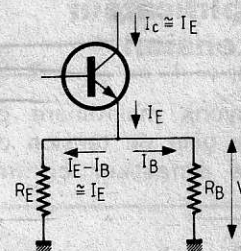
ANNEXE 1

Calcul du gain de courant de l'amplificateur de la figure 8

Le courant I_E , provenant de l'émetteur se divise en deux parties :

1° Courant I_B dans la résistance R_B (la jonction base émetteur étant négligeable par rapport à R_B)

2° Le reste du courant, soit $I_E - I_B$ traverse R_E . En fait I_B est très faible par rapport à I_E . On considère alors R_E traversé par I_E seul.



La tension aux bornes de ces deux résistances est la même tension V . On a :

$$R_E I_E = R_B I_B$$

d'où :

$$\frac{I_E}{I_B} = \frac{R_B}{R_E}$$

Et, puisque $I_C \approx I_E$, gain de courant :

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{R_B}{R_E}$$

LES AMPLIFICATEURS B.F. de petite puissance

BEAUCOUP d'électroniciens débutants se trouvent embarrassés lorsqu'ils veulent réaliser un amplificateur de puissance, même si une faible puissance leur est nécessaire.

Le but de l'article de ce mois est de leur expliquer comment fonctionne un amplificateur de puissance « push-pull » afin de les aider pour la réalisation d'un amplificateur BF de petite puissance.

Nous commencerons par parler des classes de polarisation, puis nous rappellerons ce que sont les montages fondamentaux d'un transistor.

Nous passerons ensuite à la pratique en indiquant la façon de régler et de contrôler la polarisation d'un étage, afin d'éviter les écrêtages. Nous verrons comment fonctionne un push-pull et comment reconnaître les différents types : parallèle, série, symétrie complémentaire et quasi complémentaire. Enfin nous examinerons quelques détails d'un amplificateur type.

Par la suite, nous passerons à la réalisation d'amplificateurs à transistor et intégrés.

larisation du transistor (potentiomètre P de la figure 1).

Un signal alternatif v étant appliqué à l'entrée de l'étage, on retrouve en sortie cette tension amplifiée variant de part et d'autre de la tension V_0 (voir figure 7 représentant ce signal sur l'écran d'un oscilloscope).

Pour des raisons que l'on comprend (écrêtage), si la tension de sortie doit avoir une amplitude assez grande, la tension V_0 doit être approximativement égale à $U/2$.

La classe B est celle des amplificateurs de puissance push-pull. Elle se caractérise par le fait qu'en l'absence de signal à l'entrée, le courant

collecteur est pratiquement nul. La valeur de la tension V_0 est donc proche de celle de la tension d'alimentation.

La tension de polarisation est réglée pour un courant I_b proche de zéro.

Les montages fondamentaux

On sait que les trois montages fondamentaux d'un transistor sont les montages base commune, émetteur commun et collecteur commun.

Aujourd'hui, nous nous occuperons des deux derniers car il est nécessaire de pouvoir les reconnaître dans un schéma afin de bien com-

Classe A Classe B

La « classe » d'un amplificateur définit sa polarisation.

La classe A est la plus courante pour les amplificateurs de tension. La tension V_0 de sortie de l'amplificateur est toujours présente, même s'il n'y a aucun signal à l'entrée. Cette tension V_0 , mesurée au voltmètre ou avec un oscilloscope, se règle en jouant sur la valeur de la po-

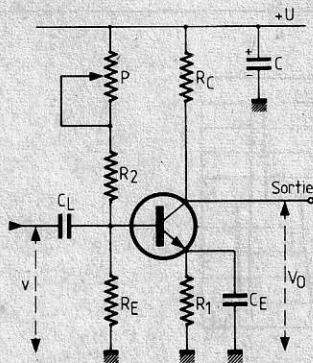


Fig. 2. — Schéma théorique du montage émetteur commun.

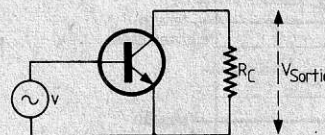


Fig. 1. — Montage émetteur commun. Le signal est appliqué entre base et émetteur.

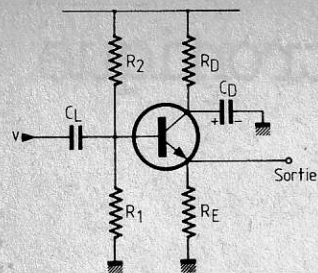


Fig. 3. — Montage collecteur commun. La résistance R_E n'est pas découplée.

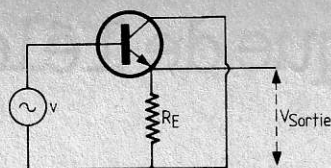


Fig. 4. — Schéma théorique du montage collecteur commun. La résistance R_E est commune aux circuits d'entrée et de sortie.

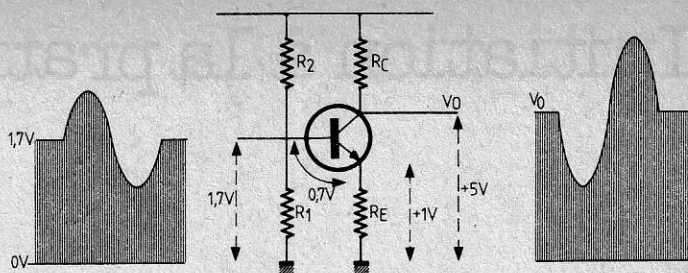


Fig. 5. — Transistor polarisé en classe A. La tension en sortie est proche de $U/2$.

prendre le fonctionnement des étages d'un ampli BF de puissance.

Prenons d'abord le montage le plus classique : l'émetteur commun, représenté sur la figure 1. On reconnaît aisément le circuit avec, en plus, le condensateur C de découplage de l'alimentation, et le condensateur C_L de liaison. Une tension basse fréquence v est appliquée à l'entrée. La fréquence du signal est telle que ces condensateurs ont une réactance négligeable et sont équivalents à des courts-circuits pour la gamme de fréquence considérée. Cette dernière remarque permet de simplifier le montage pour plus de compréhension. Pour cela, on retire les circuits d'alimentation et de polarisation, de même que les composants courts-circuités par la réactance des condensateurs. On arrive au schéma théorique (fig. 2) d'où on tire la conclusion suivante.

Dans un montage émetteur commun, le signal d'entrée v est appliqué entre base et émetteur, et le signal de sortie se trouve entre collecteur et émetteur.

Passons au montage collecteur commun (fig. 3) représenté ici avec une cellule de découplage R_D C_D . La différence fondamentale par rapport au montage précédent réside dans le fait que la résistance de charge se trouve dans le circuit émetteur.

En simplifiant à l'extrême le circuit, on obtient le circuit de base (fig. 4). Le signal d'entrée v n'est plus appliqué entre base et émetteur, et la résistance de charge R_E est commune aux circuits d'entrée et de sortie. On dit qu'il y a contre-réaction. La tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée. L'impédance du circuit d'entrée est très élevée, ce qui fait que le montage collecteur commun est utilisé comme adaptateur d'impédance.

Le premier schéma

Le schéma le plus simple comporte une charge directement connectée dans le circuit collecteur du transistor qui fonctionne en classe A. La charge peut évidemment

être un haut-parleur de haute impédance ou bien encore un écouteur.

Au repos, la tension par rapport au potentiel masse est $+1,7$ V sur la base et $+5$ V sur le collecteur. Un signal appliqué sur la base se retrouve amplifié en sortie, comme le montre le dessin (fig. 5). Plus ce signal sera élevé, plus la puissance sonore sera grande.

On est toutefois limité par la tension d'alimentation et la tension émetteur.

En augmentant inconsidérément le signal d'entrée, il y a écrêtage en sortie. Un bon moyen de se rendre compte du phénomène est de brancher un oscilloscope entre collecteur et masse (fig. 6 et 7).

L'oscilloscope est réglé sur la sensibilité 1 V/division, l'entrée étant sur la position « continu » ou « DC ». D'abord, sans signal à l'entrée, on mesure les tensions sur les points suivants : alimentation ($+9$ V), tension collecteur (c'est la tension de repos qui est de $+5$ V dans notre exemple), tension émetteur ($+1$ V). On injecte ensuite un signal provenant

d'un générateur BF, le balayage de l'oscilloscope étant correctement réglé, on peut voir sur l'écran le signal de sortie (a) de part et d'autre du point de repos de $+5$ V.

La limite sans distorsion est atteinte lorsque la crête positive atteint la valeur de la tension d'alimentation de $+9$ V.

Quant à la crête négative, sa limite est celle de la tension émetteur ($+1$ V).

Au-delà le signal est tronqué, il y a distorsion. Le signal maximal utilisable est de 8 V crête à crête, soit en valeur efficace :

$$\frac{8}{2} \times 0,707 = 2,8 \text{ volts}$$

La puissance dans la charge est : $P = V_{eff} \times I_{eff}$, ou (puisque $I_{eff} = V_{eff}/R_C$)

$$P = \frac{(V_{eff})^2}{R_C}$$

Si la charge R_C est un écouteur de $2\,000 \Omega$, la puissance dans cet écouteur est de

$$P = \frac{(2,8)^2}{2\,000 \Omega}$$

soit $3,9$ milliwatts, ce qui est bien faible.

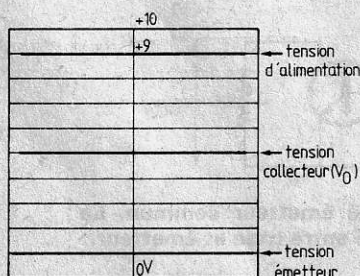


Fig. 6. — Mesure des tensions continues à l'aide d'un oscilloscope.

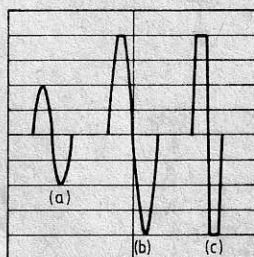


Fig. 7. — L'oscilloscope permet de contrôler l'écrêtage en sortie.

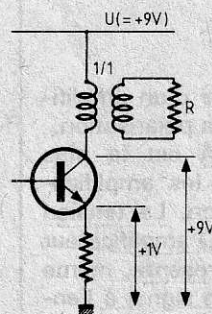


Fig. 8. — L'utilisation d'un transformateur permet d'augmenter la puissance de sortie.

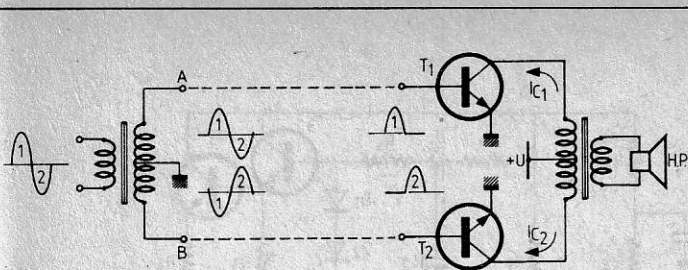


Fig. 9. — Schéma de base du push-pull.

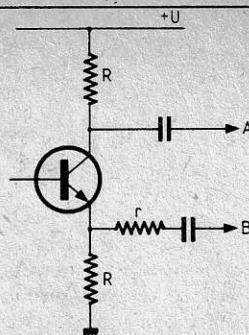


Fig. 10. — Déphaseur à transistor.

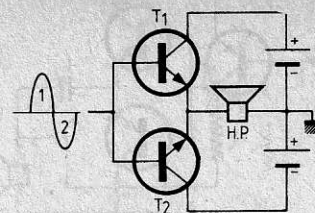


Fig. 11. — Push-pull série.

En augmentant la tension d'alimentation ou en utilisant un transformateur, comme nous allons le voir, la puissance peut être très augmentée.

Dans l'exemple précédent la valeur de la charge était imposée. Si elle ne l'est pas, quelle est la valeur optimale à utiliser ? La charge est égale au rapport :

V_{cc} max sans distorsion

I_{cc} max sans distorsion

La tension maximale crête à crête (V_{cc} max) est dans notre exemple égale à 8 V. Le courant correspondant (I_{cc} max) est égal au I_c max donné par le constructeur. Avec un BC 140 (I_c max = 1 A), la valeur optimale est de 8Ω , et la puissance dans la charge est, d'après la formule, $V_{eff} \times I_{eff} = 2,8 V \times 0,35 A = 0,98 W$.

La puissance de sortie est augmentée par l'emploi d'un transformateur de couplage entre le transistor et la résistance de charge. Ce transformateur est de rapport 1/1 et on suppose que sa résistance ohmique est négligeable.

La tension au repos (sur le collecteur) est égale à la ten-

sion d'alimentation U , puisqu'il n'y a pas de chute de tension dans l'enroulement du primaire du transformateur. La tension efficace correspondant au maximum sans distorsion est : tension au repos moins tension émetteur, soit $10 V - 1 V = 9 V$. Quant à la puissance, elle est de

$$\frac{(9)^2}{2 \cdot 000} = 40 \text{ mW}$$

Ainsi la puissance de sortie est considérablement augmentée par l'utilisation d'un transformateur (fig. 8).

Autre avantage du transformateur : la résistance R d'utilisation peut être modifiée, la charge du transistor reste la même si le rapport de transformation du transformateur est également modifié en conséquence.

Le push-pull

Avec les semiconducteurs, la technique actuelle pour sortir une puissance B.F. est le « push-pull », technique qui consiste à utiliser deux transistors, chacun amplifiant une alternance (classe B).

Le push-pull dit « paral-

lèle » nécessite l'emploi d'un déphaseur qui peut être un transformateur (fig. 9) ou un transistor (fig. 10).

Si on considère sur le primaire du transformateur d'entrée une période du signal avec ses alternances positive (1) et négative (2), le secondaire nous donne entre chaque extrémité (A, B) et la masse, deux signaux en opposition de phase.

Le point A du secondaire est connecté à la base d'un transistor NPN (T_1) qui amplifie l'alternance 1, tandis que l'alternance 2 est amplifiée par le transistor T_2 , également NPN.

Les deux transistors fonctionnent alternativement et on retrouve sur les collecteurs les deux alternances, chacune ayant comme amplitude max. une valeur sensiblement égale à U .

Nous n'avons représenté sur la base qu'une seule alternance positive, seule cette alternance est amplifiée par le transistor, la partie négative bloquant ces NPN.

Le transformateur de sortie permet d'adapter la charge, tout comme le montage de la figure 9.

Quant au transformateur déphaseur, dit « d'attaque », ou encore appelé « driver », il peut être remplacé par un transistor ayant des charges égales dans les circuits émetteur et collecteur. Une résistance « r » est placée côté émetteur, afin de compenser la faible impédance de sortie du transistor côté émetteur.

Ce transistor déphaseur ou ce transformateur driver peut être supprimé si on choisit la technique « push-pull série » ou « symétrie complémentaire » faisant appel à des transistors de caractéristiques identiques, mais de structure opposée, autrement dit à une paire NPN/PNP (fig. 11).

On remarque que la charge se trouve entre émetteur et masse. L'alternance positive du signal à l'entrée bloque le transistor T_2 , mais est amplifiée par T_1 . C'est le contraire qui se passe pour l'alternance négative 2, elle est amplifiée par T_2 et bloque T_1 .

Ce circuit est d'une grande simplicité par rapport au push-pull parallèle ; en revanche il nécessite une alimentation spéciale et des transis-

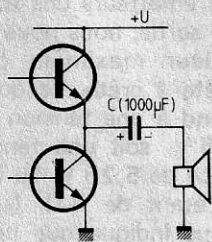


Fig. 12. — Push-pull série quasi-complémentaire.

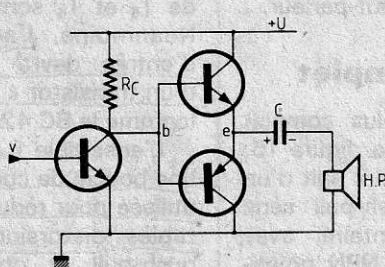


Fig. 13. — Les transistors de sortie fonctionnent en collecteur commun.

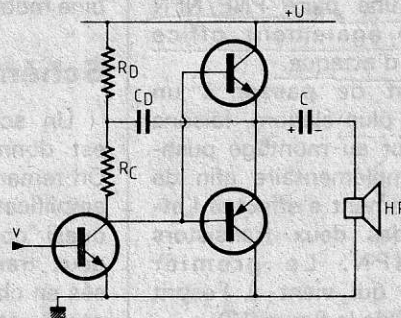


Fig. 14. — Les transistors de sortie fonctionnent en émetteur commun.

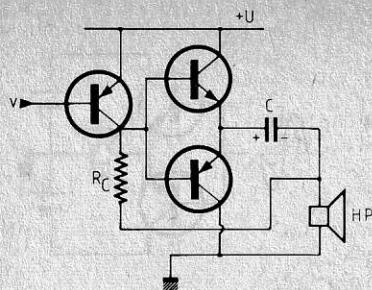


Fig. 15. — Variante du montage de la figure 14.

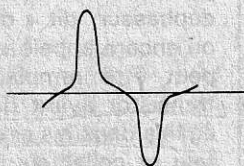


Fig. 17. — Distorsion de croisement « Cross over ».

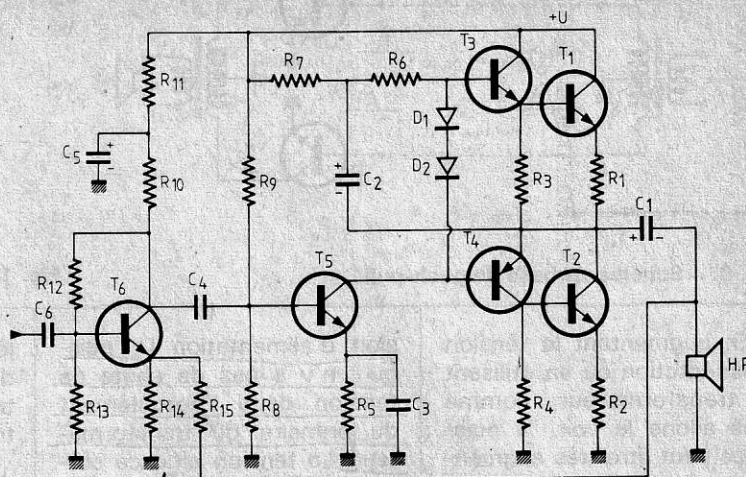


Fig. 16. — Exemple de schéma complet.

tors NPN et PNP de caractéristiques semblables.

Ces inconvénients amènent à une variante, également « push-pull série », mais « quasi complémentaire », « quasi » parce que les deux transistors sont du même type (soit PNP, soit NPN).

L'alimentation spéciale peut être remplacée par une alimentation ordinaire, si on place en série avec le haut-parleur un condensateur électrolytique de forte valeur, généralement supérieure à 1 000 μ F. Ce condensateur se charge et reste chargé à une tension égale à $U/2$ (fig. 12).

Etage d'attaque

Ce montage « quasi complémentaire », avec ses deux transistors de sortie, a quand même besoin pour le déphasage d'une paire PNP/NPN faisant également office d'étage d'attaque.

Avant de passer à un schéma plus élaboré, faisons un retour au montage push-pull complémentaire afin de voir comment s'effectue l'attaque des deux transistors PNP/NPN. Le premier schéma qui vient à l'esprit est celui de la figure 13.

On se rappelle que les deux transistors de sortie

doivent fonctionner en classe A, et que pour cela, ils doivent être attaqués entre base et émetteur (soit entre les points b et e). Ceci n'est pas le cas pour ce schéma dans lequel les transistors de puissance se trouvent branchés en collecteur commun.

L'adjonction d'une cellule de découplage (fig. 14) permet d'arriver à nos fins. La charge du transistor est R_C , R_D a une valeur faible et C_D a une réactance négligeable aux fréquences BF amplifiées.

De nombreux autres schémas sont possibles. Nous en donnons un autre comme exemple, dans lequel l'étage d'attaque est un PNP. La tension aux bornes de la résistance de charge R_C du driver est bien appliquée entre base et émetteur de l'étage final à travers le condensateur C. L'alimentation en continu de l'étage se fait à travers la bobine mobile du haut-parleur.

Schéma complet

Un schéma plus complet est donné sur la figure 16. On remarque qu'il s'agit d'un amplificateur push-pull série quasi complémentaire, avec deux transistors NPN polarisés en classe B. Les résistances R_1 et R_2 du circuit émetteur (de l'ordre de l'ohm) limitent le courant dans ces

transistors de sortie. Une paire PNP/NPN, également polarisée en classe B précède l'étage de sortie. Les deux diodes D_1 et D_2 règlent la polarisation des transistors T_1 à T_4 . Une résistance ajustable est souvent placée en série avec ces diodes, elle sert à régler le courant de repos (très faible) de l'étage de sortie. De cette manière on réduit la distorsion de croisement (en anglais « cross over ») due au fait que les alternances positives et négatives sont amplifiées par des voies différentes (fig. 17).

On voit que les diodes sont traversées par le courant collecteur du transistor T_5 polarisé en classe A. La charge de celui-ci est la résistance R_6 , tandis que R_7 et C_2 constituent une cellule de découplage dont nous avons déjà vu l'utilité. A part ce point particulier, les circuits de T_5 et T_6 sont classiques. Néanmoins, l'amplificateur d'entrée devra être équipé d'un transistor « faible bruit » (comme le BC 424).

L'ensemble R_{14} , R_{15} forme une boucle de contre-réaction utilisée pour réduire les inévitables distorsions dues au push-pull et obtenir également un gain constant en fonction de la fréquence.

Le rapport R_{15}/R_{14} fixe le gain total de l'amplificateur.

Puissance de sortie

La tension d'alimentation U et l'impédance du haut-parleur déterminent la puissance de sortie de l'amplificateur.

En prenant comme exemple une tension d'alimentation de 18 V et une impédance de bobine mobile du haut-parleur de 8 Ω , quelle est la puissance maximale disponible en sortie, sans distorsion ?

Celle-ci est donnée par la formule :

$$\frac{E^2_{eff}}{R}$$

La tension crête à crête de sortie ne peut dépasser les 18 V de l'alimentation.

Afin d'être sûr de ne pas avoir d'écrtage et en tenant compte des résistances dans les émetteurs des transistors de sortie, nous nous fixons la valeur maximale de 15 V crête à crête, ce qui correspond à une tension crête de 7,5 V, soit une tension efficace de 5,25 V. La valeur de R étant de 8 Ω , la formule nous indique que nous pouvons compter sur une puissance de l'ordre de 3,5 watts.

J.-B. P.

Initiation à la pratique de l'électronique

REALISATION D'AMPLIFICATEUR B.F. DE PETITE PUISSANCE

DANS le numéro 1678 nous avons donné un aperçu sur les amplificateurs de petite puissance à transistor. Nous en avons expliqué le fonctionnement et avons abordé les principaux problèmes, tels que la puissance de sortie de l'écrêtage.

Aujourd'hui, nous proposons plusieurs solutions à transistors, à circuit intégré ou mixte.

L'amplificateur avec un seul transistor de sortie en classe A, semble la solution la plus simple. La puissance de sortie ne peut excéder la puissance dissipée dans le transistor.

L'amplificateur intégré est la solution la meilleure car elle permet, avec le minimum de calcul et de composants, de réaliser un ampli de qualité.

Une autre solution intéressante est d'utiliser un amplificateur opérationnel suivi de deux transistors polarisés en classe B. L'ampli op fournit le gain en tension, et les transistors, la puissance de sortie. Le choix de ces transistors est principalement fait par la relation :

$$P_{c\max} = 0,4 P_{\max}$$

Enfin nous parlerons de l'emploi de la contre-réaction, technique réduisant le gain global de l'amplificateur.

Montage classe A à transistor

Notre premier exemple d'amplificateur utilise un seul transistor de sortie polarisé obligatoirement en classe A.

C'est l'amplificateur qui, à première vue paraît le plus simple et le plus facile à réussir, bien que la solution à cir-

cuit intégré, comme nous le verrons plus loin, pose encore moins de problème.

Voyons maintenant quelle est la marche à suivre pour calculer et réaliser complètement un tel amplificateur.

Cet amplificateur sortira une puissance inférieure au watt et ne demandera qu'un nombre le plus restreint possible de composants. Les principaux composants sont

l'alimentation, le haut-parleur et le transistor de sortie.

L'alimentation peut se composer par exemple de deux piles de 4,5 V en série. Le haut-parleur devra avoir une impédance assez élevée (100 Ω), sinon un transformateur d'adaptation sera inséré entre sa bobine mobile et le transistor.

Le transistor devra être capable de supporter une certaine puissance, autrement dit, sa dissipation collecteur ($P_{c\max}$) devra être suffisante. Nous laisserons de côté les gros transistors (avec boîtier TO-3) nécessitant un radiateur de refroidissement, et choisirons un modèle avec boîtier du type TO-39, comme le BC 140, transistor NPN de la série 1 A.

Rappelons les caractéristiques principales de ce transistor :

$V_{CE\max}$	= 40 V
$I_{C\max}$	= 1 A
$P_{C\max}$	= 0,65 W
Gain de courant	= 40 à 250

C'est la valeur de $P_{C\max}$ qui nous intéresse le plus, car nous essaierons de tirer le maximum de puissance. Cet amplificateur devant fonc-

tionner en classe A, il faut se rappeler que le rendement d'un tel montage ne peut être supérieur à 50 %. Concrètement, ceci veut dire que l'amplificateur ne peut fournir que la moitié de la puissance donnée par la source. Si la puissance fournie par l'alimentation est de 2 W, un watt seulement atteint le haut-parleur pour être transformé en puissance sonore, le watt restant étant dissipé dans le transistor de sortie sous forme de chaleur.

Notre transistor ne pouvant dissiper que 650 mW au maximum, le haut-parleur ne pourra donner que 650 mW et la puissance fournie par la source sera 1,3 W.

Donc, en résumé, dans un amplificateur classe A, la puissance de sortie ne peut être supérieure à la valeur de $P_{C\max}$ du transistor de sortie.

La question peut se poser d'une façon différente : dans un amplificateur classe A, supposé bien étudié, connaissant la tension d'alimentation U et l'impédance Z du haut-parleur, quelle est la puissance « utile » maximale sans distorsion ?

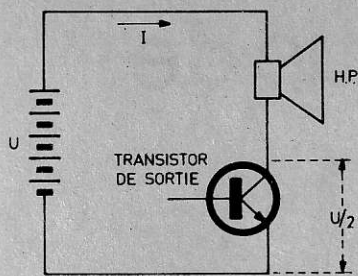


Fig. 1. — En classe A la puissance $U \times I$ fournie par la source se divise en 2 parts égales dans le transistor et dans la charge.

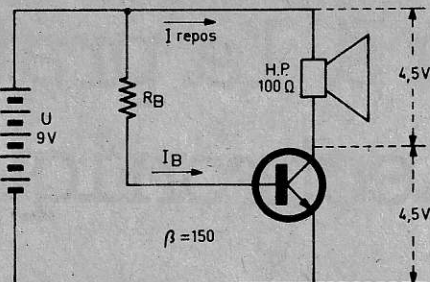


Fig. 2. — Etage de sortie classe A.

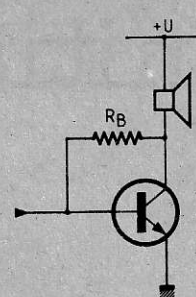


Fig. 3. — Pour une plus grande stabilité, R_B est placée entre base et collecteur.

On aura une idée de cette puissance en utilisant la formule :

$$\frac{U^2}{2Z}$$

En réalité cette formule n'est que théorique, car il faut considérer d'autres facteurs... Pour obtenir une valeur plus précise, il faut compter sur 80 % de la tension U , puis on appliquera la formule. Prenons un exemple pratique : l'alimentation est de 9 V et l'impédance de la bobine mobile est de 100 Ω , la puissance de sortie sera au maximum :

$$\frac{(9 \times 0,8)^2}{2 \times 100} = 0,2 \text{ W (fig. 1)}$$

Calcul de l'étage de sortie

Le courant de repos dans le transistor est égal à la tension aux bornes de la charge divisée par la résistance de cette charge, soit :

$$\frac{4,5 \text{ V}}{100} = 0,045 \text{ A}$$

ou 45 mA (fig. 2). Si le gain

du transistor est 150 (valeur moyenne), le courant I_B est égal à :

$$\frac{45 \text{ mA}}{150}$$

soit 300 μA , et la résistance de base sera donc égale à :

$$\frac{U - V_{BE}}{I_B}$$

c'est-à-dire à :

$$\frac{9 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{300 \times 10^{-6} \text{ A}} \approx 27 \text{ k}\Omega$$

Afin d'obtenir une plus grande stabilité de l'étage, et pour compenser l'absence de résistance dans le circuit émetteur, la résistance R_B sera placée entre base et collecteur (fig. 3).

La résistance R_B n'aura plus la même valeur, elle sera égale à :

$$\frac{4,5 \text{ V} - 0,7 \text{ V}}{300 \mu\text{A}} = 12 \text{ k}\Omega$$

Calcul de l'étage d'attaque

Pour cet étage nous utiliserons un transistor NPN standard comme le BC 107.

Cet étage n'a pas besoin de fournir une puissance, il apportera seulement un certain gain en tension.

On adoptera pour cet étage le même type de montage que précédemment : émetteur commun avec résistance R_B placée entre base et collecteur.

On sait que le gain en courant d'un transistor a une valeur maximale pour un certain courant I_C , on sait aussi que le bruit engendré par un transistor est minimal pour une valeur donnée du courant collecteur.

Pour cette deuxième raison nous choisirons une valeur de I_C égale à 1 mA.

Utilisation de la contre-réaction

La contre-réaction, ou réaction négative, est un moyen facile de réduire la distorsion tout en déterminant un gain précis de l'amplificateur.

La contre-réaction consiste à prendre une partie du signal de sortie et de l'appliquer à l'entrée du montage de telle sorte que le signal initial soit réduit. Il est indispensable que le signal ramené soit en parfaite opposition avec le signal injecté à l'amplificateur.

Pour bien comprendre ce qui se passe dans un amplificateur contre-réactionné, considérons d'abord un montage sans contre-réaction (fig. 4). Une augmentation de courant I_B se traduit par un gain de courant dans le circuit collecteur. Introduisons une résistance R_E dans le circuit émetteur, le montage est contre-réactionné (fig. 5).

Une augmentation de I_B se traduit bien par une élévation de I_E , puisqu'on peut considérer que $I_C = I_E$. Il en résulte donc une élévation de V_E tendant à réduire l'effet de I_B . Plus R_E est élevée, plus V_E sera élevée, réduisant encore plus la tension entre base et émetteur. De ceci, il faut bien se rappeler que, pour que

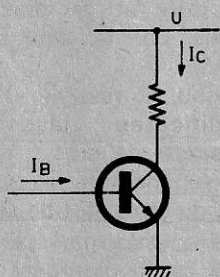


Fig. 4. — Etage sans contre-réaction.

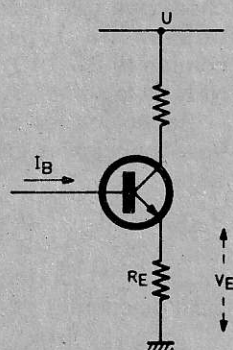


Fig. 5. — Etage avec contre-réaction.

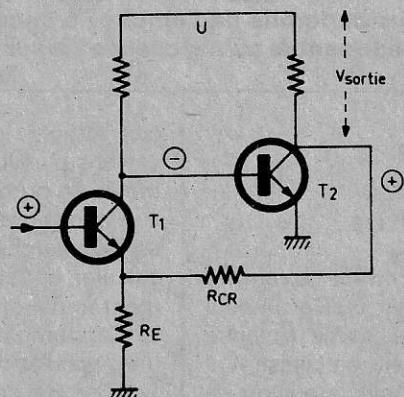


Fig. 6. — Le gain de tension est égal au rapport :

$$\frac{R_{CR}}{R_E}$$

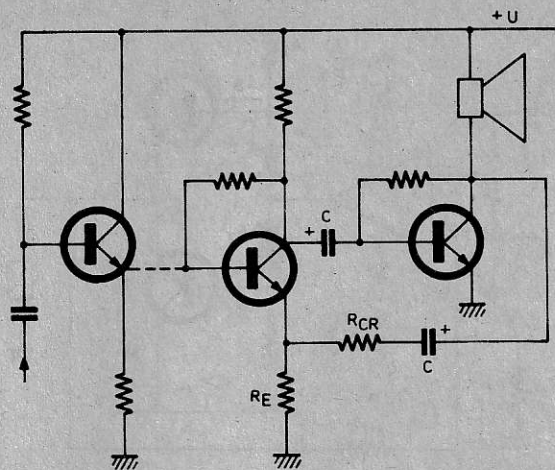


Fig. 7. — Schéma complet de l'amplificateur classe A.

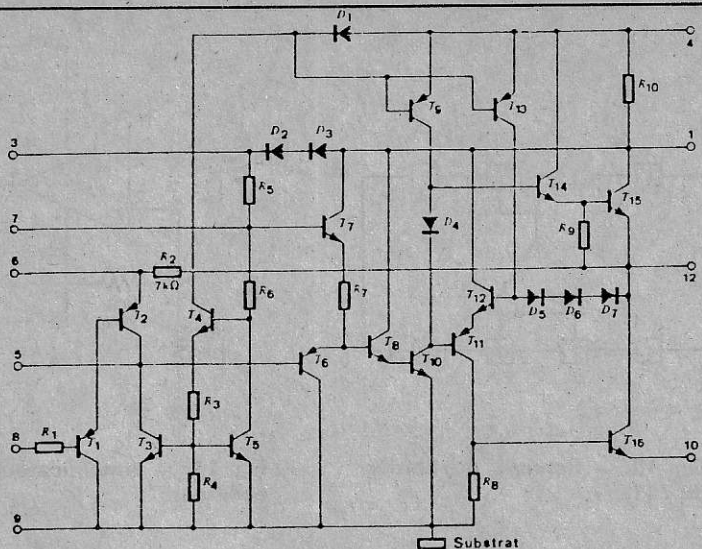


Fig. 8. — Schéma interne d'un amplificateur BF de puissance intégré (TBA 800) doc Telefunken.

l'étage soit bien contre-réactionné, l'augmentation du signal sur la base doit être compensée par une augmentation de la tension sur l'émetteur.

Passons maintenant à un amplificateur à 2 étages avec contre-réaction (fig. 6). Une partie de la tension de sortie est ramenée à l'entrée par la boucle de contre-réaction R_{CR} — R_E formant un diviseur de tension. Cette tension ramenée est égale à :

$$V_{\text{Sortie}} \times \frac{R_E}{R_{CR} + R_E}$$

Nous voyons que l'ampli est bien soumis à une réaction négative : une augmentation du signal sur la base de T_1 entraîne une diminution sur le collecteur de T_1 et une augmentation de ce signal amplifié sur le collecteur de T_2 . L'élévation de tension aux bornes de R_E réduit l'effet de l'augmentation du signal à l'entrée de cet amplificateur.

Au cas où il y aurait un étage supplémentaire entre T_1 et T_2 , l'effet serait inverse, il y aurait réaction positive et l'amplificateur oscillerait.

Pour terminer ce paragraphe sur la contre-réaction, disons que celle-ci réduit le gain d'un amplificateur. Le gain de tension avec contre-réaction est égal approximativement au rapport :

$$\frac{R_{CR}}{R_E}$$

Si le gain sans boucle de contre-réaction est égal à

150, et si ensuite nous insérons une résistance R_{CR} de $1\,000\,\Omega$, la résistance R_E étant de $47\,\Omega$, le gain avec contre-réaction sera sensiblement égal à 20, et les distorsions seront considérablement réduites.

Revenons maintenant à notre schéma.

Nous avons représenté l'étage final figure 3. L'ensemble des étages d'attaque et de sortie est donné figure 7. En série avec R_{CR} se trouve un condensateur dont le but est de ne pas détruire l'équilibre des tensions continues. Sa valeur capacitive est grande pour que sa réaction soit faible par rapport à R_{CR} , pour la gamme de fréquences amplifiées.

Le calcul des composants

de l'étage d'attaque ne pose pas de problème. Le courant I_C choisi est $1\,\text{mA}$. L'insertion d'une résistance de $100\,\Omega$ dans le circuit émetteur ne modifie pas la polarisation du transistor T_1 . Et si nous souhaitons un gain total de l'ordre de 30, R_{CR} aura comme valeur $3,3\,\text{k}\Omega$. Les condensateurs C sont des $10\,\mu\text{F}/12\,\text{V}$.

Afin que l'entrée de l'amplificateur ne vienne pas amortir le circuit dont on veut amplifier le signal, il est conseillé d'ajouter un étage d'entrée en « collecteur commun » dont le but n'est pas d'amplifier la tension (son gain de tension est égal à 1) mais de disposer d'une impédance d'entrée très élevée. Celle-ci est égale au pro-

duit : résistance dans le circuit émetteur par le gain de courant du transistor. De cette façon on obtient facilement une résistance d'entrée de l'ordre du Mégohm (fig. 7). Remarquons que dans cet étage la contre-réaction est « totale ».

Amplificateur BF intégré

Une autre réalisation rapide d'amplificateur BF utilise un circuit intégré. Il en existe beaucoup sur le marché. Nous avons choisi comme modèle le TBA 810 qui se trouve dans tous les magasins de composants électroniques.

Ce circuit peut être alimenté par une tension entre 4 et 20 V. Sa puissance de sortie maximale est de 1,5 W sans radiateur si l'amplificateur fonctionne à une température ambiante inférieure à 40°C . Cette puissance peut monter à 5 W si le circuit est monté sur un radiateur. Ce composant est, en effet, pourvu de petites ailettes qui peuvent être soudées sur le revêtement métallique d'un circuit imprimé (TBA 810S) ou fixé par 2 boulons si les ailettes sont perforées (TBA 810 AS).

Le montage interne est un push-pull complémentaire classe B, dont le rendement est de 78 %.

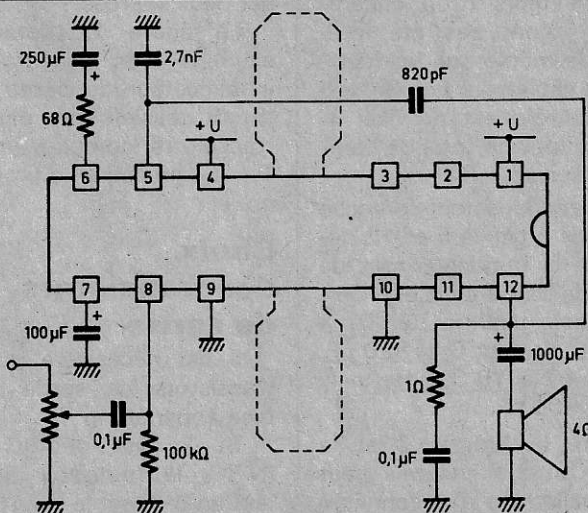


Fig. 9. — Schéma de l'amplificateur complet.

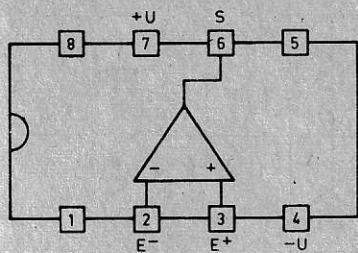


Fig. 10. — Schéma du boîtier du 741.

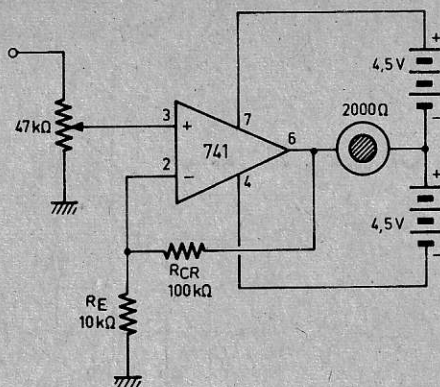


Fig. 11. — Amplificateur pour écouteur.

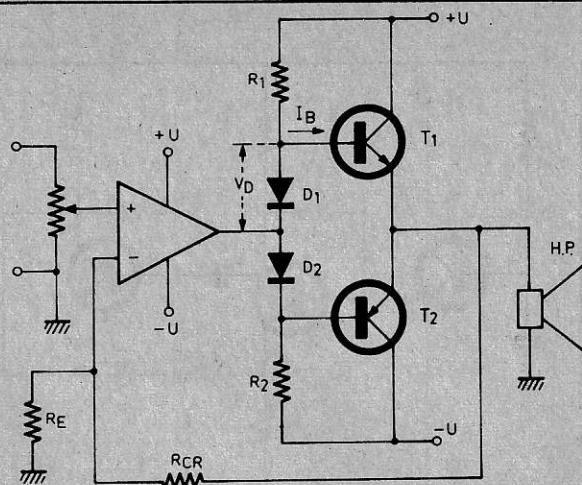


Fig. 12. — Amplificateur utilisant un ampli op muni de deux transistors.

La puissance de sortie maximale dépend de la tension d'alimentation et de l'impédance du haut-parleur. Si celle-ci est de $4\ \Omega$ la puissance de sortie max est de 250 mW pour une tension d'alimentation de 4,5 V, 0,5 W pour 6 V, 1,25 W pour 9 V.

Les autres caractéristiques intéressantes sont l'impédance d'entrée ($5\ M\Omega$) et la bande passante qui va de 40 Hz à 20 000 Hz, pour une distorsion de 0,3 %. Cet amplificateur peut être qualifié de « haute fidélité ».

Montage pratique

Nous donnons sur la figure 8 le schéma interne d'un amplificateur BF intégré (TBA 800). On reconnaît aisément les circuits de base constituant un amplificateur BF classique.

Le préamplificateur, montage Darlington (T_1 , T_2), a son entrée sur la broche 8. La résistance R_E dont nous avons parlé à propos de la contre-réaction doit être câblée extérieurement entre la broche 6 et la masse à travers un condensateur. La résistance R_{CR} de la boucle de contre-réaction n'est autre que la résistance R_2 du schéma (7 k Ω pour le TBA 800, 4 k Ω pour les TBA 810 et TCA 830). Une autre résistance devra être

connectée entre la broche 8 et la masse afin que la base de T_1 ne soit pas « en l'air » en continu. Les broches 9 et 10 sont connectées à la masse (moins zéro volt). La sortie de l'ampli se trouve sur la broche 12. L'alimentation du circuit intégré se fait par la broche 4.

Le schéma de branchement (vue du dessus) du circuit intégré, valable aussi bien pour le TBA 810 que pour le TBA 800 et le TCA 810, est donné sur la figure 9, ainsi que les composants extérieurs, constituant un amplificateur BF complet.

Il est vivement conseillé de n'appliquer la tension sur le montage qu'une fois placés le circuit intégré et les composants extérieurs.

On voit que le câblage est très simplifié, seuls les condensateurs (trop encombrants) n'ont pas été intégrés, de même que les résistances câblées sur la broche 6 dont le rôle est de fixer le gain de tension total de l'amplificateur.

Le condensateur branché entre les broches 5 et 12 détermine la fréquence max de la bande passante. Cette dernière est garantie de 40 à 20 000 Hz pour $C = 820\ pF$, ou de 40 à 10 000 Hz avec $C = 1\ 500\ pF$.

Entre la broche 7 et la masse un condensateur peut éventuellement être connecté pour éliminer des ronflements parasites.

Emploi d'un amplificateur opérationnel

Une autre technique consiste à utiliser un amplificateur opérationnel suivi d'une paire de transistors.

L'amplificateur opérationnel intégré est également d'un emploi facile. Ses deux entrées permettent d'appliquer sans ambiguïté une contre-réaction, déterminant de ce fait le gain de l'amplificateur (fig. 10).

Le schéma de la figure 11 indique le montage d'un ampli opérationnel (741) utilisé en amplificateur BF pour écouteur de 2 000 Ω .

Le gain total est égal au rapport :

$$\frac{R_{CR}}{R_E}$$

soit 10 dans notre exemple. L'alimentation est composée par deux sources.

La figure 12 donne un exemple d'un schéma d'un amplificateur de petite puissance utilisant une paire de transistors complémentaires T_1 , T_2 précédée d'un ampli op.

Choix des transistors de sortie

Il est nécessaire que les transistors de sortie soient bien appariés.

Si T_1 est un BC 140 (NPN), le transistor équivalent en PNP est le BC 160.

En ce qui concerne la puissance maximale (P_{max}) que

l'on peut sortir de l'ampli et de son rapport avec la puissance P_{Cmax} du transistor, il faut savoir que le rendement d'un étage classe B est de 78 % on démontre que :

$$P_{Cmax} = 0,4 P_{max}$$

Ceci signifie que si on souhaite 10 W en sortie d'un push-pull classe B, on a $P_{Cmax} = 4\ W$, soit 2 W par transistor.

Autrement dit on peut sortir d'un push-pull une puissance égale à 5 fois la puissance max dissipée dans un seul transistor.

Les transistors BC 140 et BC 160 ont un P_{Cmax} de 0,65 W, la puissance de sortie peut monter jusqu'à $0,65 \times 5$ soit 3,25 W sans dommage, ce qui est déjà une puissance BF appréciable.

Nous avons vu dans l'article précédent l'utilité des diodes D_1 et D_2 (1N 4148 ou 1N 914). Les résistances R_1 et R_2 dépendent du courant demandé en sortie et du gain des transistors T_1 et T_2 . Si le courant I_B est de 100 μA , le courant traversant R_1 ou R_2 sera au moins 10 fois plus élevé, soit 1 milliampère. La résistance est égale à :

$$\frac{U - V_D}{1\ mA}$$

Si $U = 9\ V$ et $V_D = 0,7\ V$, cela donne $R_1 = R_2 \approx 8,2\ k\Omega$.

Nous espérons que ces conseils donnés dans ces deux articles vous auront aidé à réaliser un amplificateur BF, rapidement et sans ennui.

J. B.P.