

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



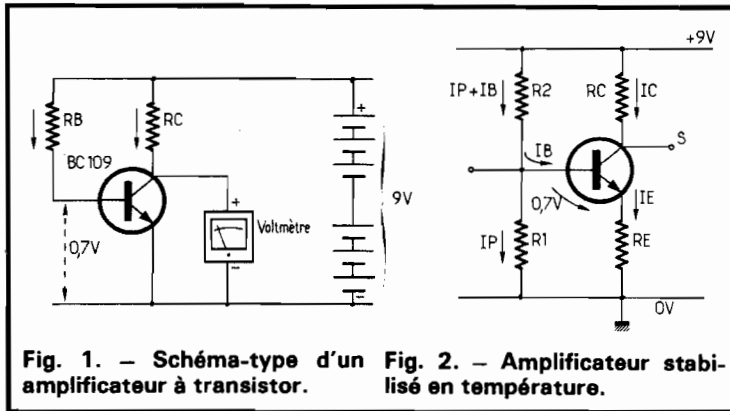
Une plaque de connexions permet un assemblage rapide.

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. Étant 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 :

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

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

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 B, 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 B 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 reparler 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\ 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

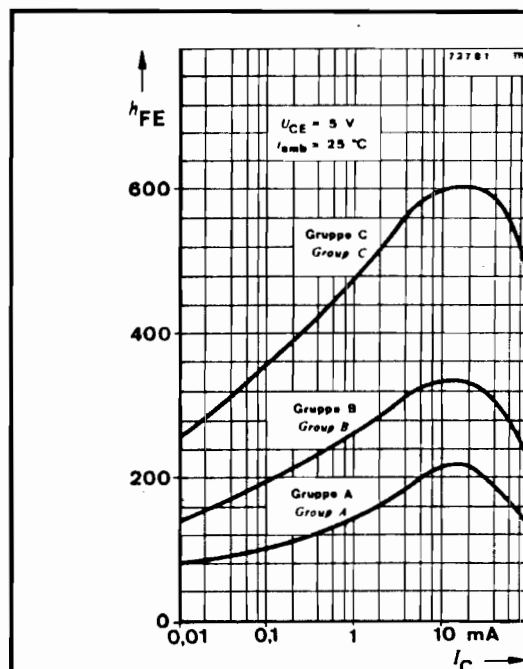


Fig. 3. - Variation du gain du transistor BC 109 en fonction du courant collecteur.

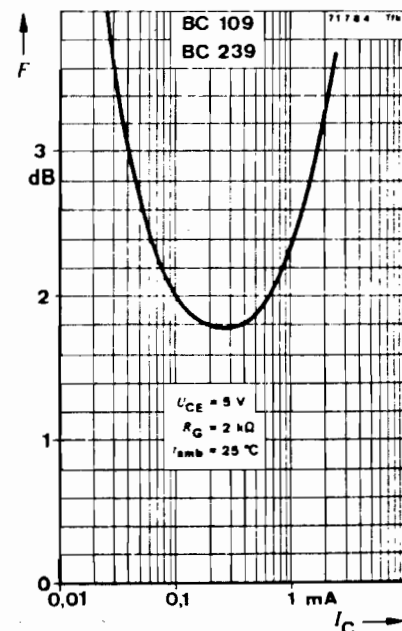


Fig. 4. - Variation du bruit F du transistor BC 109 en fonction du courant collecteur.

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 $I_p = 10 \times I_b$, 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

$$\frac{1 \text{ mA}}{200}, \text{ soit } = \frac{1000 \mu\text{A}}{200}$$

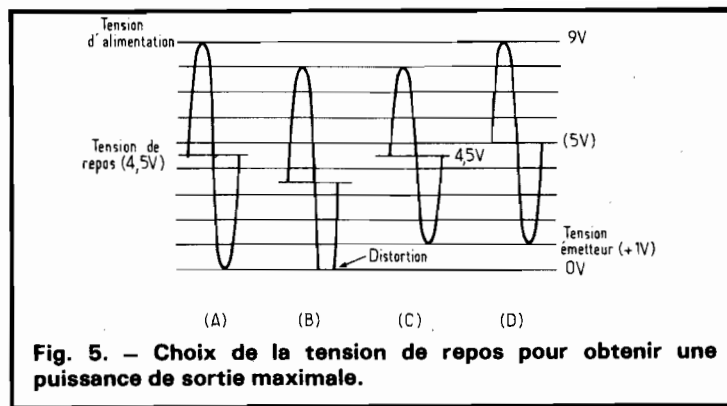
ou $5 \mu\text{A}$. D'après ce que nous venons de dire $I_p = 50 \mu\text{A}$. Les résistances R_1 et R_2 sont facilement calculées puisque la tension à leurs bornes et le courant les traversant sont connus ($R_1 = 34 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 133 \text{ k}\Omega$).

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_p , ce qui aurait diminué la résistance du pont et augmenté l'énergie demandée à la source. Les piles auraient été usées 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-



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-

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

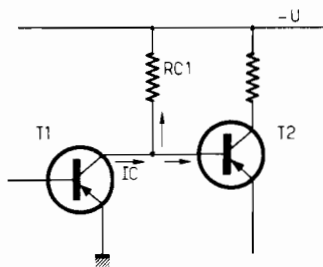


Fig. 6. — Couplage de deux transistors PNP. Une partie seulement de I_C atteindra T_2 .

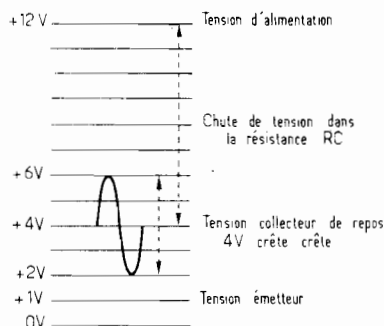


Fig. 7. — Conditions de fonctionnement du circuit collecteur.

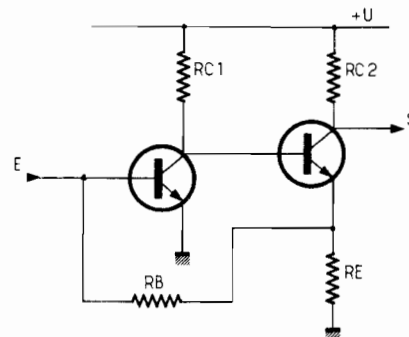


Fig. 8. — Amplificateur de tension à deux étages.

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 2000Ω 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.

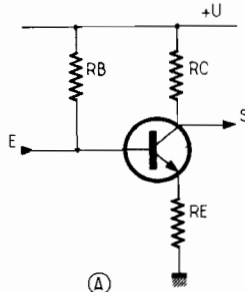


Fig. 9. — Amplificateur de tension à un étage.

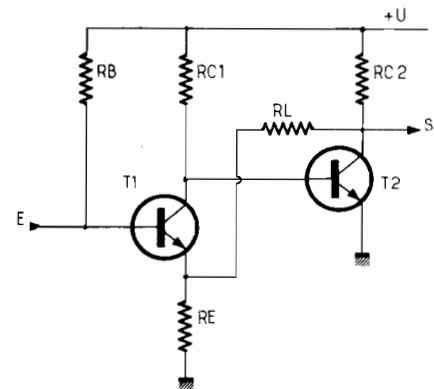
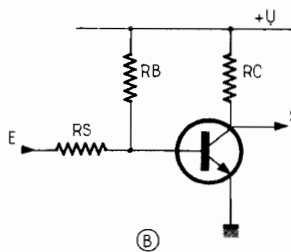


Fig. 10. — Amplificateur de tension à deux étages.

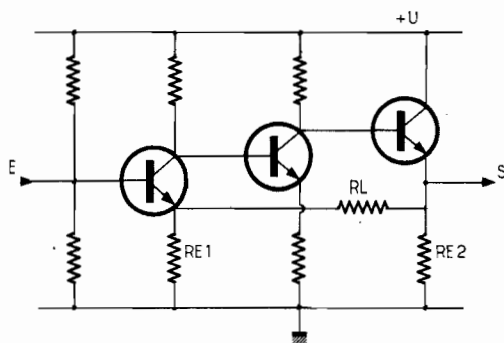


Fig. 11. – Amplificateur de tension utilisant en sortie un étage collecteur commun.

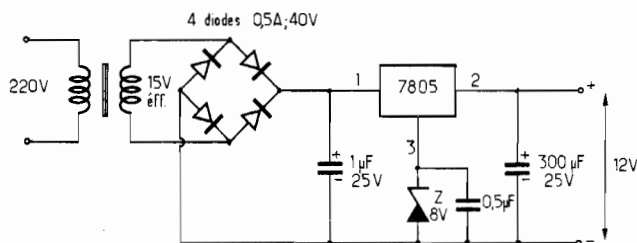


Fig. 12. – Une alimentation stabilisée.

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 $4,5\ V$ (tension de repos) doit être relié à la base du suivant qui est à $+2\ V$. 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 $+5\ V$ 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 $+5\ V$. En insérant une diode zener de $4\ V$ avec la polarité indiquée, la tension de sortie sera de $+9\ V$. Celle-ci serait de $+12\ V$ 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 $+12\ V$ 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.

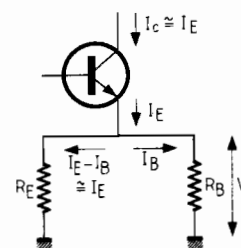
ANNEXE 1

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 :

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