

# Initiation à la pratique de l'électronique

## L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

L'amplificateur opérationnel intégré, plus communément désigné par son abréviation « ampli op », fait partie des circuits intégrés linéaires (ou analogiques), l'autre famille étant les circuits logiques, ou digitaux (portes, bascules...). Les amplificateurs opérationnels permettent de réaliser de très nombreux montages : amplificateurs, oscillateurs, comparateurs, filtres actifs... Ils furent utilisés dans les premiers ordinateurs pour effectuer des opérations arithmétiques, d'où l'origine de leur nom.

Nous nous bornerons aujourd'hui à quelques applica-

**On entend de plus en plus parler des amplificateurs opérationnels, et pourtant beaucoup de jeunes techniciens en ont une connaissance tout à fait élémentaire et hésitent à utiliser ce composant.**

**Le présent article est publié dans le but d'aider le lecteur à surmonter les difficultés éventuelles et à réaliser quelques circuits.**

tions que le lecteur sera capable de calculer, et de réaliser par la suite.

### L'AMPLI IDEAL

Imaginons un amplificateur dont le gain ne serait pas seu-

lement très élevé, mais dont la valeur pourrait également être réglée de façon très précise. Cet amplificateur pourrait amplifier aussi bien une tension continue faible qu'un signal alternatif de fréquence élevée. Il pourrait, à volonté,

introduire ou non un déphasage de 180°. Cet amplificateur modèle aurait aussi une impédance d'entrée élevée, dans le but de ne pas amortir les circuits précédents. Quant à la résistance interne de sa sortie, elle serait assez faible pour pouvoir fournir un courant important.

L'amplificateur opérationnel se rapproche beaucoup de cet amplificateur idéal. Pour mieux comprendre son fonctionnement, afin de l'utiliser de façon rationnelle, voyons comment est constitué ce type de circuit.

Partons d'un simple étage à transistor, monté en émetteur

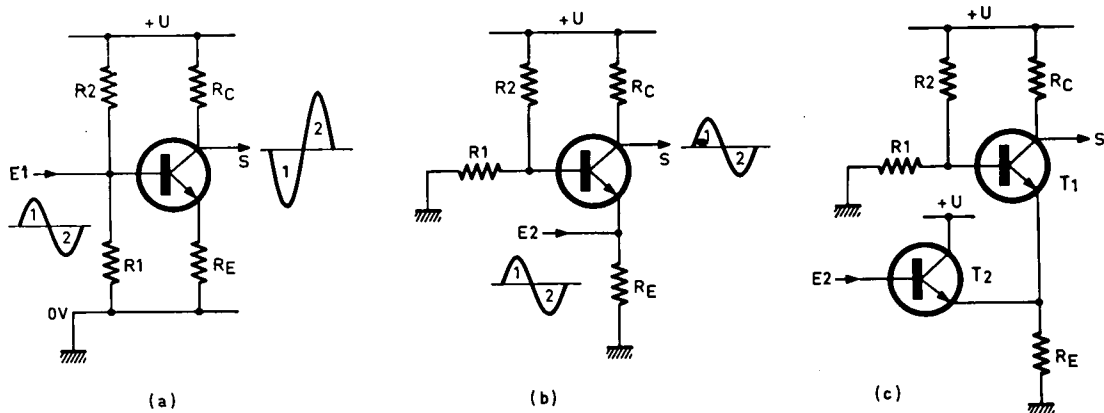


Fig. 1. - En combinant un montage émetteur commun (a) et une base commune (b) auxquels on ajoute un collecteur commun (c), on arrive à la forme la plus simple de l'amplificateur opérationnel.

commun (fig. 1a). Nous avons vu que son gain de tension est égal à  $R_C/R_E$  et que le déphasage entre les signaux d'entrée et de sortie est de  $180^\circ$ . Si maintenant nous ne voulons pas de déphasage, il serait nécessaire de faire fonctionner le transistor en « base commune » ; autrement dit la tension à amplifier serait appliquée à l'émetteur pour être recueillie, amplifiée, et sans déphasage, sur le collecteur (fig. 1b). La résistance  $R_E$  étant toujours un peu faible, et dans le but de présenter la même impédance sur les deux entrées, il est conseillé d'ajouter un transistor en collecteur commun ( $T_2$ ), comme indiqué sur la figure 1c. Ce circuit à deux transistors est plus couramment représenté sous une autre forme (fig. 3). Le signal que nous appliquons à l'entrée  $E_2$  (+) se retrouve à travers  $T_2$ , sans amplification ni déphasage aux bornes de  $R_E$ . La tension aux bornes de celle-ci est appliquée à  $T_1$  qui l'amplifie, mais ne la déphase pas. Si le signal est appliqué sur l'autre entrée  $E_1$  (-), le cheminement du signal est plus direct, il se trouve amplifié et déphasé à la sortie S.

obtenons une variation de tension aux bornes de la charge.

L'énorme avantage de ce type d'amplificateur est son insensibilité aux parasites ; leur effet sur les deux bases est neutralisé en sortie. De même, une variation de température entraînant une variation de courant collecteur dans  $T_1$  et  $T_2$  fait que les points  $S_1$  et  $S_2$  varieront ensemble et dans la même direction, de telle manière que la charge ne sera pas perturbée.

Pour que cet amplificateur soit efficace, il est indispensable que  $T_1$  et  $T_2$  soient bien identiques.

Le nom de cet amplificateur vient du fait que c'est la différence entre les tensions appliquées sur les bases qui est amplifiée. L'entrée  $E_1$  reçoit une variation de + 20 mV et  $E_2$  une variation de + 10 mV. Le signal à l'entrée symétrique est de :  $20 - 10 = 10$  mV ; il se retrouve en sortie multiplié par le gain. Attention aux polarités des signaux d'entrée : avec une variation de - 5 mV sur  $E_1$  et + 10 mV sur  $E_2$ , le signal de commande à l'entrée différentielle est de  $E_1 - E_2$ , soit  $(- 5) - (+ 10)$ , ce qui donne - 15 mV.

## AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

Dans le but d'obtenir deux montages absolument identiques, on ajoute une résistance sur le collecteur de  $T_2$  (fig. 3), circuit appelé « amplificateur différentiel » possédant une sortie symétrique : la charge est disposée entre les sorties  $S_1$  et  $S_2$ .

Voyons l'utilité de cet amplificateur : si les deux entrées reçoivent des signaux de même phase et de même amplitude, aucune variation de tension n'apparaît sur la charge.

En revanche, si  $E_2$  est à potentiel fixe et que le signal est appliqué seulement sur  $E_1$ , nous

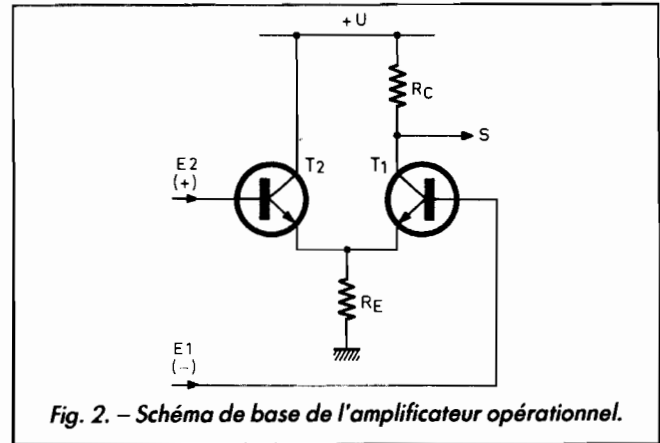


Fig. 2. - Schéma de base de l'amplificateur opérationnel.

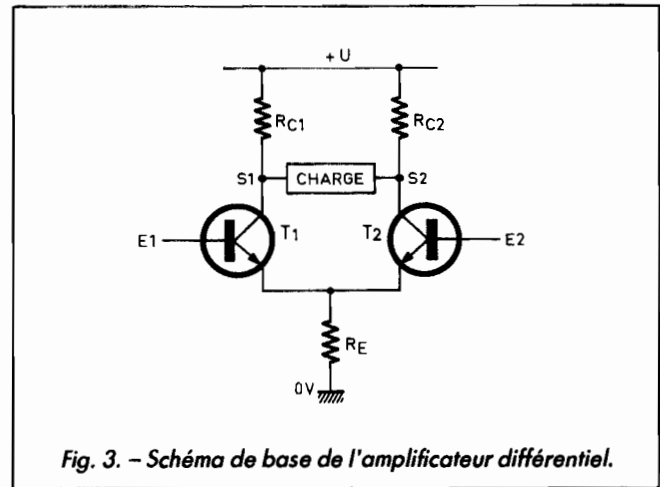


Fig. 3. - Schéma de base de l'amplificateur différentiel.

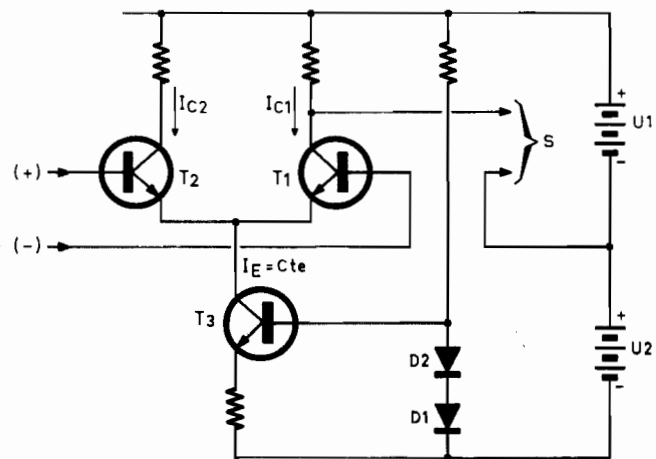


Fig. 4. - Schéma d'un amplificateur opérationnel.

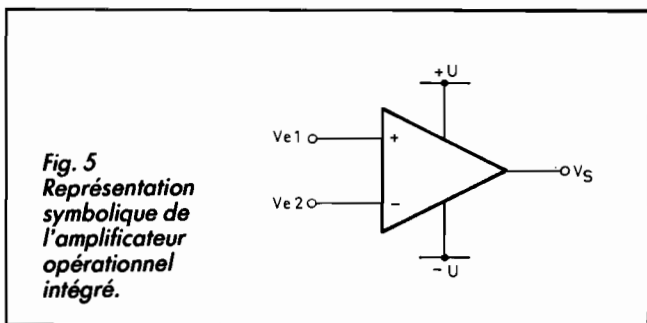


Fig. 5  
Représentation symbolique de l'amplificateur opérationnel intégré.

### AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL TRANSISTORISE

Sur certains schémas d'amplificateurs opérationnels, on remarque que la résistance  $R_E$  est remplacée par un transistor. Celui-ci est équivalent à un générateur de courant constant afin que la somme de  $I_{C1}$  et de  $I_{C2}$  soit toujours la même. A une diminution de  $I_{C1}$  correspond une augmentation de  $I_{C2}$ . Un autre détail concerne la source d'alimentation. Le point masse du montage ne se trouve pas à  $-U$  comme pour l'alimentation des transistors NPN, mais à mi-tension. Le circuit est étudié de telle sorte qu'au repos la tension collecteur du transistor de sortie soit égale à cette mi-tension ou, si l'on préfère, au potentiel de cette nouvelle masse. La tension amplifiée à la sortie varie de part et d'autre de ce potentiel masse.

### AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL INTEGRE

Grâce aux progrès de la micro-électronique, les performances des amplificateurs opérationnels se sont considérablement améliorées. Schématiquement, l'amplificateur opérationnel intégré se présente sous la forme d'un triangle (fig. 5) avec cinq connexions : deux pour les entrées, une pour la sortie, et

deux pour l'alimentation. Ces dernières ne sont pas toujours représentées.

Quelles sont les caractéristiques principales de ce composant ? Pour les modèles les plus courants (technique bipolaire), la résistance d'entrée peut se situer entre 200 k $\Omega$  et 2 M $\Omega$ , exceptionnellement 5 M $\Omega$  (type RC4136). Ces valeurs élevées paraissent faibles par rapport à celles des modèles FET qui peuvent atteindre 10<sup>10</sup> ou 10<sup>12</sup>  $\Omega$  (série TL 080). La résistance interne de sortie est de l'ordre de 50 à 500  $\Omega$ . Certains modèles sont protégés contre les courts-circuits qui pourraient survenir en sortie.

La double tension d'alimentation varie entre  $\pm 2$  V et  $\pm 22$  V. Pour les montages courants, un bon choix est  $\pm 12$  V, bien que parfois, pour l'amplification de signaux faibles, une tension bien plus petite soit employée ( $\pm 3$  V). Une alimentation de  $\pm 12$  V signifie que l'on doit disposer de deux sources de 12 V reliées en série. Le point commun de ces deux alimentations est le point de masse du montage, comme nous allons le voir sur les schémas pratiques. A noter que certains modèles sont monotension, ce qui simplifie le problème de l'alimentation. Quant au courant de repos, il est généralement de l'ordre de 3 mA.

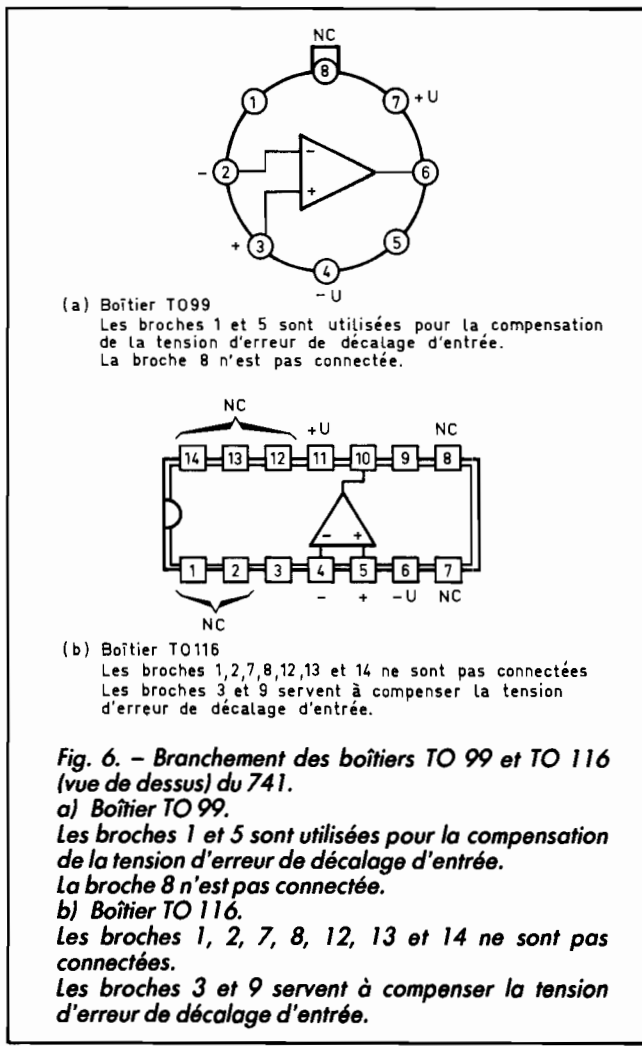
Pour ces premières expérimentations, nous prendrons le type 741, qui est certes un des ancêtres des « amplis op », mais qui a l'avantage d'être

très répandu et de ne pas coûter cher (moins de 4 F). Ses caractéristiques limites sont les suivantes :

- Tension d'alimentation :  $\pm 22$  V (consommation : 2,8 mA)
- Puissance de sortie : 500 mW.
- En ce qui concerne son utilisation, ses caractéristiques sont (pour une alimentation de  $\pm 15$  V, et une température ambiante de 25°C) :
- Résistance d'entrée : 2 M $\Omega$
- Résistance de sortie : 75  $\Omega$
- Gain de tension (boucle ouverte) : 200 000
- Fréquence maximale : 2 MHz.
- Le 741 se présente dans plusieurs boîtiers différents : TO 99 (boîtier métallique),

TO 116 (boîtier plastique), comme sur la figure 6 ; ou DIP 8 (boîtier plastique), comme le montre le montage de la figure 7. Ces circuits sont donnés vus de dessus.

Les deux entrées de l'amplificateur ne sont pas rigoureusement au même potentiel. Il existe toujours une très légère tension, appelée « offset » ou tension d'erreur de décalage d'entrée. Elle est de l'ordre de 6 mV pour le 741, et peut être annulée par un montage comme celui donné figure 7. Pour ce réglage, les deux entrées sont reliées à la masse. Un voltmètre électronique branché entre la sortie (broche 6) et la masse doit indi-



(a) Boîtier TO99  
Les broches 1 et 5 sont utilisées pour la compensation de la tension d'erreur de décalage d'entrée. La broche 8 n'est pas connectée.

(b) Boîtier TO116  
Les broches 1, 2, 7, 8, 12, 13 et 14 ne sont pas connectées. Les broches 3 et 9 servent à compenser la tension d'erreur de décalage d'entrée.

Fig. 6. - Branchement des boîtiers TO 99 et TO 116 (vue de dessus) du 741.  
a) Boîtier TO 99.  
Les broches 1 et 5 sont utilisées pour la compensation de la tension d'erreur de décalage d'entrée. La broche 8 n'est pas connectée.  
b) Boîtier TO 116.  
Les broches 1, 2, 7, 8, 12, 13 et 14 ne sont pas connectées.  
Les broches 3 et 9 servent à compenser la tension d'erreur de décalage d'entrée.

quer 0 V, sinon le réglage du potentiomètre doit être retouché.

Puisque nous parlons de compensation, disons un mot de celle en fréquence. Elle peut être réalisée intérieurement comme pour le 741, ou encore par un branchement externe (modèles 761 et 861). Un condensateur de 22 pF doit alors être branché entre les deux broches mentionnées par le constructeur. Cette compensation a pour but d'éliminer des oscillations parasites pouvant survenir lorsque le circuit amplifie des signaux à fronts raides (signaux carrés).

## GAIN DE L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

Le gain en boucle ouverte étant très élevé, on utilise en pratique un circuit de contre-réaction pour doser ce gain à une valeur bien plus faible, correspondant à la tension que nous souhaitons obtenir en sortie.

Dans un circuit de contre-réaction, une certaine portion de la tension de sortie est ramenée à l'entrée afin de s'opposer au signal d'entrée et, de ce fait, réduire l'amplification et également les distorsions. Puisque cette tension « s'oppose », elle est appliquée à l'entrée « moins » de l'amplificateur.

La figure 8 nous montre la réalisation d'un tel circuit. Le pont de résistances  $R_1$ - $R_2$  applique bien à l'entrée une fraction de la tension de sortie. Les connexions d'alimentation ne sont pas toujours représentées.

La valeur du gain de l'ensemble est inversement proportionnelle à la tension ramenée ; elle dépend donc de la valeur de  $R_1$  et de  $R_2$ . Ce gain est donné par le rapport

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} \text{ ou, en simplifiant : } \frac{R_1}{R_2} + 1$$

Si  $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$  et  $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ , le gain est égal à

$$\frac{500 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega} + 1$$

soit 101 fois. Il faut plutôt dire que ce gain est de l'ordre de 100, à cause de la précision des résistances. Il n'en reste pas moins vrai que, si on utilise des résistances très précises, le gain mesuré sera bien de 101 fois. La formule pratique que l'on appliquera dans la majorité des cas sera :

$$\text{Gain de tension} = \frac{R_1}{R_2}$$

En pratique,  $R_1$  ne doit pas avoir une valeur trop élevée ; il faut éviter de dépasser 1 M $\Omega$ . Celle de  $R_2$  ne sera pas inférieure à 1 k $\Omega$ . Une bonne valeur pour  $R_2$  est 10 k $\Omega$ .

Ainsi, il suffit de deux résistances et d'un circuit intégré pour réaliser un amplificateur. On évitera toutefois la tentation

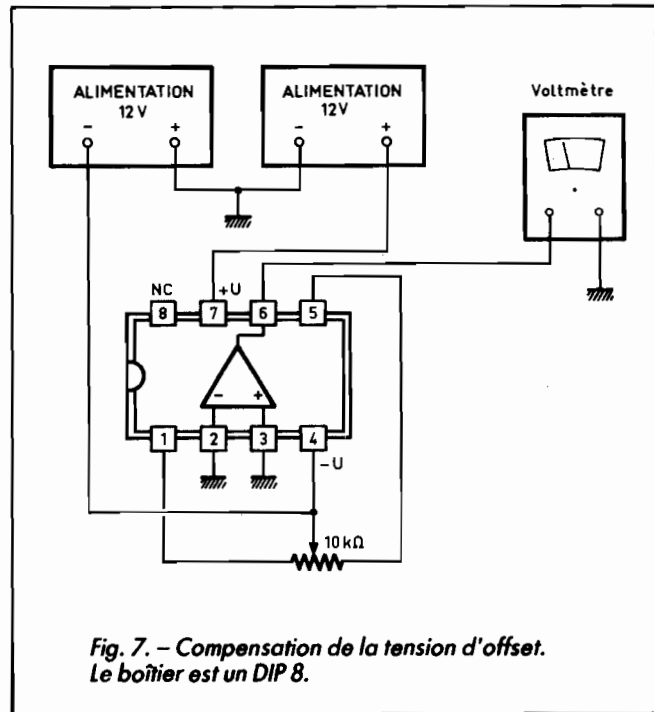


Fig. 7. - Compensation de la tension d'offset. Le boîtier est un DIP 8.

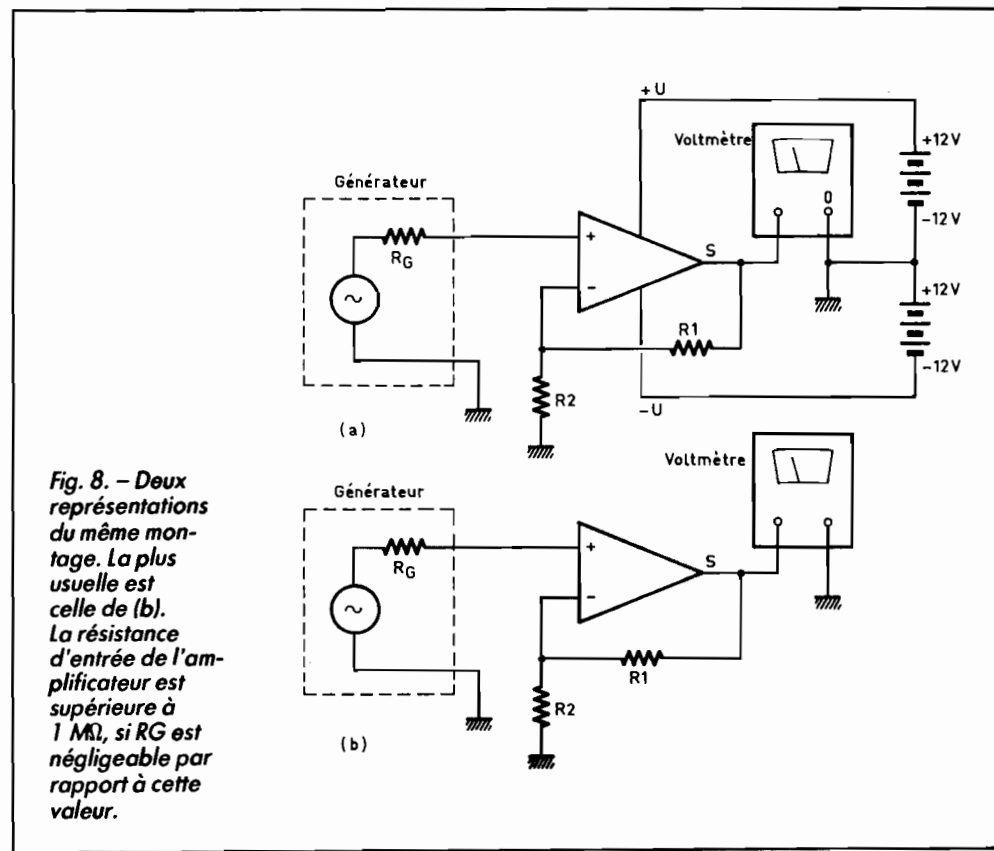


Fig. 8. - Deux représentations du même montage. La plus usuelle est celle de (b). La résistance d'entrée de l'amplificateur est supérieure à 1 M $\Omega$ , si  $R_G$  est négligeable par rapport à cette valeur.

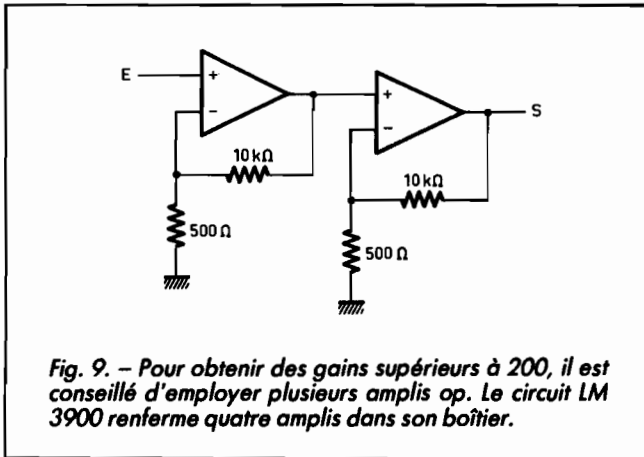


Fig. 9. - Pour obtenir des gains supérieurs à 200, il est conseillé d'employer plusieurs amplis op. Le circuit LM 3900 renferme quatre amplis dans son boîtier.

d'obtenir un gain trop fort avec un seul ampli. La limite, sans problème, se situe entre 150 et 200. Si on souhaite un gain de 400, il est préférable de disposer en cascade deux amplis op ayant chacun un gain de 20 (fig. 9). Si c'est un gain réglable qui est souhaité, rien n'empêche de jouer sur la contre-réaction. La résistance  $R_2$  peut être mise en série avec une résistance réglable (potentiomètre de 10 kΩ, par exemple, avec une résistance de 2 kΩ, comme représenté sur la figure 10a). On peut également

tension crête-à-crête à ne pas dépasser à l'entrée. A noter également que certains amplis op sont à collecteur ouvert (type 761). Une résistance externe de quelques kilo-ohms (1 kΩ à 4,7 kΩ) doit être placée entre la connexion de sortie et la masse.

AMPLIFICATEUR AVEC DÉPHASAGE DE 180°

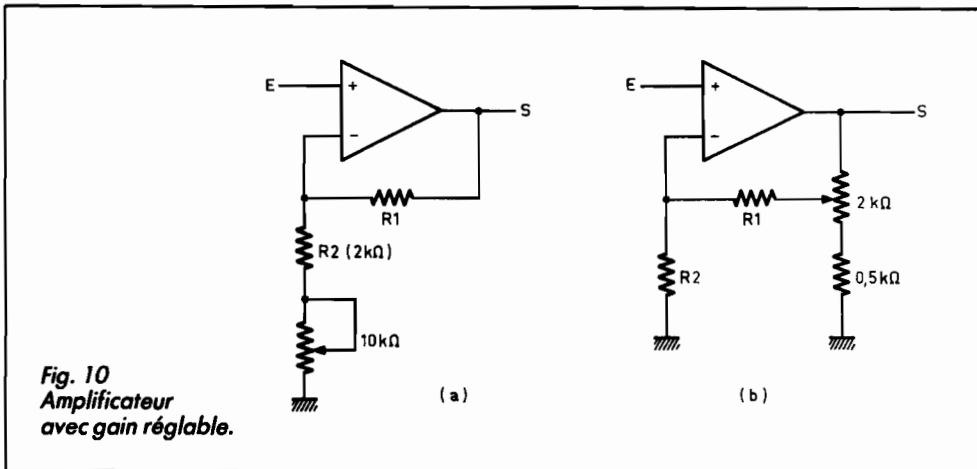


Fig. 10 Amplificateur avec gain réglable.

Ce montage est représenté sur la figure 11. L'entrée « moins » reçoit d'une part la contre-réaction et d'autre part le signal à amplifier. La formule du gain doit tenir compte de l'impédance interne  $R_G$  du générateur de signal :

$$\text{Gain de tension} = \frac{-R_1}{R_2 + R_G}$$

Si ce générateur est la cellule piézo d'un lecteur de disque, dont l'impédance est de l'ordre de 50 kΩ, mieux vaut choisir le montage de la figure 8. Mais si nous avons besoin d'amplifier 100 fois le signal provenant d'un micro dont l'impédance est de 300 Ω, nous pourrions utiliser ce montage. Et si nous avons sous la main une résistance de 500 kΩ pour  $R_1$ , la valeur de  $R_2$  sera donnée, en principe, par la formule :

$$\left| G \right| = \frac{R_1}{R_2} \quad \text{soit} \quad R_2 = \frac{500}{100}$$

ou 5 kΩ.

A cette valeur théorique de  $R_2$ , on doit soustraire 300 Ω. La valeur réelle de  $R_2$  est alors 4,7 kΩ.

AMPLIFICATEUR SUIVEUR

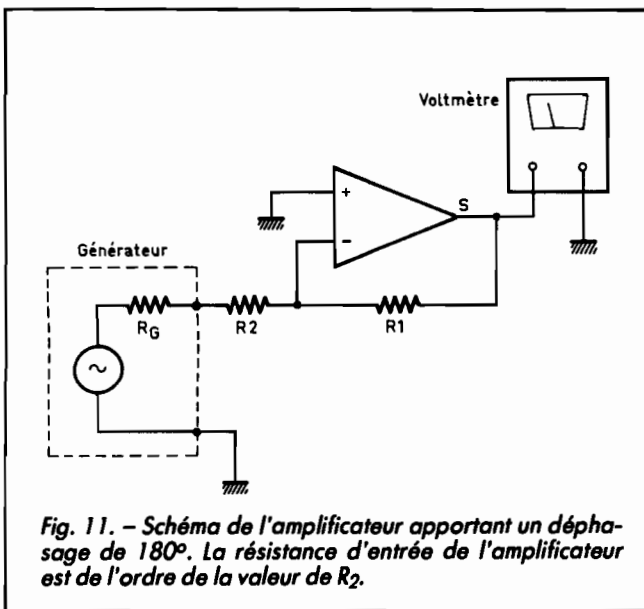


Fig. 11. - Schéma de l'amplificateur apportant un déphasage de 180°. La résistance d'entrée de l'amplificateur est de l'ordre de la valeur de  $R_2$ .

appliquer une fraction de la tension de sortie dans le circuit de contre-réaction (fig. 10b).

TENSION DE SORTIE

Etant donné le gain élevé qu'il est possible d'obtenir, il faut tenir compte des valeurs maximales des signaux d'entrée et de sortie. La tension crête-à-crête de sortie ne devra pas dépasser la valeur de la tension d'alimentation moins 10 %. Pour une alimentation de ± 12V, cette tension de sortie ne doit pas dépasser ± 10,8 V, soit une valeur crête-à-crête de 21,6 V. Divisée par le gain du montage, nous obtenons la

Ce montage (fig. 12) est le plus simple des amplificateurs. Son amplification de tension est égale à l'unité : on re-

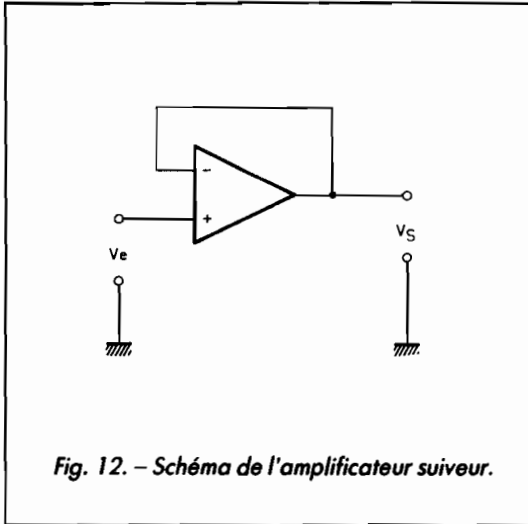


Fig. 12. - Schéma de l'amplificateur suiveur.

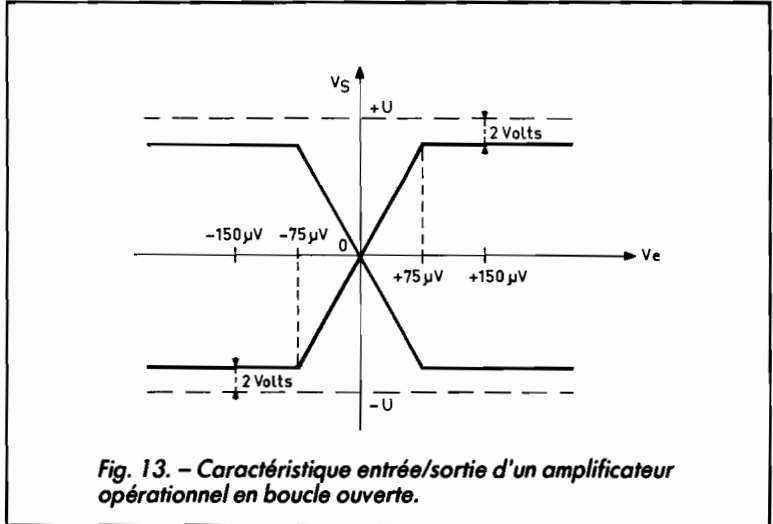


Fig. 13. - Caractéristique entrée/sortie d'un amplificateur opérationnel en boucle ouverte.

trouve en sortie la même valeur qu'à l'entrée, avec la même polarité. Son intérêt est sa résistance d'entrée très élevée, ce qui permet, par exemple, d'utiliser un vieux contrôleur à aiguille pour mesurer des tensions sans consommer de courant. Le courant d'entrée maximale d'un 741 peut atteindre 0,5 mA, mais certains amplis op déjà cités (FET) ont un courant d'entrée inférieur à 0,1 nA.

COMPARATEUR DE TENSION

Avant de parler de ce montage, il est intéressant de jeter un coup d'œil sur la caractéristique entrée/sortie d'un ampli op non contre-réactionné (fig. 14). Celui-ci est alimenté par une tension  $\pm U$ , que nous pouvons imaginer égale à  $\pm 15$  V. Nous considérons la caractéristique en trait gras qui représente celle correspondant à l'entrée non-inverseuse (l'entrée « moins » étant reliée à 0 V) (fig. 13).

Nous voyons que la tension de sortie ne peut varier qu'entre  $-U$  et  $+U$ , moins une marge de l'ordre de 2 V. Entre ces deux paliers, l'inclinaison de la droite est fonction du gain en boucle ouverte de

l'amplificateur. Si le gain est d'environ 200 000, la linéarité se situe entre  $-75 \mu\text{V}$  et  $+75 \mu\text{V}$  de tension d'entrée  $V_e$ .

Ainsi, lorsque nous appliquons un échelon de tension supérieur à  $+75 \mu\text{V}$  sur l'entrée « plus » (fig. 14), la tension de sortie passe directement à  $+13$  V ( $U - 2$  V). De même, si la tension  $V_e$  passe de 0 à  $-100 \mu\text{V}$ , la tension de sortie passe de 0 à  $-13$  V.

Le raisonnement est le même, au signe près, pour l'entrée inverseuse. Pour une variation de  $+100 \mu\text{V}$  à l'entrée, il en résulte un passage de 0 à  $-13$  V en sortie.

La figure 15 nous donne le schéma d'un comparateur de tension, utilisé ici pour le contrôle de décharge d'une batterie de 12 V. La ten-

sion  $V_e$ , fluctuante suivant la tension de la batterie, est comparée à la tension fixe aux bornes d'une diode Zener. La tension de sortie dé-

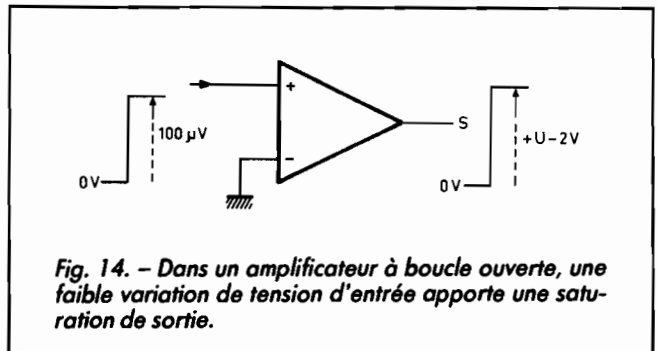


Fig. 14. - Dans un amplificateur à boucle ouverte, une faible variation de tension d'entrée apporte une saturation de sortie.

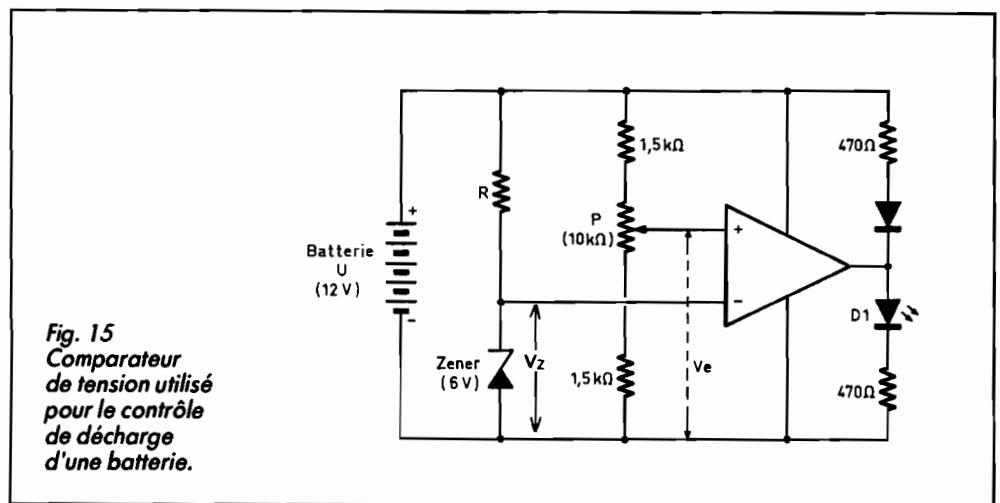


Fig. 15 Comparateur de tension utilisé pour le contrôle de décharge d'une batterie.

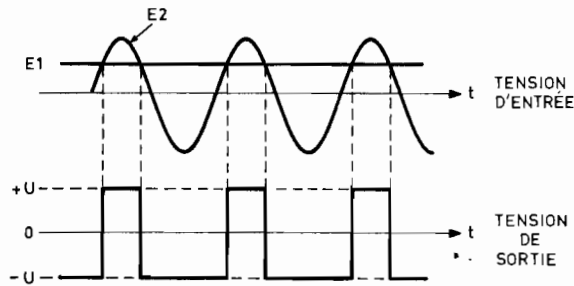


Fig. 16  
Signaux du comparateur de tension.

pend de la valeur relative des deux tensions à l'entrée. Lorsque la tension  $V_e$  est supérieure à  $V_z$ , la tension de sortie est proche de + 12 V. Dans le cas où  $V_e$  est inférieure, la

tension de sortie est proche de zéro volt. Deux diodes électroluminescentes, une verte ( $D_1$ ) et une rouge ( $D_2$ ), nous informent sur le niveau de sortie.

Toujours avec un comparateur de tension, il nous est facile de générer des signaux carrés à partir d'une tension sinusoïdale provenant d'un générateur BF (fig. 16).

### VITESSE DE VARIATION DE LA TENSION DE SORTIE

Cette vitesse, appelée plus communément « slew-rate », s'exprime en volts par microseconde. Elle indique quelle est la variation maximale possible de la tension de sortie pendant un temps de  $1 \mu s$ . Elle a son importance quand on manipule des signaux carrés à des fréquences élevées. Sa valeur varie entre 0,5 et  $1,5 V/\mu s$ , bien qu'à l'heure actuelle il soit possible de monter jusqu'aux alentours de  $100 V/\mu s$ .

J.-B. P.

# RÉSERVEZ VOTRE ALBUM 1986 D'ÉLECTRONIQUE APPLICATIONS

RÉUNISSANT LES SIX NUMÉROS DE L'ANNÉE ÉCOULÉE  
(NUMÉROS 45 à 50)

Prix : **126 F** (port compris)

Envoyez votre commande accompagnée d'un chèque à l'ordre de *ÉLECTRONIQUE APPLICATIONS* à :  
**ÉLECTRONIQUE APPLICATIONS, Vente au Numéro, 2 à 12, rue de BELLEVUE, 75940 PARIS CEDEX 19**