

LES AMPLIFICATEURS OPERATIONNELS

L'AMPLIFICATEUR opérationnel est un montage capable de performances très intéressantes. Intégré, il est devenu un composant très pratique que l'on retrouve dans de très nombreux schémas.

Certains électroniciens hésitent encore à l'utiliser, faute de bien le connaître.

Nous nous proposons aujourd'hui d'aider le lecteur à surmonter ces difficultés et de réaliser un amplificateur.

Nous allons voir :

- que les amplificateurs opérationnels nécessitent une alimentation double (une tension positive et une tension négative par rapport à la masse),
- qu'ils possèdent deux entrées,
- que leur amplification peut dépasser 100 000 fois,
- mais que son gain peut être ajusté avec précision grâce à l'emploi de 2 résistances dont le rapport donne la valeur exacte du gain.

L'amplificateur opérationnel intégré fait partie des circuits intégrés linéaires (ou analogique), l'autre famille étant les circuits logiques ou digitaux (portes, bascules...).

Les amplificateurs opérationnels permettent de réaliser de très nombreux montages : amplificateurs, comparateurs, oscillateurs, filtres actifs... Ils furent utilisés dans les premiers ordinateurs pour effectuer des opérations arithmétiques d'où l'origine de son nom.

Nous nous bornerons aujourd'hui à quelques applications que le lecteur sera capable de calculer et de réaliser par la suite.

Vers un amplificateur idéal

Imaginons un amplificateur parfait, ou presque, dont le gain ne serait pas seulement très élevé, mais dont la valeur serait également 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° . Ce circuit 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 élevé.

Retour sur l'amplificateur de base

Réfléchissons un peu sur le circuit amplificateur de base, c'est-à-dire sur le simple transistor monté en émetteur commun (fig. 1).

Le pont de polarisation n'a pas été représenté afin de rendre plus claire l'explication. Par contre, nous y voyons apparaître la valeur des différents éléments, comme les résistances dans les circuits d'émetteur et de

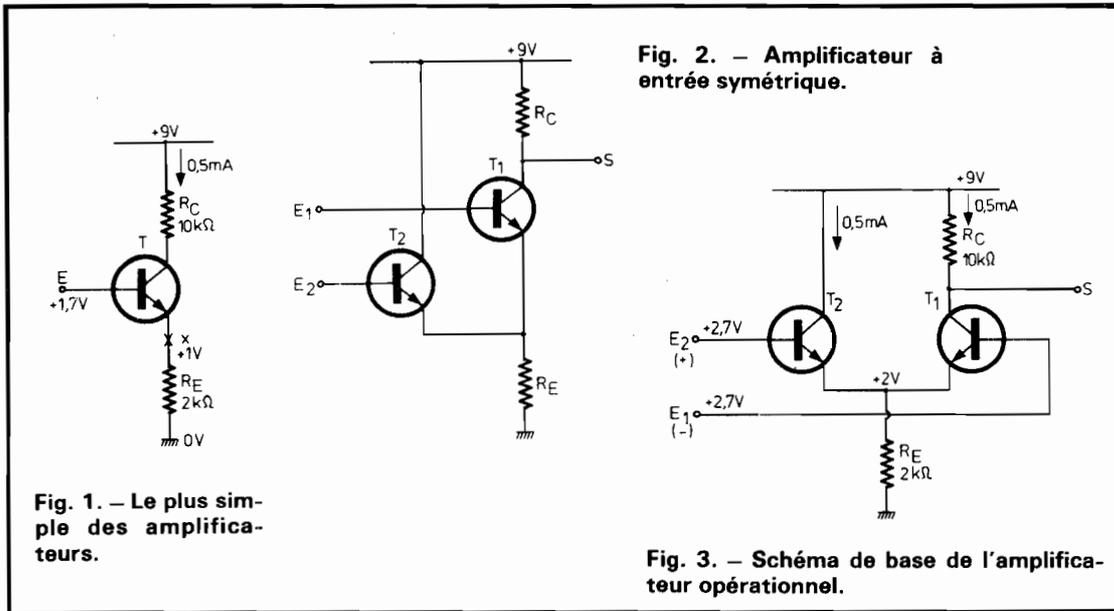
base. Le courant collecteur étant de 0,5 mA, les valeurs respectives sur le collecteur et l'émetteur sont + 4 V et + 1 V. Le transistor est du type silicium, la tension sur la base est donc + 1,7 V par rapport à la masse.

Tel qu'il est représenté, cet amplificateur a un gain de tension égal au rapport R_C sur R_E , soit 5. Et en ce qui concerne la phase, le signal appliqué à l'entrée (sur la base) se retrouve amplifié et déphasé de 180° à la sortie, c'est-à-dire entre collecteur et masse.

La phase joue un rôle très important dans les amplificateurs. On dit qu'il y a un déphasage de 180° , ou de $\pi/2$, ou encore une opposition de phase entre l'entrée et la sortie, lorsqu'une augmentation instantanée à l'entrée se traduit par une diminution instantanée à la sortie.

Faisons varier la tension à l'entrée, et voyons ce qui en résulte à la sortie.

Pour prendre une valeur numérique, si la tension de la base passe de + 1,7 à 2 V, soit une élévation de



+ 0,3 V, il s'en suit une augmentation de I_c , augmentant la chute de tension aux bornes de R_C , et diminuant ainsi la tension de sortie d'une valeur qui est précisément + 0,3 V multiplié par le gain de 5. La tension sur le collecteur passe de + 4 V à + 3,5 V. Nous avons bien un déphasage de 180°, puisqu'une variation de + 0,3 V à l'entrée entraîne - 1,5 V de variation en sortie. Si au contraire la tension à l'entrée chute de - 0,3 V, la jonction base-émetteur sera un peu plus bloquée, d'où une diminution de I_c , entraînant en sortie une augmentation de + 1,5 V de la tension sur le collecteur.

Suppression du déphasage

Toujours avec ce même transistor, si maintenant nous ne voulons aucun déphasage, il faut le faire fonctionner en base commune. Autrement dit, la variation de tension devrait être appliquée à l'émetteur (point X du schéma). On retrouverait sur le collecteur, toujours la même tension amplifiée que précédemment, mais ce serait sans déphasage.

La résistance R_E étant un peu faible, et dans le but de présenter la même impédance sur les deux entrées, il serait conseillé d'ajouter un

transistor monté en collecteur commun (T_2 sur la figure 2).

Ce montage de ces deux transistors est plus souvent représenté d'une façon différente comme sur la figure 3. La résistance R_E est commune, elle est maintenant traversée par le courant collecteur des deux transistors, soit 1 mA en tout. La tension sur les émetteurs passe donc de 1 à 2 V, et la tension de polarisation sur les deux bases devra être relevée.

Nous sommes en présence d'une entrée symétrique.

Le signal que nous appliquons à l'entrée E_2 (+) se retrouve, sans amplification ni déphasage, aux bornes de R_E , puisque T_2 est monté en « collecteur commun ». Cette

tension est ensuite appliquée à T_1 , monté en base commune, sa base étant bien à un **potentiel fixe** de + 2,7 V. Le signal se retrouve en sortie (point S). Il n'est toujours pas déphasé, mais il subit l'amplification de tension due à T_1 (gain de 5).

Si le signal est appliqué sur l'autre entrée E_1 (-), le cheminement du signal est plus direct, il se retrouve amplifié et déphasé à la sortie, comme nous l'avons vu auparavant.

Amplificateur différentiel

Afin de réaliser deux montages absolument identiques, on rajoute une résistance dans le collecteur de T_2 ,

comme représenté sur la figure 4. Nous venons de réaliser un circuit appelé « amplificateur différentiel », sur lequel nous ne nous attarderons pas longtemps. Voyons quand même son utilité.

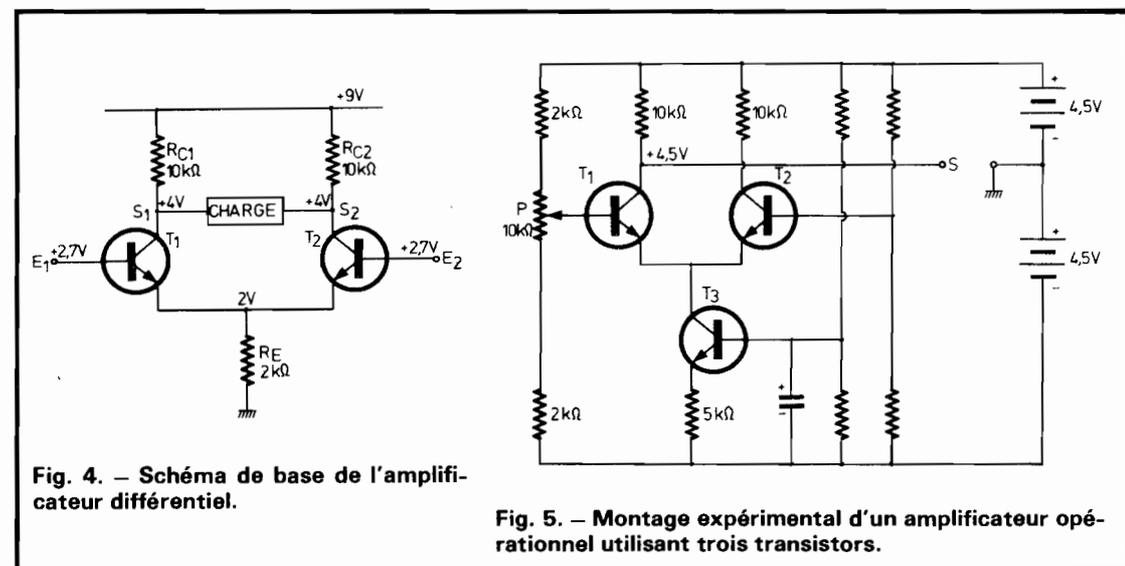
Cet amplificateur possède une sortie symétrique : la charge du montage est placée entre les sorties S_1 et S_2 .

Si les 2 entrées ont même phase et même amplitude, il n'y a aucune amplification, car si nous avons + 20 mV sur E_1 , cette tension se retrouve amplifiée sur S_1 (soit + 20 mV \times 5 = + 100 mV). Cette même tension de + 20 mV appliquée sur E_2 occasionne également une augmentation de + 100 mV. Le résultat est qu'aucune variation de tension n'apparaît aux bornes de la charge.

Par contre, si E_2 est fixe, et que les + 20 mV sont appliqués seulement sur E_1 , une variation de + 100 mV se retrouve aux bornes de la charge.

Ceci est un énorme avantage de ce type d'amplificateur. Cette tension de + 20 mV, de même phase et de même amplitude, appliquée aux deux entrées pourrait être une tension parasite. Elle serait neutralisée en sortie.

Dé même une variation de température entraîne une variation de courant collecteur dans T_1 et T_2 . 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 les deux amplificateurs T_1 et T_2 soient bien identiques.

Avant de revenir à l'ampli opérationnel, appliquons aux entrées deux tensions pas forcément identiques.

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, multiplié par le gain de l'amplificateur, la tension en sortie est 50 mV.

Attention aux polarités du signal 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 : $E_1 - E_2 = (- 5) - (+ 10 \text{ mV}) = - 15 \text{ mV}$, et la variation aux bornes de la charge est - 45 mV.

Retour à l'amplificateur opérationnel

On remarque sur certains schémas d'amplificateurs opérationnels que la résistance R_E est remplacée par un transistor. Celui-ci est monté en générateur de courant constant afin que la somme de IC_1 et de IC_2 soit toujours la même. A une diminution de IC_1 , correspond une augmentation de IC_2 .

Un autre détail concerne la source d'alimentation. Le point masse du montage ne se trouve plus à - V, 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 on préfère, au potentiel de cette

nouvelle masse. La tension amplifiée à la sortie varie de part et d'autre du potentiel masse (fig. 5).

L'amplificateur opérationnel intégré

Le montage tel qu'il est représenté sur la figure 5 est encore bien loin d'être l'amplificateur idéal. Il faudrait encore ajouter pas mal de composants pour l'améliorer. Heureusement, grâce aux progrès de la micro-électronique, il nous est maintenant possible d'acheter des amplis OP intégrés, dont le boîtier est de la taille d'un TO-39.

Les particularités communes aux amplificateurs opérationnels actuels sont leur utilisation d'une alimentation

double, leur entrée symétrique et leur gain de tension très élevé, de l'ordre de 100 000 fois.

Beaucoup de modèles possèdent en plus certains avantages, ils sont protégés contre les courts-circuits qui pourraient survenir en sortie. Un circuit de sécurité interne les protège contre les oscillations parasites.

La figure 6 représente le schéma interne d'un amplificateur opérationnel intégré du type 741. L'entrée différentielle se trouve aux points 2 et 3, la sortie en 6. Le circuit est alimenté entre les points 4 et 7.

Sa représentation symbolique sur un schéma peut être tout simplement un triangle avec deux entrées et une sortie (fig. 6-A). Parfois la représentation est plus compliquée (B). Nous en aurons plus loin l'explication.

TYPES	VALEURS LIMITES			RÉSISTANCE		GAIN BOUCLE OUVERTE	FRÉQUENCE MAX	COMPENSATION EN FRÉQUENCE	SLEW RATE	BOÎTIERS (vue de dessus)	REMARQUES
	TENSION ALIMENTATION (et courant à vide)	COURANT SORTIE	PUISSANCE SORTIE	ENTRÉE	SORTIE						
709 μA 709 TAA 521 TAA 522	$\pm 18V$ (2,6mA)	10mA	80mW	400k Ω	150 Ω	45000	5MHz	pas de compensation	0,3V/ μs		
741 μA 741 SN 52741 MC 1741 TL 1741 TBA 221	$\pm 18V$ (2,8mA)	25mA	80mW	2M Ω	75 Ω	200000	2MHz	interne	0,5V/ μs		FAIBLE BRUIT
748 μA 748 MC 1748 TBB0748	$\pm 22V$ (2mA)	18mA	50mW	2M Ω	75 Ω	150000		interne	0,5V/ μs		PROTECTION CONTRE LES COURTS-CIRCUITS
761 TAA 761	$\pm 18V$ (1,8mA)	70mA	150mW	200k Ω	R_S	90000		22pF entre 5 et 6	9V/ μs		RÉSISTANCE EXTERNE A BRANCHER ENTRE 5 et +U ($\leq 10k\Omega$)
861 TAA 861A TAA 865A	$\pm 10V$ (1mA)	70mA	70mW	200k Ω	R_S	90000		22pF entre 7 et 8	3V/ μs		RÉSISTANCE EXTERNE A BRANCHER ENTRE 7 et +U ($\leq 10k\Omega$)

TABLEAU I

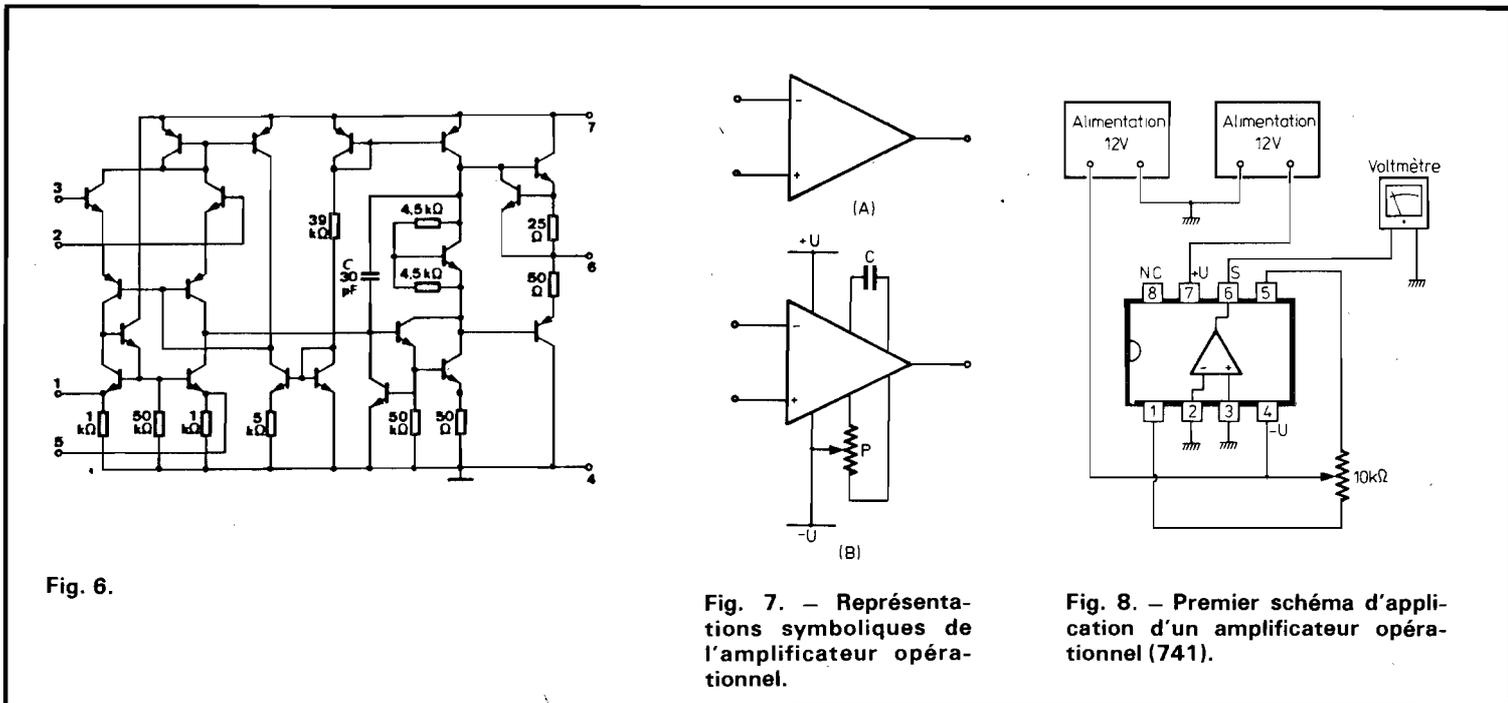


Fig. 6.

Fig. 7. — Représentations symboliques de l'amplificateur opérationnel.

Fig. 8. — Premier schéma d'application d'un amplificateur opérationnel (741).

Les types les plus courants

Les caractéristiques de quelques amplificateurs opérationnels choisis parmi les plus courants sont données sur le tableau I.

Sur la première ligne, ce sont celles du 709 dont l'appellation change avec le constructeur : μA 709 (Fairchild), MCI 709 A (Motorola), TL 1709 (Telefunken)...

Le 709 est l'ancêtre des amplis opérationnels intégrés. Lorsque dans les années 60, il fut introduit par la firme américaine Fairchild, son prix le rendait inabordable. Par la suite, tout comme les autres circuits intégrés, son prix n'a cessé de baisser. Il ne coûtait guère plus cher qu'un transistor, ce qui a fait dire que si l'industrie automobile avait suivi la même « désescalade », une Rolls-Royce coûterait maintenant le prix d'une bicyclette.

Pratique des amplificateurs opérationnels

Pour notre exemple d'application, nous avons choisi le

type 741, avec boîtier DIL 8 broches.

Deux particularités importantes, générales à tous ces amplificateurs, doivent d'abord être expliquées : celle de son alimentation, et celle de l'attaque de ses deux entrées.

La tension maximale est ordinairement de ± 18 V. Pour les montages courants, un bon choix est ± 12 V, bien que parfois, pour l'amplification de signaux faibles, une tension bien plus petite est employée (± 3 V). Une alimentation ± 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 (fig. 8).

La sortie de l'ampli se trouve entre la broche 6 et la masse. Le signal d'entrée sera injecté sur une des entrées, l'autre étant reliée à un potentiel pouvant être éventuellement la masse.

Le circuit étant alimenté, il nous faut maintenant régler le potentiomètre de 10 k Ω . Celui-ci sert à obtenir une excellente symétrie des deux chaînes d'amplification constituant l'amplificateur opérationnel. Pour ce réglage, les deux entrées sont reliées à la masse. Un voltmètre électronique branché entre la sortie

(broche 6) et la masse doit indiquer 0 V, sinon le réglage du potentiomètre doit être retouché.

Puisque nous parlons de compensation, disons un mot de celle de la fréquence. Elle peut être réalisée intérieurement, comme pour le 741, soit par un branchement externe, comme pour les 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).

Autre remarque importante : pour certains amplis OP, une résistance de sortie doit être câblée entre la broche « sortie » et le pôle positif de l'alimentation. Cette résistance doit être inférieure ou égale à 10 k Ω .

Gain de l'ampli opérationnel

Le circuit étant réglé correctement, nous pouvons l'utiliser. Notre premier essai sera de le faire amplifier. Si

nous jetons un coup d'œil sur les caractéristiques, nous voyons que le gain « boucle ouverte » est très élevé, le plus souvent de l'ordre de 100 000 fois. En ayant l'intention d'amplifier le signal donné par un micro, dont la valeur est de 5 mV, aurions-nous en sortie une tension de 500 V ? En pratique un circuit de contre-réaction est utilisé 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 partie 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'ampli. La figure 9 nous montre la réalisation d'un tel circuit. Le pont de résistances R_1 et R_2 applique bien à l'entrée une fraction de la tension de sortie. Les connexions d'alimentation n'ont pas été 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

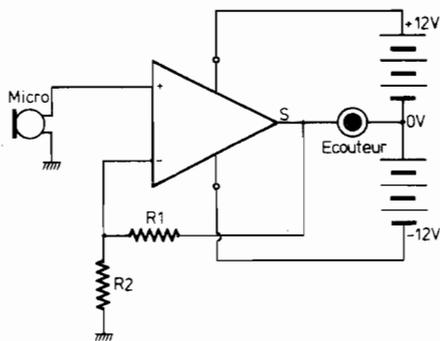


Fig. 9. — Les deux résistances R_1 et R_2 définissent le gain du montage.

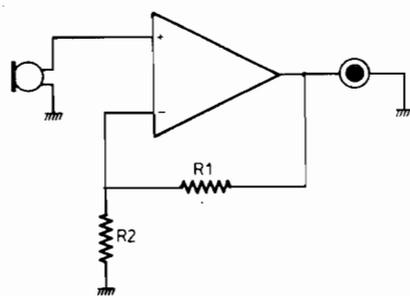


Fig. 10. — Représentation usuelle de l'amplificateur. Seules les entrées et la sortie sont représentées.

gain est donné par le rapport :

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

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 :

$$\frac{500 \text{ k}\Omega}{5 \text{ k}\Omega} + 1, \text{ soit } 101 \text{ fois}$$

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. En pratique, R_1 ne doit pas avoir une valeur trop élevée, il faut éviter de dépasser $1 \text{ M}\Omega$. Celle de R_2 ne

sera pas inférieure à $1 \text{ k}\Omega$. Une bonne valeur pour R_2 est $10 \text{ k}\Omega$.

Ainsi, il suffit de deux résistances et un circuit intégré pour réaliser un amplificateur. On évitera toutefois la tentation 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 mettre en cascade deux amplis OP avec un gain de 20 chacun (fig. 11).

Si on désire un gain réglable, rien n'empêche de jouer sur la contre-réaction. La résistance R_2 peut être mise en série avec une résistance réglable (potentiomètre de $10 \text{ k}\Omega$, par exemple, avec $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$). On peut aussi appliquer le schéma représenté sur la figure 12.

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 $\pm 12 \text{ V}$, cette tension de sortie ne doit pas dépasser $\pm 10,8 \text{ V}$, soit une valeur crête-à-crête de $21,6 \text{ V}$. Divisée par le gain du montage, nous obtenons la tension crête-à-crête à ne pas dépasser à l'entrée. Pour un gain de 100 000, cela se chiffre en microvolts crête-à-crête, soit 7 mV efficaces à ne pas dépasser sous peine d'avoir des distorsions graves (écrtages).

Les trois montages les plus usuels

Ces montages sont représentés sur le tableau II. Le premier est le plus classique. Il n'apporte pas de déphasage, puisque le signal à amplifier est injecté sur l'entrée +. Le second montage introduit un déphasage de 180° . L'entrée - reçoit d'une part la contre-réaction et d'autre part le signal d'en-

<p>AMPLIFICATEUR (Déphasage nul)</p>	<p>GAIN DE TENSION</p> $\frac{R_1 + R_2}{R_2}$ <p>ou</p> $\frac{R_1}{R_2} + 1$
<p>AMPLIFICATEUR (Déphasage 180°)</p>	<p>GAIN DE TENSION</p> $\frac{R_1 + R_2 + R_1}{R_2}$ <p>(Si $R_1 \ll R_2$, GAIN $\cong \frac{R_1}{R_2}$)</p>
<p>COMPARATEUR DE TENSION</p>	<p>Si $E_2 > E_1$, $S = +U$ Si $E_2 < E_1$, $S = -U$</p>

TABLEAU II

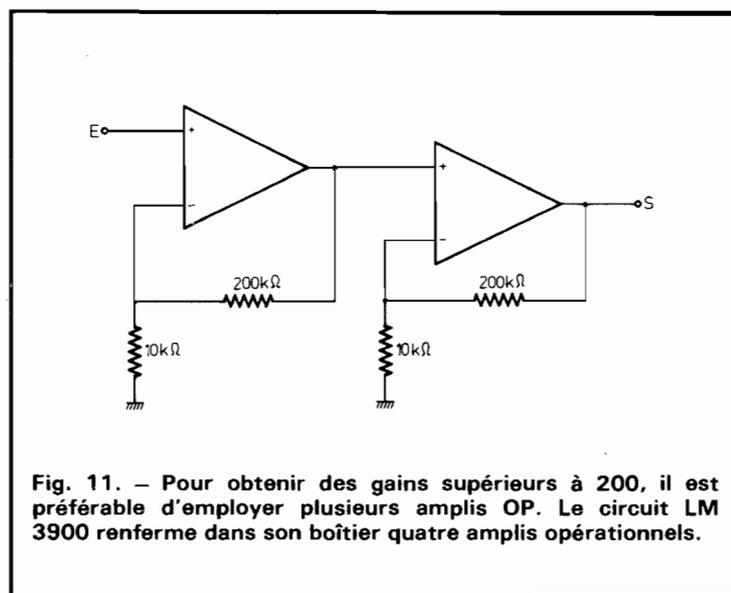


Fig. 11. — Pour obtenir des gains supérieurs à 200, il est préférable d'employer plusieurs amplis OP. Le circuit LM 3900 renferme dans son boîtier quatre amplis opérationnels.

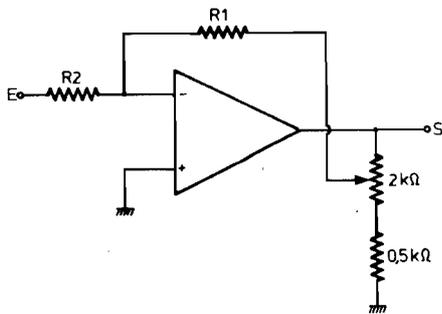


Fig. 12. — Amplificateur avec gain réglable.

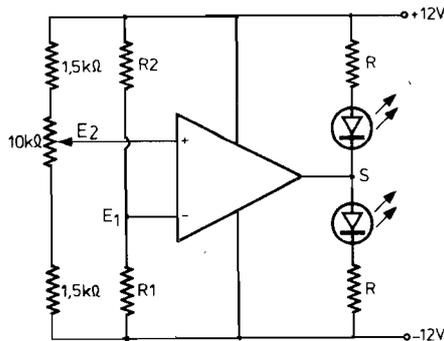


Fig. 13. — Comparateurs de tension. La résistance R (470 Ω) limite le courant dans les LED.

trée. La formule du gain tient compte de l'impédance interne du générateur de la tension à amplifier.

Si ce générateur est la cellule piézo d'un lecteur de disque, dont l'impédance est de l'ordre de 50 kΩ, mieux vaut utiliser le premier montage. Mais si nous voulons, par exemple, amplifier 100 fois le signal donné par un microdynamique dont l'impédance est de 300 Ω, rien n'empêche l'emploi de ce montage. Et si nous avons sous la main une résistance de 500 kΩ pour R₁, la valeur de R₂ sera donnée, en principe, par la formule : gain de tension

$$\approx \frac{R_1}{R_2}$$

soit :

$$R_2 = \frac{500}{100} \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

A cette valeur théorique de R₂, on doit soustraire 300 Ω. La valeur réelle de R₂ est alors 4,7 kΩ.

Comparateur de tension

Le troisième montage du tableau II est un comparateur de tension. Les deux tensions à comparer sont appliquées à l'entrée. L'une d'elle est fixe, c'est la tension de comparaison (par exemple, l'entrée n° 1), l'autre est variable, c'est la tension à comparer. La tension à la sortie dépend de la valeur relative des deux tensions à l'entrée. Prenons un cas concret : le montage est alimenté par ± 12 V. Si la tension sur l'entrée n° 2

est supérieure au niveau de comparaison (entrée n° 1), la tension de sortie est égale à + 12 V. Si la tension sur l'entrée n° 2 n'atteint pas ce niveau, la tension de sortie est de - 12 V. La tension de sortie peut être contrôlée par deux diodes électroluminescentes, une LED rouge lorsque le signal à l'entrée dépasse le niveau de comparaison, une LED verte dans le cas contraire (fig. 13). La précision du niveau de comparaison pourrait être améliorée par l'emploi d'une diode Zener.

Toujours avec un comparateur de tension, il nous est facile de fabriquer des signaux carrés à partir d'une tension sinusoïdale provenant d'un générateur BF (fig. 14).

Un autre terme rencontré fréquemment est la tension ou le courant d'offset, dont la cause est le manque de symétrie des deux voies de l'amplificateur. On connaît l'effet néfaste d'une différence même infinie, quelques dixièmes de milliampère, à l'entrée. Traversant une résistance d'1 MΩ, la tension aux bornes, une fraction de volt, multipliée par le gain de l'amplificateur, produira une variation inacceptable en sortie. C'est pour cette raison que les constructeurs prévoient, pour certains amplificateurs opérationnels, un réglage extérieur par potentiomètre (fig. 7-B et 8).

J.B.P.

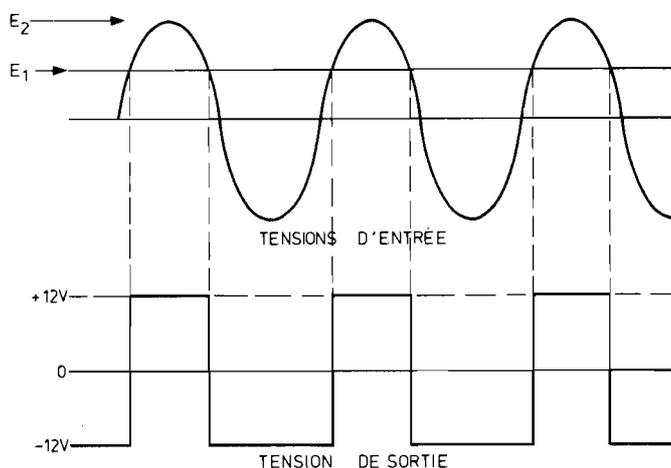


Fig. 14. — Signaux carrés obtenus à la sortie d'un comparateur de tension.

Le « Slew-Rate »

On a l'habitude d'appeler ainsi la vitesse de montée d'un signal traversant un ampli opérationnel. Cette vitesse s'exprime en volt par microseconde. Elle indique quelle est la variation maximale possible d'une tension pendant un temps de 1 μs. Elle a son importance quand on manipule des signaux carrés à des fréquences élevées. Sa valeur varie entre 0,5 et 1,5 V/μs, bien qu'à l'heure actuelle, il est possible de monter jusqu'aux alentours de 40 V/μs.