

# L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL (on5hq)

Les amplificateurs opérationnels ont été créés à l'origine pour réaliser des opérations d'additions, de soustractions, d'intégrations ... dans les calculatrices analogiques. En réalité on les utilise actuellement dans de nombreuses applications comme les amplificateurs à courant alternatif et à courant continu, les appareils de mesure, les oscillateurs .... et trouvent de nombreuses applications dans le monde radioamateur.

## CIRCUITS ET CARACTÉRISTIQUES DE BASE

La plupart des amplificateurs opérationnels sont des amplificateurs de différence qui comportent deux bornes d'entrée et une borne de sortie (fig. 1). L'appareil fonctionne avec deux alimentations qui possèdent une masse commune (fig. 2), ainsi la tension de sortie peut-elle évoluer entre des valeurs positives ou négatives par rapport à la masse. L'amplificateur opérationnel de type courant possède aux fréquences basses un gain d'environ 100 000. Il a une impédance d'entrée d'environ 1 MΩ et une impédance de sortie de quelques centaines d'ohms.

L'une des bornes d'entrée du système est affectée du signe moins car elle donne une tension de sortie en opposition de phase avec la tension d'entrée. L'autre borne est affectée du signe plus car elle donne une tension de sortie en phase avec la tension d'entrée. Si les signaux identiques sont appliqués simultanément aux deux entrées, la tension de sortie sera nulle pour un amplificateur idéal car les deux signaux s'équilibrent mutuellement. Pour des signaux d'entrée quelconques la tension de sortie est proportionnelle à la différence entre les deux signaux, à savoir :

$$e_o = A_o (e_1 - e_2)$$

$A_o$  = gain en boucle ouverte de l'amplificateur opérationnel (soit  $A_o = 100000$ )

$e_1$  = tension appliquée à la borne plus

$e_2$  = tension appliquée à la borne moins

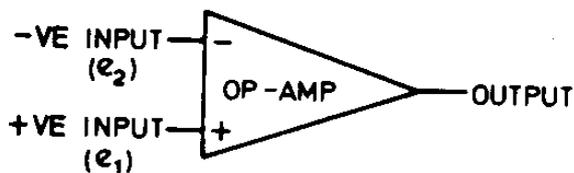


Fig. 1

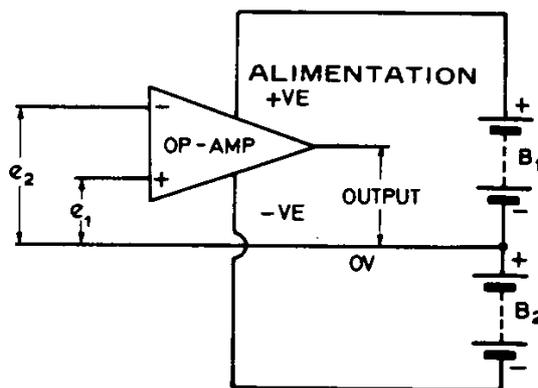


Fig.2

La figure 3 montre une application très simple de l'amplificateur opérationnel. Ce circuit qui fonctionne comme un comparateur de différence utilise une tension fixe  $e_2$  (ou tension de référence) que l'on applique à l'entrée négative et une tension de commande  $e_1$  (ou tension échantillonnée) que l'on applique à l'entrée positive. Quand la tension de commande dépasse la tension de référence de quelques dixièmes de volts, la tension de sortie atteint la saturation dans le sens positif tandis que si la tension de commande est inférieure de quelques dixièmes de volts, la tension de sortie atteint la saturation dans le sens négatif.

La figure 4 représente la caractéristique de transfert du circuit précédent.

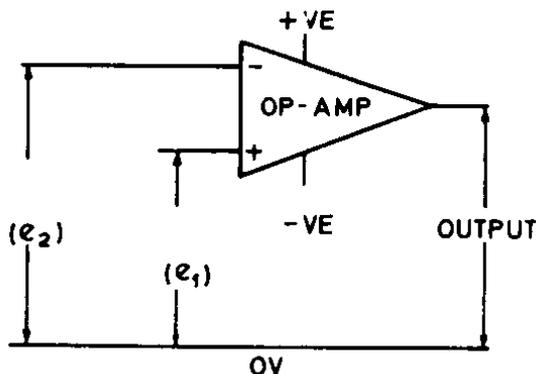


Fig.3

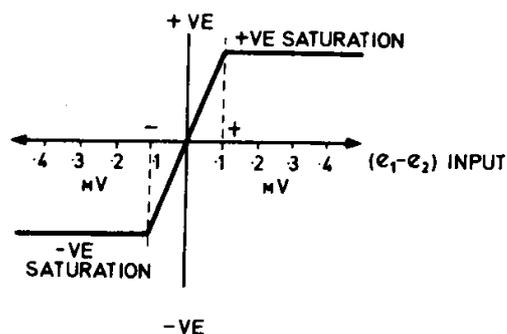


Fig.4

Il est intéressant de noter que le signal de sortie est surtout fonction de l'écart entre les deux signaux d'entrée et qu'il ne dépend pratiquement pas des valeurs absolues des signaux d'entrée. Ainsi, avec une tension de référence de 1 V, si une tension de différence égale à 200  $\mu\text{V}$  est nécessaire pour faire passer la sortie d'un niveau sortie négatif à un niveau sortie positif, l'appareil se comporte-t-il comme un interrupteur qui fonctionne pour une variation de 0,02 % du signal échantillonné de 1 V. Dans ces conditions, ce circuit fonctionne comme un comparateur de tension de grande précision. L'amplificateur opérationnel peut fonctionner comme amplificateur inverseur de bas niveau à courant continu en reliant à la masse la borne positive et en reliant le signal d'entrée à la borne négative (fig. 5).

L'amplificateur opérationnel est alors utilisé en boucle ouverte (c'est-à-dire sans contre réaction) avec un gain de tension d'environ 100 000 et une impédance d'entrée d'environ 1 M $\Omega$ . L'inconvénient de ce montage vient de ce que ses paramètres dépendent de l'amplificateur opérationnel et que dans les différents étages ils subissent d'importantes variations.

Une façon beaucoup plus intéressante d'utiliser l'amplificateur opérationnel consiste à le faire fonctionner en chaîne fermée c'est-à-dire avec une contre-réaction négative (fig. 6).

Dans ces conditions le gain du montage est :  $A = R_2 / R_1$  et ne dépend que du rapport des résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Le gain est indépendant des caractéristiques internes de l'amplificateur opérationnel dans la mesure où le gain en boucle ouverte ( $A_0$ ) est grand par rapport au gain en boucle fermée ( $A$ ). L'impédance d'entrée du circuit est égale à  $R_1$  ce qui le rend également indépendant des caractéristiques de l'amplificateur opérationnel.

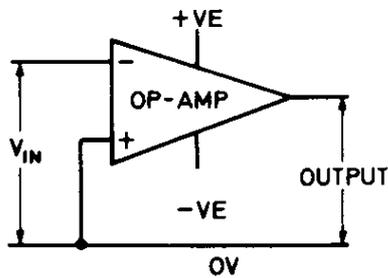


Fig.5

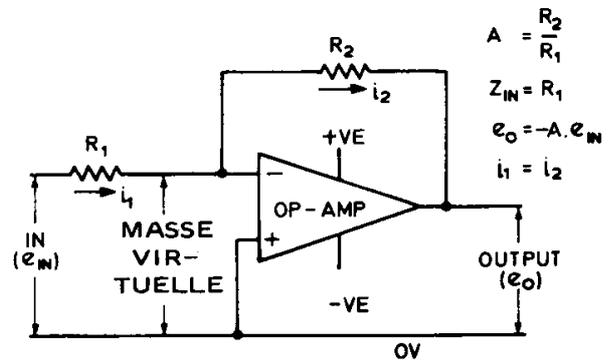


Fig.6

Il est intéressant de noter que si  $R_1$  et  $R_2$  conditionnent le gain du montage global, ils n'ont aucune action sur les paramètres de l'amplificateur opérationnel, ainsi le quotient entre les tensions de sortie et d'entrée est-il toujours égal au gain en chaîne ouverte de l'amplificateur opérationnel. De même la borne négative continue à présenter une très grande impédance d'entrée et le courant débité par le générateur d'attaque qui est relié à cette borne est négligeable. Aussi tout le courant qui traverse  $R_1$  traverse aussi  $R_2$  ce qui permet d'écrire:  $i_1 = i_2$ .

Si  $v_1$  désigne la tension aux bornes d'entrée de l'amplificateur (fig. 6), on a:

$$i_2 = \frac{v_1 - e_0}{R_2} = \frac{v_1(1 + A_0)}{R_2}, \text{ puisque } e_0 = A_0 \cdot v_1$$

d'où :

$$\frac{v_1}{i_2} = \frac{R_2}{1 + A_0} \cong 0, \text{ puisque : } A_0 \approx 100\,000$$

On dit que cet amplificateur possède entre ses deux bornes d'entrée une **masse virtuelle**. Le mot «virtuel» est utilisé pour bien montrer que si la tension d'entrée est nulle ( $v_1 = 0$ ), le court circuit n'est cependant traversé par aucun courant.

On a : 
$$I_1 = (e_{in} - 0) / R_1 = i_2 = (0 - e_0) / R_2$$

D'où : 
$$A = \frac{e_0}{e_{in}} = - \frac{R_2}{R_1}$$

De même avec l'amplificateur à courant continu sans inversion de phase (fig.7) le gain en tension est :  $(R_1 + R_2) / R_1$  et l'impédance d'entrée est sensiblement égale à  $(A_0 / A) Z_{in0}$ , si  $Z_{in0}$  désigne l'impédance d'entrée à chaîne ouverte de l'amplificateur opérationnel. L'avantage de ce circuit vient de ce qu'il a une très grande

impédance d'entrée.

L'amplificateur opérationnel peut fonctionner comme un suiveur de tension de précision en le branchant comme un amplificateur non inverseur de gain unité (fig. 8).

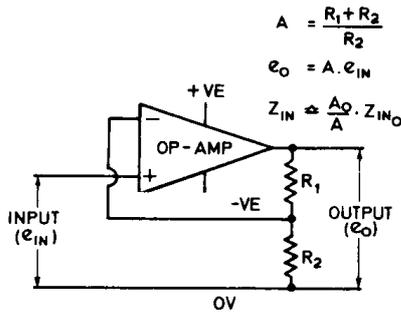


Fig.7

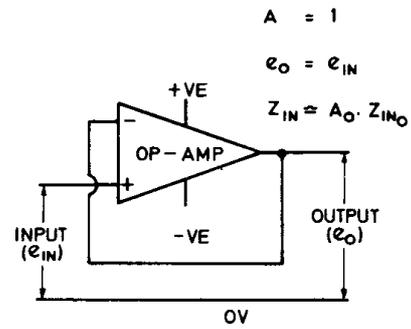


Fig.8

Dans ce cas, les tensions d'entrée et de sortie sont identiques mais l'impédance d'entrée est très grande et sensiblement égale à  $A_0 \cdot Z_{in0}$ .

Les circuits de base des amplificateurs (fig. 3 à 8) sont à courant continu mais on peut facilement les adapter au courant alternatif. Les amplificateurs opérationnels ont beaucoup d'autres applications que celles de simples amplificateurs :

Ils peuvent facilement remplir des fonctions comme déphaseur, sommateur ou soustracteur, filtre actif ou amplificateur sélectif, redresseur à simple ou à double alternance, oscillateur ou multivibrateur. .. Beaucoup de ces principales applications seront décrites dans les prochains chapitres de cet ouvrage.

## PARAMETRES DE L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

Un amplificateur opérationnel idéal devrait avoir une impédance d'entrée infinie, une impédance de sortie nulle, un gain infini, une bande passante infinie, une reproductibilité parfaite du signal d'entrée à la sortie. Les amplificateurs pratiques ne sont pas parfaits les paramètres de performances sont indiqués sur les fiches signalétiques de l'appareil. Les plus importants sont les suivants :

**Gain de tension  $A_0$  en chaîne ouverte** - Cette valeur qui exprime le gain de tension entre les bornes d'entrée et de sortie est exprimée le plus souvent en décibels. Les valeurs courantes du gain sont de 100000, soit: 100 dB.

**Impédance d'entrée  $Z_{in}$**  - C'est l'impédance vue des deux bornes d'entrée. Sa valeur courante est de 1 M $\Omega$ .

**Impédance de sortie  $Z_o$**  - Sa valeur est de quelques centaines d'ohms. Courant de polarisation  $I_b$  - La plupart des amplificateurs opérationnels utilisent des étages d'entrée à transistors bipolaires qui utilisent des courants de polarisation très faibles. La grandeur de ces courants n'est qu'une fraction de microampère.

**Tension d'alimentation  $V_s$**  - Les amplificateurs opérationnels utilisent deux alimentations distinctes dont les tensions sont comprises entre des limites maximale et minimale. Si ces tensions sont trop élevées, l'amplificateur peut être mis hors d'usage et si elles sont trop basses il ne fonctionne pas correctement. Des limites courantes sont de  $\pm 3$  V à  $\pm 15$  V.

**Tension d'entrée maximale  $V_i(max)$**  - La tension d'entrée appliquée à l'amplificateur opérationnel ne doit pas dépasser les tensions d'alimentation sinon l'amplificateur risque d'être mis hors d'usage. Cette tension  $V_i(max)$  est en général inférieure à la tension d'alimentation de 1 à 2 V.

**Tension de sortie maximale  $V_o(max)$**  - Si l'amplificateur est surchargé, il est alors à l'état saturé. Dans ces conditions sa tension de sortie est limitée par la tension d'alimentation, sa valeur  $V_o(max)$  étant inférieure à celle-ci de 1 à 2 V.

**Tension résiduelle d'entrée (tension d'offset  $V_{io}$ )** - Dans l'amplificateur idéal le signal d'entrée est parfaitement reproduit à la sortie et la tension de sortie est nulle quand les deux entrées sont à la masse.

Dans la pratique les amplificateurs opérationnels ne sont pas parfaits. Il en résulte de légers déséquilibres internes qui sont équivalents à l'application d'une tension résiduelle (ou tension d'offset) aux bornes d'entrée. Cette tension qui est très faible (quelques millivolts) est cependant suffisante en raison du gain élevé pour saturer l'amplificateur. C'est pourquoi la plupart des amplificateurs opérationnels disposent d'une alimentation extérieure qui permet de neutraliser cette tension d'offset.

**Taux de rejection en mode commun C.M.R.R. (1)** - L'amplificateur opérationnel idéal produit une tension de sortie qui est proportionnelle à la différence entre les signaux appliqués aux deux bornes d'entrée qui sont identiques, c'est-à-dire en mode commun. Dans la pratique les signaux en mode commun ne s'équilibrent pas parfaitement et ils produisent un petit signal à la sortie. L'aptitude que possède un amplificateur opérationnel pour rejeter les signaux de mode commun s'exprime par le taux de rejet en mode commun. Celui-ci s'exprime par le rapport du gain de l'amplificateur opérationnel avec des signaux de mode différentiel au gain de ce même amplificateur avec des

signaux de mode commun. Les valeurs courantes de ce taux sont de 90 dB.

**Fréquence de transition  $f_T$**  - Un amplificateur opérationnel a un gain de tension d'environ 100 dB aux basses

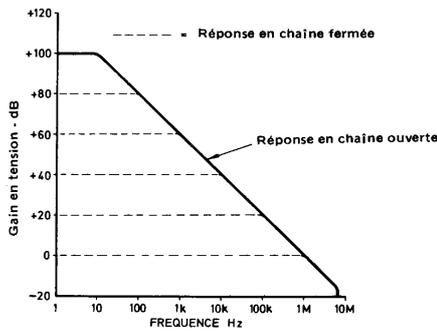


Fig. 9

fréquences et pour des questions de stabilité, sa réponse en fréquence à chaîne ouverte doit présenter un gain qui diminue quand la fréquence augmente et qui a pour valeur l'unité à la fréquence de transition  $f_T$ . Généralement la diminution du gain avec la fréquence est de 6 dB par octave (ou 20 dB par décade). La figure 9. représente la réponse usuelle d'un amplificateur opérationnel pour une fréquence  $f_T$  de 1 MHz et pour un gain de 100 dB à basse fréquence.

Notons que si l'amplificateur opérationnel fonctionne à chaîne fermée, sa bande passante dépend du gain en chaîne fermée. Pour un gain de 60 dB sa bande passante n'est que de 1 kHz tandis que pour un gain de 20 dB celle-ci sera de 100 kHz. La fréquence  $f_T$  est une figure de mérite qui représente le produit gain-bande passante.

Fig. 9

**Vitesse de montée  $S$**  - De même qu'ils sont soumis aux limitations de bande passante, les amplificateurs opérationnels subissent un phénomène que l'on appelle: limitation du temps de montée. Celui ci a pour effet de limiter la variation maximale de la tension de sortie pendant un temps donné. Ce temps de montée est indiqué en volts par microsecondes, sa valeur courante est comprise entre 1 V/ $\mu$ s et 10 V/ $\mu$ s. Une conséquence de cette limitation du temps de montée est d'accorder une plus grande bande passante aux signaux faibles qu'aux signaux forts. Une autre conséquence est de transformer une onde sinusoïdale d'entrée en une onde triangulaire de sortie si l'amplificateur opérationnel fonctionne au-delà de son taux normal de vitesse de montée.

## ALIMENTATION DES AMPLIFICATEURS OPÉRATIONNELS

Les amplificateurs opérationnels utilisent deux alimentations distinctes. L'une d'elles doit être positive par rapport à la référence commune des entrées tandis que l'autre doit être négative. Dans la plupart des applications, ces alimentations sont réalisées à partir de deux sources indépendantes reliées à un point commun (fig. 2). Le plus souvent ces alimentations sont équilibrées, ces deux tensions étant égales mais de polarités opposées. Il faut toutefois signaler que l'utilisation d'alimentations équilibrées n'est pas impérative et que l'on peut utiliser des alimentations dissymétriques si l'on ne recherche pas à la sortie le signal symétrique maximal de crête à crête.

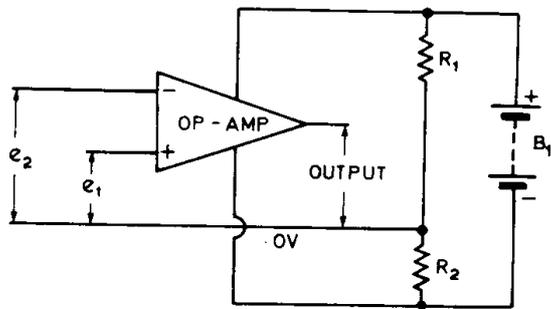


Fig. 10

Il n'est pas nécessaire d'utiliser deux alimentations indépendantes pour obtenir les deux sources nécessaires car celles-ci peuvent être réalisées à partir d'une alimentation unique (fig. 10). En effet, grâce au pont  $R_1 - R_2$  on réalise à la jonction de  $R_1$  et  $R_2$  un point commun avec une borne positive à l'extrémité supérieure de  $R_1$ . Dans les applications à courant continu, il faut que les valeurs de  $R_1$  et  $R_2$  soient telles que le courant de repos qui les traverse soit beaucoup plus élevé que le courant de sortie car ces résistances sont en série avec la sortie de l'amplificateur opérationnel.

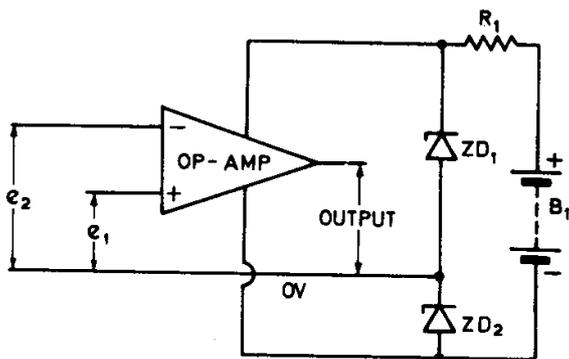


Fig. 11

Si l'amplificateur opérationnel doit délivrer un courant de sortie de pic élevé, les conditions précédentes peuvent nécessiter des courants de repos trop élevés dans  $R_1$  et  $R_2$ . Un moyen de remédier à cet inconvénient consiste à remplacer  $R_1$  et  $R_2$  par des diodes zener (fig. 11). Celles-ci présentent de faibles impédances dynamiques en série avec l'amplificateur opérationnel. Ainsi leurs courants de repos peuvent-ils n'être que légèrement supérieurs au courant maximal de sortie et est-il possible de les régler par l'intermédiaire de  $R_1$ . Les deux montages avec une seule alimentation que nous venons d'étudier intéressent des amplificateurs de puissance à courant continu. Ils nécessitent des courants de repos relativement élevés (les signaux utiles comme les grandeurs de repos, qui sont en continu, traversent les résistances du montage. Avec des amplificateurs à courant

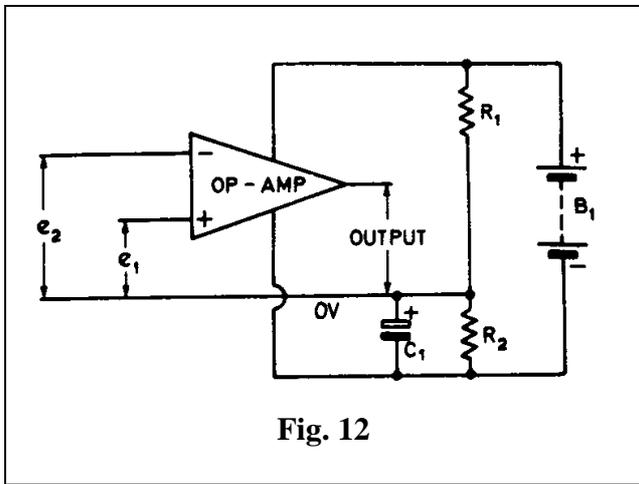


Fig. 12

alternatif, les courants de repos peuvent être beaucoup moins élevés. C'est ainsi qu'il est alors possible de shunter la résistance  $R_2$  par une capacité  $C_1$  de très grande valeur (fig. 12). Dans ces conditions, on dispose d'une très faible impédance en courant alternatif d'une part entre le point commun et la borne négative (faible impédance  $C_1$ ) d'autre part entre le point commun et la borne positive (faible impédance d'alimentation  $B_1$  en série avec  $C_1$ ) ainsi le fonctionnement de l'amplificateur en courant alternatif n'est-il pas influencé par les valeurs des courants de repos qui traversent  $R_1$  et  $R_2$ . En réalité la seule condition concernant  $R_1$  et  $R_2$  est que leurs courants de repos soient élevés par rapport au courant de polarisation d'entrée ( $I_b$ ) et dans la plupart des cas ceux-ci ne dépassent pas quelques microampères.

## AMPLIFICATEURS OPERATIONNELS PRATIQUES:

### LE 741

Dans l'industrie on rencontre des types variés d'amplificateurs opérationnels. Certains d'entre eux sont étudiés avec les bonnes réponses aux fréquences élevées, d'autres ont soit de très grandes impédances d'entrée ou soit un comportement thermique exceptionnel, d'autres enfin sont étudiés pour les usages les plus courants. Un "best seller" dans ce domaine est sans conteste le 741, qui bien que ancien de conception peut toujours être utilisé problèmes dans la majorité des cas .

L'amplificateur 741 qui appartient à la 3<sup>e</sup> génération et très courant, est ce qu'on peut appeler un "best seller" qui, malgré "son âge", répond à la majorité de nos besoins. Il est protégé contre le verrouillage à l'entrée et contre les courts-circuits à la sortie ; il est compensé en fréquence ce qui évite l'instabilité en régime linéaire. La réponse en fréquence est identique à celle de la figure 1.5, la fréquence de transition étant de 1 MHz. L'appareil peut être équipé d'un potentiomètre de 10 kΩ alimenté par la borne négative afin d'appliquer une tension d'offset extérieure (fig. 13).

#### Caractéristiques du 741

$A_o$	Gain de tension en boucle ouverte	100 dB
$Z_{in}$	Impédance d'entrée	1 MΩ
$Z_o$	Impédance de sortie	150 Ω
$I_b$	Courant de polarisation d'entrée	200 nA
$V_{s(max)}$	Tension d'alimentation maximale	± 18 V
$V_{i(max)}$	Tension d'entrée maximale	± 13 V
$V_{o(max)}$	Tension de sortie maximale	± 14 V
$V_{io}$	Tension d'offset à l'entrée	2 mV
c.m.r.r.	Rapport de rejection de mode commun	90 dB
$F_T$	Fréquence de transition	1 MHz

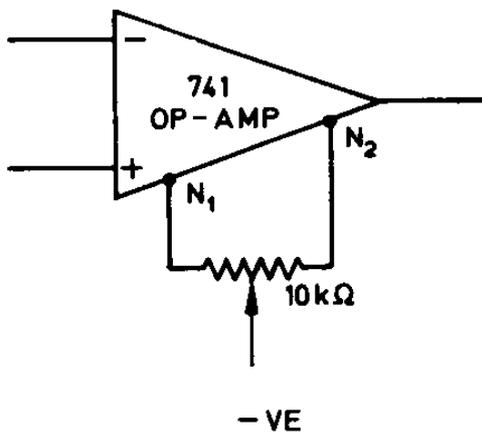


Fig. 13

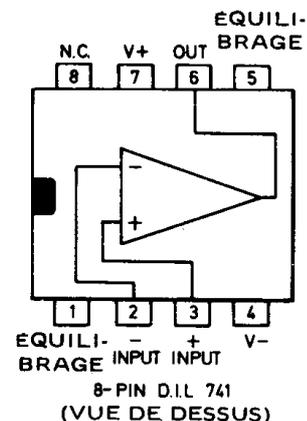
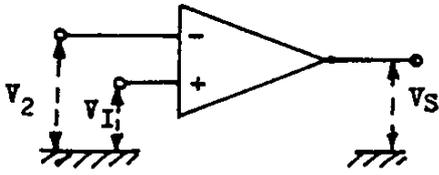


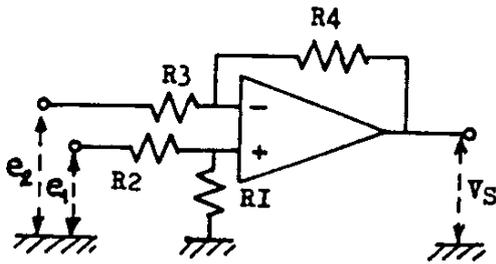
Fig.14

# Aide mémoire d'utilisation de l'amplificateur opérationnel



Gain en tension  $G = \frac{V_s}{V_1 - V_2}$   
 (entre  $10^3$  et  $10^6$ )

Impédance d'entrée  $Z = \frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2}$   
 ( $> 100k\Omega$ )

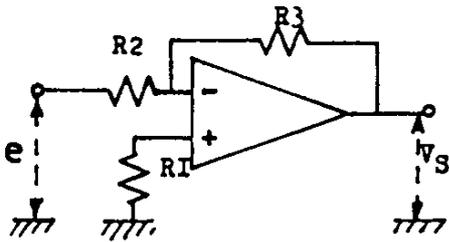


## AMPLIFICATEUR DIFFERENTIEL

Gain composite  $G' = \frac{V_s}{e_1 - e_2}$

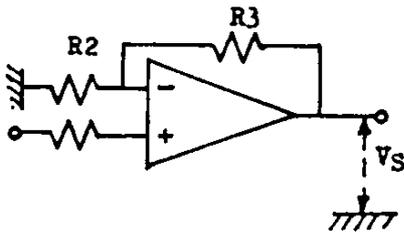
Cas particulier:

si  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \rightarrow G = \frac{R_4}{R_3}$



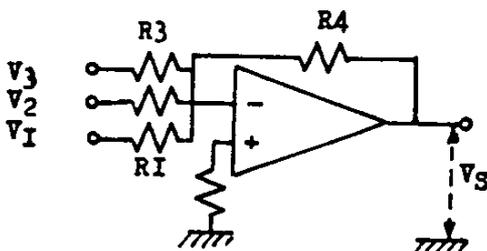
## AMPLIFICATEUR INVERSEUR

$G = -\frac{V_s}{e}$        $G = -\frac{R_3}{R_2}$



## AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR

$G = \frac{R_2 + R_3}{R_2}$



## AMPLIFICATEUR ADDITIONNEUR

$V_s = -R_4 \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$

$-V_s = V_1 + V_2 + V_3$