

AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL
LIMITATIONS NON LINEAIRES DES MONTAGES LINEAIRES
Etude Théorique

Caractéristiques des amplificateurs opérationnels

| | μA 741 | TL 081 |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Amplification à vide μ_0 | $> 2 \cdot 10^4$ | $2 \cdot 10^5$ |
| Résistance de sortie | $< 75 \Omega$ | environ 50Ω |
| Tension décalage d'entrée | $< 6 \text{ mV}$ | $< 9 \text{ mV}$ |
| Courants décalage d'entrée | 10 nA | $< 30 \text{ pA}$ |
| Produit gain-(bande passante) | environ 1 MHz | 3 MHz |
| slew rate | $> 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ | $13 \text{ V}/\mu\text{s}$ |

L'étude des limitations est faite sur le montage amplificateur non inverseur. **Attention, elles peuvent apparaître avec tout montage autre que l'amplificateur non inverseur.**

1 Saturation en tension:

Les tensions de saturation d'un A.O. ne sont pas symétriques et sont légèrement inférieures en valeur absolue à la tension d'alimentation. Ainsi, si la tension d'alimentation est $\pm 15 \text{ V}$, on peut observer :

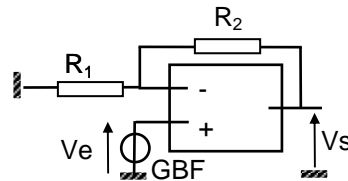
Pour la saturation basse : $-15 \text{ V} < -V'_{sat} \leq -13.5 \text{ V}$

Pour la saturation haute : $13.5 \text{ V} \leq V_{sat} < 15 \text{ V}$

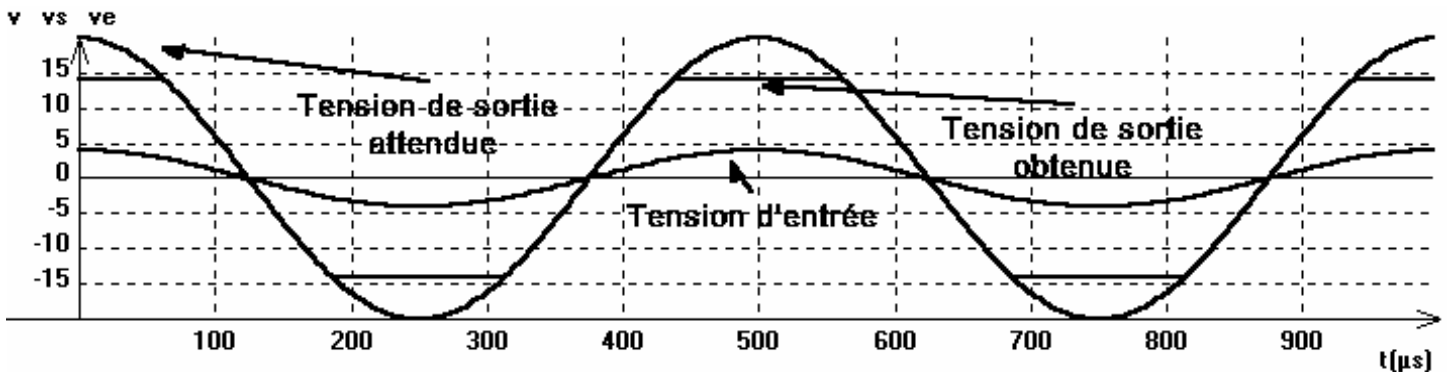
On s'intéresse au montage non inverseur ci-contre. En régime linéaire, la tension de sortie est

$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e, \quad \text{c'est-à-dire tant que}$$

$$-V'_{sat} \leq V_s \leq V_{sat}$$



Si pour certains instants, l'inégalité précédente n'est pas respectée, le signal est écrêté. dans le cas où la tension d'entrée est sinusoïdale, on observe alors une **sinusoïde écrêtée** comme sur la figure ci-dessous.



2 Fonctionnement non linéaire :

Pour effectuer l'étude de la stabilité du montage suivant le bouclage, il faut tenir compte de la réponse de l'A.O. réel. On rappelle dans ce cas que dans la zone de fonctionnement linéaire :

$$\underline{V}_s = \underline{\mu}(j\omega)(\underline{V}^+ - \underline{V}^-) \text{ avec } \underline{\mu}(j\omega) = \frac{\mu_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}}. \text{ L'amplification à vide } \mu_0 \text{ étant de l'ordre de } 10^5.$$

Dans le cas du montage non inverseur précédent, on a : $V^+ = V_e$ et $V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s = \beta V_s$, ce qui conduit à :

$$(1 + \beta\mu_0)V_s + j\frac{\omega}{\omega_c}V_s = \mu_0V_e$$

soit en passant à l'équation différentielle :

$$(1 + \beta\mu_0)V_s + \frac{1}{\omega_c} \frac{dV_s}{dt} = \mu_0V_e$$

Tous les coefficients de l'équation homogène sont positifs donc le montage est stable et peut fonctionner en régime linéaire.

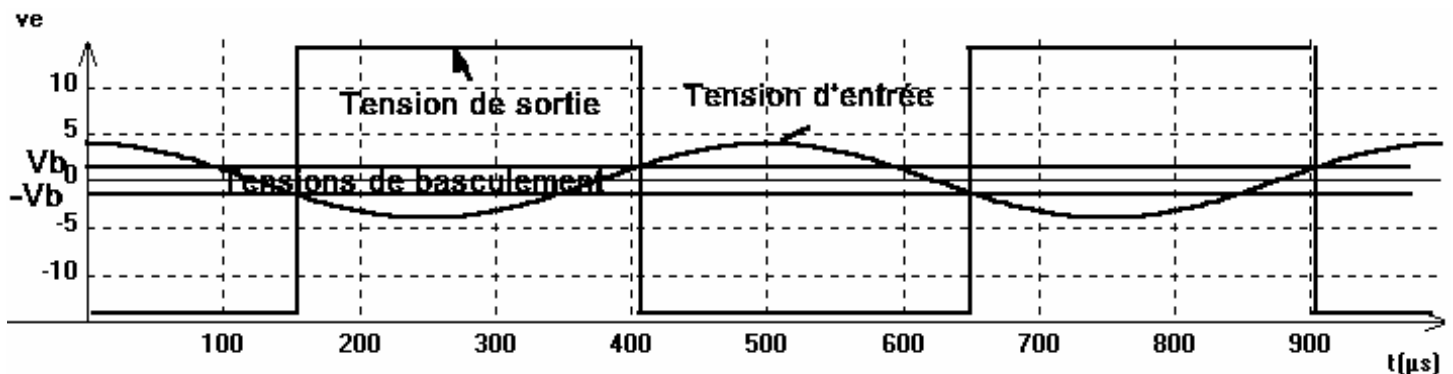
En revanche, si on inverse les bornes, alors $V^- = V_e$ et $V^+ = \beta V_s$, ce qui conduit cette fois à :

$$(1 - \beta\mu_0)V_s + j\frac{\omega}{\omega_c}V_s = -\mu_0V_e$$

soit en passant à l'équation différentielle :

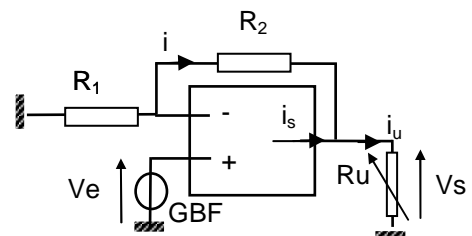
$$(1 - \beta\mu_0)V_s + \frac{1}{\omega_c} \frac{dV_s}{dt} = -\mu_0V_e$$

Sachant que pour des montages courants $\beta > 10^{-5}$ (par exemple pour $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ et $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$, $\beta = 1/11$), le terme $1 - \beta\mu_0$ est négatif : **le montage n'est pas stable et ne peut donc pas fonctionner en régime linéaire.** On observe en sortie un signal créneau (ce n'est pas un sinus à crête comme précédemment).



3 Saturation en courant:

On s'intéresse maintenant au courant de sortie maximal que peut délivrer un A.O. Pour le visualiser, on branche une résistance d'utilisation R_u variable.



Si on applique une loi des nœuds à la sortie, on obtient la relation : $i_u = i + i_s$. De plus :

$$V_s = R_u i_u = -(R_1 + R_2) i$$

Si l'on prend les valeurs suivantes pour les résistances : $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ et $R_u \leq 1 \text{ k}\Omega$ alors

d'après la relation précédente : $i = \frac{R_u}{R_1 + R_2} i_u \leq 0.09 i_u$ et on peut négliger i devant i_u . On peut donc

écrire : $i_s \approx i_u$ et $V_s = R_u i_s$. Tant que l'A.O. fonctionne en régime linéaire, on a donc :

$$i_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{V_e}{R_u}$$

Si l'on maintient V_e constant, la relation précédente montre que si l'on diminue R_u alors i_s augmente. A la limite si R_u est nulle i_s deviendrait ∞ et le composant serait détruit, s'il n'y avait de limitation. En effet **par construction, le courant de sortie i_s est limité à une valeur maximale $i_{s,max}$ de l'ordre de 20 mA.**

Lorsque la valeur absolue de i_s tend à dépasser $i_{s,max}$, le montage sature : **ce n'est pas une saturation en tension comme au § 1.1 mais une saturation en courant. Le courant $i_{s,max}$ est appelé courant de saturation.**

Lorsqu'il y a saturation en courant, la tension V_s est égale à une constante : $V_s = R_u i_{s,max}$. Sa mesure et la connaissance de R_u permettent de mesurer $i_{s,max}$.

Dans le cas où la tension d'entrée est sinusoïdale et qu'il y a saturation en courant, la tension V_s est une sinusoïde écrêtée mais la saturation n'est pas égale à V_{sat} ou $-V'_{sat}$.

4 Vitesse de balayage limite (slew rate):

Il s'agit de la pente maximale de tension que peut reproduire l'amplificateur en sortie $s = \left(\frac{dV_s}{dt} \right)_{max}$.

Si la tension de sortie doit varier trop rapidement, l'A.O. ne peut pas suivre et il répond le plus rapidement qu'il peut. Par exemple, pour un signal sinusoïdal:

$V_s = a \cos \omega t$, soit $\frac{dV_s}{dt} = -a\omega \sin \omega t$. La pente maximale de la tension de sortie lorsque l'A.O.

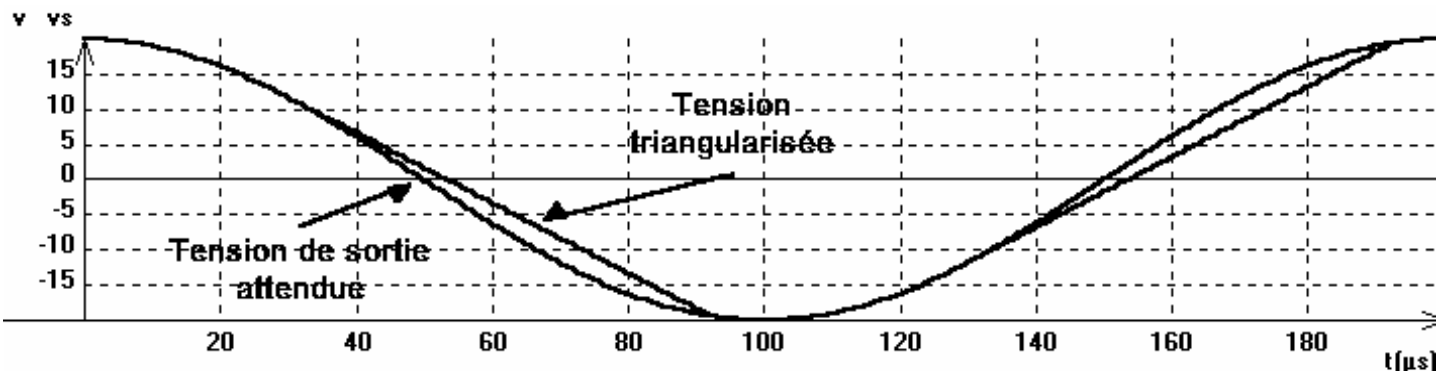
fonctionne en régime linéaire est $a\omega$. Deux cas peuvent alors se poser :

$a\omega \leq s$ et l'A.O. peut « suivre ».

$a\omega > s$ et sur certains intervalles de temps, l'A.O. ne peut pas suivre.

Dans ce dernier cas, l'A.O. répond avec une pente $\pm s$, c'est-à-dire que sur ces intervalles de temps V_s est remplacée par une droite de pente $\pm s$.

On obtient alors le signal représenté sur la figure ci-dessous. **On dit qu'il y a triangularisation du signal.**



Ce n'est pas seulement la fréquence qui importe mais aussi l'amplitude, comme le montre le raisonnement précédent.
Dans le cas d'un signal créneau, la variation est très rapide et on observe en fait en sortie un signal en trapèze.