

Chapitre 6

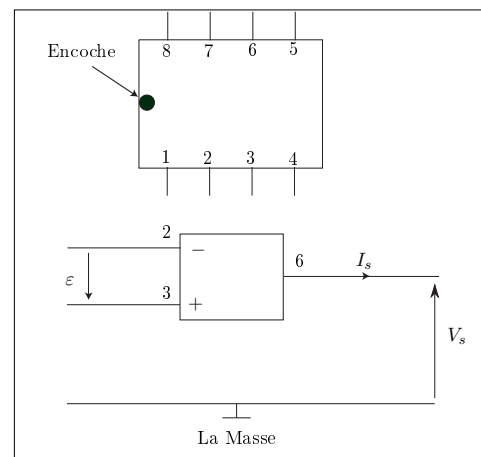
Amplificateur opérationnel-1 (AO)

6.1 Présentation de l'A.O

L' Amplificateur Opérationnel (A.O) est circuit intégré (ensemble de transistors, diodes, résistances, condensateurs placés sur d'un cristal de silicium) de 8 broches destinées à le relier au reste du circuit extérieur.

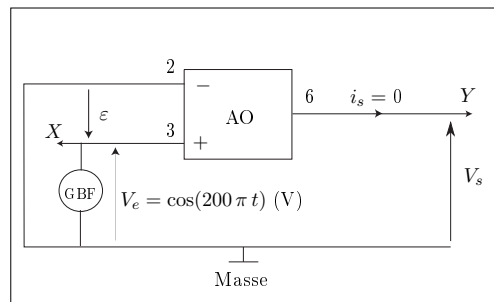
- 2 : entrée inverseuse (-) ;
- 3 : entrée non inverseuse (+) ;
- 4 : alimentation négative V_- (ici $V_- = -15\text{ V}$) ;
- 7 : alimentation positive V_+ (ici $V_+ = +15\text{ V}$) ;
- 6 : sortie ;
- 1 et 5 : réglage du décalage en tension (offset) ;
- 8 : n'est pas relié au circuit (non connecté).

En général, le circuit de polarisation de l'A.O. n'est pas représenté dans les schémas des montages. L'utilité de cette alimentation est de fournir de l'énergie à l'A.O. pour qu'il puisse amplifier la tension ε .

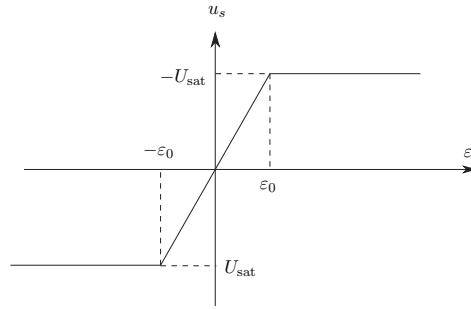


6.2 Caractéristique statique de transfert en sortie ouverte ($i_s = 0$)

Pour étudier la réponse de la tension de sortie u_s en fonction de la tension différentielle d'entrée ε , on peut, par exemple, utiliser le montage de la figure suivante en fixant la tension de l'entrée inverseuse à 0 et en connectant un générateur sinusoïdal à l'entrée non inverseuse.



En mode XY de l'oscilloscope par exemple, on obtient les résultats suivants :



On constate que l'A.O. a deux régimes de fonctionnement :

- Régime **saturé** :

- $u_s = U_{\text{sat}}$ pour $\varepsilon > \varepsilon_0$;
- $u_s = -U_{\text{sat}}$ pour $\varepsilon < -\varepsilon_0$;

Dans ces cas, la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel est constante et indépendante de la valeur de la tension différentielle d'entrée ε .

La tension de saturation est notée U_{sat} et sa valeur est habituellement comprise entre 12,5 et 14,5 V pour une alimentation de l'amplificateur opérationnel de -15 V/ +15 V. En pratique, la tension de saturation négative n'est pas forcément égale en valeur absolue à la tension de saturation positive. La valeur de cette tension dépend de l'alimentation du composant.

- Régime **linéaire** :

$$u_s = \mu_0 \varepsilon \quad \text{si} \quad -\varepsilon_0 < \varepsilon < \varepsilon_0$$

où μ_0 est le coefficient d'amplification différentielle en régime continu avec $\varepsilon_0 \sim mV$ et $\mu_0 \sim 10^4$ à 10^6 .

On en déduit que la zone de passage de $-U_{\text{sat}}$ à $+U_{\text{sat}}$ est très étroite. Il sera donc en pratique délicat de se placer dans cet intervalle de valeurs pour la tension ε .

Pour fonctionner en régime linéaire, il doit y avoir une liaison (boucle de réaction) entre la sortie (6) et l'entrée inverseuse (2) appelée réaction négative (ou contre réaction).

6.2.1 Modèle de l'A.O idéal

Du fait des valeurs des grandeurs caractéristiques de l'AO, on peut utiliser une idéalisation de ce composant à fin de simplifier l'étude théorique.

Le modèle idéal de l'amplificateur opérationnel correspond à faire les hypothèses suivantes :

- *Courants d'entrée nul* :

$$i^+ = i^- = 0$$

cette hypothèse est justifié par le fait que leur ordre de grandeur qui est de l'ordre de 30 pA (TL081 par exemple).

- *Gain différentiel μ_0 infini* :

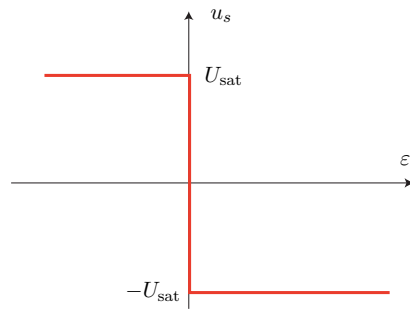
$$\mu_0 \rightarrow +\infty$$

ceci est justifié par le fait que μ_0 est assez élevé ($\sim 10^5$)

- *Résistance de sortie infinie* :

$$R_s = 0$$

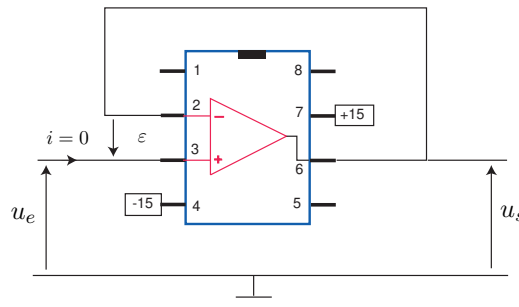
La caractéristique de l'AO idéal est alors :



En régime linéaire, la tension d'entrée de l'AO idéal est nulle : $\varepsilon = 0$.

6.3 Montages à AO

6.3.1 Montage suiveur



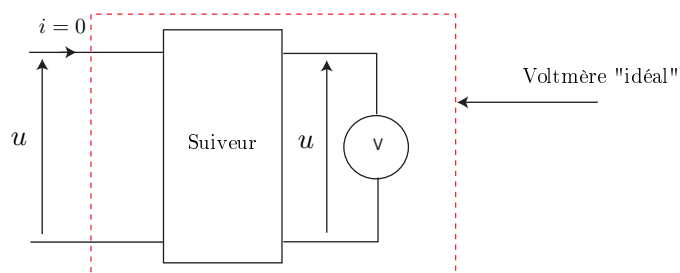
Il y a une boucle entre l'entrée inverseuse (-) est la sortie, donc l'AO fonctionne en régime linéaire $\rightarrow \varepsilon \approx 0$ ($\varepsilon \sim mV$ voir TP).

La loi des mailles donne :

$$u_s + \varepsilon - u_e = 0 \quad \rightarrow \quad u_s = u_e$$

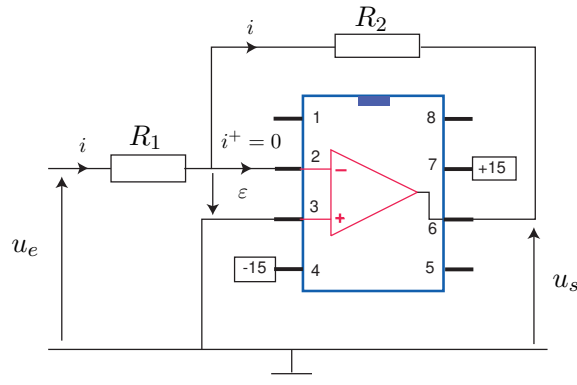
d'où le nom donné à ce montage : la tension de sortie est égale à la tension à vide du générateur placé à l'entrée du montage.

Puisque le courant d'entrée est très faible, ce montage peut être utilisé pour limiter l'influence entre deux étages (quadripôles) en série. Par exemple on peut transformer un voltmètre normale en un voltmètre de bonne qualité :



on a construit ainsi un voltmètre de grande résistance d'entrée (car $i = 0$), donc il n'influence pas le circuit lors de la mesure de la tension u .

6.3.2 Montage amplificateur



Il y a une boucle entre l'entrée inverseuse (-) est la sortie, donc l'AO fonctionne en régime linéaire $\rightarrow \varepsilon \approx 0$ ($\varepsilon \sim mV$ voir TP).

La loi des mailles donne :

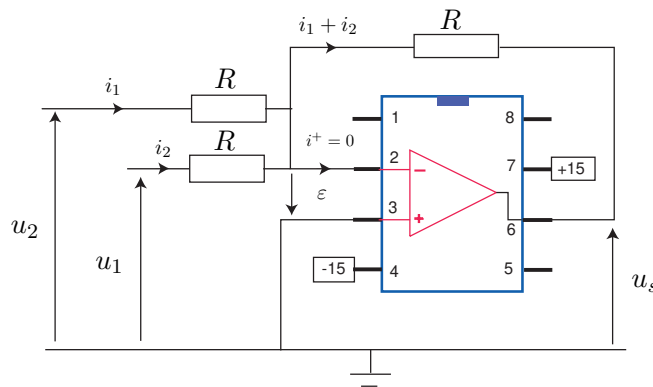
$$u_s + R_2 i + \varepsilon = 0 \quad \text{et} \quad u_e - R_1 i + \varepsilon = 0$$

soit :

$$u_s = -\frac{R_2}{R_1} u_e$$

c'est un amplificateur inverseur.

6.3.3 Montage sommateur



Il y a une boucle entre l'entrée inverseuse (-) est la sortie, donc l'AO fonctionne en régime linéaire $\rightarrow \varepsilon \approx 0$ ($\varepsilon \sim mV$ voir TP).

La loi des mailles donne :

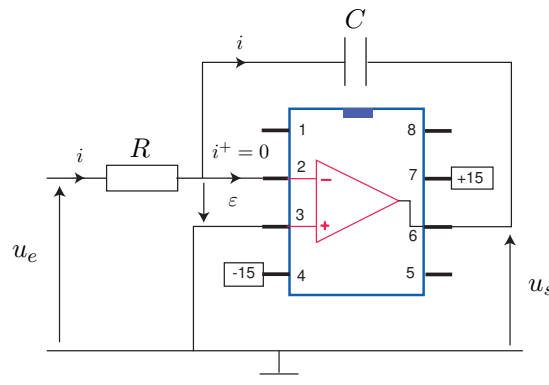
$$u_s + R(i_1 + i_2) + \varepsilon = 0 \quad \text{et} \quad u_1 - R i_1 + \varepsilon = 0 \quad \text{et} \quad u_2 - R i_2 + \varepsilon = 0$$

soit :

$$u_s = -(u_1 + u_2)$$

c'est un sommateur (avec inversion de signe).

6.3.4 Montage intégrateur



Il y a une boucle entre l'entrée inverseuse (-) est la sortie, donc l'AO fonctionne en régime linéaire $\rightarrow \varepsilon \approx 0$ ($\varepsilon \sim mV$ voir TP).

La loi des mailles donne :

$$u_s + u_c + \varepsilon = 0 \quad \text{et} \quad u_e - Ri + \varepsilon = 0$$

avec : $i = C \frac{du_c}{dt}$.

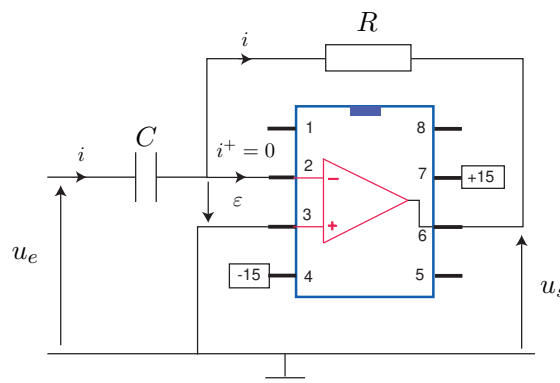
soit :

$$u_s = -\frac{1}{RC} \int u_e dt$$

c'est un intégrateur.

Remarque : En pratique, les défauts de l'AO réel le font saturer et par conséquent ce montage de principe ne fonctionne pas correctement. Pour remédier à cela on ajoute une résistance en parallèle avec le condensateur (voir TP).

6.3.5 Montage dérivateur



Il y a une boucle entre l'entrée inverseuse (-) est la sortie, donc l'AO fonctionne en régime linéaire $\rightarrow \varepsilon \approx 0$ ($\varepsilon \sim mV$ voir TP).

La loi des mailles donne :

$$u_s + Ri + \varepsilon = 0 \quad \text{et} \quad u_e - u_c + \varepsilon = 0$$

avec : $i = C \frac{du_c}{dt}$.

soit :

$$u_s = -\frac{1}{RC} \frac{du_e}{dt}$$

c'est un dérivateur.

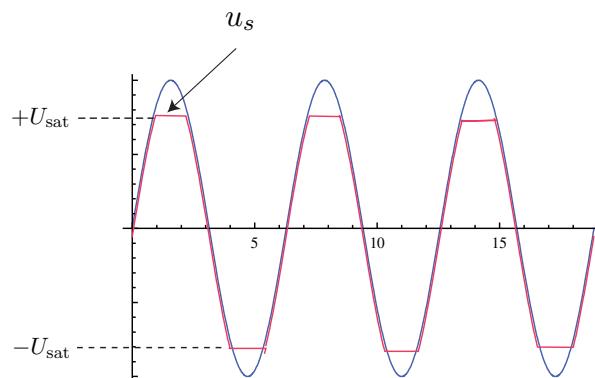
6.4 Limitations du fonctionnement linéaire de l'AO

Le modèle de l'amplificateur opérationnel idéal n'est qu'un modèle qui est satisfaisant dans une large mesure. Cependant, dans un certain nombre de cas, on observe des écarts entre les comportements réellement obtenus et ceux qui sont prédits dans le cadre du modèle idéal.

6.4.1 Limitation en tension de sortie

La valeur absolue de la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel ne peut dépasser une valeur appelée tension de saturation et notée U_{sat} .

$$|u_s| \leq U_{\text{sat}}$$



La solution pour pallier ce problème est de diminuer l'amplitude du signal d'entrée.

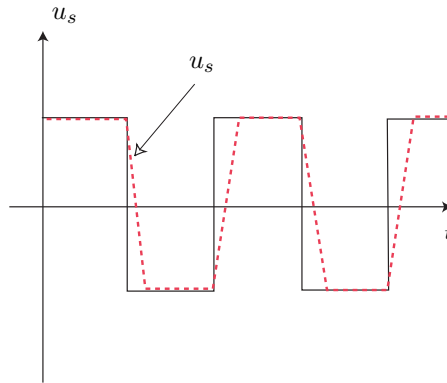
6.4.2 Limitation en courant de sortie

Un amplificateur opérationnel ne peut pas délivrer un courant de sortie dont l'intensité i_s dépasse une valeur limite $I_{s_{\text{max}}}$. Elle est généralement comprise entre 20 et 30 mA.

$$I_s \leq I_{s_{\text{max}}} \sim 20 \text{ mA}$$

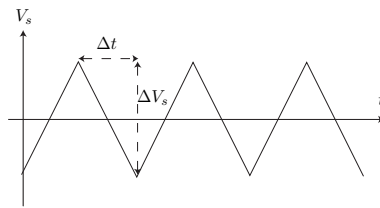
6.4.3 Vitesse de balayage ou "slew rate"

Expérimentalement, on constate qu'il existe une limitation de la vitesse de variation de la tension en sortie de l'amplificateur opérationnel. Elle correspond au fait que le temps de réponse de l'amplificateur opérationnel n'est pas négligeable et qu'il y aura un retard dans la réponse.



Ainsi pour un signal carré, le changement brutal de valeur pour la tension ne sera pas immédiat et cela entraîne un phénomène de triangularisation du carré. On parle de *slew rate* σ ou de vitesse de balayage limite en sortie.

$$\sigma = \left| \frac{du_s}{dt} \right|_{\max} = \left| \frac{\Delta V_s}{\Delta t} \right|$$



En régime sinusoïdal $u_s = U_m \cos(\omega t)$ on obtient une expression du slew rate : $\sigma = U_m \omega$.

La fréquence à laquelle cette limitation intervient dépend de l'amplitude U_m du signal : plus le signal aura une grande amplitude, plus la fréquence maximale d'utilisation (c'est-à-dire en dessous de laquelle aucune déformation du signal n'est visible) sera basse (voir TP).

