

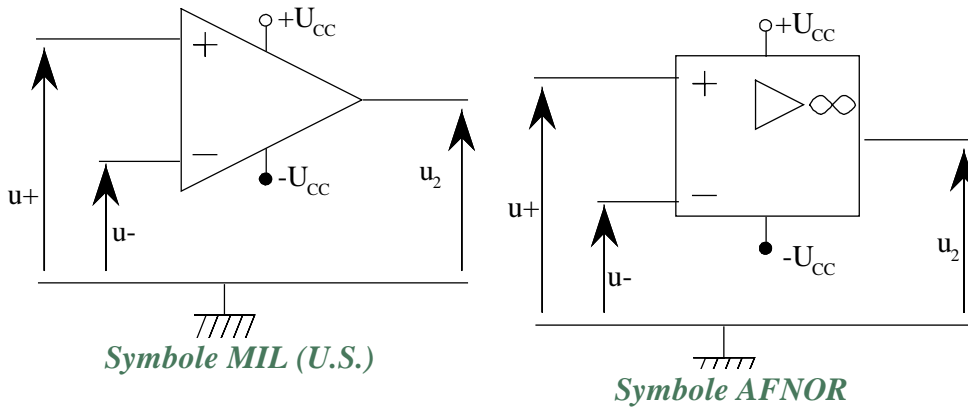
XI. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL PARFAIT (AOP)

A. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL REEL

1. Rappels sur l'amplification.

1. Est appelé amplificateur un quadripôle tel que la puissance qu'il produit à sa sortie soit supérieure à la puissance qu'il reçoit à l'entrée.
2. Le surcroît de puissance de sortie est fourni par l'alimentation.
3. L'alimentation sert aussi à polariser les composants actifs (transistors) qui font fonctionner l'amplificateur
4. Un amplificateur est dit linéaire si le signal a la même forme à la sortie qu'à l'entrée.

2. Symboles d'un amplificateur opérationnel (AO)



Un amplificateur opérationnel est alimenté entre deux tensions symétriques par rapport à la masse : $+U_{CC}$ et $-U_{CC}$.

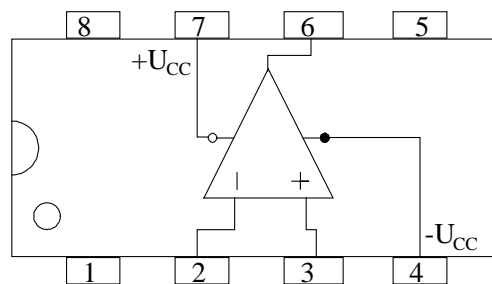
Essentiellement, il amplifie la différence de potentiel entre ses deux entrées :

$$u_2 = u_{out} = A(u^+ - u^-) \text{ L'amplification est énorme : } A \sim 10^5$$

$$\text{Les impédances d'entrée sont très grandes : } Z^+ \sim Z^- \sim \infty$$

3. Description d'un AO réel

Ce composant sera étudié en détail en 2^{ème} année



AO dans un boîtier DIL (Dual In Line) à 8 broches.
La patte n°1 est repérée par un rond, ou un onglet.

Patte n°	7	4	2	3	6
Fonction	Alimentation n $-U_{CC}$	Alimentation $-U_{CC}$	u^- Entrée inverseuse	u^+ Entrée non inv.	Sortie u_{out}

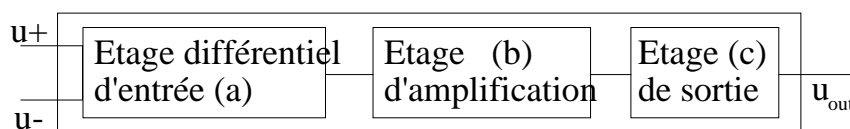
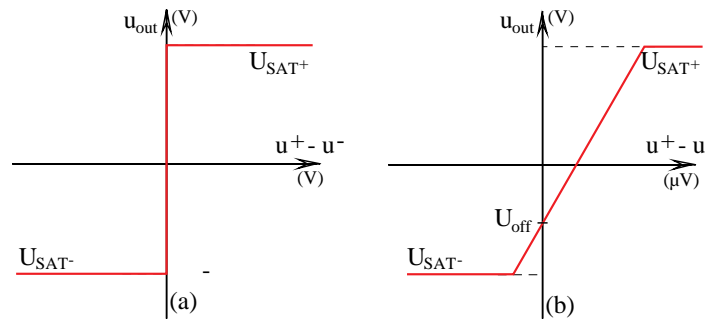


Schéma fonctionnel d'un AO.

4. Domaine de linéarité et saturations



*Caractéristique de transfert, sortie(entrée), d'un AO présentée avec deux échelles différentes pour l'entrée.
 U_{off} : tension de décalage à l'entrée.*

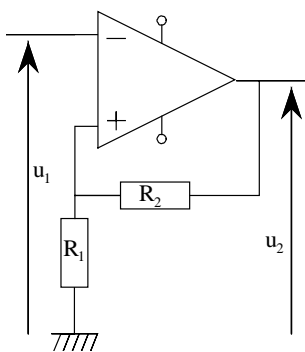
Par construction $A \sim 10^5$, donc le transfert en tension $u_{out}(u^+ - u^-) = A(u^+ - u^-)$ est quasi-inutilisable dans un réseau linéaire. L'AO sature ($u_{out} = U_{SAT}^\pm$) pour des valeurs très faibles de la tension d'entrée $\epsilon = u^+ - u^-$. Dans la pratique, il y a saturation dès que $u^+ \neq u^- \Leftrightarrow \epsilon \neq 0$. Un AO est linéaire si $U_{SAT}^- < u_{out} < U_{SAT}^+$ et si $i_{out} < I_{OUTM}$.
 Rq : Le plus souvent $|U_{SAT}^+| \neq |U_{SAT}^-|$

B. REACTION ET CONTRE-REACTION

Les notions de **réaction** et de **contre-réaction** sont fondamentales en électronique et seront généralisées à tous les amplificateurs en 2^{ème} année.

1. L'AO réactionné : Un trigger

Le gain d'un AO peut être encore augmenté en "injectant" une partie de la sortie sur l'entrée non-inverseuse. Le système a alors deux états stables $u_{out} = U_{SAT}^+$ et $u_{out} = U_{SAT}^-$. Il est possible d'ajuster les seuils qui déclenchent le passage d'un état à l'autre :



Trigger de Schmitt...

AO utilisé en trigger inverseur :

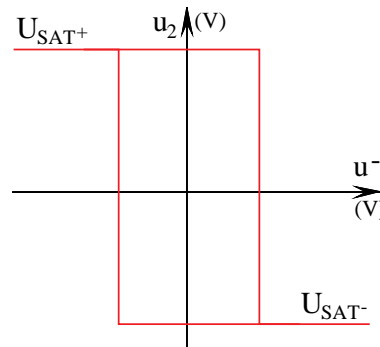
$u_1 = u^-$; R_1 et R_2 forment un pont diviseur en sortie quasi-ouverte :

$$u^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_2 ; \text{ avec } u_2 = U_{SAT}^\pm$$

u^+ sert de seuil au système :

$$u_2 = U_{SAT}^+ \Rightarrow u^+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{SAT}^+$$

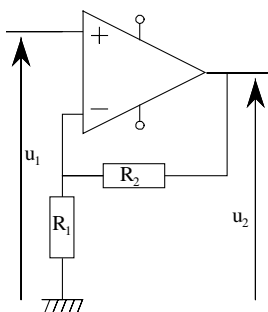
Si $u_1 \uparrow$, alors $u^- > u^+ \Rightarrow u_2 = U_{SAT}^-$
 Le transfert est ici hystérétique, ce qui évite les basculements répétitifs.



...ou comparateur à hystérésis

2. L'AO contre-réactionné : Un AO Parfait (AOP)

Le gain d'un AO peut être diminué en "injectant" une partie de la sortie sur l'entrée inverseuse. Le domaine linéaire du système est alors plus large.



Amplificateur-suiveur

AO contre-réactionné :

Le gain du montage est limité.
 $\epsilon = u^+ - u^-$ est négligeable devant les autres tensions.
 L'amplificateur est stable dans son domaine linéaire.
 Le système peut être utilisé en amplificateur linéaire.
 La bande des fréquences utilisables est élargie.
 L'impédance d'entrée est augmentée.
 L'AO est supposé parfait et ses propriétés idéales...

C. L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL PARFAIT (AOP)

Un AOP peut être considéré comme parfait seulement s'il fonctionne dans son domaine linéaire. C'est le cas le plus souvent s'il câblé avec une contre réaction plus importante que la réaction (souvent, la réaction est absente).

Propriétés d'un AO réel :

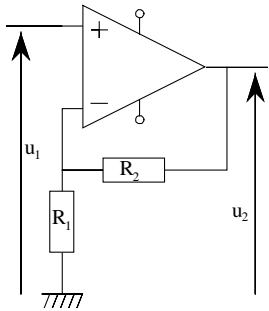
1. Un gain fini, $A \approx 10^5$
2. Une tension différentielle d'entrée petite s'il est dans son domaine linéaire.
3. Des impédances d'entrée Z^\pm très élevées
4. Une impédance de sortie Z_{OUT} très faible.
5. Une fréquence de transition f_T constante ($f_T = \text{produit gain} \times \text{bande passante}$).
6. Une tension de décalage non nulle, mais corrigable

Propriétés d'un AO Parfait :

1. Un gain infini, $A \sim \infty$
2. Une tension différentielle d'entrée nulle $u^+ = u^-$
(sinon $u_{out} = \infty$, ce qui est impossible)
3. Des courants d'entrée nuls : $i^+ = i^- = 0$
4. Une impédance de sortie nulle (générateur de tension parfait)
5. Une bande passante infinie (laisse passer des signaux de n'importe quelle fréquence)
6. Une tension de décalage nulle

D. EXEMPLES D'APPLICATIONS DES AOP

1. Amplificateur suiveur

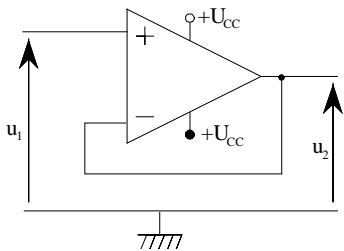


Si $i^- = 0$, alors R_1 et R_2 forment un pont diviseur en sortie ouverte :

$$u^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_2 \quad \text{et} \quad u^+ = u^-, \quad \text{soit :}$$

$$\frac{u_2}{u_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

2. Le tampon d'impédance (buffer)

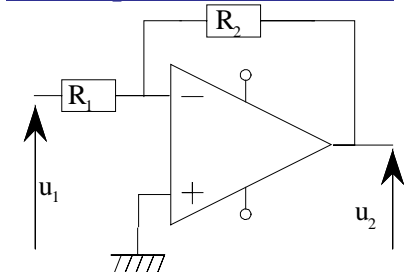


Ici $u_2 = u^- = u^+ = u_1$

Ce circuit sert à reproduire exactement la tension d'entrée.

Le courant de sortie est pris sur l'alimentation de l'amplificateur au lieu d'être pris sur la source. Une source faible peut piloter une forte charge.

3. L'amplificateur inverseur



$$i^- = 0 \Rightarrow i_{R1} = i_{R2} = i$$

et $u^- = u^+ = 0$, donc :

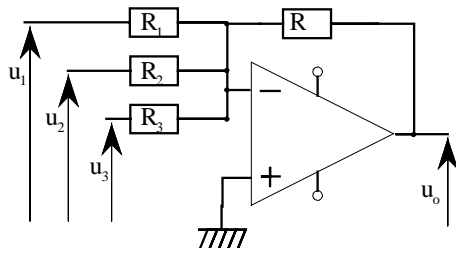
$$u_1 = R_1 i \quad \text{et} \quad u_2 = -R_2 i, \quad \text{soit :}$$

$$\frac{u_2}{u_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$R_1 = R_2 \Rightarrow$ circuit inverseur,

u_1 et u_2 sont en opposition de phase.

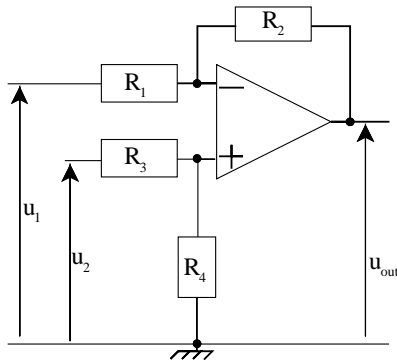
4. Sommateur inverseur



Un tel circuit s'étudie en appliquant le **théorème de Millmann** en u^- . Le principe de superposition s'applique aussi, mais demande plus de travail.

$$u_2 = -R \left(\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \frac{u_3}{R_3} \right)$$

5. Amplificateur de différence



Appliquez Millmann en u^+ et en u^- :

$$u_{out} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4} u_2 - \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1 \right)$$

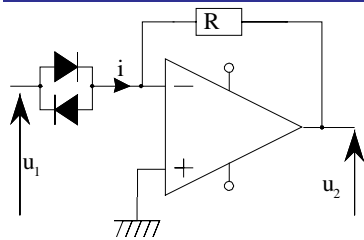
L'amplification de différence se fait

si : $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$

Dans ce cas :

$$u_{out} = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$

6. Amplificateur exponentiel

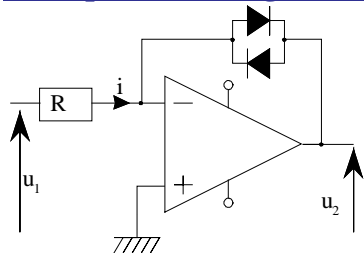


$u_2 = -Ri$ et $i = I_S e^{u_1/U_T}$, soit :

$$u_2 = -RI_S e^{u_1/U_T}$$

u_1 et u_2 sont en opposition de phase

7. Amplificateur logarithmique



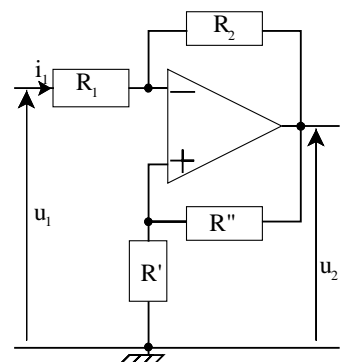
De même :

$u_1 = Ri$ et $i = -I_S e^{u_2/U_T}$, soit :

$$u_2 = -U_T \ln \left(\frac{u_1}{RI_S} \right)$$

u_1 et u_2 sont en opposition de phase

8. Amplificateur réactionné et contre-réactionné



Posons :

$$\beta^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{et} \quad \beta^+ = \frac{R''}{R'' + R'}$$

$$u_2 = u_1 \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{\beta^-}{\beta^+ - \beta^-} \right)$$

L'amplificateur est stable si et seulement si u_1 et u_2 sont en opposition de phase, soit si $\beta^+ < \beta^-$.

etc.