

# Amplificateur opérationnel

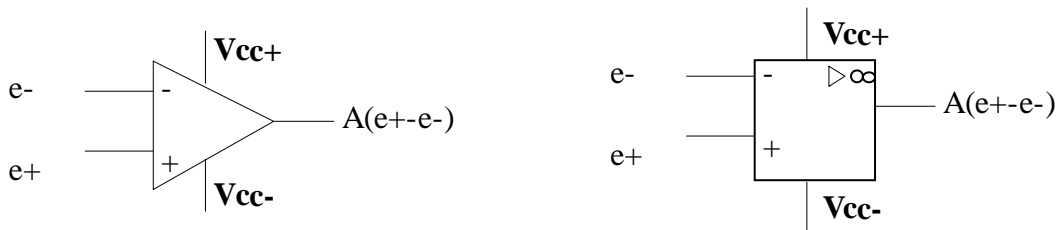
<b>1. Présentation.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Symbole – AOp idéal .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2. Conditions de bon fonctionnement.....</b>	<b>2</b>
<b>2. Caractéristiques – Mode de fonctionnement : .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Caractéristique de transfert – Fonctionnement en boucle ouverte :.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2. Fonctionnement en régime linéaire :.....</b>	<b>4</b>
<b>2.3. Fonctionnement en réaction positive : .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Caractéristiques constructeur :.....</b>	<b>6</b>
<b>3.1. Valeurs limites de fonctionnement :.....</b>	<b>6</b>
<b>3.2. Caractéristiques électriques :.....</b>	<b>6</b>

## 1. Présentation

### 1.1. Symbole – AOp idéal

Le tiers environ des circuits intégrés linéaires est constitué d'amplificateurs opérationnels. Très souvent symbolisé par un triangle, parfois par un carré, l'**A**mplificateur **O**pérationnel, **AOp**, possède :

- deux entrées :
  - Une dite **inverseuse** : **e-**
  - Une dite **non inverseuse** : **e+**
- Une sortie commandée par la différence des deux entrées :  $s = A(e+ - e-)$
- Deux entrées d'alimentation : **Vcc+** et **Vcc-**.



Symbole le plus utilisé

Autre symbole : AOP idéal

Typiquement, le gain **A** est **très grand** (idéalement infini) et l'AOp fonctionne pour des fréquences allant du continu (0 hz) à plusieurs Mhz (idéalement non limité en fréquence). **Les courants d'entrée sont très faibles** et souvent considérés comme nuls.

**Les caractéristiques d'un AOp idéal sont :**

**Amplification différentielle infini :  $A = \infty$ .**

**Bande passante infinie**

**Résistance de sortie nulle.**

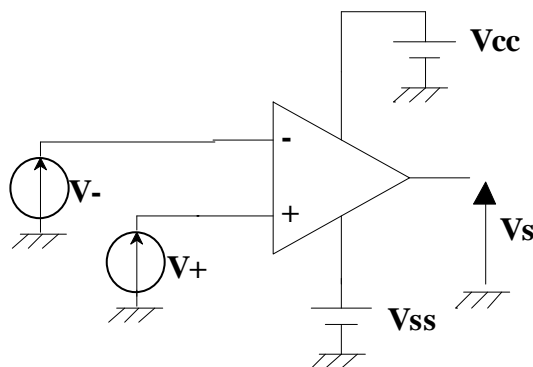
**Courants d'entrée nuls  $i_+ = i_- = 0$**

Il existe plus de 2000 types d'amplificateur opérationnel sur le marché.

**C'est un composant incontournable de l'électronique (comme le transistor).**

### 1.2. Conditions de bon fonctionnement.

Un AOp est un **circuit actif** qui doit donc être alimenté par des sources de tensions extérieures.



Généralement, le fonctionnement normal est obtenu pour :

**$V_{cc} = -V_{ss}$**  (alimentation symétrique).

Et en respectant :

**$V_{ss} < V_+ < V_{cc}$**

**$V_{ss} < V_- < V_{cc}$**

Et dans ces conditions, on aura toujours :

**$V_{ss} < V_s < V_{cc}$ .**

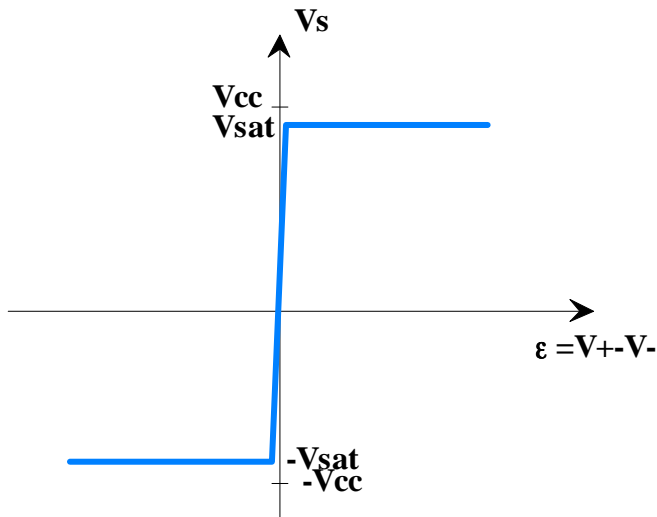
## 2. Caractéristiques – Mode de fonctionnement :

### 2.1. Caractéristique de transfert – Fonctionnement en boucle ouverte :

La fonction générale d'un Aop, comme nous l'avons déjà dit, est de fournir un signal de sortie proportionnel à la différence des entrées, avec un coefficient de proportionnalité très grand.

$$V_s = A (V_+ - V_-) \text{ avec } A \text{ très grand.}$$

Ce qui se traduit par la caractéristique de transfert suivante:



Les tensions maximum et minimum que peut prendre la sortie sont généralement notées  $+V_{sat}$  et  $-V_{sat}$ . Ces tensions sont différentes des tensions d'alimentation et plus généralement on a :

$$\begin{aligned} +V_{sat} &\neq V_{cc} & \text{et } +V_{sat} &\neq |-V_{sat}| \\ |-V_{sat}| &\neq |-V_{cc}| \end{aligned}$$

Très souvent, on trouvera la notation  $\epsilon$  pour définir  $V_+ - V_-$  :

$$\epsilon = V_+ - V_-$$

Sur cette caractéristique, on peut également remarquer que pour avoir un

fonctionnement avec  $-V_{sat} < V_s < +V_{sat}$  il faut travailler à  $\epsilon$  très faible.

Exemple : Pour un TL081 alimenté entre +15V et -15 V, le constructeur donne :

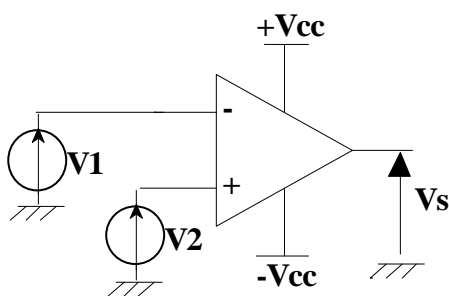
$$A = 2.10^5.$$

$$+V_{sat} = |-V_{sat}| = 13.5V.$$

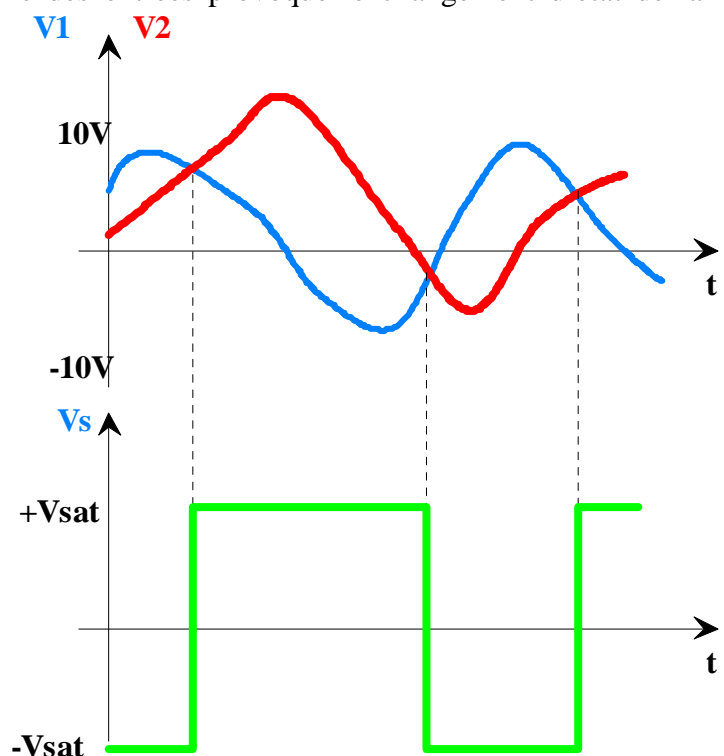
Pour travailler dans la zone de fonctionnement linéaire, il faut donc :

$$\epsilon \leq \frac{+V_{sat} - (-V_{sat})}{A} = \frac{27}{2.10^5} = 135 \mu V \text{ c\`a c}$$

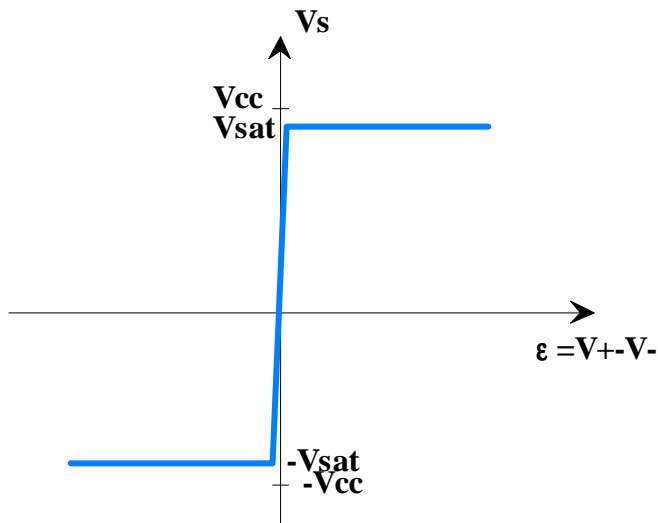
Une variation de quelques  $\mu V$  sur l'une des entrées provoque le changement d'état de la sortie.



L'amplificateur opérationnel utilisé seul, on dit en boucle ouverte, fonctionne donc en comparateur de tension.



## 2.2. Fonctionnement en régime linéaire :



contre réaction.

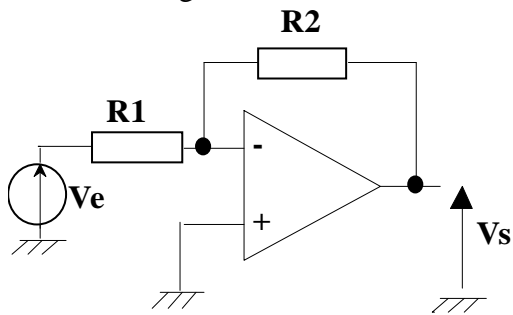
Si on reprend ce qui a été vu précédemment, pour avoir un fonctionnement avec  $-V_{sat} < V_s < +V_{sat}$  il faut travailler à  $\epsilon$  très faible.

Or, en pratique, on travaille avec des signaux d'amplitude pouvant évoluer entre  $-V_{cc}$  et  $+V_{cc}$ . L'AOp ne peut donc pas être utilisé tel quel.

Pour travailler dans la zone de fonctionnement linéaire, la solution consiste à prélever une fraction de la tension de sortie et de la soustraire à  $(V_+ - V_-)$ . On réalise **une réaction négative** ou

### Exemple :

Soit le montage suivant :



En considérant **les courants d'entrée nuls**, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_- = \frac{V_e * R_2 + V_s * R_1}{R_1 + R_2} \\ V_+ = 0 \end{cases}$$

Pour **Ve fixe** et en supposant que  $-V_{sat} < V_s < +V_{sat}$  (fonctionnement linéaire). Que se passe-t'il si  $V_s$  augmente ?

Dans ces conditions  $V_-$  augmente, et par conséquent,  $\epsilon = (V_+ - V_-)$  diminue ce qui se traduirait par une diminution rapide de  $V_s$ , puisque  $V_s = A(V_+ - V_-)$  et que  $A$  tends vers l'infini (très grand). Mais alors  $\epsilon = (V_+ - V_-)$  augmente ce qui tend à faire remonter  $V_s$  et par suite,  $V_s$  revient à chaque fois à sa position initiale. Donc pour  $V_e$  fixe,  $V_s$  est fixe. Ceci n'est possible que si  **$\epsilon = (V_+ - V_-) = 0$** .

Dans ces conditions, puisque dans ce montage  $V_+ = 0$ , on obtient : 
$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_e$$

Le montage est donc un **amplificateur inverseur**.

Ce raisonnement est valable pour tous les montages possédant une réaction négative ou contre réaction et amène à la démarche d'étude suivante :

### Démarche d'étude des montages à Aop avec contre réaction :

Si l'amplificateur opérationnel est utilisé en réaction négative, c'est à dire rebouclage de la sortie sur l'entrée inverseuse, alors on pose :

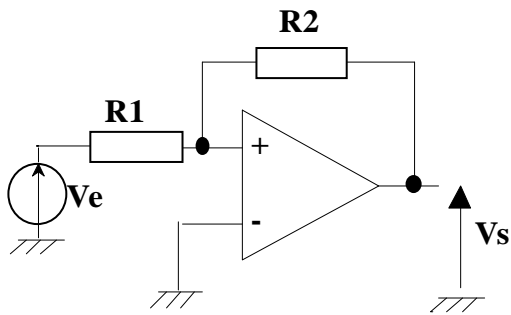
$$V_+ = V_-$$

On établit ensuite les expressions de  $V_+$  et  $V_-$  en fonction des éléments du montage (résistances, condensateurs, etc.).

Puis on écrit  $V_+ = V_-$ , et on en déduit l'expression de  $V_s$ .

### 2.3. Fonctionnement en réaction positive :

Soit le montage suivant :



On reprend le même raisonnement que précédemment.

En considérant les courants d'entrée nul, on peut encore écrire :

$$\begin{cases} V_+ = \frac{V_e * R_2 + V_s * R_1}{R_1 + R_2} \\ V_- = 0 \end{cases}$$

Pour  $V_e$  fixe et en supposant que  $-V_{sat} < V_s < +V_{sat}$  (fonctionnement linéaire). Que se passe-t-il si  $V_s$  augmente ?

Dans ces conditions  $V_+$  augmente, et par conséquent,  $\epsilon = (V_+ - V_-)$  augmente ce qui se traduit par une augmentation rapide de  $V_s$ , puisque  $V_s = A(V_+ - V_-)$  et que  $A$  tend vers l'infini (très grand). Donc **le système emmène forcément la tension de sortie en saturation**, ici à  $+V_{sat}$ .

On retiendra donc que :

**En réaction positive, la sortie de l'AOp ne peut prendre que deux états :**  
 + $V_{sat}$  si  $V_+ > V_-$   
 -  $V_{sat}$  si  $V_+ < V_-$ .

Dans le montage ci-dessus, on va donc chercher les valeurs de  $V_e$  pour lesquelles on a  $V_s = +V_{sat}$  et celles pour lesquelles  $V_s = -V_{sat}$ .

**On suppose  $V_s = +V_{sat}$** , ce qui veut dire que l'on suppose que  $V_+ > V_-$ , et **on cherche pour quelles valeurs de  $V_e$  on passe dans la condition  $V_+ < V_-$  qui provoque le changement d'état de  $V_s$  à  $-V_{sat}$** . Donc :

$$\begin{cases} V_+ = \frac{V_e * R_2 + V_{sat} * R_1}{R_1 + R_2} \\ V_- = 0 \end{cases}$$

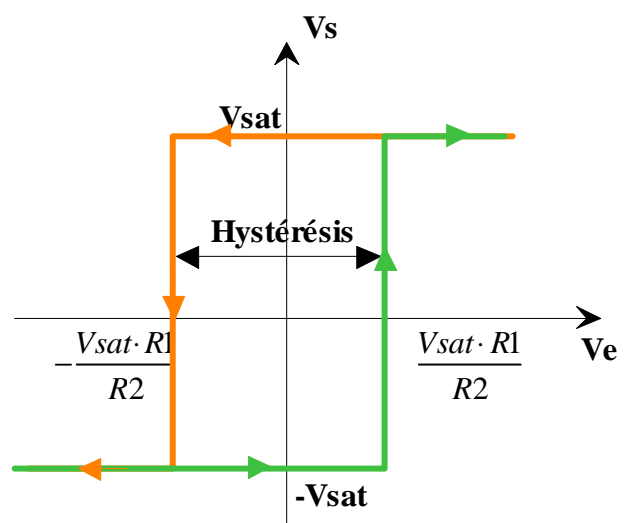
Et  $V_+ < V_-$  conduit à :

$$V_e < -\frac{V_{sat} \cdot R_1}{R_2}$$

En suivant un raisonnement identique pour le cas  $V_s = -V_{sat}$ , on trouve que le basculement de  $V_s$  de  $-V_{sat}$  à  $+V_{sat}$  a lieu pour :

$$V_e > \frac{V_{sat} \cdot R_1}{R_2}$$

Ce qui se résume dans la caractéristique de transfert du montage :



C'est un **COMPAREUR À HYSTERESIS NON INVERSEUR**.

### 3. Caractéristiques constructeur :

#### 3.1. Valeurs limites de fonctionnement :

Nom		Description
$V_{CC+}$	Supply voltage,	Tension d'alimentation positive maximum
$V_{CC-}$	Supply voltage,	Tension d'alimentation négative maximum
$\Delta V_{IM}$	Differential input voltage	Tension d'entrée différentielle maximum : tension maximum pouvant exister entre les entrées inverseuse et non inverseuse. $(V_+-V_-)_{MAX}$ .
$V_{IM}$	Input voltage	Tension maximum pouvant être appliquée sur une entrée. L'amplitude sur une entrée ne devra jamais dépasser la tension d'alimentation.
$P_D$	Continuous total dissipation	Puissance maximum dissipée en continue.

#### 3.2. Caractéristiques électriques :

Nom		Description
$V_{IO}$	Input offset Voltage	Idéalement la caractéristique de transfert passe par 0. En réalité, même si on relie les 2 entrées ensemble à la masse, il existe une tension continue en sortie. Cette tension divisée par le gain A (à $f=0$ ) donne la valeur de la tension différentielle d'entrée. Cette tension provient de la non symétrie de l'étage d'entrée des AOp. Certains AOp possèdent des entrées de compensation d'offset pour corriger ce défaut.
$I_{IO}$ $I_{IB}$	Input Offset Current Input Bias Current	Idéalement, les courants d'entrée sont nuls. Hors pour assurer la polarisation des transistors constituant les AOp, des courants très faibles existent sur les entrées $V_+$ et $V_-$ . Ces courants sont des courants de base, pour les AOp à entrées bipolaires, et des courant de grilles pour les AOp à entrées JFET, ils sont donc plus faibles dans le deuxième cas. Le constructeur ne donne pas directement la valeur de ces courants, mais les caractérise par : $I_{IO} = I^+ - I^- \text{ et } I_{IB} = \frac{I^+ + I^-}{2}$ Ces courants sont nécessaires au bon fonctionnement de l'AOp.
$A_{VD}$	Large signal differential voltage amplification	Le gain d'un AOp est idéalement infini et ne dépend pas de la fréquence. En réalité, il est très grand et sa valeur en continue est donnée par le constructeur par $A_{VD}$ . Il est généralement donné en $V/mV$ ou en dB ( $20\log A_{VD} $ avec $A_{VD}$ en $V/mV$ ). Exemple, pour le TL081, $A_{VD} = 200 V/mV$ soit : 106dB.

$B_1$ (ou $F_T$ )	Unity Gain bandwidth (Frequency Transistion)	De plus, le gain varie en fonction de la fréquence (chute quand la fréquence augmente). Le constructeur fourni la valeur de $F_T$ , fréquence pour laquelle le gain vaut 1. Cette caractéristique est également appelé <b>Produit Gain Bande</b> passante.
$r_i$	Input resistance	Résistance d'entrée. Supposée infinie dans le modèle idéal, c'est la résistance d'entrée différentielle (vue entre les broches + et - de l'AOp) elle est de l'ordre de $10^{12} \Omega$ en réalité. Dans certaines documentations constructeur, on trouve aussi la valeur de la résistance de mode commun $r_{ic}$ (vue entre la broche + ou - de l'AOp est la masse) du même ordre de grandeur.
CMRR	Common mode rejection ratio	Taux de rejection en mode commun. La tension de sortie ne dépend pas que de la différence des entrées mais aussi de la moyenne des tension d'entrée (valeur commune au deux entrée, appelée tension de mode commun). On peut alors écrire : $V_s = A_{VD}(v^+ - V^-) + A_c \frac{V^+ + V^-}{2}$ $A_c$ est le gain de mode commun de l'AOp et le constructeur donne comme caractéristiques : $CMRR = \left  \frac{A_{VD}}{A_c} \right  \quad \text{ou} \quad CMRR_{dB} = 20 \log \left( \left  \frac{A_{VD}}{A_c} \right  \right)$
SR	Slew rate	Le Slew Rate défini la vitesse maximum de variation de la tension de sortie de l'AOp. Il s'exprime en V/ $\mu$ s.
$k_{SVR}$	Suplly voltage rejection ratio	Ce paramètre chiffre la sensibilité de la sortie de l'AOp vis-à-vis des variations de la tension d'alimentation. $k_{SVR} = 20 \log \left( \left  \frac{\Delta V_{CC\pm}}{\Delta V_s} \right  \right)$
$I_{CC}$	Supply current	Courant d'alimentation. Indique la consommation en courant par AOp dans un boîtier en comportant plusieurs. (ex : TL084 = 4 TL081 dans un seul boîtier).
$r_o$	Output resistance	L'AOp possède une résistance de sortie non nul pour limiter le courant en cas de court circuit de celle-ci. Elle est faible, une centaine d'ohm pour les plus mauvais. On montre que la résistance de sortie d'un montage en réaction négative est réduite par rapport à $r_o$ .

