

## 1. Amplificateur opérationnel

### 11. Présentation

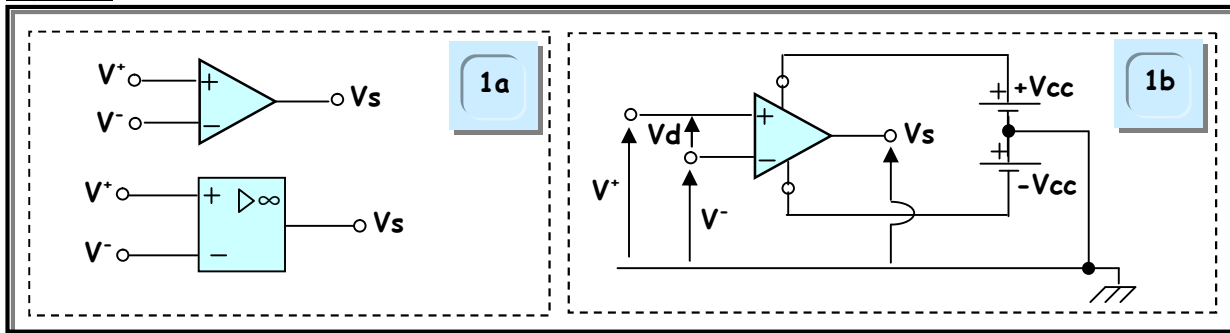
Un amplificateur opérationnel « AOP » est circuit linéaire intégré. C'est un composant constitué principalement de transistors et d'éléments électroniques de base (diodes, résistances,...).

Son symbole est celui de la figure 1a. Un AOP est caractérisé par :

- Une entrée non inverseuse  $V^+$ .
- Une entrée inverseuse  $V^-$ .
- Une sortie  $V_s$ .

Le fonctionnement de l'AOP nécessite souvent deux tensions d'alimentation symétriques  $+V_{cc}$  et  $-V_{cc}$ . Ces deux tensions sont appliquées sur deux bornes du circuit (voir figure 1b).

Figure 1



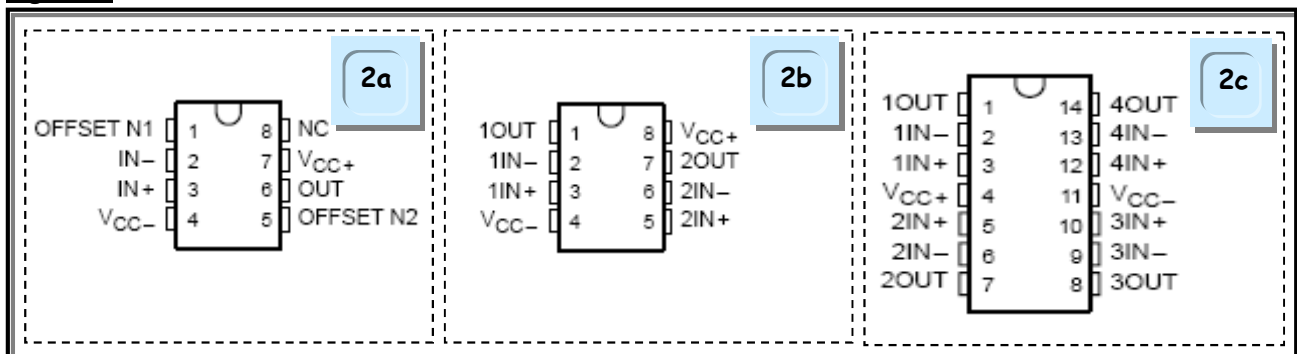
### 12. Brochage

L'AOP se matérialise par un circuit intégré et se trouve dans un boîtier standard de 8 broches qui contient 1 seul AOP (voir figure 2a). On cite à titre d'exemple le TL081 et le TL071.

Il existe aussi des boîtiers standards qui contiennent :

- 2 AOP (voir figure 2b) tels que le TL082 et le TL072.
- 4 AOP (voir figure 2c) tels que le TL084 et le TL074.

Figure 2



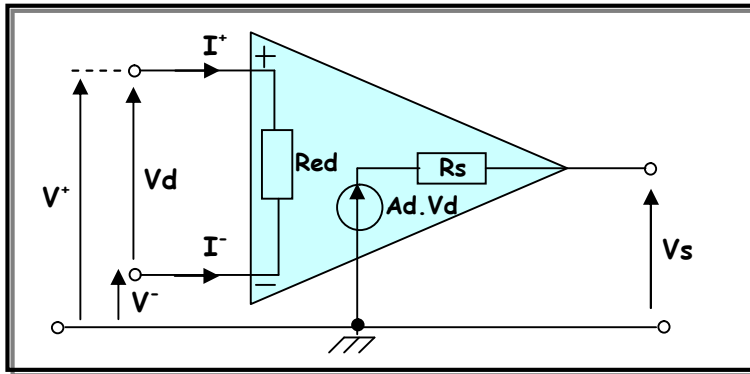
### 13. Modèle équivalent d'un AOP

Un amplificateur opérationnel peut être modélisé conformément au schéma de la figure 3 :

- $R_{ed}$  : Résistance d'entrée différentielle.
- $R_s$  : Résistance de sortie.
- $A_d$  : Amplification différentielle.

Dans le cas réel,  $R_{ed}$  et  $A_d$  sont généralement très grandes et  $R_s$  très faible. Pour le TL081 par exemple, le constructeur donne  $A_d=2.10^5$ ,  $R_{ed}=10^6 M\Omega$  et  $R_s=50\Omega$ .

Figure 3



#### 14. Caractéristique de transfert $V_s=f(V_d)$

De façon générale, on peut écrire :  $V_s = Ad.(V^+ - V^-) = Ad.V_d$  où :

- ☑  $Ad$  présente l'amplification différentielle.
- ☑  $V_d$  est la tension différentielle  $V_d = V^+ - V^-$ .

L'examen de la caractéristique de transfert donnée à la figure 4a fait apparaître deux modes de fonctionnements :

- ☑ Régime linéaire d'amplification où  $V_s = Ad.V_d$ .
- ☑ Régime non linéaire de saturation où  $V_s$  peut prendre deux valeurs :
  - $V_s = +V_{sat}$  si  $V_d > +V_{sat}/Ad$ .
  - $V_s = -V_{sat}$  si  $V_d < -V_{sat}/Ad$ .

$+V_{sat}$  et  $-V_{sat}$  présentent respectivement la tension de saturation positive et négative de l'AOP. Elles dépendent des tensions d'alimentation de l'AOP et on a toujours  $V_{sat} < V_{cc}$ .

Pour le TL081, on a  $Ad = 2.10^5$ . Si on suppose que  $V_{cc} = 15V \Rightarrow V_{sat} = 13V$ , l'intervalle du régime linéaire est tel que  $-65\mu V < V_d < +65\mu V$ .

#### 15. Amplificateur opérationnel parfait

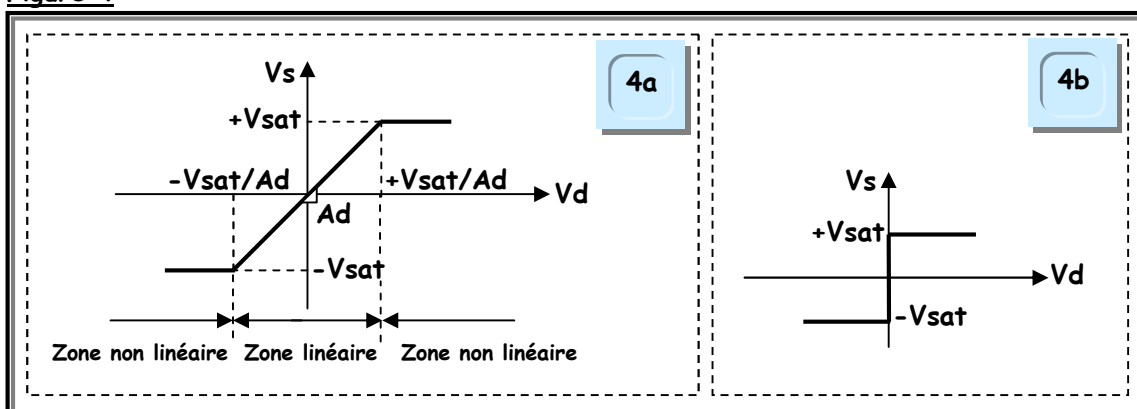
Un amplificateur opérationnel parfait est caractérisé par :

- ☑ Une amplification différentielle  $Ad$  infinie ( $Ad = \infty$ ).
- ☑ Une résistance d'entrée différentielle  $Red$  infinie ( $Red = \infty$ ).
- ☑ Une résistance de sortie  $R_s$  nulle ( $R_s = 0$ ).

Les conséquences pratiques de l'AOP parfait seront les suivantes :

- Dans le régime linéaire spécifique à l'amplification, on a  $Ad = \infty \Rightarrow V_d = V_s / Ad = 0 \Rightarrow V^+ = V^-$ .
- Dans les deux régimes, linéaire et non linéaire, on a  $Red = \infty \Rightarrow I^+ = I^- = 0$ .
- La caractéristique de transfert  $V_s = f(V_d)$  est celle de la figure 4b.

Figure 4



## 2. Modes de Fonctionnement de l'AOP

### 21. Fonctionnement en régime linéaire ou d'amplification

Ce mode de fonctionnement s'effectue avec un bouclage (contre réaction) de la sortie  $V_s$  sur l'entrée inverseuse  $V^-$ . Ce bouclage est réalisé soit par un composant ( $R, L, C$ , diode, transistor, ...), soit par une liaison directe. En considérant l'AOP parfait, les relations à tenir en compte sont  $V^+ = V^-$  et  $I^+ = I^- = 0$ .

### 22. Fonctionnement en régime non linéaire ou de commutation

Ce régime s'établit lorsque l'entrée non inverseuse  $V^+$  est reliée à la sortie  $V_s$  (réaction positive) ou tout simplement quand l'AOP fonctionne en boucle ouverte (comparateur). En considérant l'AOP parfait, les relations à tenir en compte sont  $I^+ = I^- = 0$ ,  $V_s = +V_{sat}$  si  $V^+ > V^-$  et  $V_s = -V_{sat}$  si  $V^+ < V^-$ .

## 3. Limites d'utilisation de l'AOP

### 31. Limite en tension

Un accroissement abusif de la tension d'entrée provoque la saturation de la tension de sortie et se traduit par un écrêtage de cette dernière. La valeur limite ou maximale de la tension de sortie est  $V_{sat}$  qui dépend fortement de la tension d'alimentation ( $V_{sat}$  est estimée à 90 % de  $V_{cc}$ ).

La figure 5a illustre le phénomène d'écrêtage pour une entrée sinusoïdale. Si par exemple  $V_s = A_v \cdot V_e$  alors on veuille à ce que  $V_e$  soit inférieure à  $V_{max}$  tel que  $V_{max} = V_{sat} / A_v$ .

**Exemple** :  $V_{sat} = 13V$ ,  $A_v = 10 \Rightarrow V_{max} = 1,3V$ .

### 32. Limite en courant

Le constructeur précise la valeur maximale du courant de sortie  $I_{smax}$  que peut débiter un AOP en sortie. En général, le courant  $I_{smax}$  est de l'ordre de 20mA à 30mA. Cette valeur limite la charge  $R_L$  que peut alimenter l'AOP. Une diminution de  $R_L$  cause la saturation du courant de sortie et se traduit par un écrêtage de la tension de sortie à une valeur  $V_{smax}$  inférieure à  $V_{sat}$ . Donc, on veuille à ce que  $R_L$  soit supérieure à la valeur minimale  $R_{Lmin}$  telle que  $I_{smax} = V_{smax} / R_{Lmin}$ .

**Exemple** :  $V_{smax} = 5V$ ,  $I_{smax} = 20mA \Rightarrow R_{Lmin} = 250\Omega$ .

### 33. Limite en fréquence

La rapidité d'un signal périodique est chiffrée par sa fréquence : un signal est d'autant plus rapide que sa fréquence est élevée.

Un AOP est limité en fréquence. Cette contrainte est due aux deux paramètres caractéristiques de l'AOP :

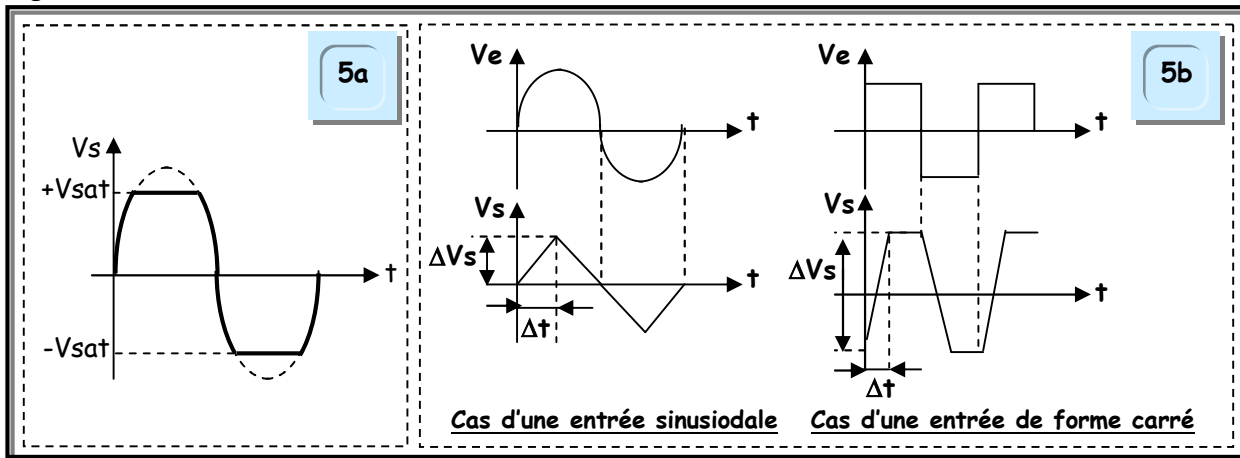
☑ **Vitesse de balayage ou de montée (slew rate)** : Cette vitesse limite la montée et la descente rapide du signal de sortie et exprimée en  $V/\mu S$ .

**Exemple** : Pour le TL081, le constructeur fixe le slew rate à  $13V/\mu S$ . Donc, on veuille à ce que la vitesse d'évolution en tension de sortie soit inférieure à la valeur imposée par le fabriquant ( $\Delta V_s / \Delta t < \text{slew rate}$ ), sinon il y aura une déformation du signal de sortie comme l'indique la figure 5b.

☑ **Bande passante (Bandwith)** : C'est l'intervalle de fréquence dans lequel l'AOP est supposé fonctionner correctement. Le constructeur définit le facteur de mérite qui est égale au produit gain\*bande passante de l'AOP. Donc, on peut définir le paramètre  $B_w$  par l'expression suivante :  $B_w = A_v \cdot F_c$  avec  $A_v$  étant l'amplification de l'AOP et  $F_c$  présente la fréquence de coupure (fréquence maximale d'utilisation de l'AOP).

**Exemple** : Pour le TL081, le constructeur fixe  $B_w$  à 3MHz. Si on choisit une amplification  $A_v = 10$ , la fréquence maximale d'utilisation de l'AOP est telle que  $F_c = B_w / A_v$ , soit  $F_c = 3 \cdot 10^6 / 10 = 300 \text{ KHz}$ . On déduit alors que en augmentant  $A_v$ ,  $F_c$  diminue et inversement.

Figure 5



#### 4. Applications linéaires de l'AOP

##### 41. Montage suiveur (figure 6a)

On a :  $V^+ = V_e$  et  $V^- = V_s$ . AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- \Rightarrow V_s = V_e \Rightarrow Av = 1$ . Le montage suiveur présente un cas particulier d'amplification qui est égale à l'unité. Un tel montage sert pour l'adaptation d'impédances.

##### 42. Montage convertisseur courant/tension (figure 6b)

En appliquant la loi d'Ohm, on a  $R \cdot I_e = V^- - V_s$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- = 0 \Rightarrow R \cdot I_e = -V_s \Rightarrow V_s = -R \cdot I_e \Rightarrow V_s = k \cdot I_e$  avec  $k = -R$  présente le coefficient de conversion. La tension de sortie  $V_s$  est bien une image du courant d'entrée  $I_e$ .

##### 43. Montage convertisseur tension/courant (figure 6c)

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- = V_e$  et  $I^+ = I^- = 0$ .

En appliquant la loi d'Ohm, on a  $R \cdot I_s = V_e \Rightarrow I_s = V_e / R \Rightarrow I_s = k \cdot V_e$  avec  $k = 1/R$ .

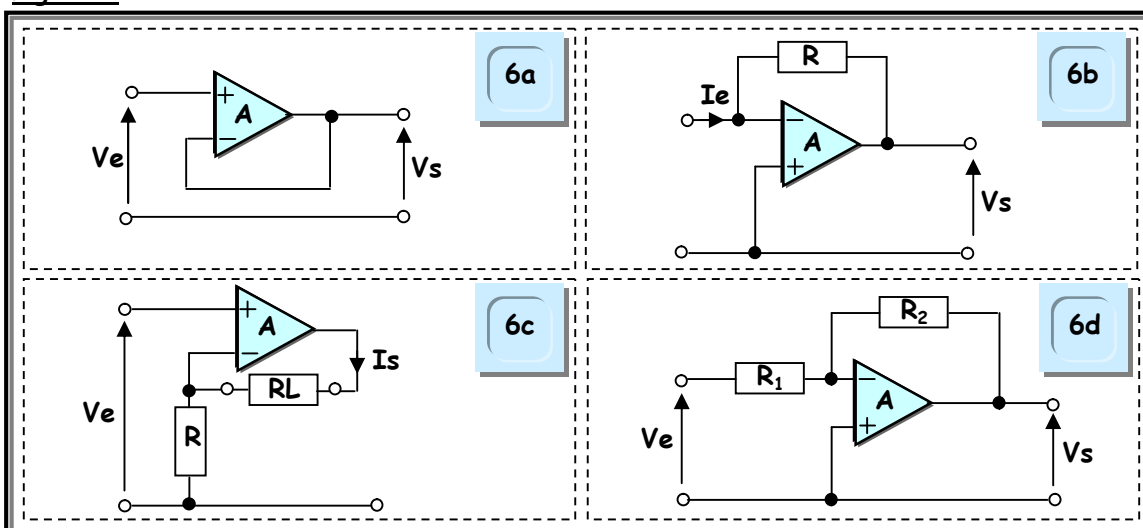
Le courant de sortie  $I_s$  est d'une part indépendant de la charge  $R_L$ , et d'autre part il est image de la tension d'entrée  $V_e$ .

##### 44. Montage amplificateur inverseur (figure 6d)

En appliquant le théorème de la superposition, on a  $V^- = [(V_e \cdot R_2) + (V_s \cdot R_1)] / (R_1 + R_2)$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- = 0 \Rightarrow (V_e \cdot R_2) + (V_s \cdot R_1) = 0 \Rightarrow V_s = (-R_2 / R_1) \cdot V_e \Rightarrow Av = -R_2 / R_1$ .

Figure 6



#### 45. Montage amplificateur non inverseur (figure 7a)

En appliquant le pont diviseur de tension, on a  $V^+ = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- = V_e \Rightarrow V_e = V_s \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \Rightarrow V_s = [1 + (R_2/R_1)] \cdot V_e \Rightarrow A_v = 1 + (R_2/R_1)$ .

#### 46. Montage soustracteur (figure 7b)

En appliquant le théorème de superposition, on a  $V^- = [(V_{e2} \cdot R_2) + (V_s \cdot R_1)] / (R_1 + R_2)$ .

En appliquant le pont diviseur de tension, on a  $V^+ = V_{e1} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- \Rightarrow V_{e2} \cdot R_2 + V_s \cdot R_1 = V_{e1} \cdot R_2 \Rightarrow V_s = (R_2/R_1) \cdot (V_{e1} - V_{e2}) \Rightarrow A_v = R_2/R_1$

Si on suppose que  $R_2 = R_1$  on aura  $V_s = V_{e1} - V_{e2}$

$\Rightarrow$  Le montage réalise ainsi la fonction mathématique soustraction.

#### 47. Montage additionneur inverseur (figure 7c)

En appliquant le théorème de Millman, on a  $V^- = [(\sum (V_{e_i}/R_i)) + (V_s/R_0)] / [(\sum (1/R_i)) + (1/R_0)]$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- = 0 \Rightarrow (\sum (V_{e_i}/R_i)) + (V_s/R_0) = 0 \Rightarrow V_s = -R_0 \cdot [(V_{e1}/R_1) + (V_{e2}/R_2) + \dots + (V_{e_n}/R_n)]$

Si on suppose que :  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$  alors  $V_s = (-R_0/R) \cdot [V_{e1} + V_{e2} + \dots + V_{e_n}] \Rightarrow A_v = -R_0/R$

Si de plus on suppose que  $R_0 = R$  on aura bien  $V_s = -(V_{e1} + V_{e2} + \dots + V_{e_n})$

$\Rightarrow$  Le montage réalise ainsi la fonction mathématique addition avec inversion de signe.

#### 48. Montage additionneur non inverseur (figure 7d)

En appliquant le théorème de Millman, on a  $V^+ = \sum (V_{e_i}/R_i) / \sum (1/R_i)$ .

En appliquant le pont diviseur de tension, on a  $V^- = V_s \cdot R_0 / (R + R_0)$ .

AOP parfait  $\Rightarrow V^+ = V^- \Rightarrow \sum (V_{e_i}/R_i) / \sum (1/R_i) = V_s \cdot R_0 / (R + R_0) \Rightarrow V_s = [1 + (R/R_0)] \cdot [\sum (V_{e_i}/R_i) / \sum (1/R_i)]$

$\Rightarrow V_s = [1 + (R/R_0)] \cdot [((V_{e1}/R_1) + (V_{e2}/R_2) + \dots + (V_{e_n}/R_n)) / ((1/R_1) + (1/R_2) + \dots + (1/R_n))]$

Si on suppose que :  $R_1 = R_2 = \dots = R_n$  alors  $V_s = [1 + (R/R_0)] / n \cdot [V_{e1} + V_{e2} + \dots + V_{e_n}] \Rightarrow A_v = [1 + (R/R_0)] / n$

Si de plus on suppose que  $R_0 = R$  on aura bien  $V_s = (2/n) \cdot (V_{e1} + V_{e2} + \dots + V_{e_n})$

$\Rightarrow$  Le montage réalise ainsi la fonction mathématique addition sans inversion de signe.

Figure 7

