

# Cours sur les amplificateurs opérationnels

Auteur : Thierry ROCACHER

## Objectifs :

- Savoir tracer la caractéristique entrée – sortie d’un AOP en boucle ouverte
- Savoir déterminer le gain en tension d’un montage amplificateur
- Savoir tracer la caractéristique d’un montage amplificateur (inverseur ou non inverseur)
- Savoir tracer la tension de sortie d’un montage amplificateur à partir de la tension d’entrée

## Pré-requis :

- Théorèmes de bases
- Filtrage
- Système bouclé

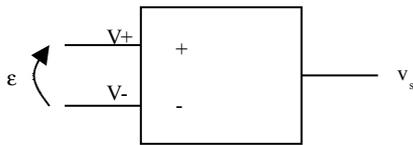
## 1- Caractéristiques d’un amplificateur opérationnel

Comme son nom l’indique, un amplificateur opérationnel (AOP) est un **amplificateur de tension**. On a l’habitude d’appeler  $\epsilon$  la tension d’entrée et  $v_s$  la tension de sortie.

Voici un extrait de la documentation du TL081 (Texas Instrument) qui est un AOP très classique :

PARAMETER	TEST CONDITIONS	T <sub>A</sub> †	TL081C TL082C TL084C			TL081AC TL082AC TL084AC			TLO81BC TL082BC TL084BC			TL081I TL082I TL084I			UNIT
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input offset voltage	V <sub>O</sub> = 0    R <sub>S</sub> = 50 Ω	25°C		3	15		3	6		2	3		3	6	mV
		Full range			20			7.5			5			9	
Temperature coefficient of input offset voltage	V <sub>O</sub> = 0    R <sub>S</sub> = 50 Ω	Full range		18		18		18		18		18		18	μV/°C
Input offset current‡	V <sub>O</sub> = 0	25°C		5	200		5	100		5	100		5	100	pA
		Full range			2			2			2			10	nA
2 Input bias current‡	V <sub>O</sub> = 0	25°C		30	400		30	200		30	200		30	200	pA
		Full range			10			7			7			20	nA
Common-mode input voltage range		25°C	±11	-12 to 15		±11	-12 to 15		±11	-12 to 15		±11	-12 to 15		V
		Full range													
3 Maximum peak output voltage swing	R <sub>L</sub> = 10 kΩ	25°C	±12	±13.5		±12	±13.5		±12	±13.5		±12	±13.5		V
	R <sub>L</sub> ≥ 10 kΩ		±12			±12			±12			±12			
	R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range	±10	±12		±10	±12		±10	±12		±10	±12		
1 Large-signal differential voltage amplification	V <sub>O</sub> = ±10 V,    R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	25°C	25	200		50	200		50	200		50	200		V/mV
	V <sub>O</sub> = ±10 V,    R <sub>L</sub> ≥ 2 kΩ	Full range	15			25			25			25			
4 Unity-gain bandwidth		25°C		3			3			3			3	MHz	
Input resistance		25°C		10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>			10 <sup>12</sup>	Ω	
Common-mode rejection ratio	V <sub>IC</sub> = V <sub>ICRmin</sub> , V <sub>O</sub> = 0,    R <sub>S</sub> = 50 Ω	25°C	70	86		75	86		75	86		75	86	dB	

Le symbole donné à un AOP est le suivant :



On remarque que l'entrée  $\varepsilon$  est de type différentiel.  
 $\varepsilon = V_+ - V_-$ .

Les caractéristiques essentielles sont indiquées par un encadré (voir page précédente). Un numéro correspondant à l'ordre d'importance est noté :

### 1- Large signal differential voltage amplification : **Coefficient d'amplification différentielle**

Il s'agit du rapport d'amplification  $A_d = v_s/\varepsilon$ . On voit que sa valeur varie entre 50000 et 200000, ce qui donne en dB un gain allant de 93 dB à 106 dB. **Ce gain est énorme.**

### 2- Input Bias Current : **Courant de repos en entrées**

C'est le courant qui est absorbé par chacune des entrées de l'amplificateur. Ce courant est nécessaire au bon fonctionnement de l'amplificateur. Sur la documentation on constate que ce courant (que l'on note souvent  $i_+$  et  $i_-$ ) vaut 30 et 200 pA. **Ces courants sont ridiculement petits.**

### 3- Maximum peak output voltage swing : **Excursion maximale de sortie**

Il s'agit des limites entre lesquelles peut évoluer le signal de sortie. Ces limites vont de  $-12\text{ V}$  à  $+12\text{ V}$  dans le pire des cas et de  $-13.5\text{ V}$  à  $+13.5\text{ V}$  dans le meilleur des cas. Ces mesures sont données pour une alimentation de l'amplificateur en  $\pm 15\text{ V}$ . On constate donc que l'on perd de 2 à 3V par rapport aux tensions d'alimentation. Ces tensions maximales sont notées  $+V_{\text{sat}}$  et  $-V_{\text{sat}}$ .

### 4- Unity gain Bandwidth : **Bande passante pour un gain unitaire**

C'est la fréquence de coupure naturelle de l'AOP lorsque celui-ci est branché en suiveur (gain de 1, voir plus tard...). On la note souvent  $f_T$ . Cela signifie tout simplement qu'un AOP est par nature un amplificateur **passé-bas**, dont la fréquence de coupure à  $-3\text{ dB}$  vaut  $f_T$  dans le cas d'un montage suiveur. Sa valeur est dans le pire des cas 3 MHz. Elle est **relativement élevée**.

Nous n'avons passé en revue que les paramètres essentiels, il y en a bien d'autres. Le TL081 est un AOP dont toutes les caractéristiques sont **moyennes**. Ceci fait de lui un AOP « multi-usage » très répandu. Dans des applications spécifiques (mesure statique, acquisition de signaux rapides), il convient d'utiliser d'autres AOP. Certains paramètres sont optimisés au détriment d'autres dans le but de le rendre efficace dans le domaine considéré.

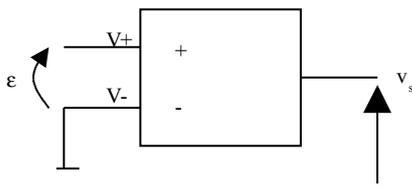
*Conclusion :*

Des paramètres cités, on peut dire que :

- Le coefficient d'amplification **Ad est très grand.**
- Les **courants** de polarisation **d'entrée** sont **très faibles**
- **L'excursion** de la tension de **sortie** correspond presque aux **tensions d'alimentation**
- **La bande passante** de l'AOP **est très grande** pour le montage suiveur.

**2- La caractéristique entrée-sortie d'un AOP.**

Montage : (alimentation  $V_{cc+} = +15V$  et  $V_{cc-} = -15 V$ )



La caractéristique s'obtient en faisant varier  $V+ = \epsilon$  de  $-V_{cc}$  à  $+V_{cc}$ .

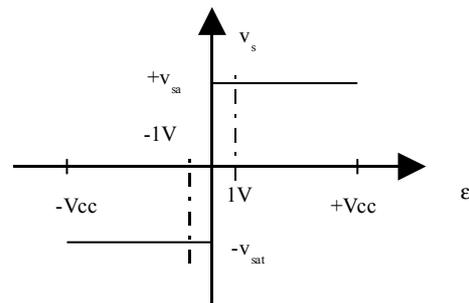
Voici la courbe obtenue :

*Interprétation :*

Si  $\epsilon=0$ ,  $V_s=0$  puisque  $v_s = Ad \cdot \epsilon$ ,

Si  $\epsilon=1V$ , dans le pire des cas  $Ad = 50000$ , donc  $v_s=50000V$  ! Evidemment cette valeur n'a aucun sens et elle sera dans la réalité écrêtée à  $+V_{sat}$ .

On peut faire exactement le même raisonnement sur  $\epsilon = -1V$

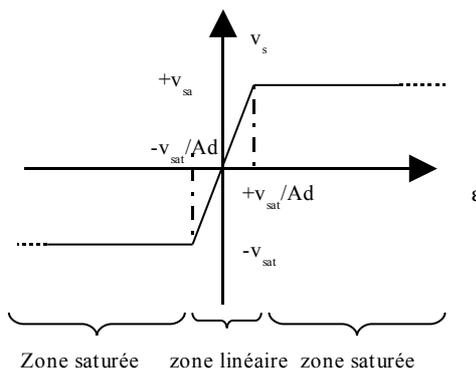


La question qui se pose alors est la suivante : pour quelle valeur de  $\epsilon$ ,  $\epsilon_{MAX}$  passe-t-on de la partie verticale de la courbe à la partie horizontale de droite ?

Réponse :  $\epsilon_{MAX} = V_{sat}/Ad = 13.5/50000 = 270 \mu V$ .

Autrement dit, la relation linéaire

$v_s = Ad \cdot \epsilon$ , ne marche que pour  $\epsilon \in [-270\mu V ; +270\mu V]$ , ou plus généralement, pour  $\epsilon \in [-V_{sat}/Ad ; +V_{sat}/Ad]$



Si on fait un zoom autour de zéro sur la courbe précédente, on obtient la courbe ci-contre.

### 3- Analyse de deux montages linéaires fondamentaux.

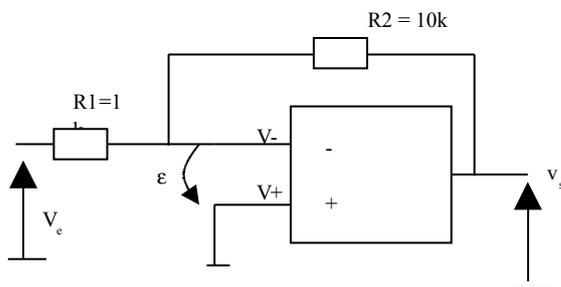
Sur la courbe précédente, nous pouvions observer une zone linéaire et 2 zones saturées.

- On dira qu'un AOP fonctionne en **régime linéaire** si sa sortie se trouve **entre +Vsat et -Vsat**, ce qui revient à dire que  $\epsilon$  est compris entre  $-V_{sat}/Ad$  et  $+V_{sat}/Ad$ .
- On dira qu'un AOP fonctionne en régime non linéaire si la sortie ne prend que les valeurs +Vsat et -Vsat.

Nous allons étudier les montages amplificateur inverseur et non inverseur.

#### 3.1- Montage amplificateur inverseur

Le montage est le suivant : on considère que  $i_-=i_+=0$  (cf. doc)



On observe que l'AOP est en contre-réaction: La résistance R2 branchée entre la sortie et l'entrée - assure cette contre-réaction.

Règle fondamentale :

**Lorsqu'un AOP subit une contre-réaction ( ce qui signifie qu'un dipôle est connecté entre la sortie et l'entrée -) alors l'AOP fonctionne dans sa région linéaire.**

Cela implique que la relation  $v_s = Ad. \epsilon$  est vrai.

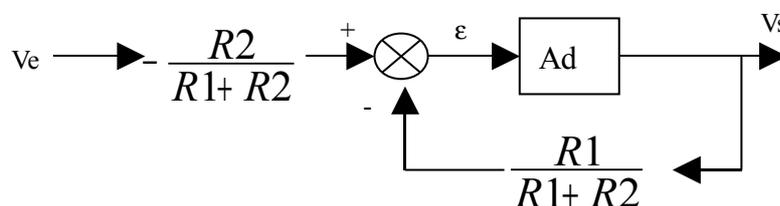
*Analyse du montage :*

Il s'agit d'un système bouclé. Exprimons la contre réaction  $\epsilon$  en fonction de Vs et Ve :

Par superposition, en appliquant la règle du pont diviseur, on trouve

$$\epsilon = - \left\{ \frac{R1}{R1+R2} V_s + \frac{R2}{R1+R2} V_e \right\}$$

On peut alors établir le schéma bloc :



En appliquant les règles de calculs des schéma blocs, on trouve Vs :

$$V_s = - \frac{R2}{R1+R2} \cdot \frac{Ad}{1 + Ad \cdot \frac{R1}{R1+R2}} \cdot V_e$$

Or, dans le pire des cas,  $Ad = 50000$ , ce qui rend le terme 1 négligeable devant  $Ad.R1/(R1+R2)$

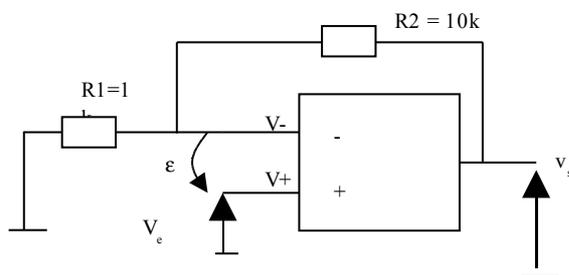
On peut donc simplifier :

$$V_s = - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Ad}{Ad \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \cdot V_e = - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_e = -10 V_e$$

En définitive, pour le montage **inverseur**, le gain (boucle fermée) vaut  $-R_2/R_1$ .

### 3.2- Montage amplificateur non inverseur

Le montage est le suivant : on considère que  $i_- = i_+ = 0$  (cf. doc)



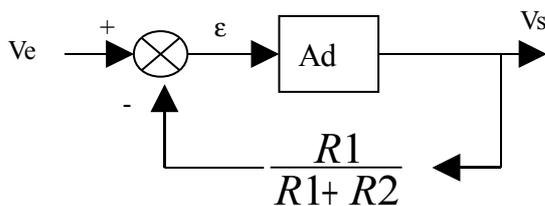
Là encore, grâce à  $R_2$ , on peut affirmer que l'AOP fonctionne dans sa région linéaire. On peut donc appliquer la formule  $V_s = Ad \cdot \epsilon$

Analyse du montage :

Exprimons  $\epsilon$  en fonction de  $V_e$  et  $V_s$  pour établir le schéma bloc :

$$\epsilon = V_e - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$$

D'où le schéma bloc :



Exprimons  $V_s$  en fonction de  $V_e$  :

$$V_s = \frac{Ad}{1 + Ad \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \cdot V_e$$

Si on considère  $Ad$  très grand, on simplifie l'expression :

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot V_e = 11 \cdot V_e$$

En définitive, pour le montage **non inverseur**, le gain (boucle fermée) vaut  $1 + R_2/R_1$ .

#### 4- Le concept de l'amplificateur opérationnel parfait.

En fin de compte les expressions des gains des deux montages précédents sont relativement simples. Pourtant, il a fallu pas mal de lignes pour y parvenir. Ceci s'explique par la simplification qui est faite à la fin du calcul. On va voir que cette simplification peut être faite dès le départ grâce au modèle **parfait** de l'AOP.

**L'AOP parfait** (fictif, mais très pratique pour le calcul) a les caractéristiques suivantes :

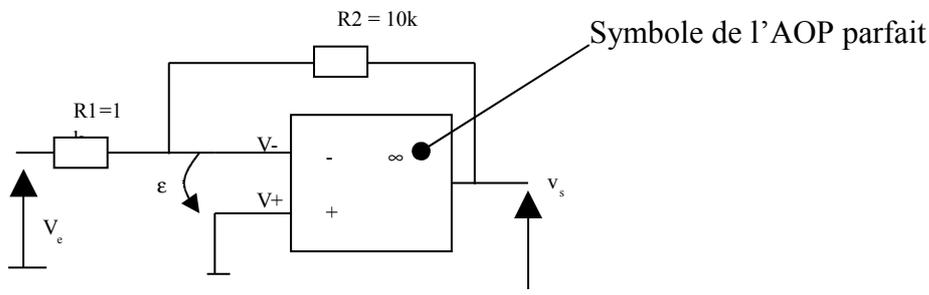
- $A_d = \infty$
- $\varepsilon = 0$  dans le régime linéaire
- $i_+ = i_- = 0$
- $\pm V_{sat} = \pm V_{cc}$
- $f_T = \infty$

**AOP réel**

- $A_d$  très grand,  $>50000$
- $\varepsilon$  très petit,  $|\varepsilon| < 270 \mu V$
- $i_+$  et  $i_-$  très faible,  $200 \text{ pA}$
- $\pm V_{sat} \approx \pm V_{cc}$ ,  $\pm 13.5$  pour  $\pm 15V$  d'alim
- $f_T$  très grande,  $>3\text{MHz}$

**Remarque importante** : Le fait que  $\varepsilon = 0$  en régime linéaire, est évident à partir du moment où l'on considère que  $A_d = \infty$ . Il ne faut pas oublier que fonctionner en **régime linéaire**, cela suppose pour l'AOP que sa sortie soit comprise entre  $+V_{sat}$  et  $-V_{sat}$ . Dès lors  $\varepsilon = V_{sat}/A_d$  ne peut qu'être nul.

Reprenons le montage inverseur, et voyons la simplicité de calcul :



L'AOP subit une contre-réaction donc l'AOP travaille en région linéaire. Donc,  $\varepsilon = 0$ , c'est à dire  $V_+ = V_-$ .

$$\text{On écrit donc } \varepsilon = - \left\{ \frac{R1}{R1+R2} V_s + \frac{R2}{R1+R2} V_e \right\} = 0 \text{ donc } V_s \cdot R1 = -V_e \cdot R2$$

$$\text{d'où } V_s = -(R2/R1) \cdot V_e$$

c.q.f.d.