



# Cours

# ELECTRONIQUE

Dispositifs électroniques à base de l'amplificateur opérationnel

email : [nasser\\_baghdad @ yahoo.fr](mailto:nasser_baghdad@yahoo.fr)

## Contenu du programme

**Chapitre I : Généralités sur l'amplificateur opérationnel**

**Chapitre II : Montages à régime linéaire indépendants de la fréquence**

**Chapitre III : Montages à régime linéaire dépendants de la fréquence**

**Chapitre IV : Montages à régime non linéaire**

**Chapitre V : Oscillateurs sinusoïdaux**

**Chapitre VI : Multivibrateurs**

**Chapitre VII : Convertisseurs A/N et N/A**



## Chapitre I

# Généralités sur l'amplificateur opérationnel

**I. Définition**

**II. Symbole et notation**

**III. Brochage**

**IV. Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte**

**V. Schéma électrique équivalent de l'amplificateur opérationnel**

**VI. Propriétés de de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte**

**VII. Fonction de transfert de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte**

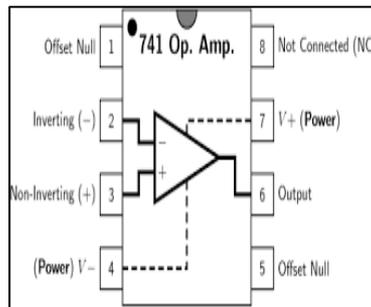
**VIII. Fonctionnement linéaire et non linéaire de l'amplificateur opérationnel**

**IX. Différents modes de fonctionnement**

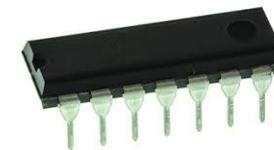
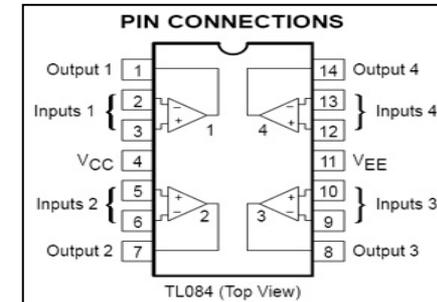
**X Hypothèses simplificatrices pour un fonctionnement en linéaire**

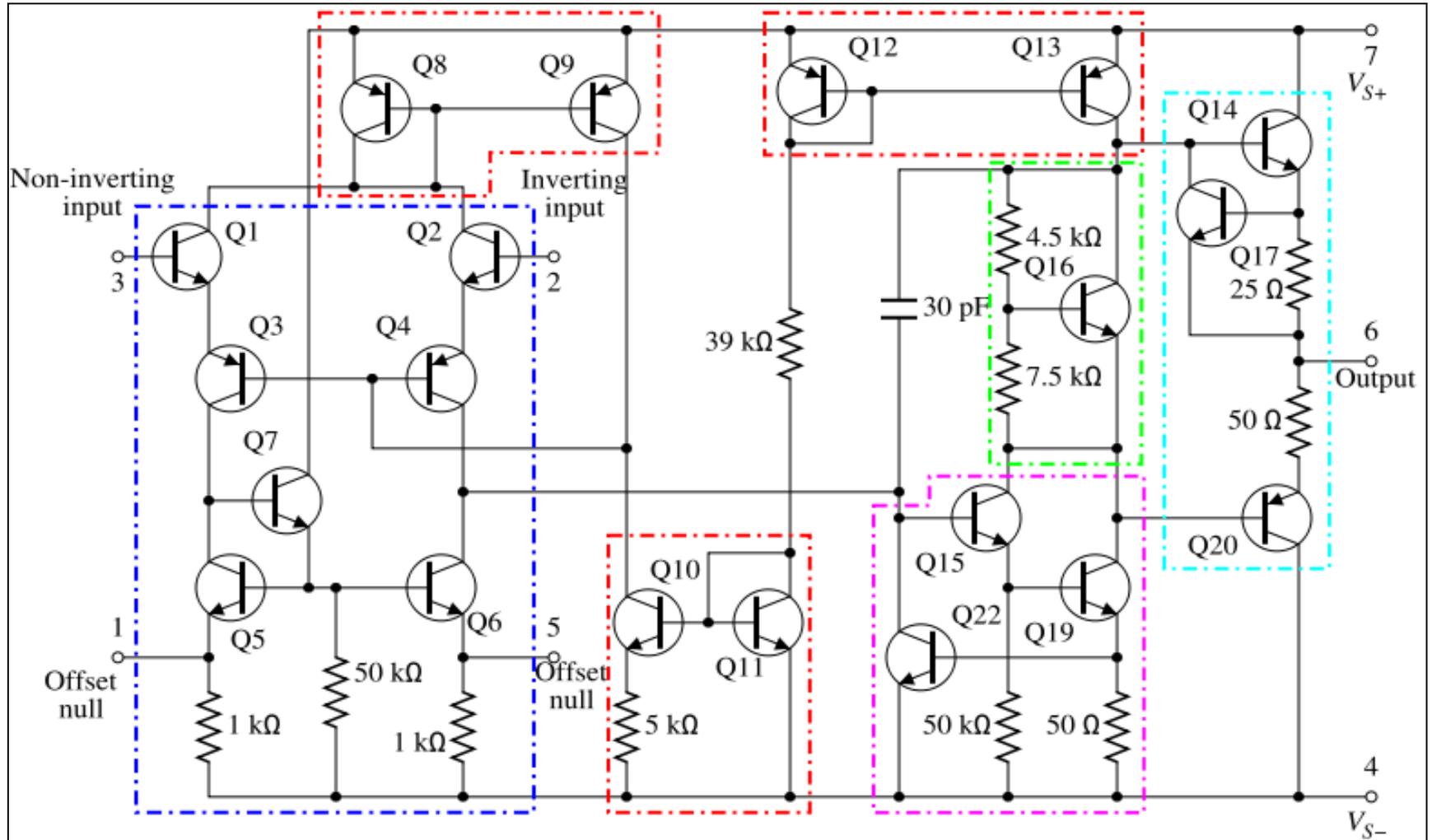
## I. Définition

- ▶ Un amplificateur opérationnel (A.O.) est un macro-composant qui contient une vingtaine de transistors (TB ou/et TEC) intégrés sur une même puce semi-conductrice de dimension de l'ordre du mm<sup>2</sup>.
- ▶ La polarisation des transistors internes au composant AO est réalisée à l'aide de deux alimentations continues symétriques  $V^+ = 15V$  et  $V^- = -15V$ .
- ▶ L'amplificateur opérationnel peut être utilisé dans un grand nombre de montages pour, comme son nom l'indique, réaliser de l'amplification ou/et effectuer des opérations (mathématiques).



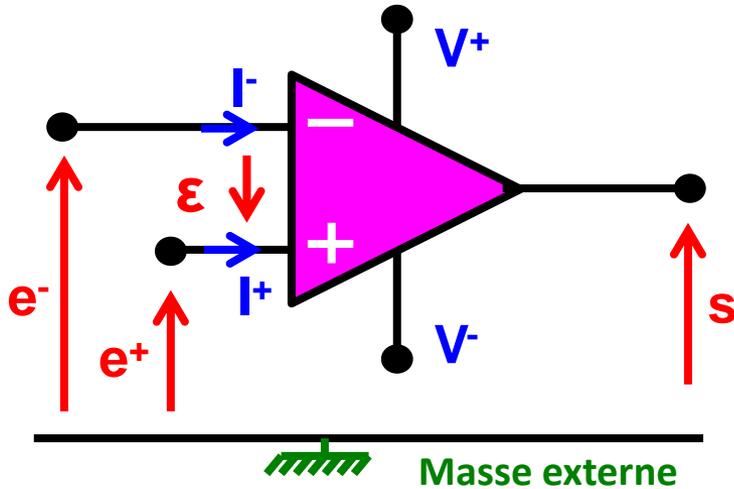
Circuit Intégré (C.I.L)



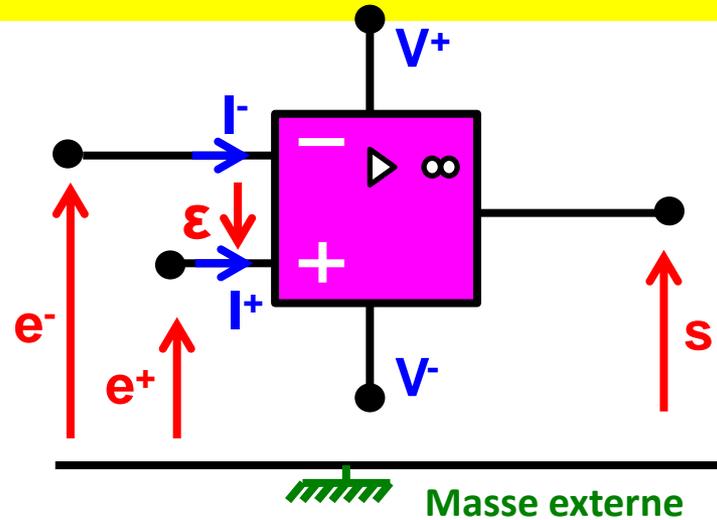


**Amplificateur opérationnel**

## II. Symbole et notation



Américain



Européen

$V^+ = + 15 \text{ V}$  : tension positive d'alimentation.

$V^- = - 15 \text{ V}$  : tension négative d'alimentation.

$e^+$  : borne d'entrée non inverseuse.

$e^-$  : borne d'entrée inverseuse.

$I^+$  : courant de l'entrée non inverseuse

$I^-$  : courant de l'entrée inverseuse

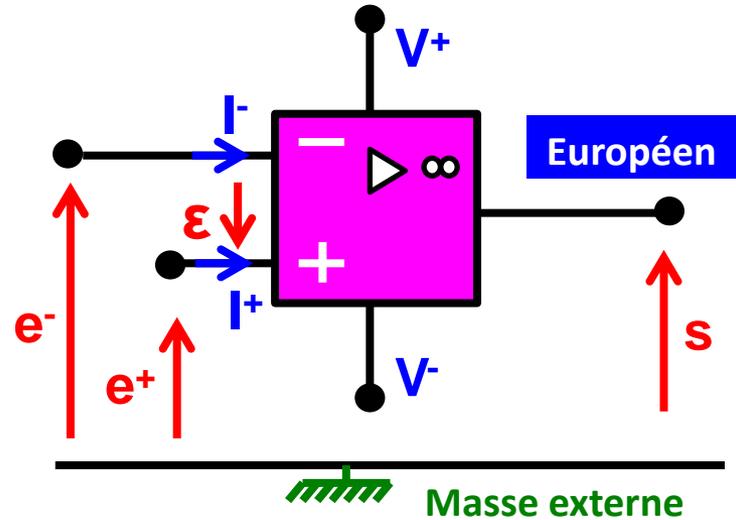
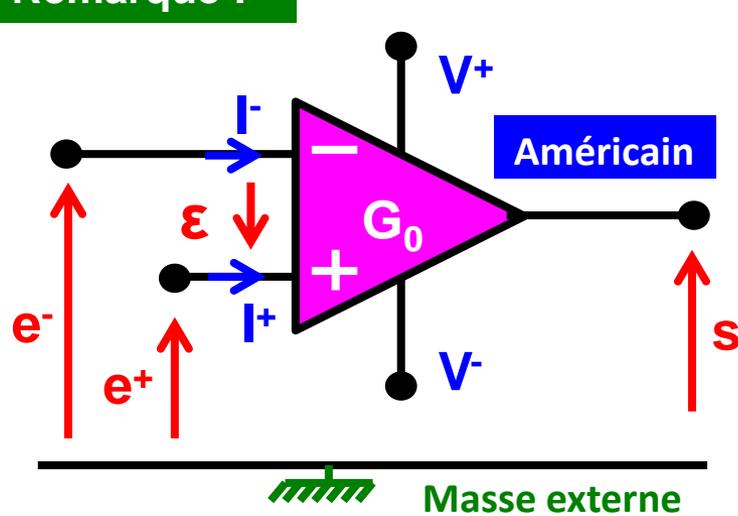
$\varepsilon = e^+ - e^-$  : tension différentielle d'entrée

$s$  : borne de sortie.

$$s = G_0 \cdot \varepsilon$$

$$G_0 \approx 10^5$$

**Remarque :**

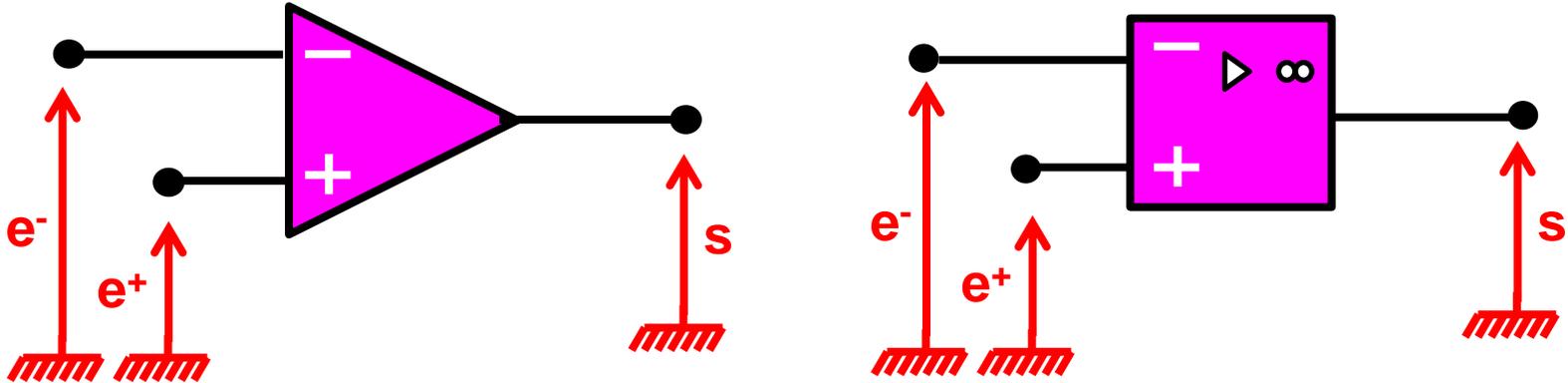


■  $G_0$  : amplification en tension statique en boucle ouverte (ou gain continu) (ou gain en tension différentielle statique).

■ Le triangle «  $\blacktriangleright$  » est le symbole de l'amplification et rappelle qu'il s'agit d'un composant unidirectionnel

■ Le symbole «  $\infty$  » qui se trouve à l'intérieur du schéma du composant signifie que l'on peut idéaliser la caractéristique de transfert de l'AO.

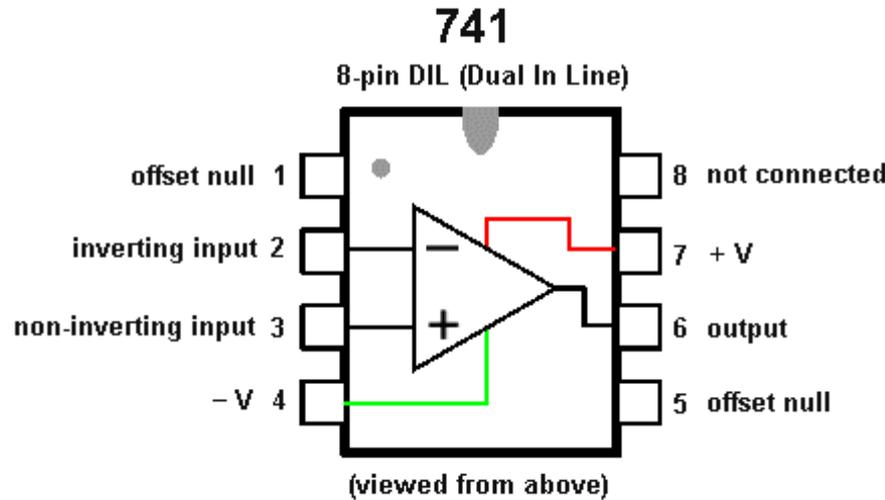
## Symbole simplifié



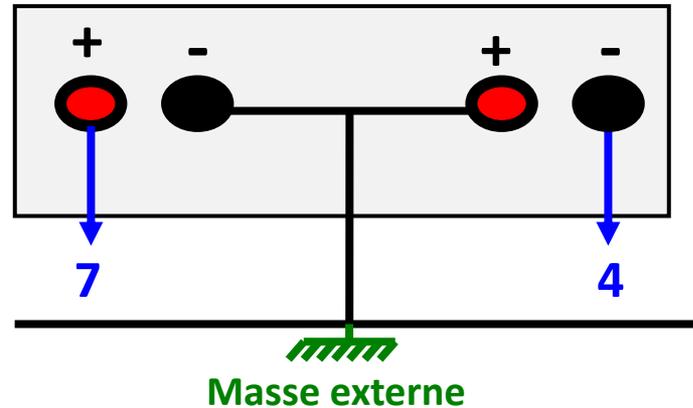
- ▶ Dans le symbole simplifié de l'amplificateur opérationnel (l'alimentation n'est pas toujours représentée car elle n'intervient pas dans le calcul, mais elle est indispensable en pratique).
- ▶ L'AO ne possède pas de masse propre à lui, la masse externe sera donc ôtée du symbole.
- ▶ L'AO sera considéré tout le temps idéal, donc  $I^+ = I^- = 0$ , les courants des entrées seront retirés du symbole.
- ▶ Si l'on s'intéressera à l'utilisation de l'AO en fonctionnement linéaire, donc  $\varepsilon = 0$  et  $e^+ = e^-$ , la tension différentielle sera donc retirée du symbole.

## III. Brochage

- Il possède 8 bornes (ou 8 broches) mais 5 bornes sont généralement utilisées :



- La masse des alimentations symétriques est la référence de tous les potentiels



## IV. Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte

### Amplificateur réel (AOR) en BO

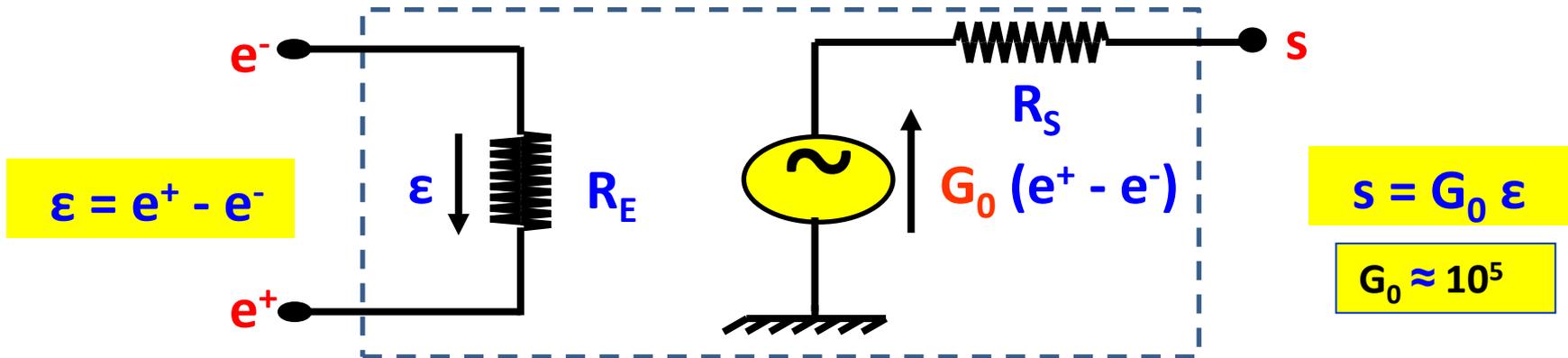
- Résistance d'entrée différentielle très élevée :  $R_E \geq 1 \text{ M}\Omega$
- Résistance de sortie très faible :  $R_S \leq 50 \Omega$
- Gain en tension différentielle statique (ou gain continu) très élevé :  $G_0 \approx 10^5$

### Amplificateur idéal (AOI) en BO

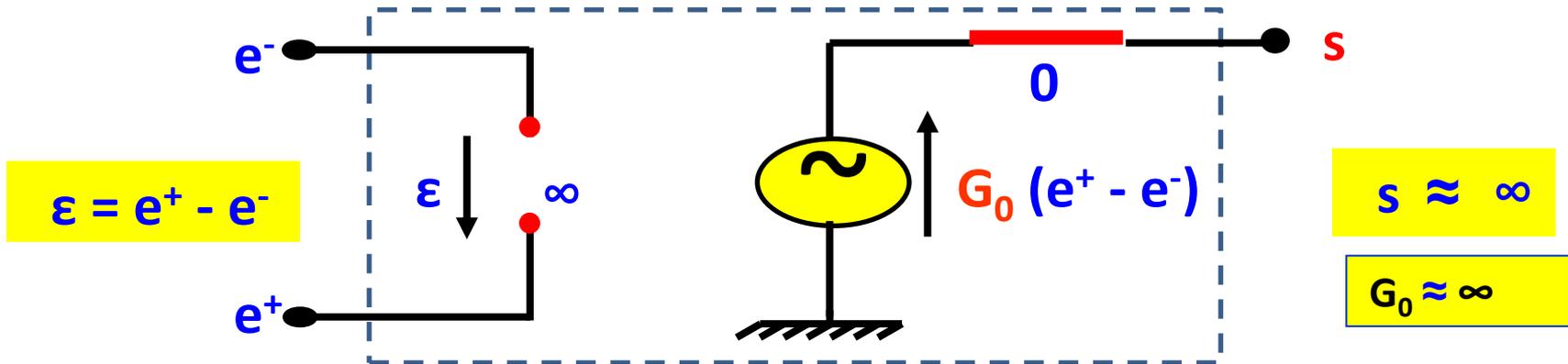
- Résistance d'entrée différentielle :  $R_E \approx \infty$   $\implies I^- = I^+ = 0$
- Résistance de sortie :  $R_S \approx 0 \Omega$
- Gain différentielle statique :  $G_0 \approx \infty$

## V. Schéma électrique équivalent de l'amplificateur opérationnel

### Amplificateur réel (AOR) en BO



### Amplificateur idéal (AOI) en BO



**AOI ==>  $I^+ = I^- = 0$  car  $R_E \approx \infty$**

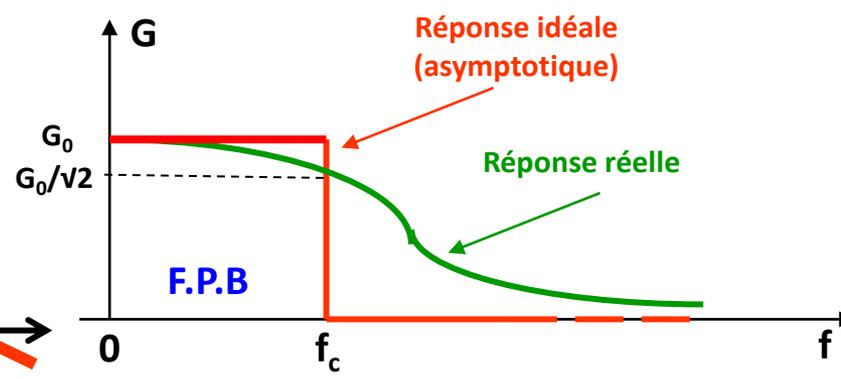
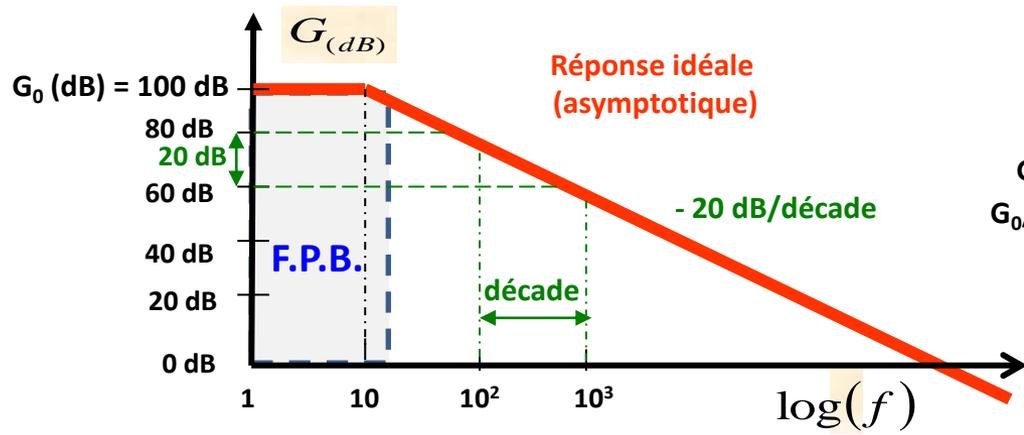
## VI. Propriétés de de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte

### AOR en BO

- L'amplification en tension (ou gain en boucle ouverte) dépend de la fréquence.

$$\underline{G}(\omega) = \frac{s}{\varepsilon} = \frac{G_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} = \frac{G_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pulsation de coupure } \omega_c = \text{qcq } 10 \text{ rad / s} \\ f_c = \text{qcq } 100 \text{ Hz} \Rightarrow \text{dispositif TBF} \\ f = 0 \Rightarrow G = G_0 = 10^5 \text{ soit } 100 \text{ dB} \end{array} \right.$$

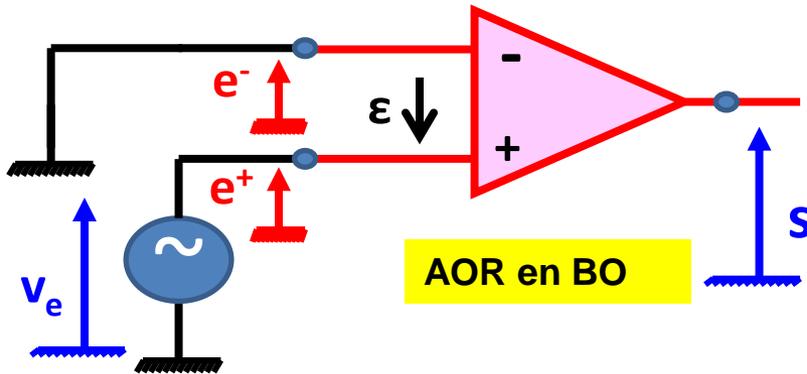


- L'AOR en BO se comporte comme un filtre passe-bas actif du 1<sup>er</sup> ordre
- La bande passante BP ou la bande d'utilisation de l'AOR va de 0 à  $f_c$ .
- Comme  $f_c = \text{à qcq } 100 \text{ Hz}$  alors l'AO en BO est un dispositif TBF (de 0 à 30 kHz)

**AO en BO est un dispositif TBF**

## VII. Fonction de transfert de l'AO en boucle Ouverte : $s = f(\epsilon)$

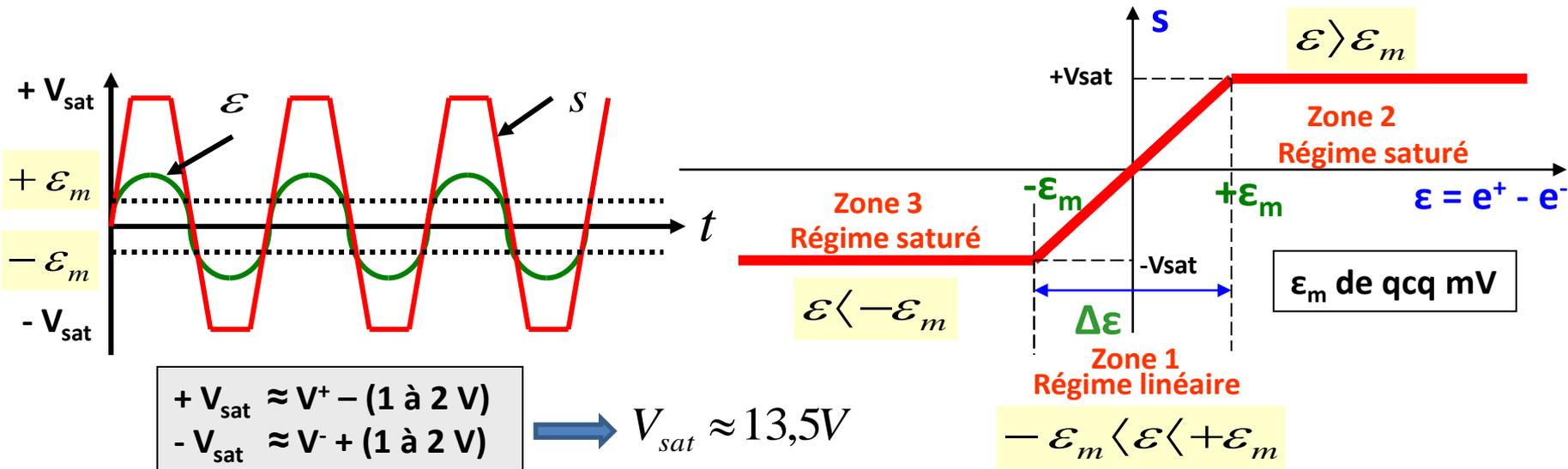
AOI en BO :  $G_0 \approx 10^5$

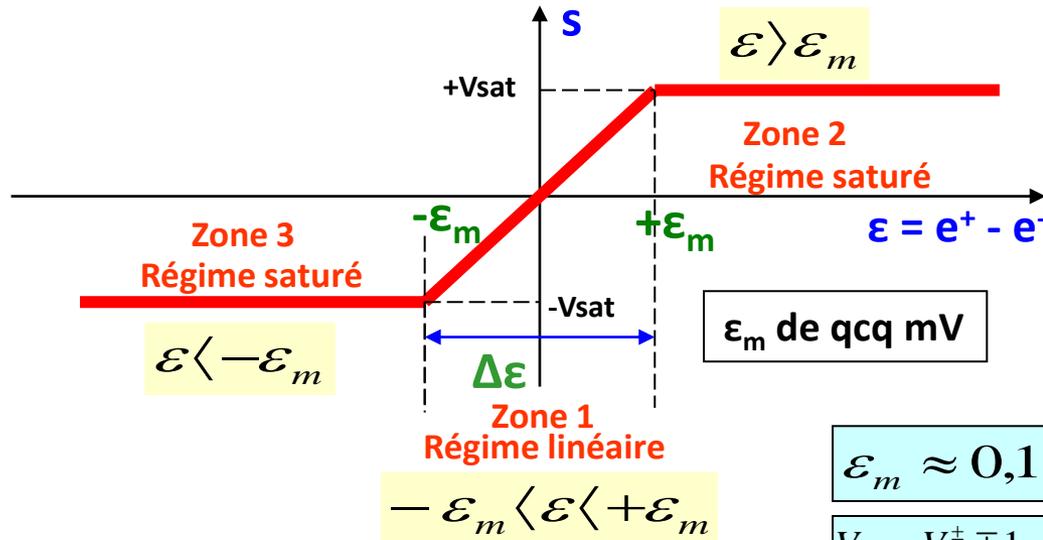


$$\left. \begin{array}{l} e^- = 0 \\ e^+ = v_e \end{array} \right\} \Rightarrow \epsilon = e^+ - e^- = +v_e$$

$$s = +G_0 \cdot v_e$$

► La fonction de transfert  $s = f(\epsilon)$  est fournie en fonctionnement de l'AO en BO





$$\epsilon_m \approx 0,13mV = 13 \cdot 10^{-5} V$$

$$V_{sat} = V^{\pm} \mp 1 \text{ à } 2V \text{ soit } V_{sat} \approx 13,5V$$

On distingue trois zones de fonctionnement :

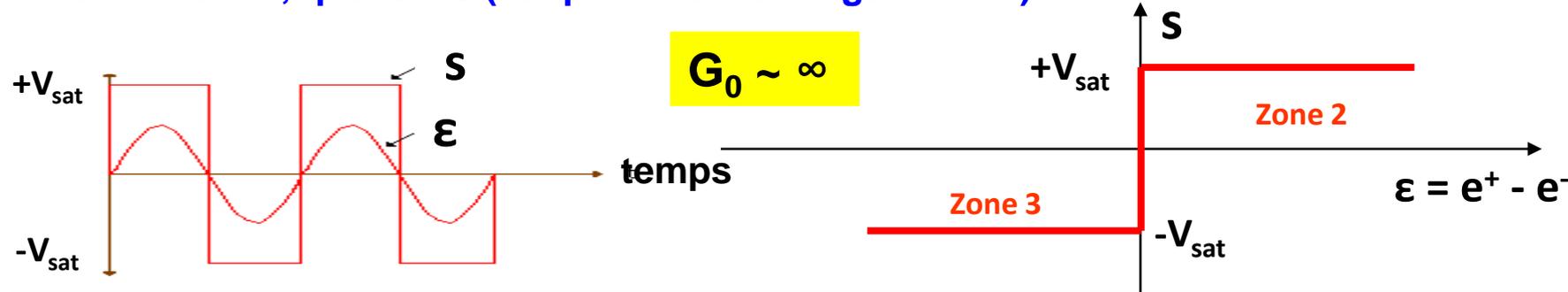
- Zone 1 :  $s = G_0 \epsilon$
- Zone 2 :  $s = +V_{sat}$
- Zone 3 :  $s = -V_{sat}$

► Dans le domaine linéaire :

$$s = G_0 \epsilon \quad \text{avec} \quad G_0 = \frac{s}{\epsilon} = \frac{\Delta s}{\Delta \epsilon} = \frac{2 \cdot V_{sat}}{2 \cdot \epsilon_m} = \frac{13,5 V}{13 \cdot 10^{-5} V} \approx 10^5$$

**AOI en BO :  $G_0 \rightarrow \infty$**

► On constate que la tension différentielle  $\epsilon$  est très faible aux autres tensions du circuit (de l'ordre du 1/10 du mV, le plus souvent) ; on pourra ainsi considérer, dans la zone linéaire, que  $\epsilon = 0$  (ce qui revient à un gain infini) :



- Zone 1 se réduit à :  $\epsilon = 0$        $e^+ = e^-$       et       $-V_{sat} < s < +V_{sat}$       **FL**
- Zones 2 et 3 :  
 si  $\epsilon > 0$        $e^+ > e^-$       alors       $s = +V_{sat}$       **FNL**  
 si  $\epsilon < 0$        $e^+ < e^-$       alors       $s = -V_{sat}$

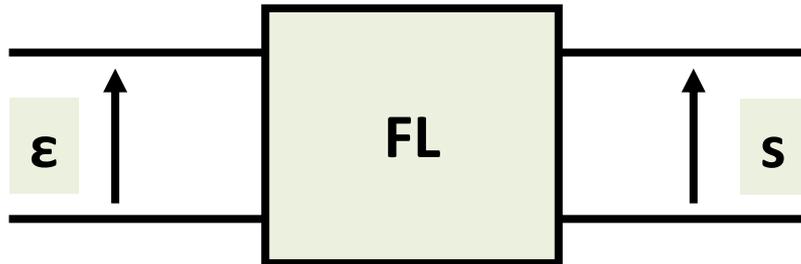
**Si  $\epsilon = 0 \iff e^+ = e^-$  alors FL**

$\epsilon = 0$       soit       $e^- = e^+$   
 $\frac{s}{\epsilon} = \frac{s}{0} = G_0 \rightarrow \infty$       mais       $|s| < V_{sat} \approx 13,5V$

} dans le domaine linéaire

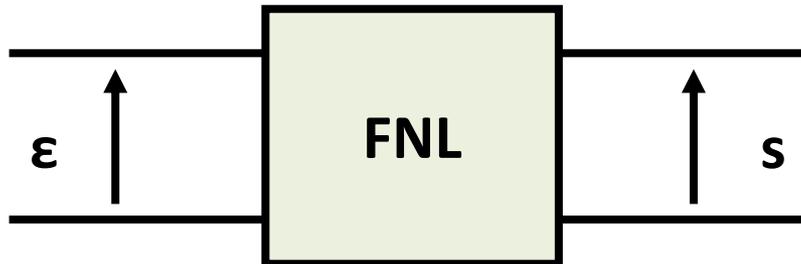
## VIII. Fonctionnement linéaire et non linéaire de l'AO

### Fonctionnement non linéaire



Signal de sortie  $s$  a la même  
forme que celui de l'entrée  $e$

### Fonctionnement linéaire



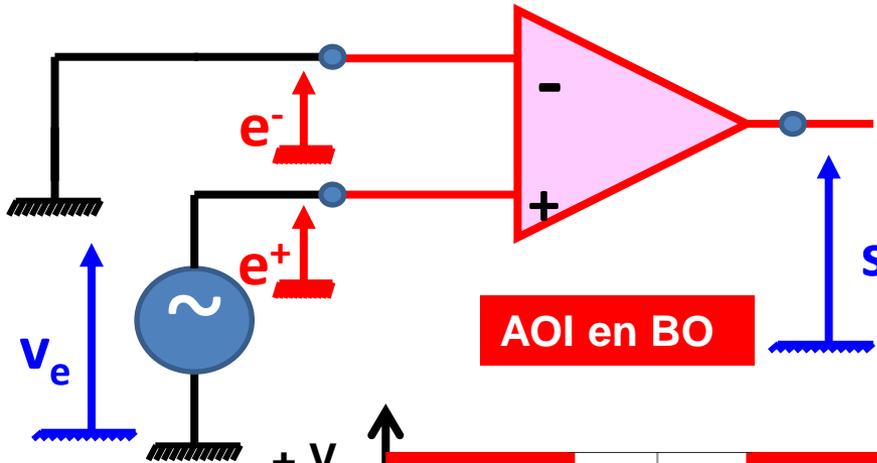
Signal de sortie  $s$  n'a pas la même  
forme que celui de l'entrée  $e$   
ou complètement déformé

**Exemple n°1 de FNL :**

$$s = G_0 \cdot \varepsilon$$

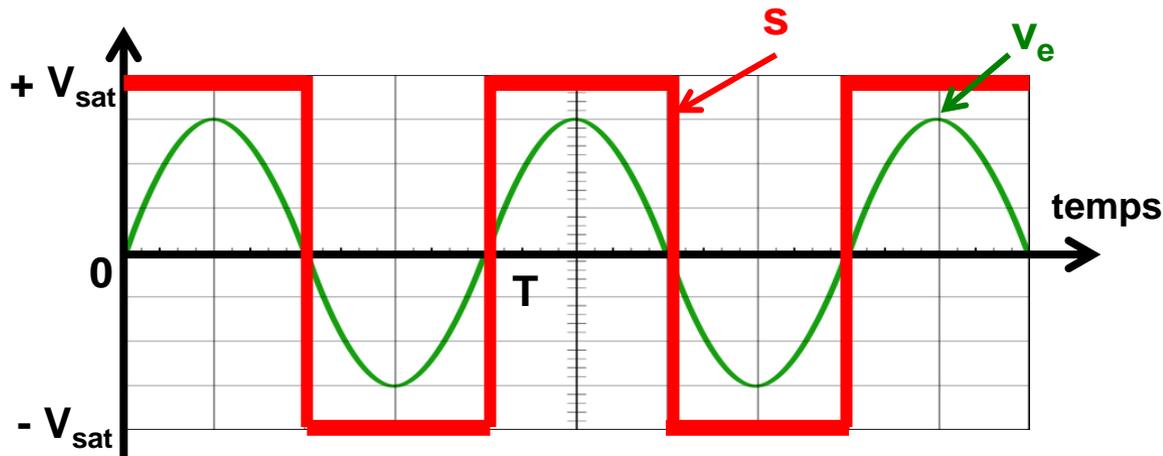
$$AOI \Rightarrow G_0 \rightarrow \infty$$

$$\text{Le moindre petit } \varepsilon \Rightarrow \begin{cases} \text{Théoriquement : } s \rightarrow \infty \\ \text{Pratiquement : } s \rightarrow \pm V_{sat} \end{cases}$$



$$\left. \begin{matrix} e^- = 0 \\ e^+ = v_e \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varepsilon = e^+ - e^- = +v_e$$

$$s = +G_0 \cdot v_e$$



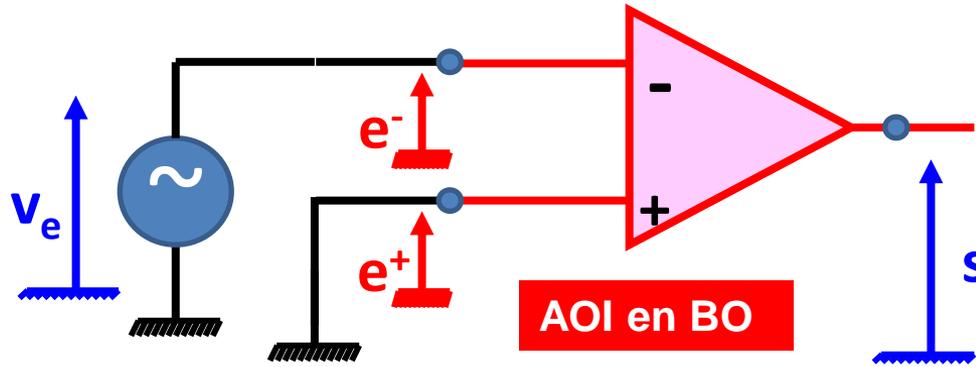
*s et v\_e en phase*

**Exemple n°2 de FNL :**

$$s = G_0 \cdot \varepsilon$$

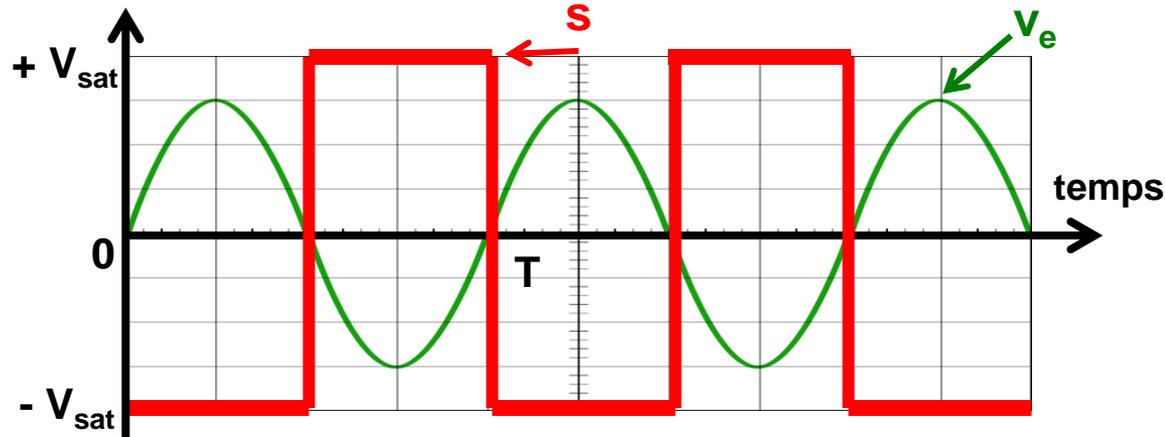
AOI  $\Rightarrow G_0 \rightarrow \infty$

Le moindre petit  $\varepsilon \Rightarrow \begin{cases} \text{Théoriquement : } s \rightarrow \infty \\ \text{Pratiquement : } s \rightarrow \pm V_{sat} \end{cases}$



$$\left. \begin{matrix} e^+ = 0 \\ e^- = v_e \end{matrix} \right\} \Rightarrow \varepsilon = e^+ - e^- = -v_e$$

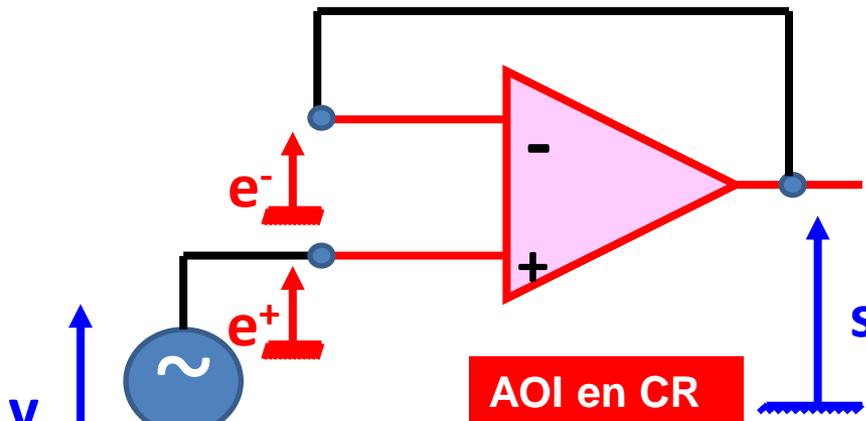
$$s = -G_0 \cdot v_e$$



*s et v\_e en opposition de phase*

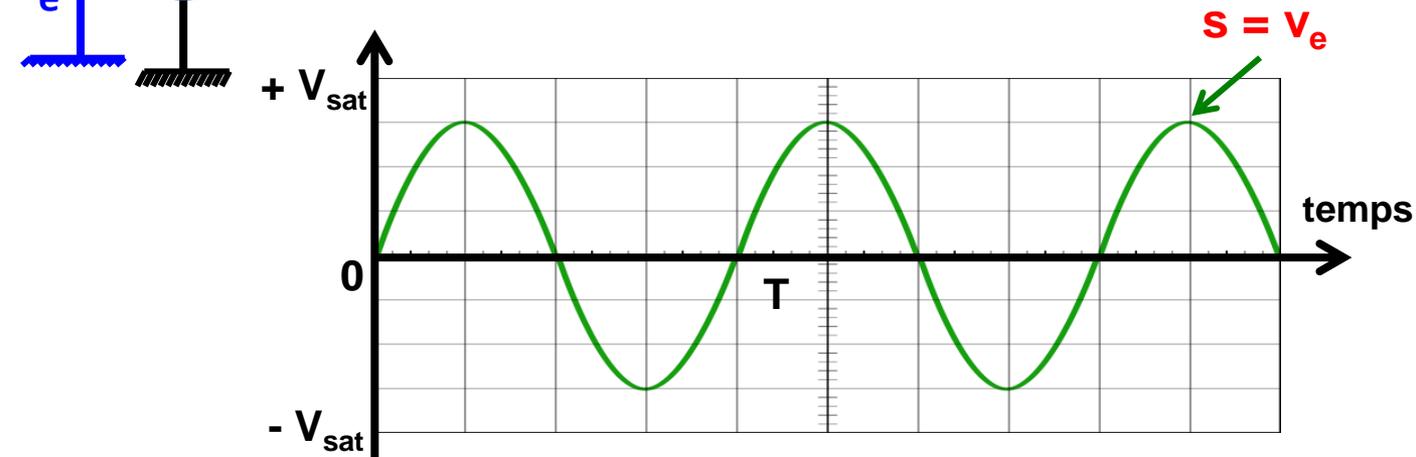
**Exemple de FL :**

*AOI en contre réaction*  $\Rightarrow \epsilon = 0 \quad -V_{sat} < s < +V_{sat}$   
*Autrement*  $\Rightarrow G \ll G_0 \quad \text{et} \quad B \gg B_0$



$$\left. \begin{matrix} e^- = s \\ e^+ = v_e \end{matrix} \right\} \Rightarrow \epsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^-$$

$$s = v_e$$



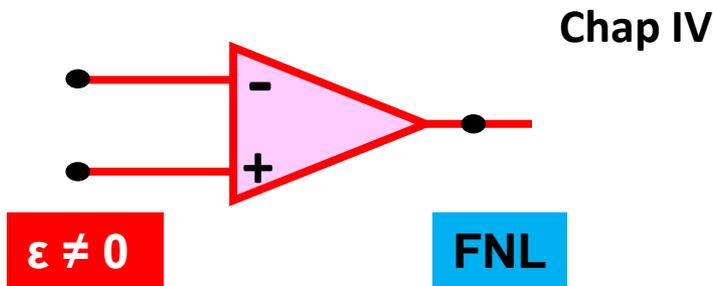
$$s = v_e$$

$$G = \frac{s}{v_e} = 1$$

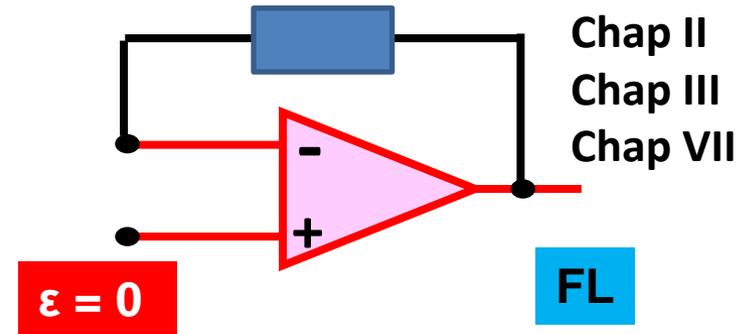
## IX. Différents modes de fonctionnement

► Il existe 4 façons de faire fonctionner l'AO :

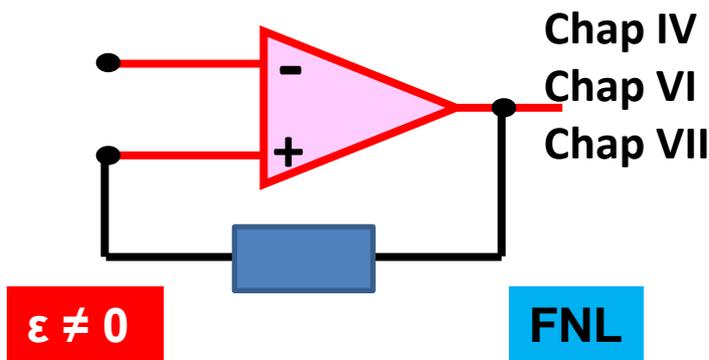
### AO en boucle ouverte



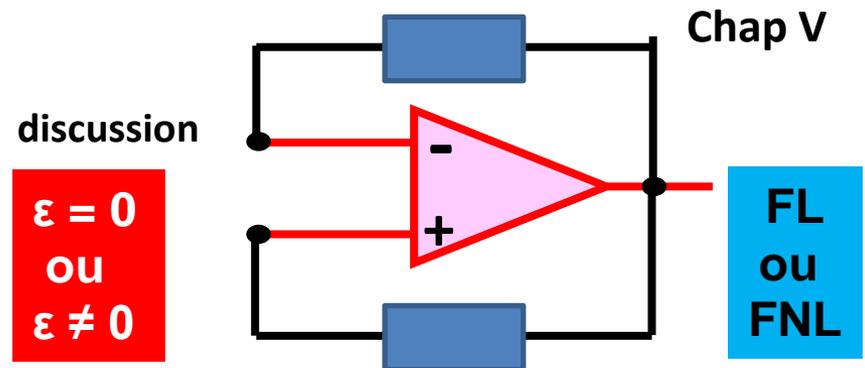
### AO en réaction négative (ou en rétroaction) (ou en contre réaction)



### AO en réaction positive (ou en réaction)



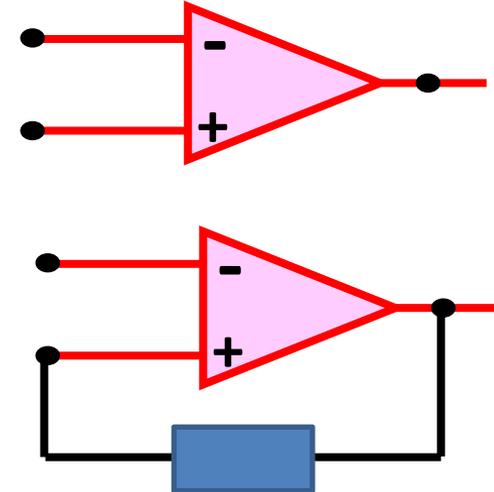
### AO en réaction positive et négative



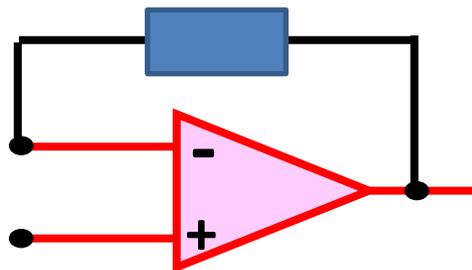
CR (ou RN)  $\implies \epsilon = 0 \iff e^+ = e^-$  alors FL

**Boucle ouverte ou Réaction positive :**  
**Fonctionnement en régime saturé**  
 (ou non linéaire)

si  $e^+ > e^-$  alors  $s = +V_{sat}$   
 si  $e^+ < e^-$  alors  $s = -V_{sat}$



**Réaction négative (ou contre réaction) :**  
**Fonctionnement en régime linéaire**



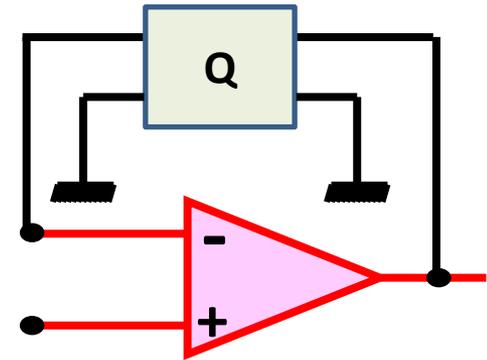
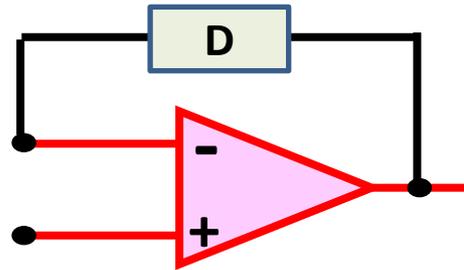
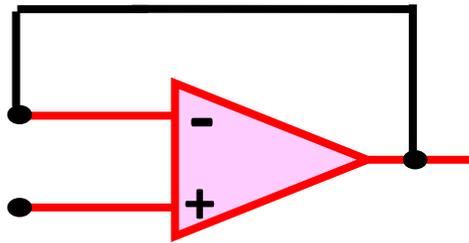
$\epsilon = 0$   $e^+ = e^-$  et  $-V_{sat} < s < +V_{sat}$

**La contre réaction : diminue le gain en tension et augmente la bande passante**

## X. Hypothèses simplificatrices pour un fonctionnement en linéaire

Résistance d'entrée infinie (AOI)  $\implies I^+ = I^- = 0$

Contre réaction  $\implies \varepsilon = 0 \iff e^+ = e^-$



Circuit de contre réaction peut être un fil, un dipôle ou un quadripôle

## Récapitulation de l'essentiel des résultats

L'AO en BO est un dispositif TBF

Le fonctionnement de l'AO en BO est non linéaire

1<sup>ère</sup> hypothèse simplificatrice

AOI  $\implies I^+ = I^- = 0$  car  $R_e \simeq \infty$

2<sup>ème</sup> hypothèse simplificatrice

Contre réaction  $\implies \varepsilon = 0 \iff e^+ = e^-$  alors FL

La contre réaction augmente la bande d'utilisation de l'AO



## Fin du chapitre I

# Généralités sur l'amplificateur opérationnel