



## Contenu du programme

**Chapitre I : Généralités**

**Chapitre II : Régime continu**

**Chapitre III : Régime alternatif sinusoïdal**

**Chapitre IV : Les quadripôles**

**Chapitre V : Les filtres passifs**

**Chapitre VI : Les diodes**

**Chapitre VII : Le transistor bipolaire**

**Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel**



**Partie A**  
**Circuits électriques**

**Partie B**  
**Circuits électroniques**



## Chapitre VIII

# L'amplificateur opérationnel



## Sommaire

- I. Généralités sur l'amplificateur opérationnel
- II. Montages à régime linéaire indépendants de la fréquence
- III. Montages à régime linéaire dépendants de la fréquence
- IV. Montages à régime non linéaire



## I. Généralités sur l'amplificateur opérationnel



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



- 1°) Définition
- 2°) Symbole et notation
- 3°) Brochage
- 4°) Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte
- 5°) Schéma équivalent électrique de l'amplificateur opérationnel
- 6°) Propriétés de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte
- 7°) Fonction de transfert de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte
- 8°) Fonctionnement linéaire et non linéaire de l'amplificateur opérationnel
- 9°) Différents modes de fonctionnement
- 10°) Hypothèses simplificatrices pour un fonctionnement en linéaire

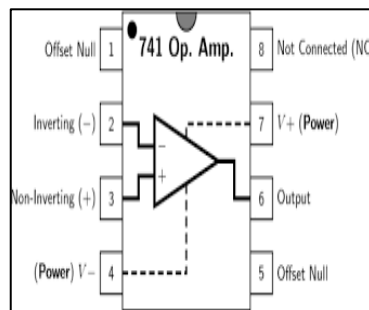


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

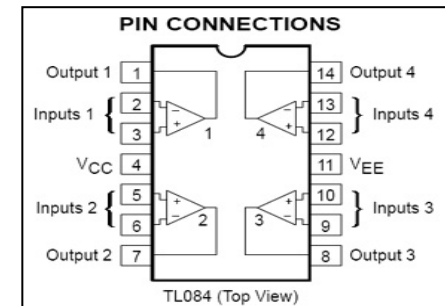


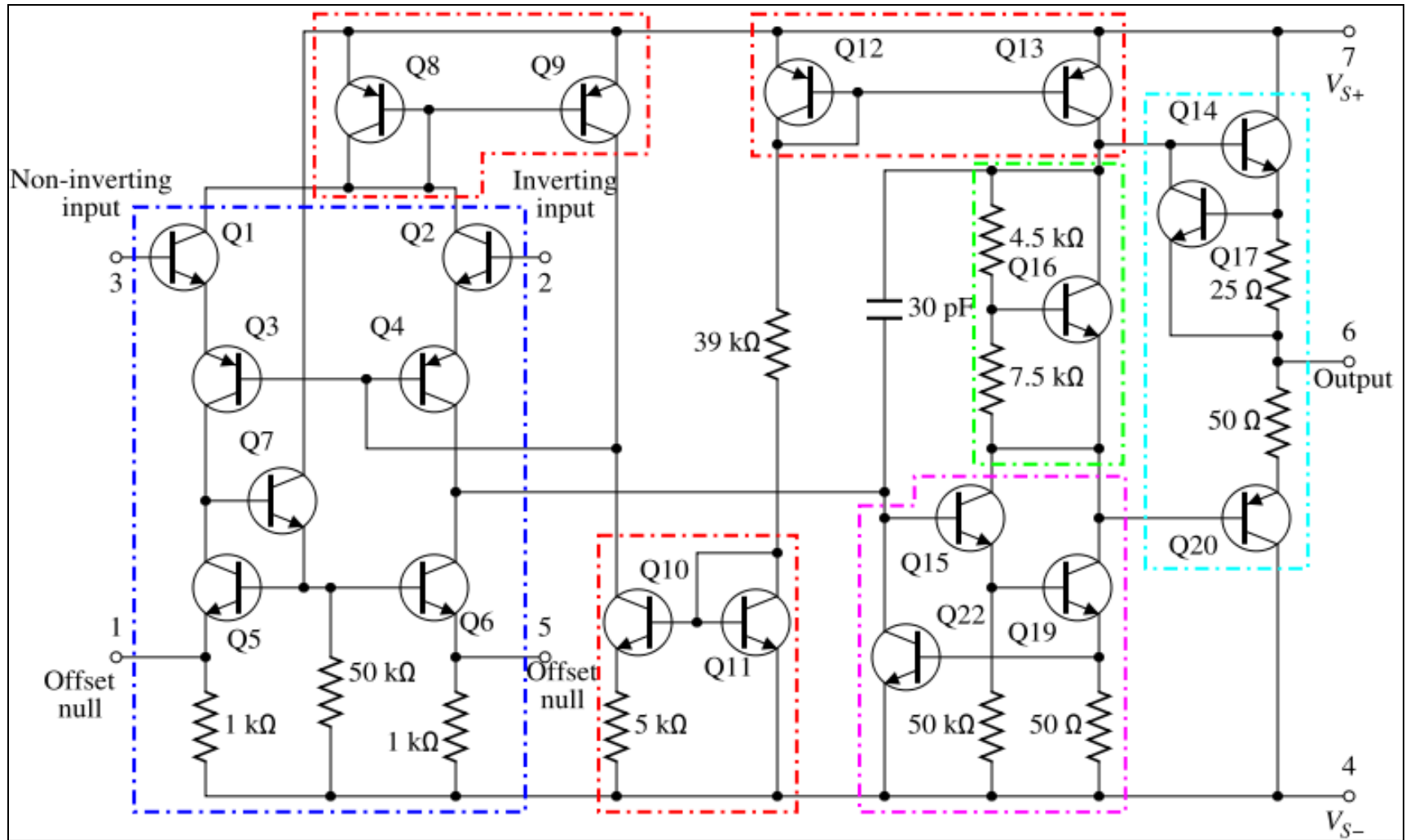
## 1°) Définition

- ▶ 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'AO est aussi appelé circuit intégré linéaire (C.I.L.).
- ▶ 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)





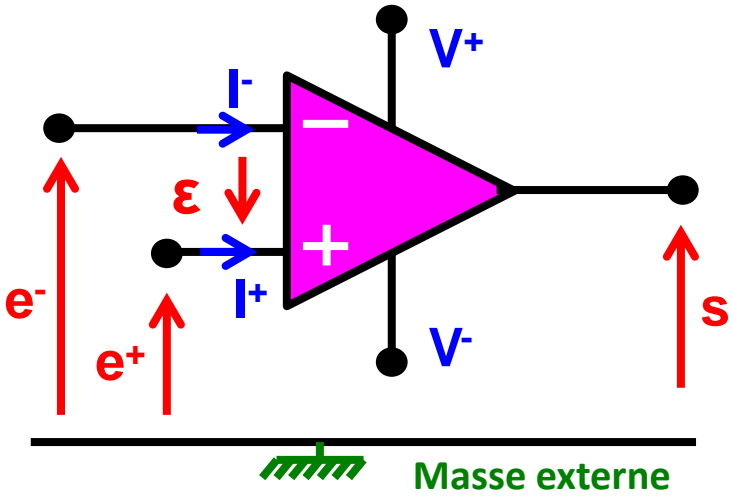
**Amplificateur opérationnel**



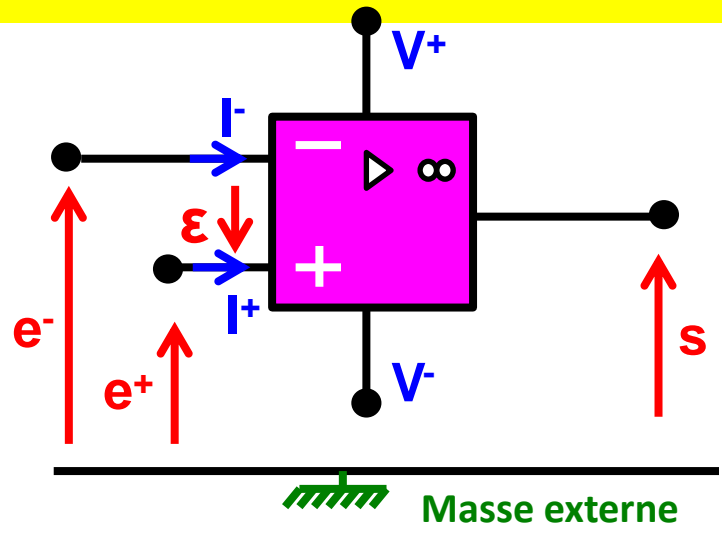
# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 2°) Symbole et notation



**Américain**



**Européen**

- $V^+ = + 15 V$  : tension positive d'alimentation.
- $V^- = - 15 V$  : tension négative d'alimentation.
- $e^+$  : borne d'entrée non inverseuse.
- $e^-$  : borne d'entrée inverseuse.
- $I^+$  : courant d'entrée non inverseuse
- $I^-$  : courant d'entrée inverseuse
- $\epsilon = e^+ - e^-$  : tension différentielle d'entrée
- $s$  : borne de sortie.

$$s = G_0 \cdot \epsilon$$

$$G_0 \approx 10^5$$

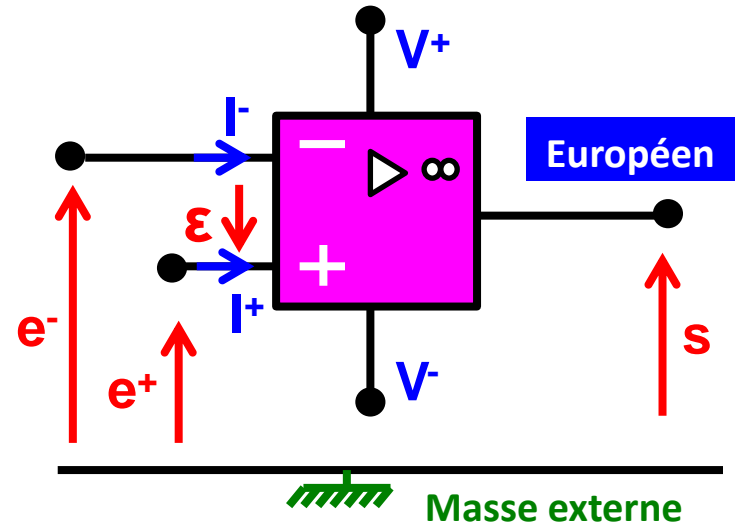
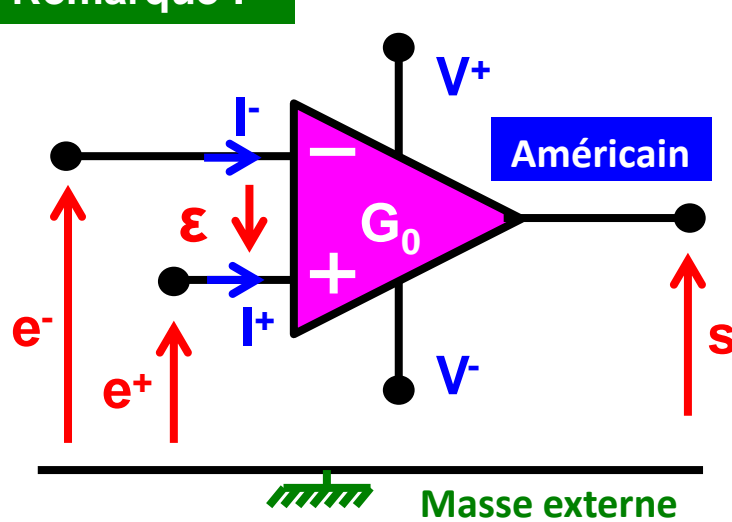




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



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

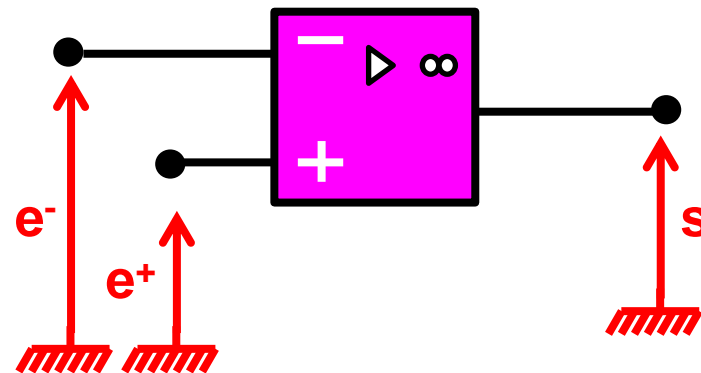
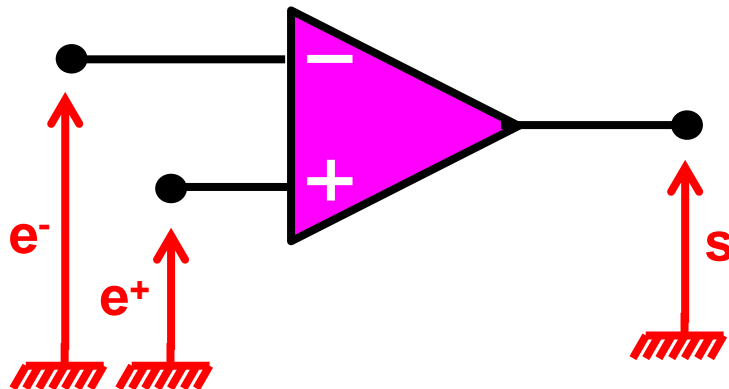
■ Le symbole «  $\infty$  » qui se trouve à l'intérieur du schéma du composant signifie que l'on peut idéaliser la caractéristique de transfert de l'AIL.



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 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.
- ▶ 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.

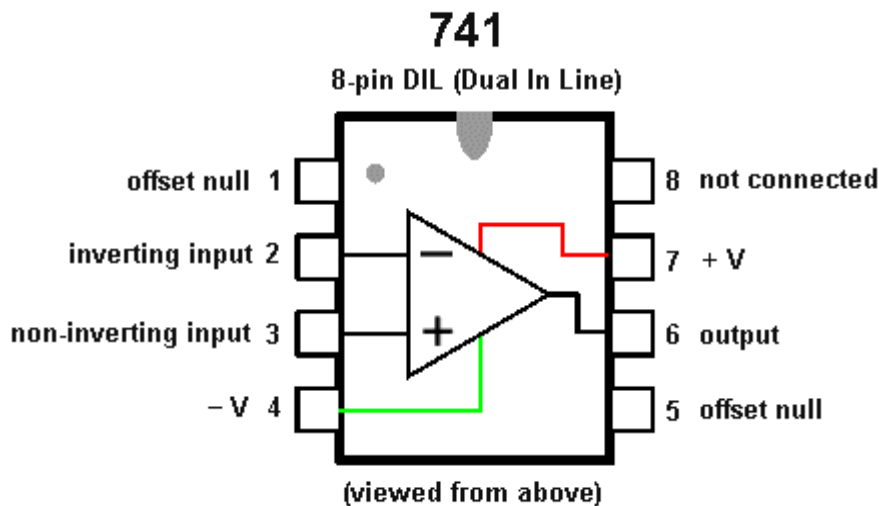


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

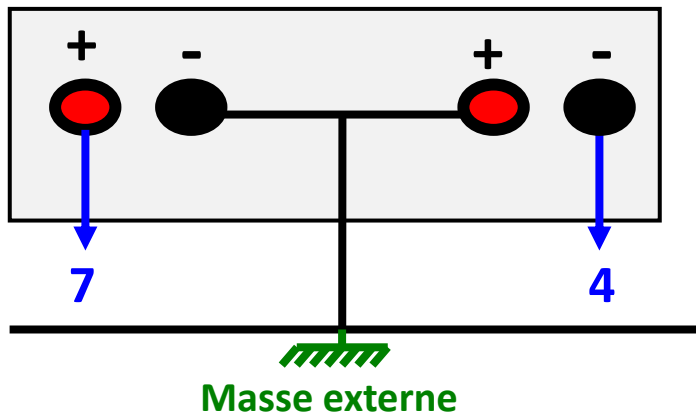


## 3°) Brochage

- 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





## 4°) Caractéristiques de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte

### Amplificateur réel en BO

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

### Amplificateur idéal en BO

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

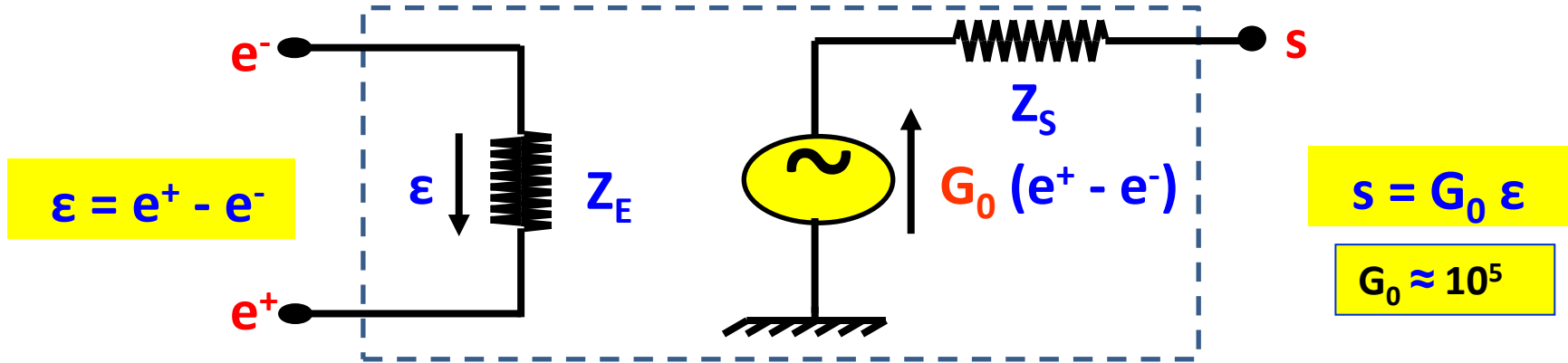


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

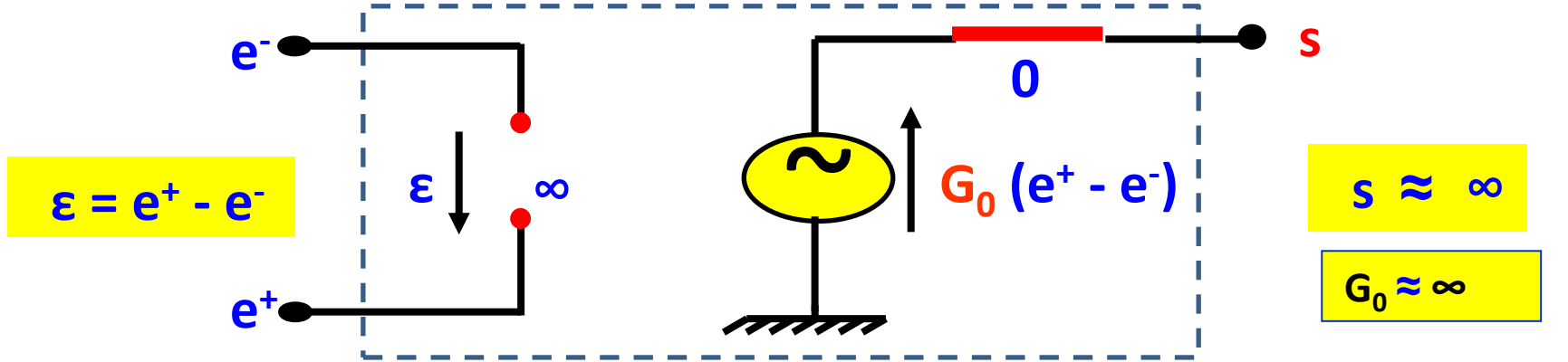


## 5°) Schéma équivalent électrique de l'amplificateur opérationnel

### Amplificateur réel (AOR) en BO



### Amplificateur idéal (AOI) en BO



**AOI ==> I+ = I- = 0 car ZE = RE ≈ ∞**



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



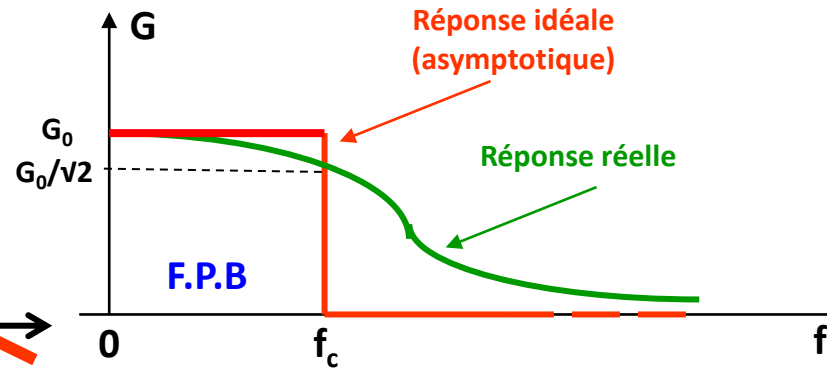
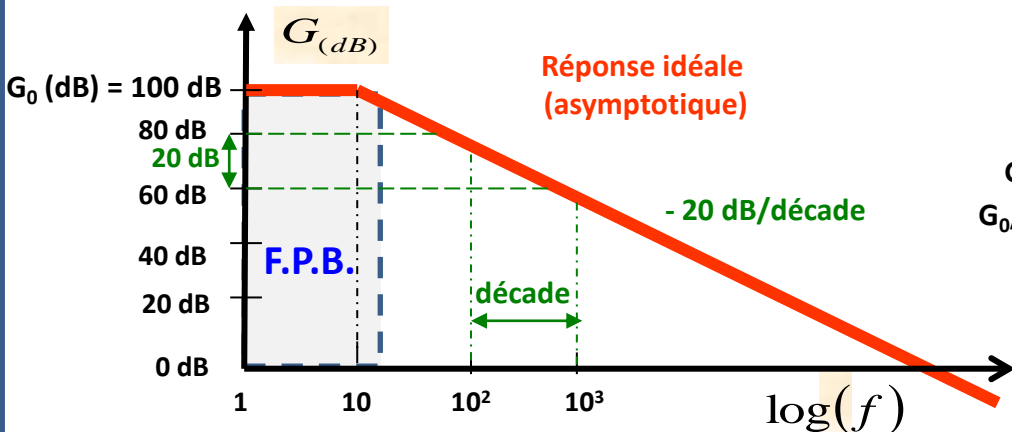
## 6°) Propriétés de de l'amplificateur opérationnel en boucle ouverte

### Amplificateur réel 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<sub>c</sub>.
- Comme f<sub>c</sub> = à qcq 100 Hz alors l'AO est un dispositif TBF (de 0 à 30 kHz)

**AO en BO est un dispositif TBF**

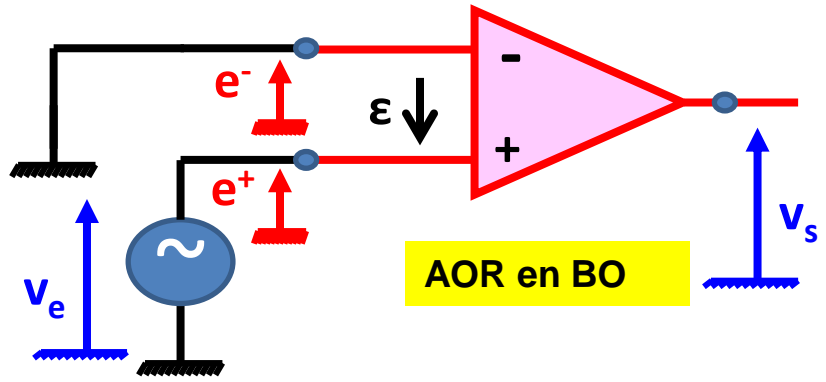


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 7°) Fonction de transfert de l'AO en boucle Ouverte : $s = f(\epsilon)$

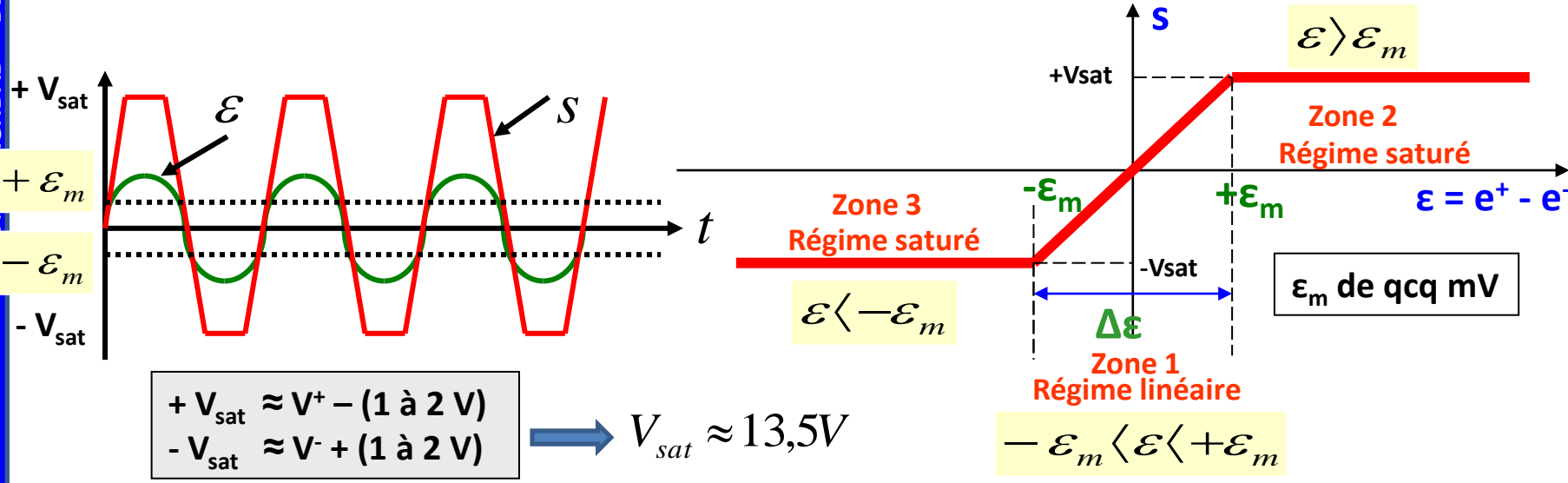
**Amplificateur réel en BO :  $G_0 \approx 10^5$**



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

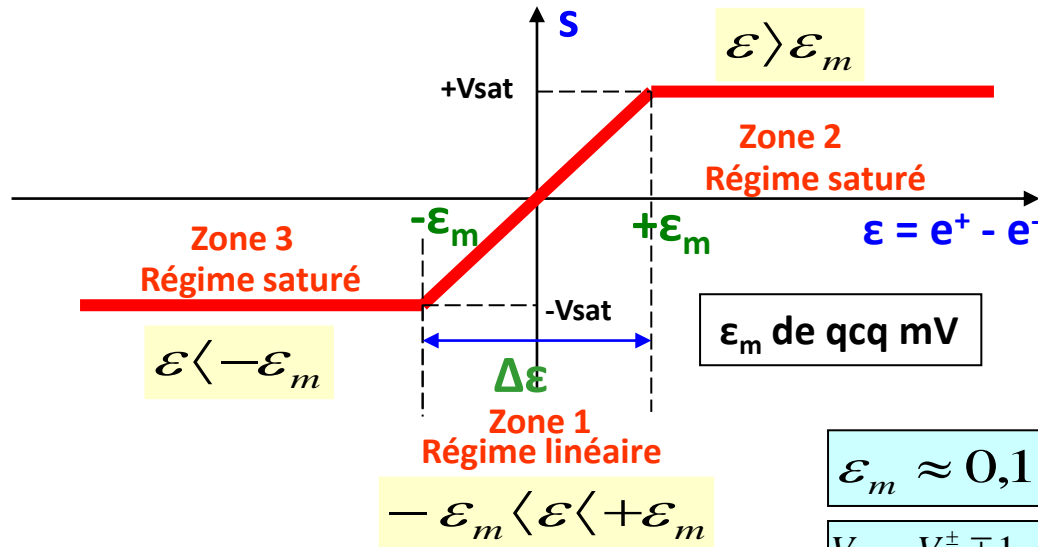
$$s = v_s \Rightarrow v_s = +G_0 \cdot v_e$$

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





# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



$$\epsilon_m \approx 0,13mV = 13.10^{-5}V$$

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

- 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 :

$$s = G_0 \epsilon \quad \text{avec} \quad G_0 = \frac{s}{\epsilon} = \frac{\Delta s}{\Delta \epsilon} = \frac{2.V_{sat}}{2.\epsilon_m} = \frac{13,5V}{13.10^{-5}V} \approx 10^5$$



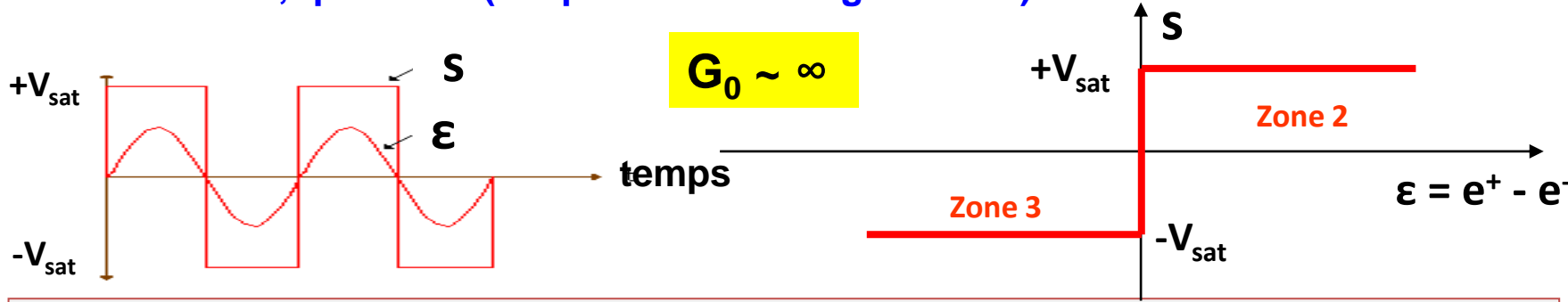


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



**Amplificateur idéal 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) :



• <u>Zone 1</u> se réduit à : $\epsilon = 0$	$e^+ = e^-$	et	$-V_{sat} < s < +V_{sat}$	FL
• <u>Zones 2 et 3</u> :	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	$e^- = e^+$	}	<i>dans le domaine linéaire</i>
$\frac{s}{\epsilon} = \frac{s}{0} = G_0 \rightarrow \infty$	mais	$ s  < V_{sat} \approx 13,5V$		

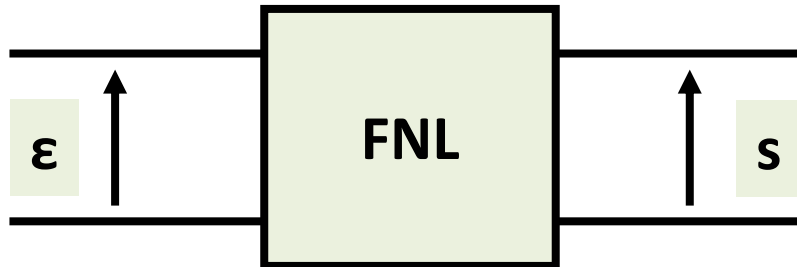


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



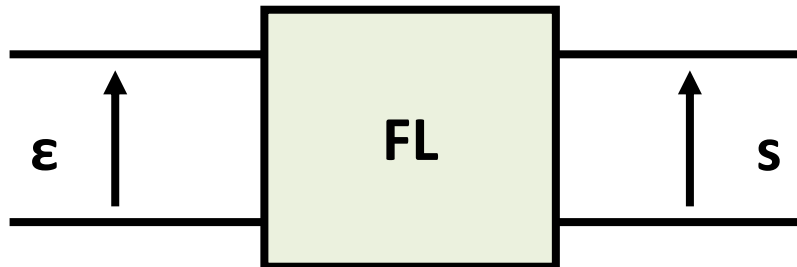
## 8°) Fonctionnement linéaire et non linéaire de l'AO

### Fonctionnement non linéaire



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

### Fonctionnement linéaire



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

En fonctionnement linéaire, la tension à amplifier ne pourra pas être appliquée directement entre les bornes inverseuse ou/et non inverseuse : nécessité au préalable d'une boucle de rétroaction



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

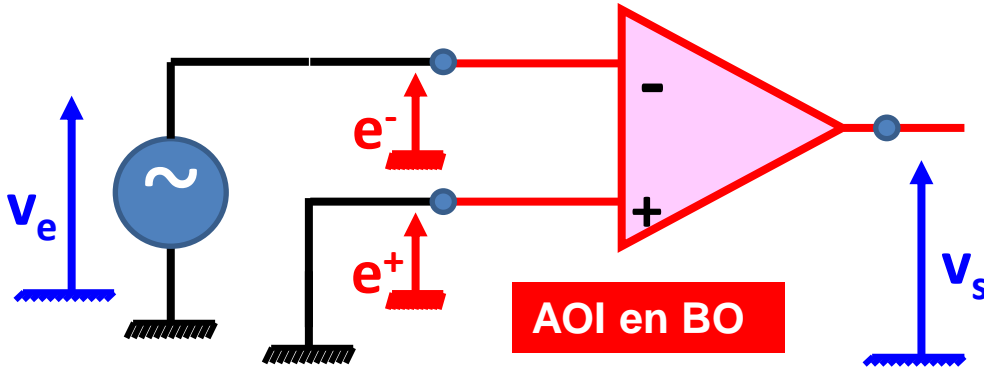


Exemple n°1 de FNL :

$$s = G_0 \cdot \varepsilon$$

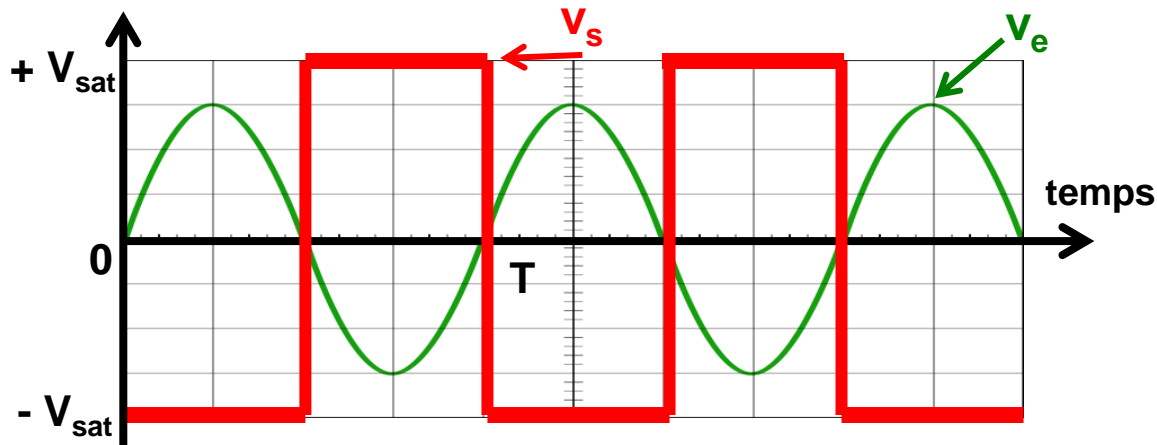
$$AOI \Rightarrow G_0 \rightarrow \infty$$

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



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

$$s = v_s \Rightarrow v_s = -G_0 \cdot v_e$$



$v_s$  et  $v_e$  en opposition de phase



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

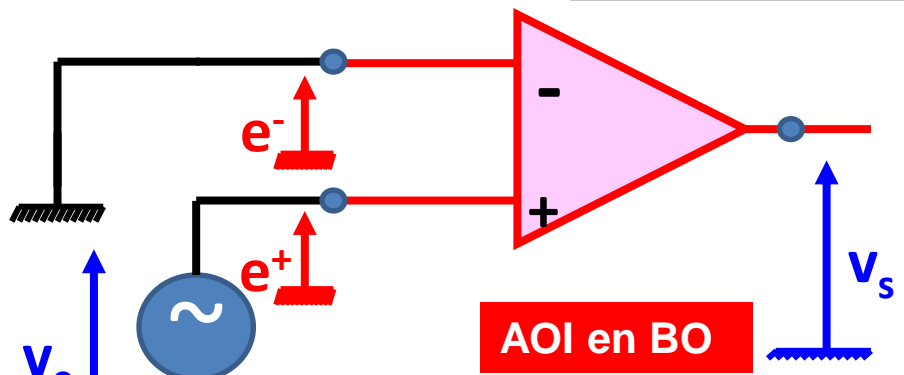


Exemple n°2 de FNL :

$$s = G_0 \cdot \varepsilon$$

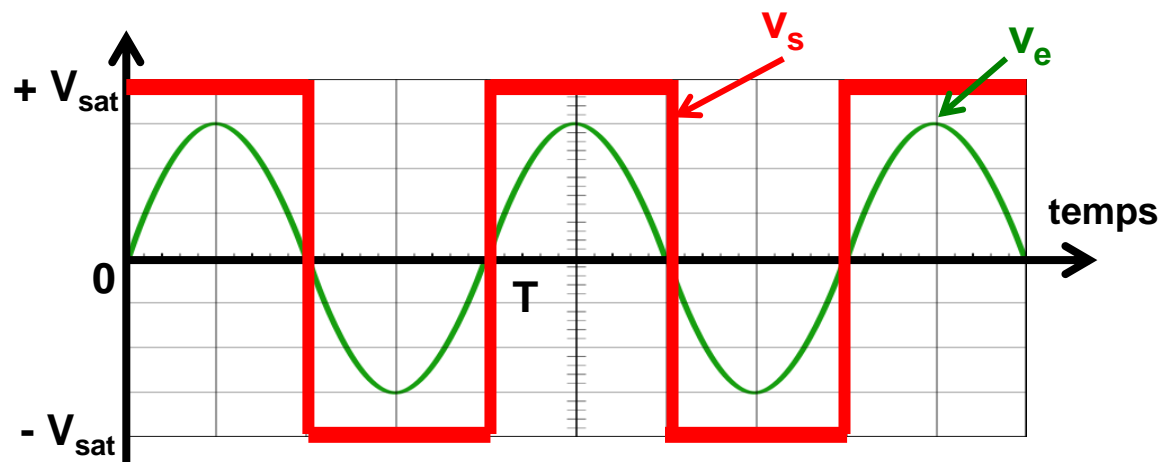
$$AOI \Rightarrow G_0 \rightarrow \infty$$

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



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

$$s = v_s \Rightarrow v_s = +G_0 \cdot v_e$$



$v_s$  et  $v_e$  en phase

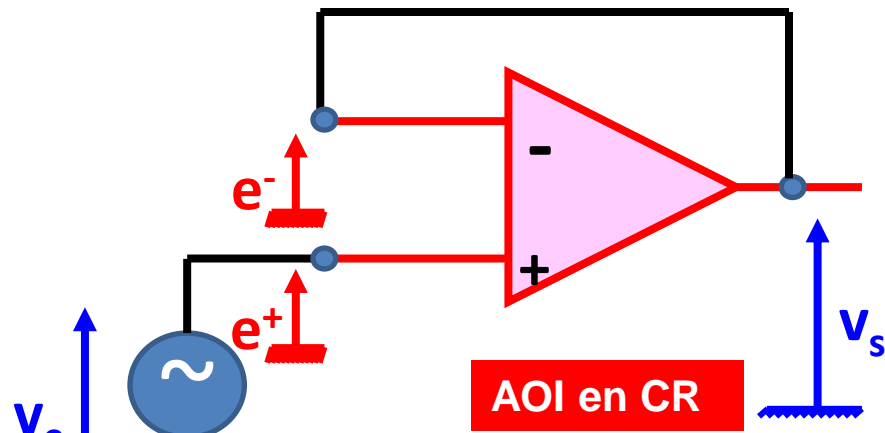


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



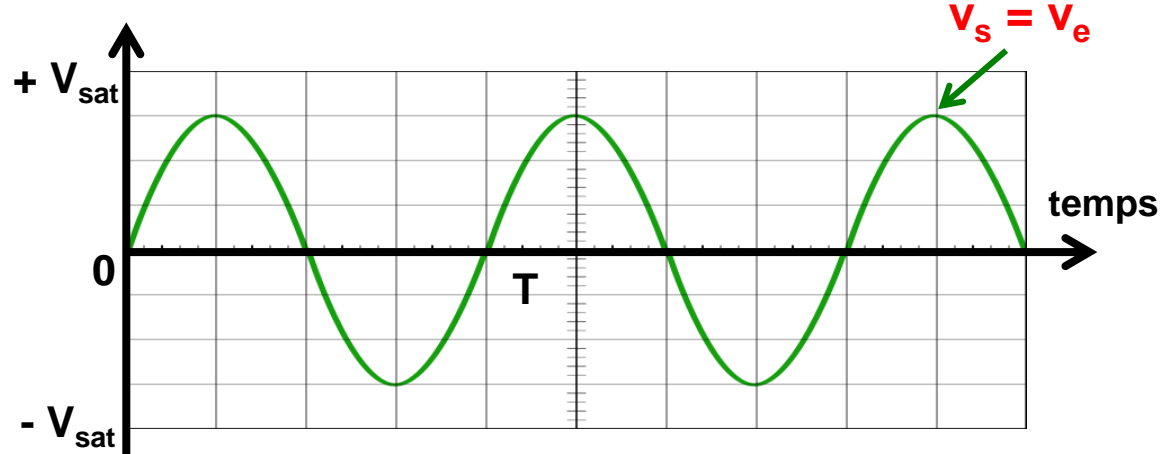
**Exemple de FL :**

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



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

$$v_s = v_e$$



$$v_s = v_e$$

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



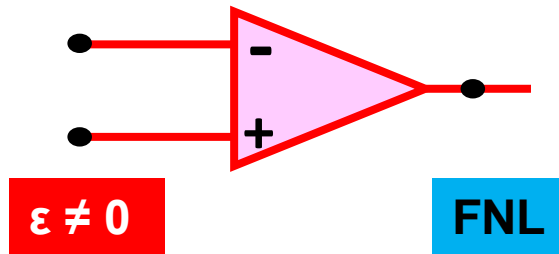
# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



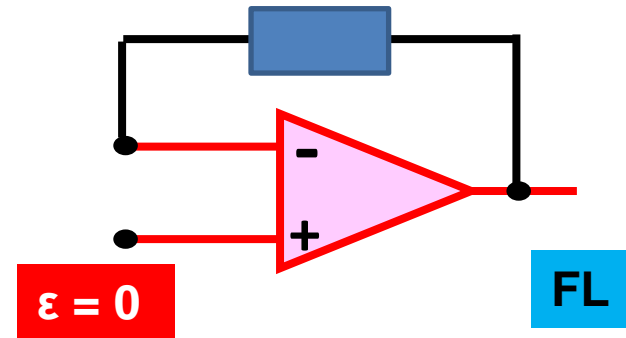
## 9°) Différents modes de fonctionnement

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

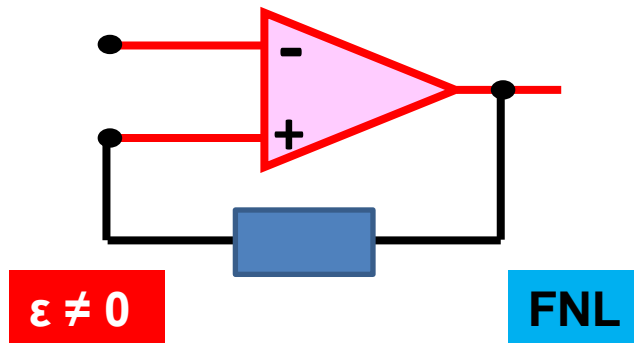
AO en boucle ouverte



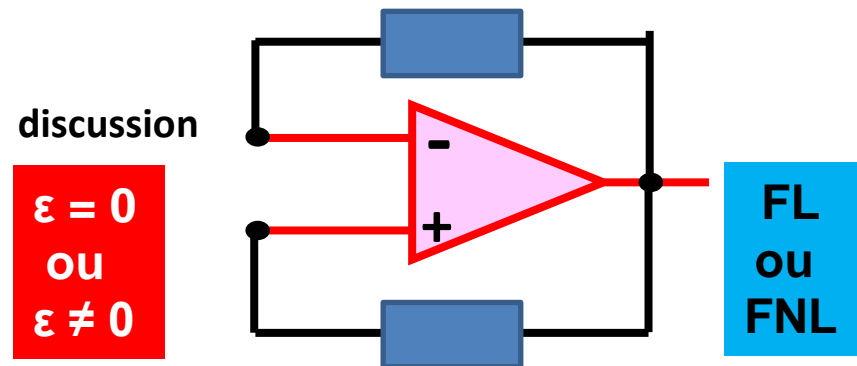
AO en réaction négative (ou en rétroaction) (ou en contre réaction)



AO en réaction positive (ou en réaction)



AO en réaction positive et négative



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

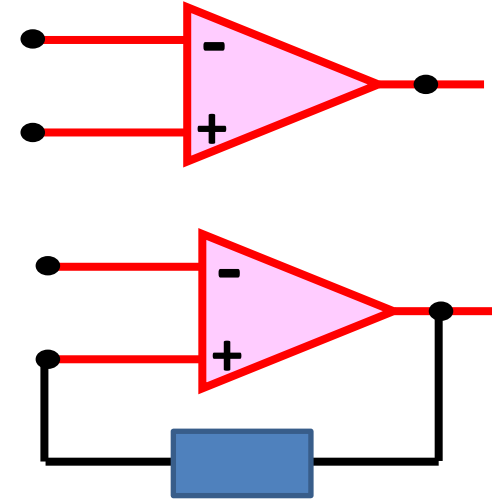


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

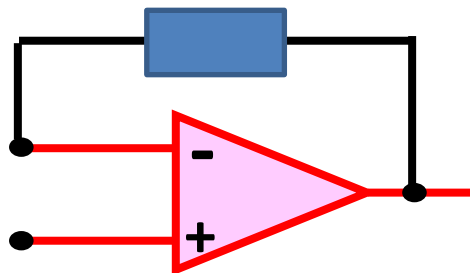


**Boucle ouverte ou Réaction positive :**  
**Fonctionnement en régime saturé**  
 (ou non linéaire)

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**



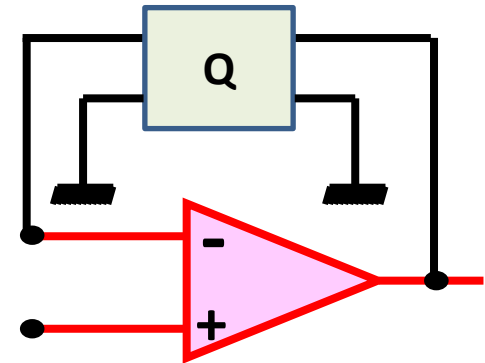
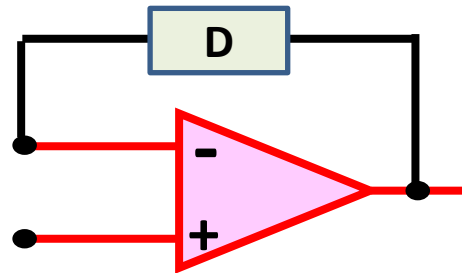
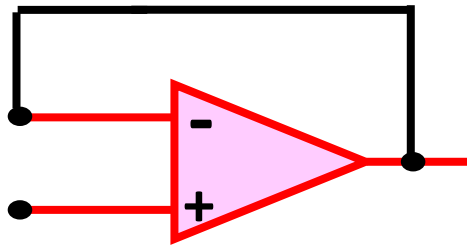
# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 10°) 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





## II. Montages à régime linéaire indépendants de la fréquence



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



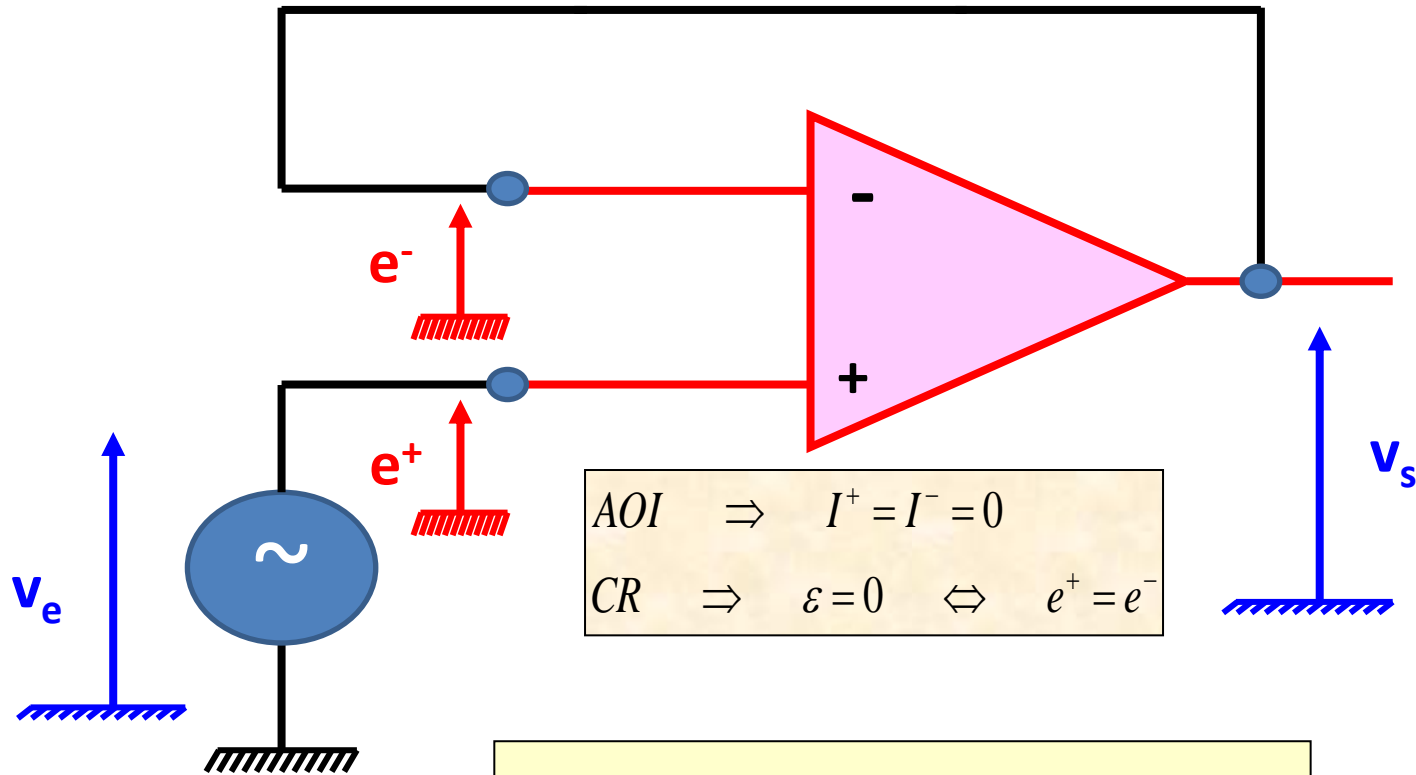
1°) Montages fondamentaux

2°) Montages particuliers



## 1°) Montages fondamentaux

### Montage suiveur



$$AOI \Rightarrow I^+ = I^- = 0$$

$$CR \Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^-$$

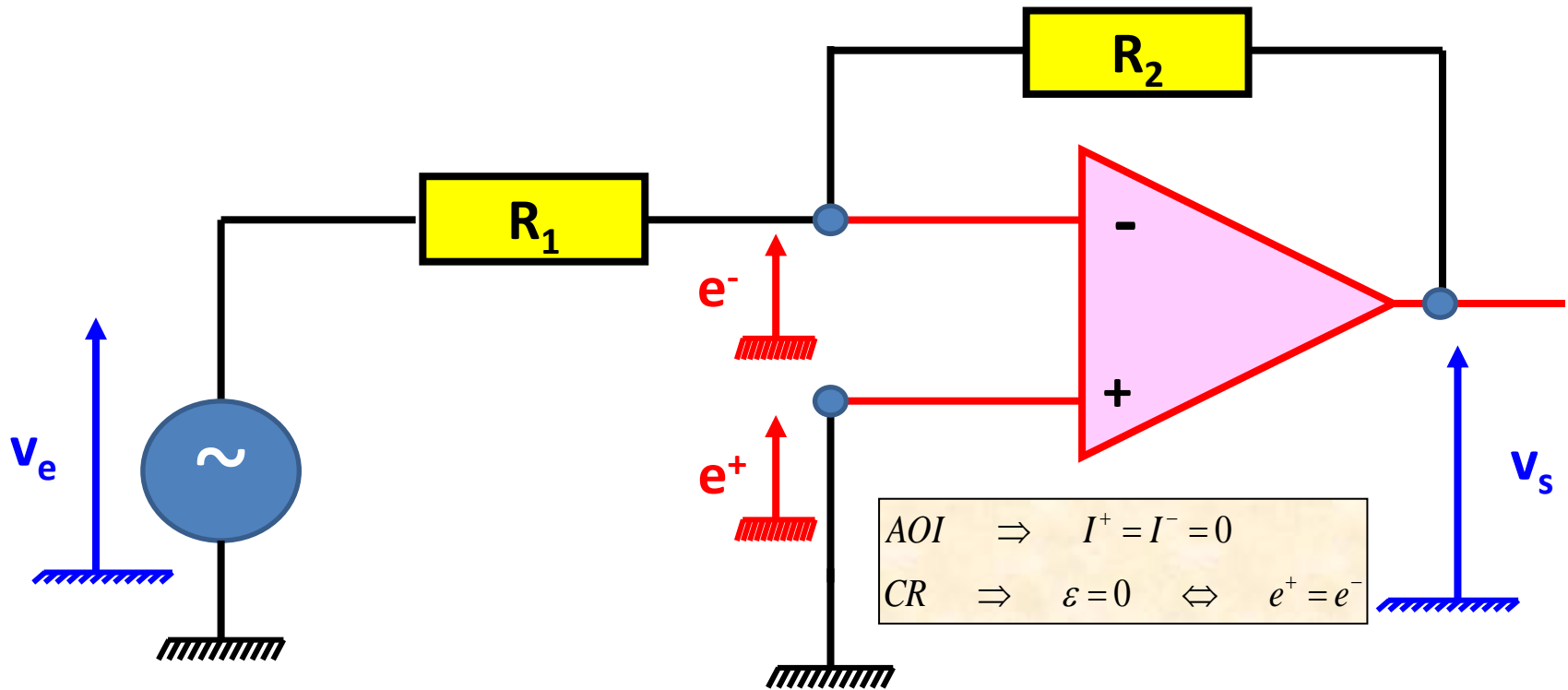
$$v_s = v_e \Rightarrow G = \frac{v_s}{v_e} = 1$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage amplificateur inverseur



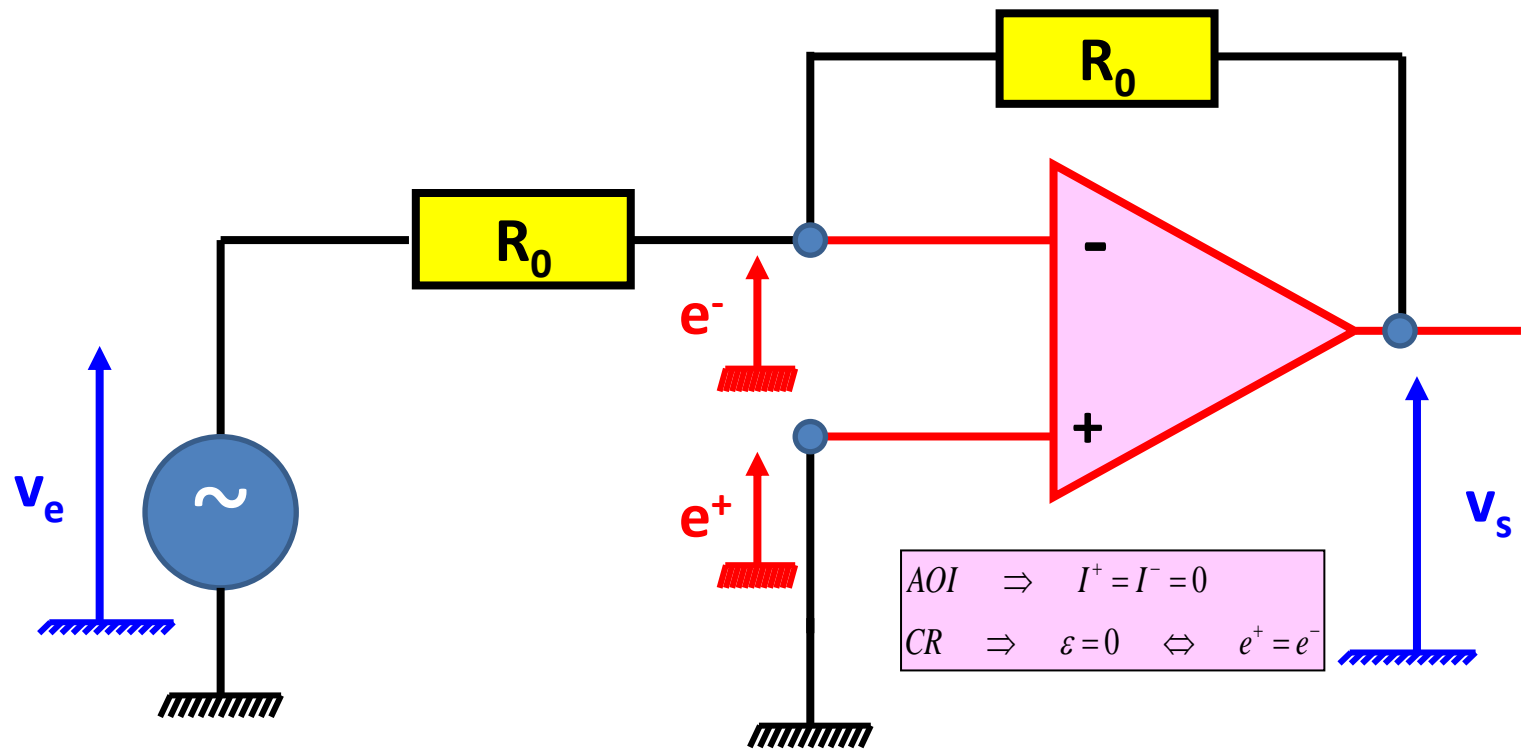
$$v_s = -\frac{R_2}{R_1} \cdot v_e \quad \Rightarrow \quad G = \frac{v_s}{v_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage inverseur



AOI  $\Rightarrow I^+ = I^- = 0$   
 CR  $\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^-$

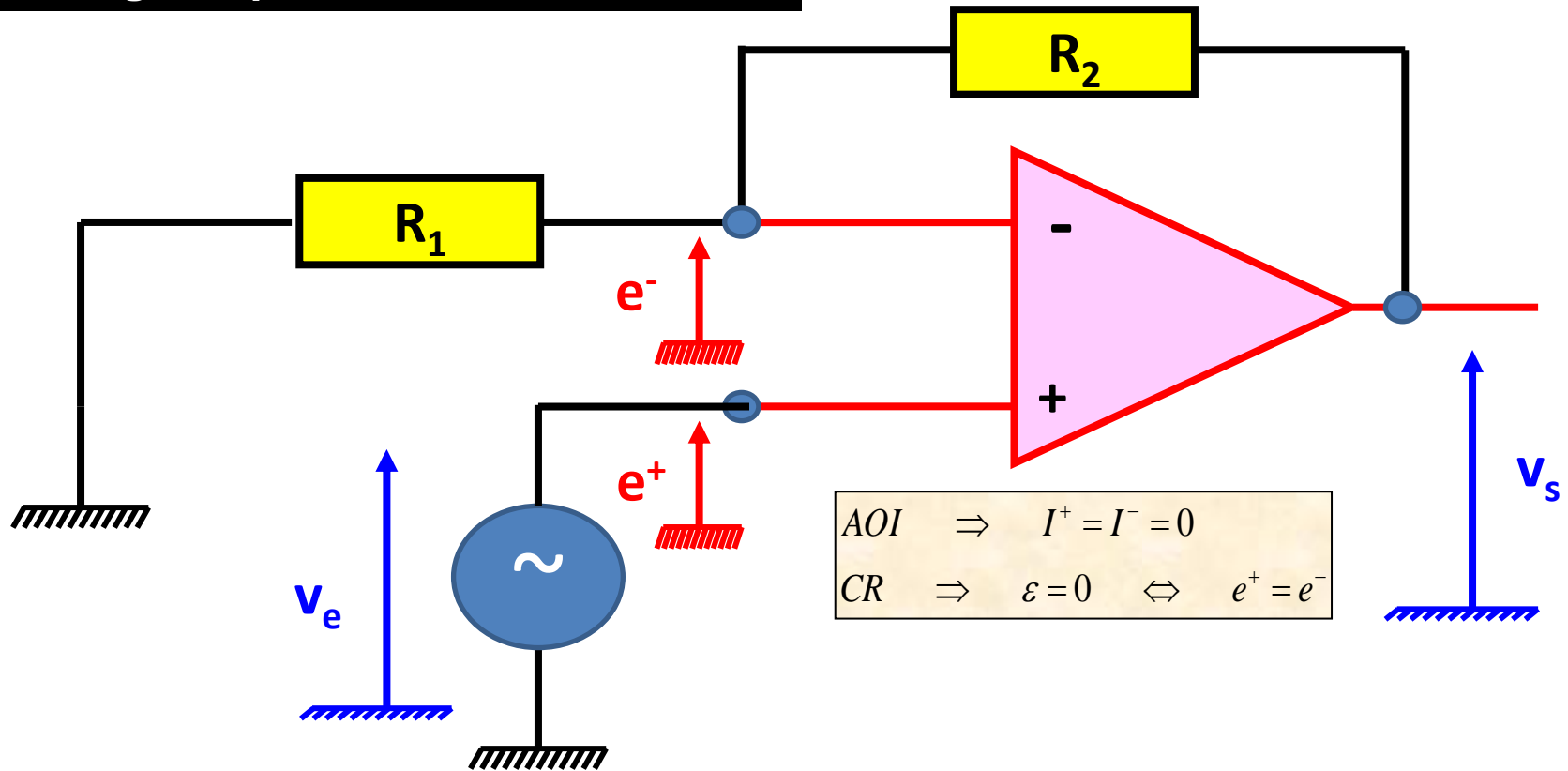
$$v_s = -\frac{R_0}{R_0} \cdot v_e = -v_e \quad \Rightarrow \quad G = \frac{v_s}{v_e} = -1$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage amplificateur non inverseur



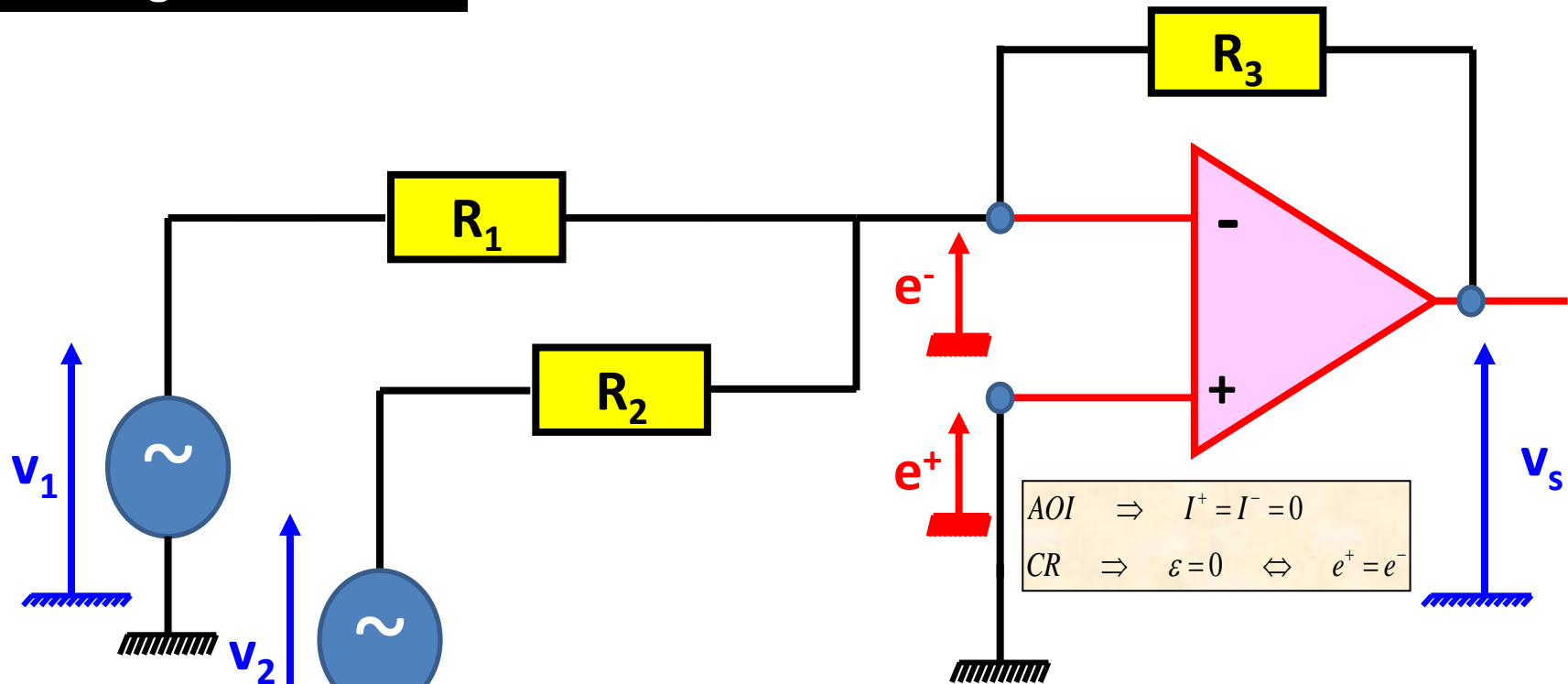
$$v_s = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot v_e \quad \Rightarrow \quad G = \frac{v_s}{v_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage sommateur



$$\begin{aligned} AOI &\Rightarrow I^+ = I^- = 0 \\ CR &\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^- \end{aligned}$$

$$v_s = - \left( \frac{R_3}{R_1} \cdot v_1 + \frac{R_3}{R_2} \cdot v_2 \right)$$

$$\text{Si } R_1 = R_2 = R_3 = R_0$$

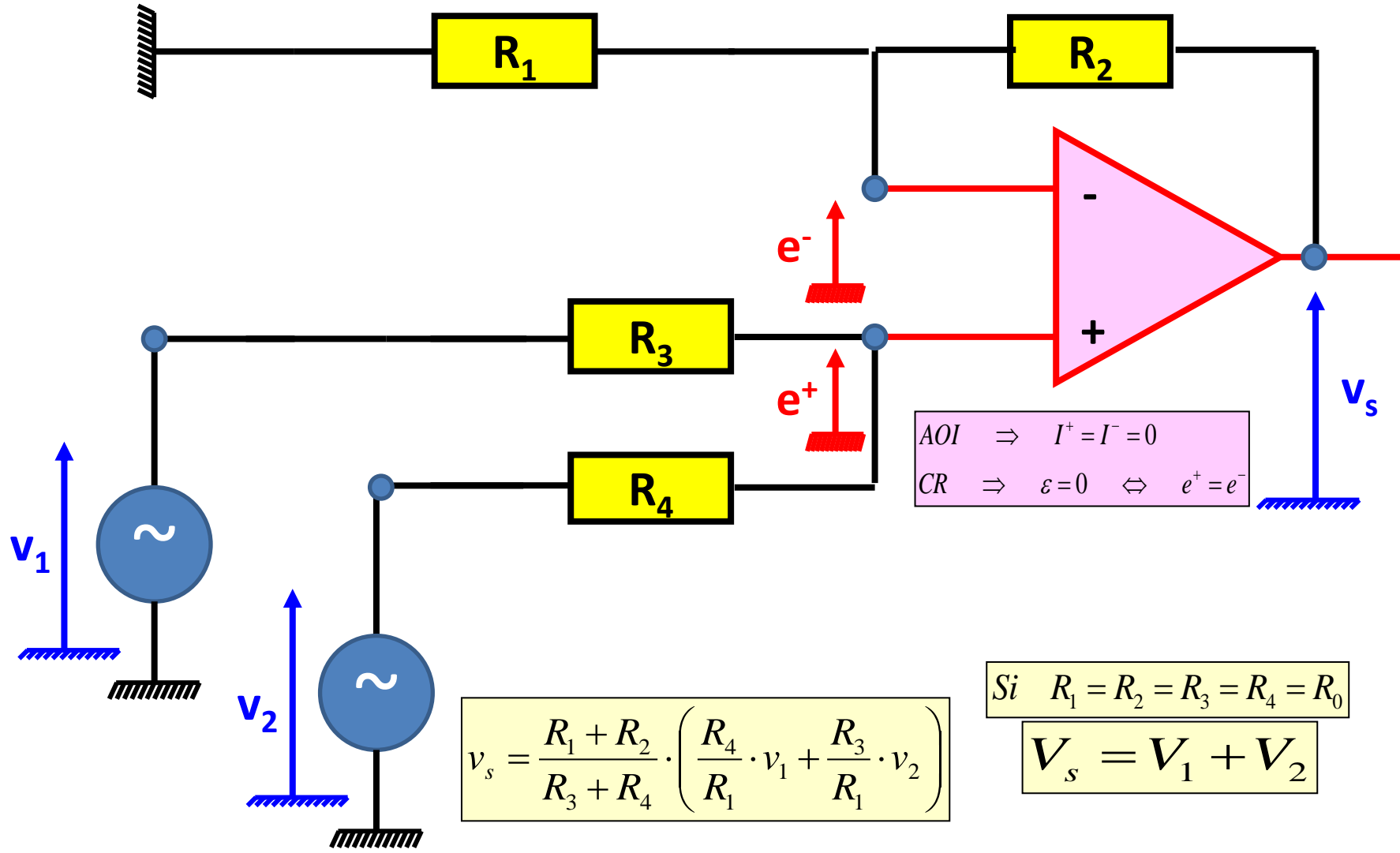
$$v_s = - (v_1 + v_2)$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage sommateur non inverseur



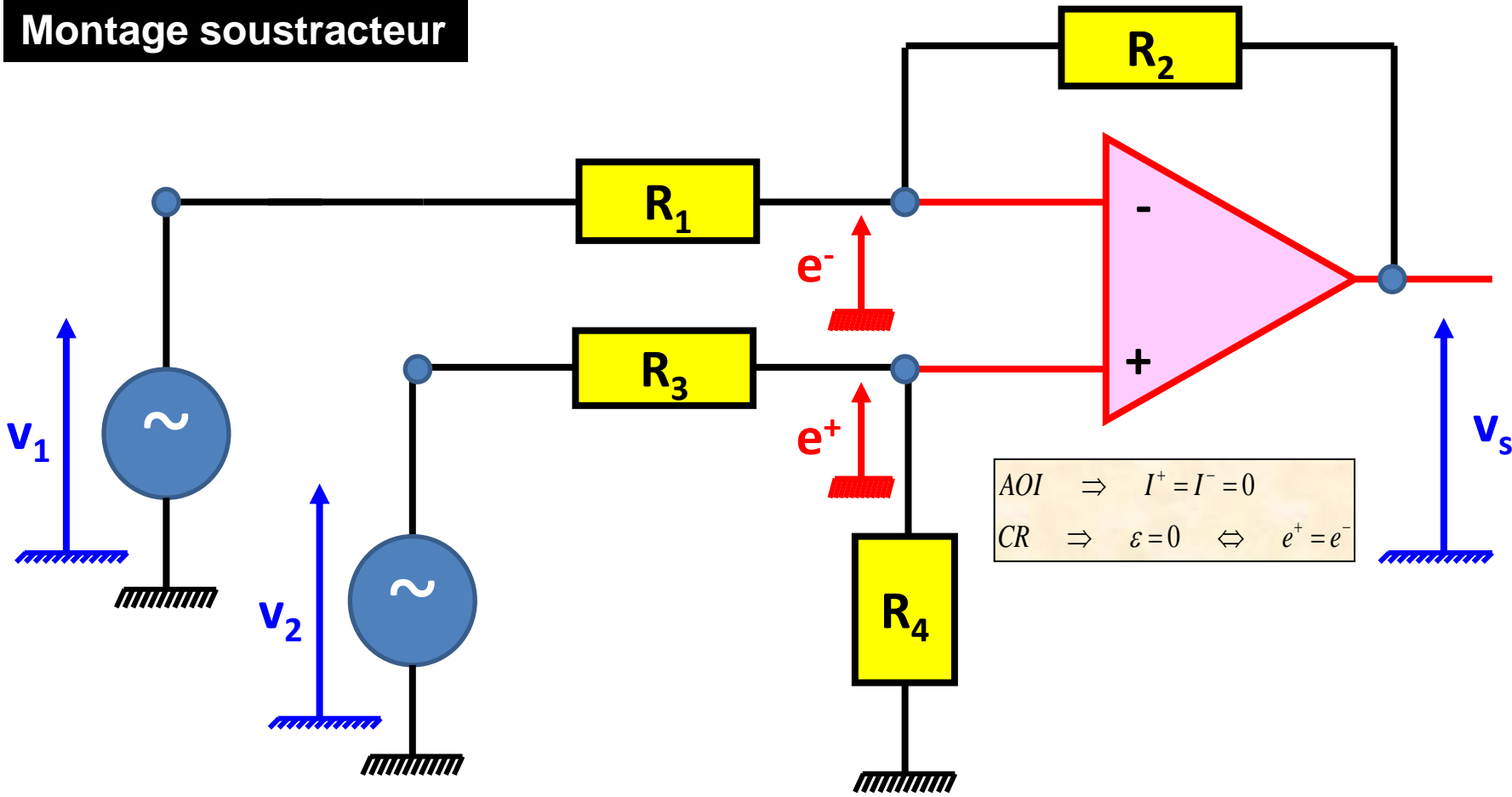




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage soustracteur



$$AOI \Rightarrow I^+ = I^- = 0$$

$$CR \Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^-$$

$$v_s = \left( \frac{R_4 \cdot R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_3 + R_4} \cdot v_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot v_1 \right)$$

Si  $R_1 = R_3$  et  $R_2 = R_4$

$$v_s = \frac{R_2}{R_1} (v_2 - v_1)$$

Si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$

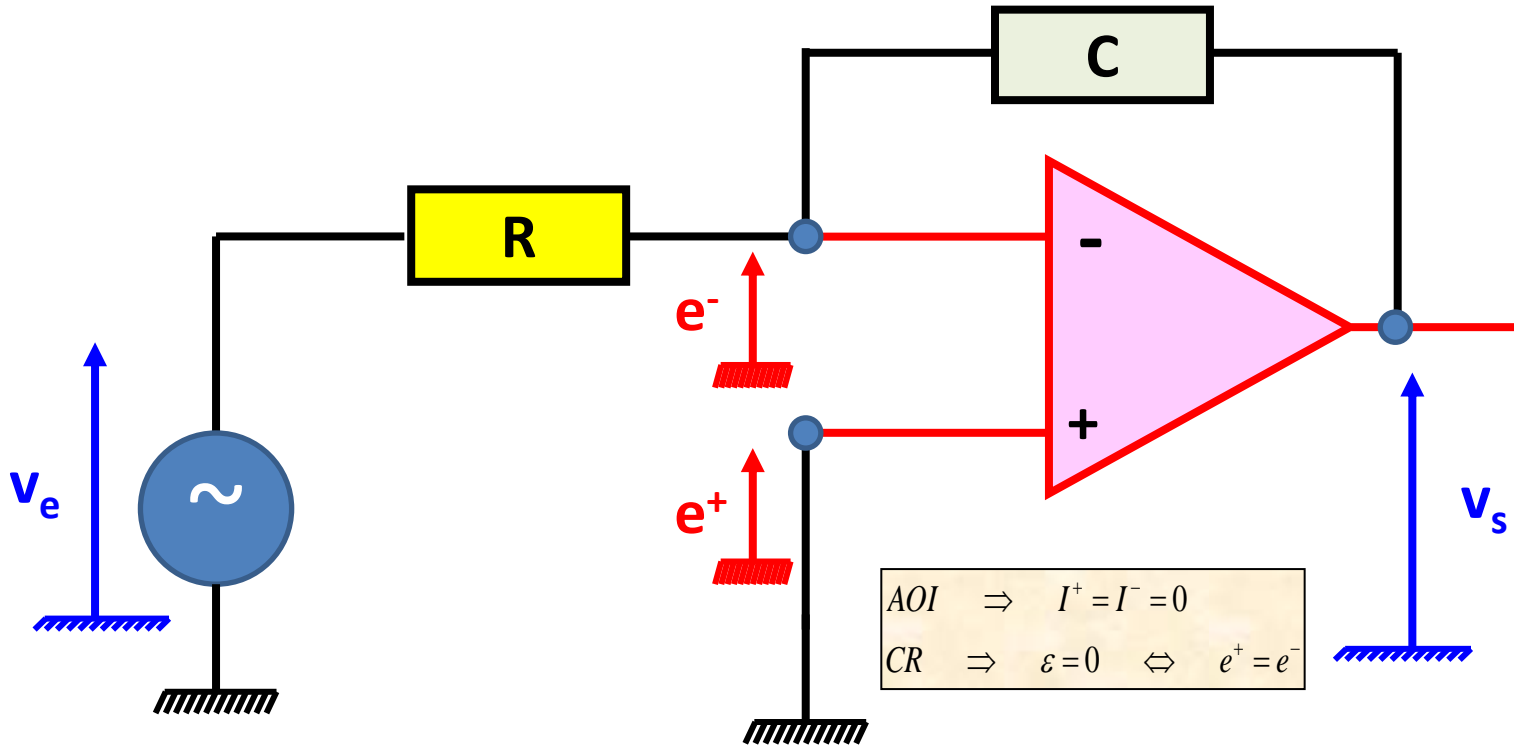
$$v_s = v_2 - v_1$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage intégrateur



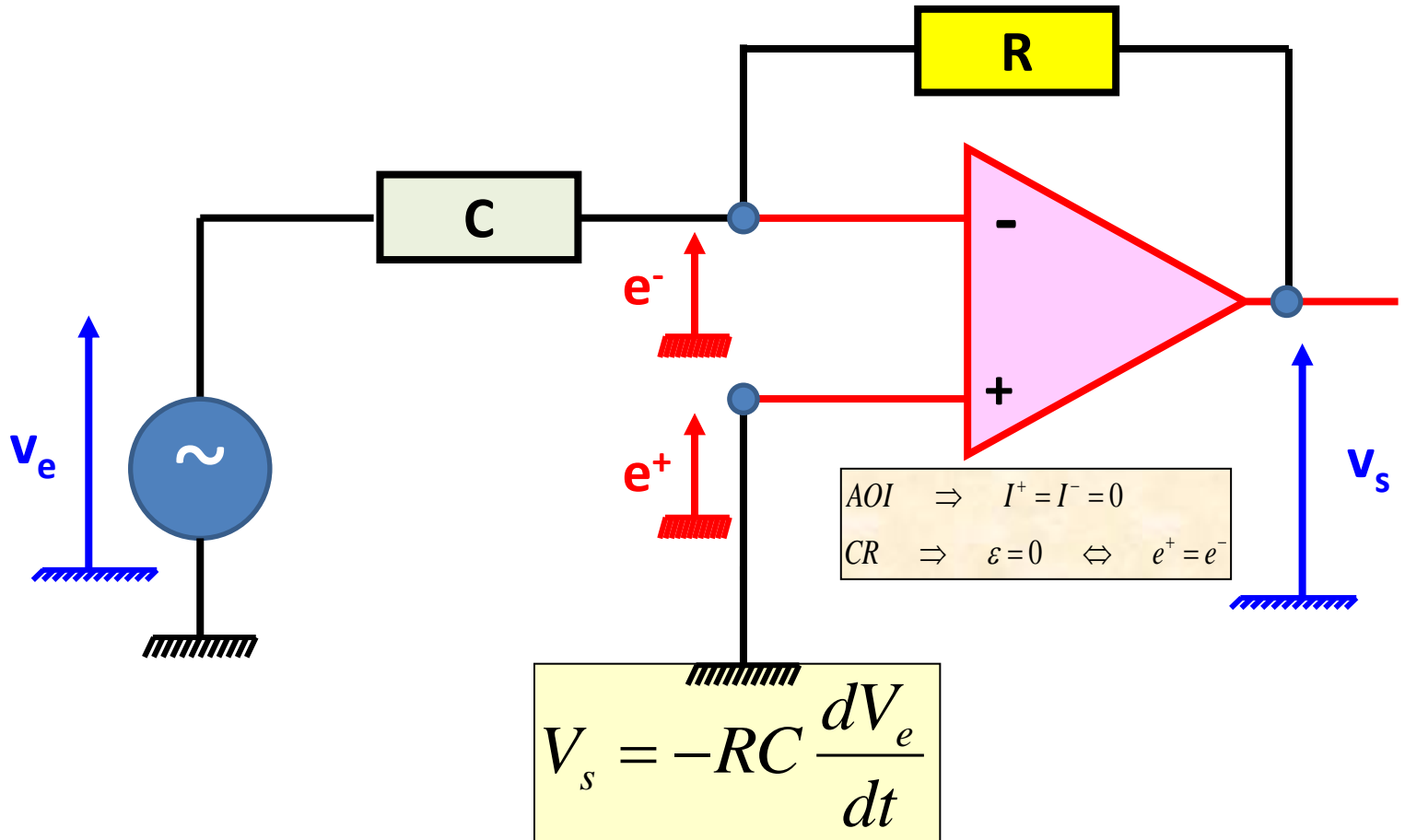
$$v_s(t) = -\frac{1}{RC} \int v_e(t) dt$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage dérivateur

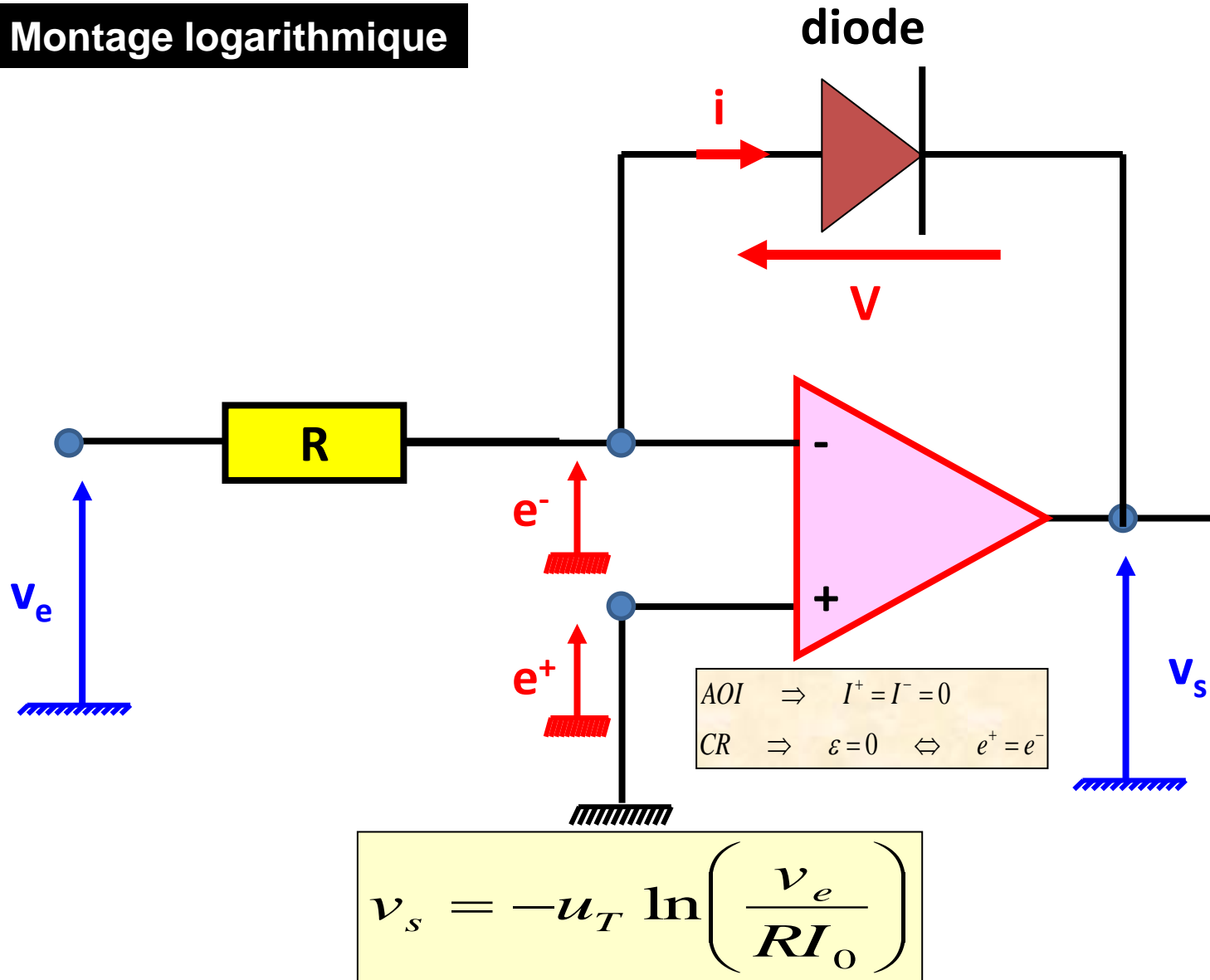




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage logarithmique

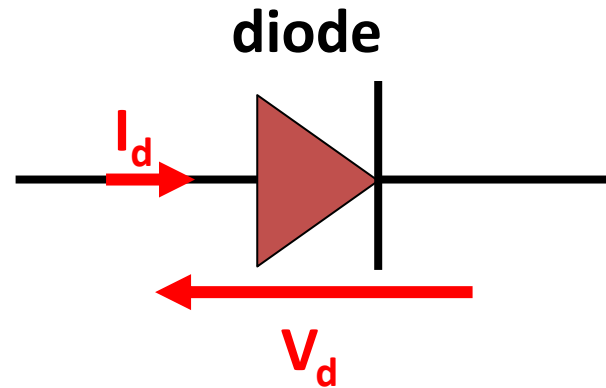




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



**Rappel :**



→ Le courant à traversant la diode est donné par la relation :

$$I_d = I_{sat} \left( e^{\frac{V_d}{u_T}} - 1 \right)$$

→ La tension  $u_T$  est correspond à la tension thermodynamique, d'une valeur de 25 mV environ à l'ambiance.

→  $I_s$  correspond au courant de saturation de la diode D ou courant inverse, de qqc nA.

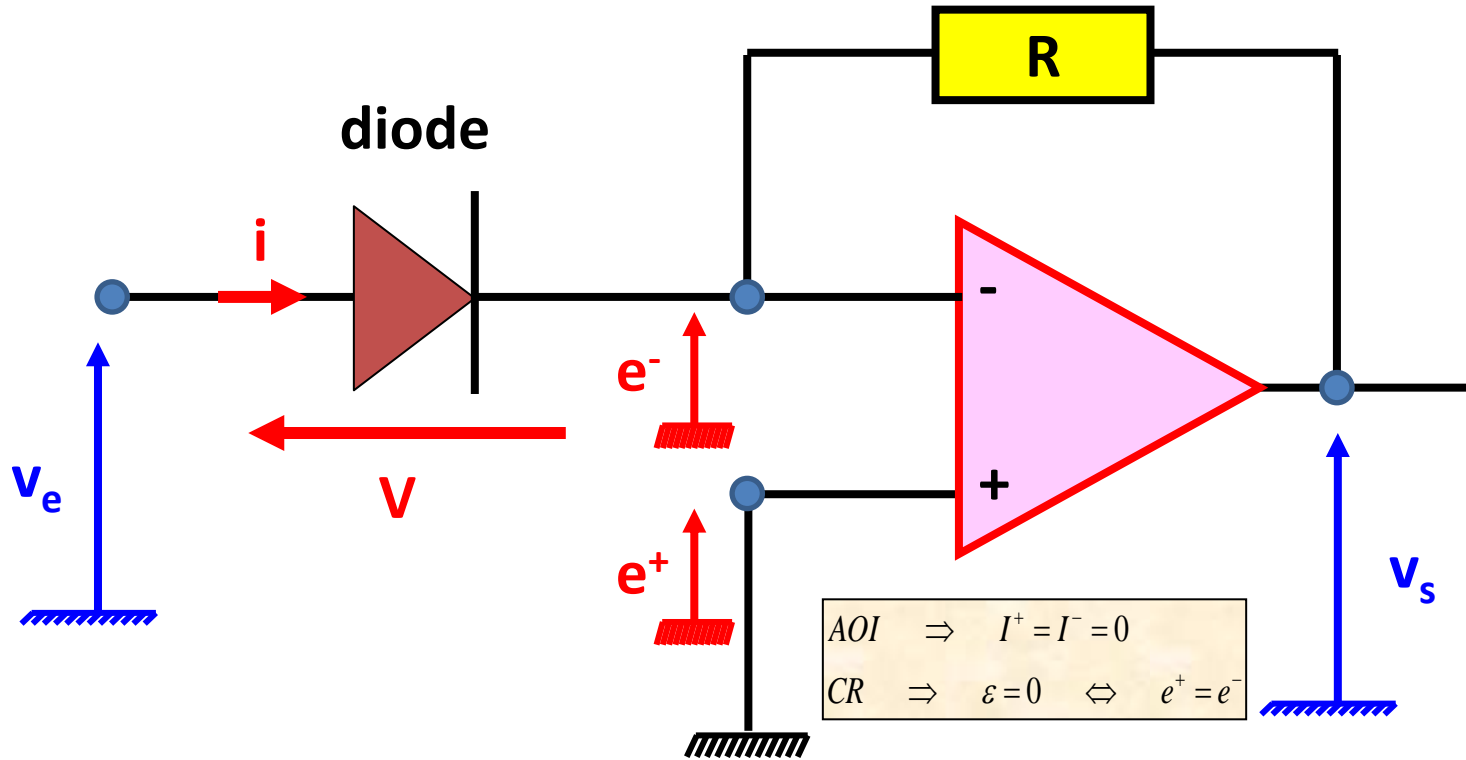
$$\text{En direct : si } I_d \approx I_s \cdot e^{\frac{V_d}{u_T}} \quad \text{alors} \quad V_d \approx u_T \cdot \ln \left( \frac{I_d}{I_s} \right)$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage anti-logarithmique (ou exponentiel)

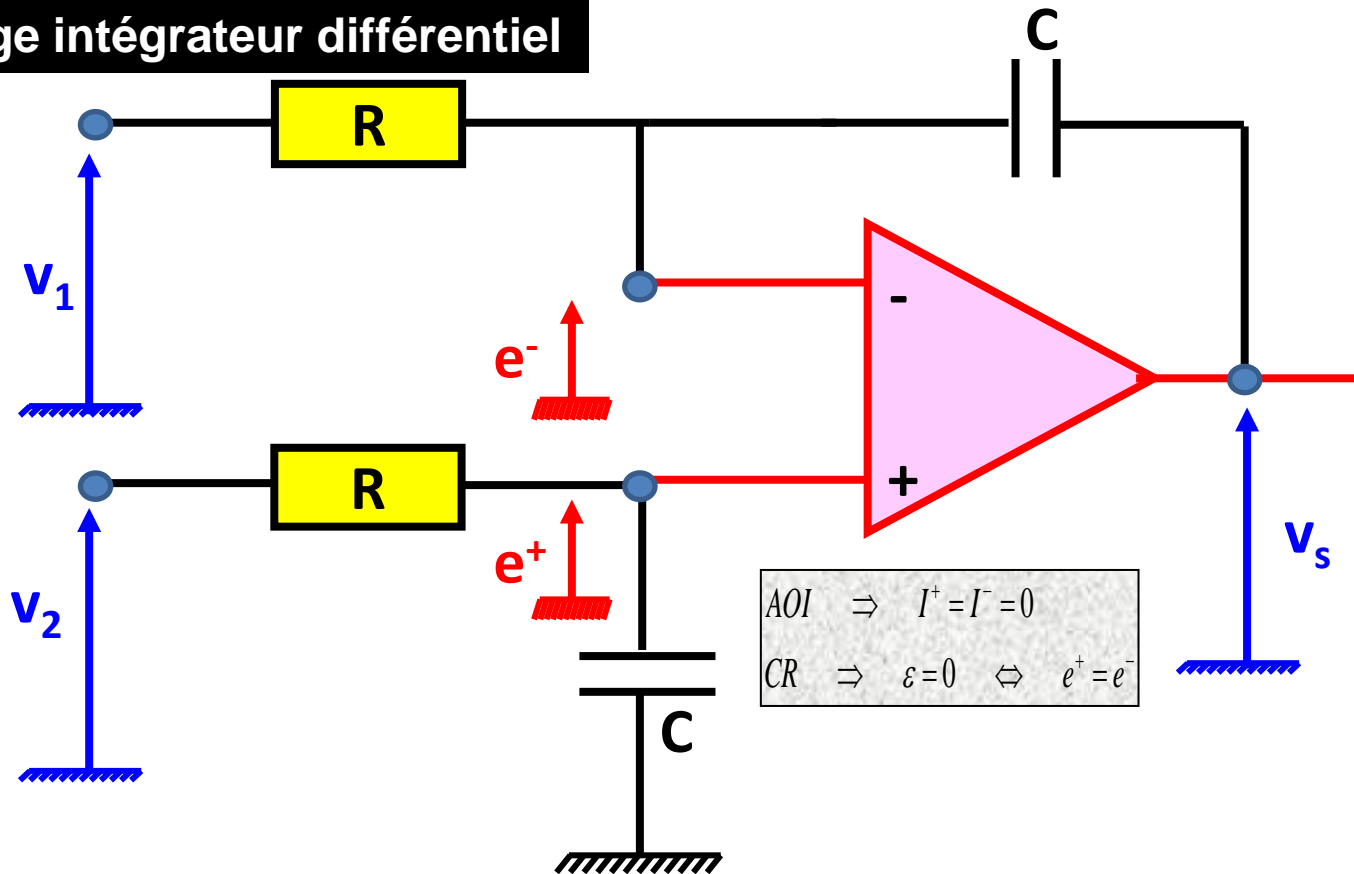


$$v_s = -R \cdot I_s \exp\left(\frac{v_e}{u_T}\right)$$



## 2°) Montages particuliers

### Montage intégrateur différentiel



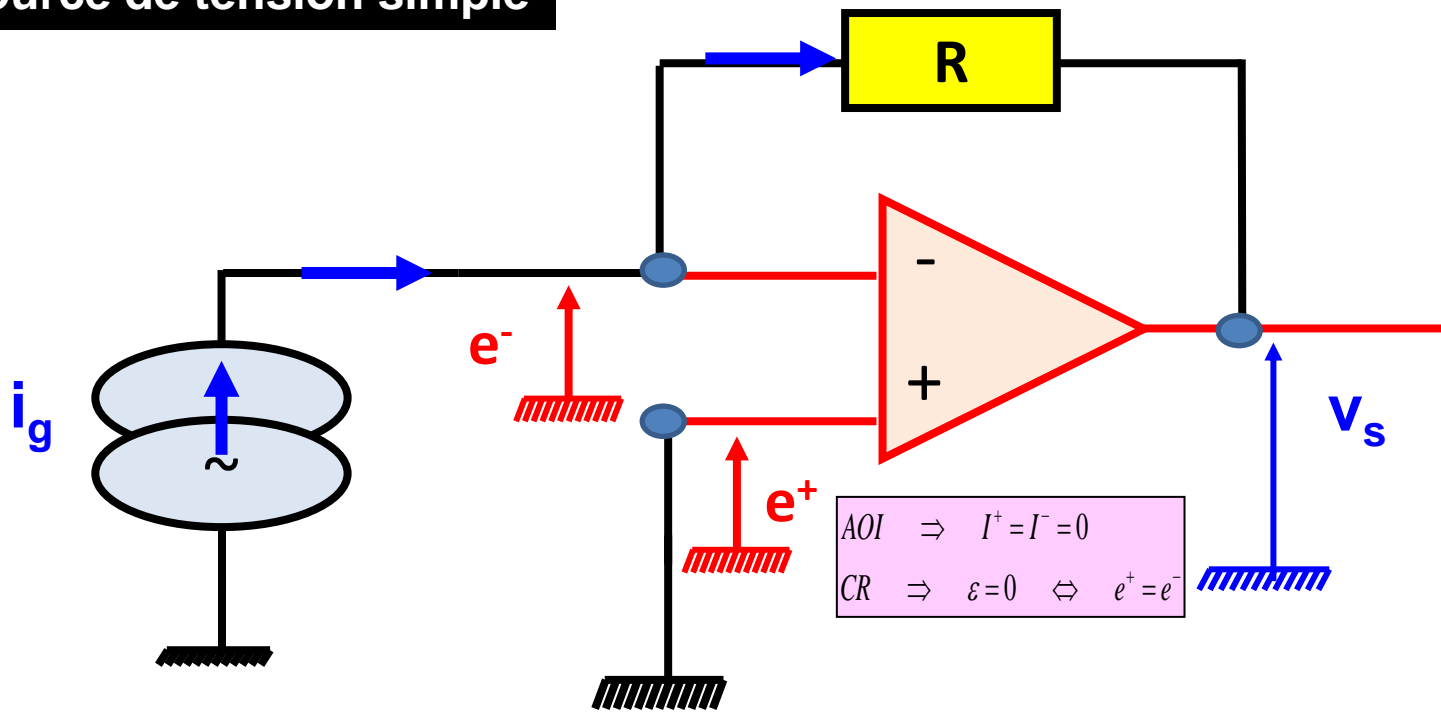
$$v_s(t) = \frac{1}{RC} \int (v_2(t) - v_1(t)) \cdot dt$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



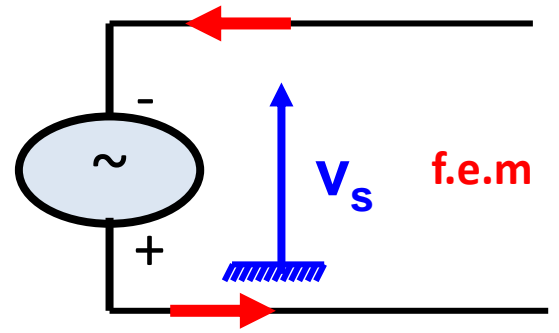
## Source de tension simple



AOI  $\Rightarrow I^+ = I^- = 0$   
 CR  $\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^-$

$v_s = -R \cdot i_g$

$e^+ = 0 \quad \text{et} \quad e^- = e^+ = 0$   
 $v_s = -R \cdot i_g \quad \Rightarrow \quad i_g = -\frac{v_s}{R}$



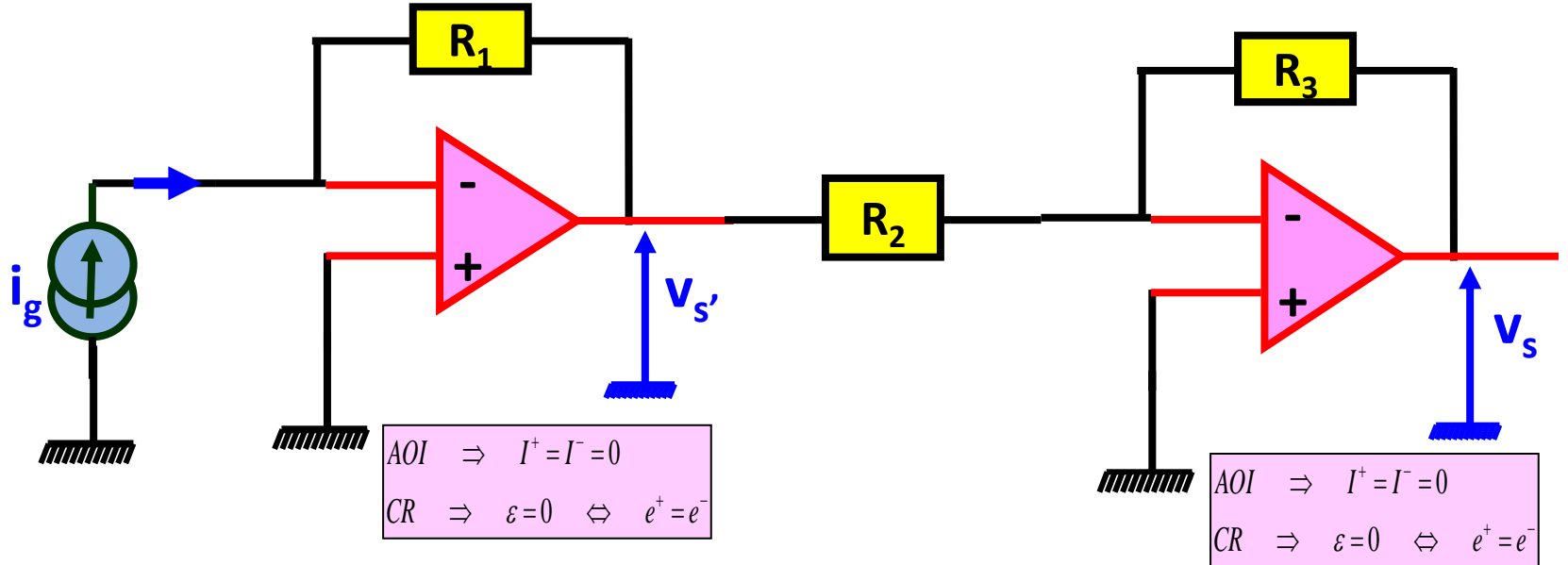




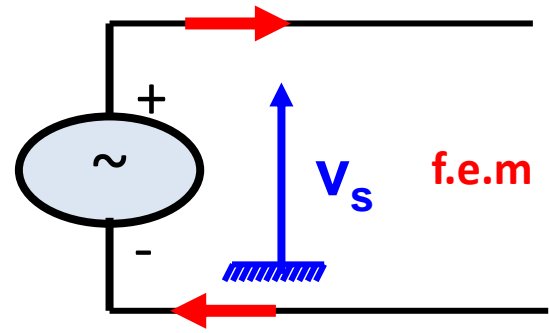
# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Source de tension amélioré



$$V_s = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2} \cdot i_g$$

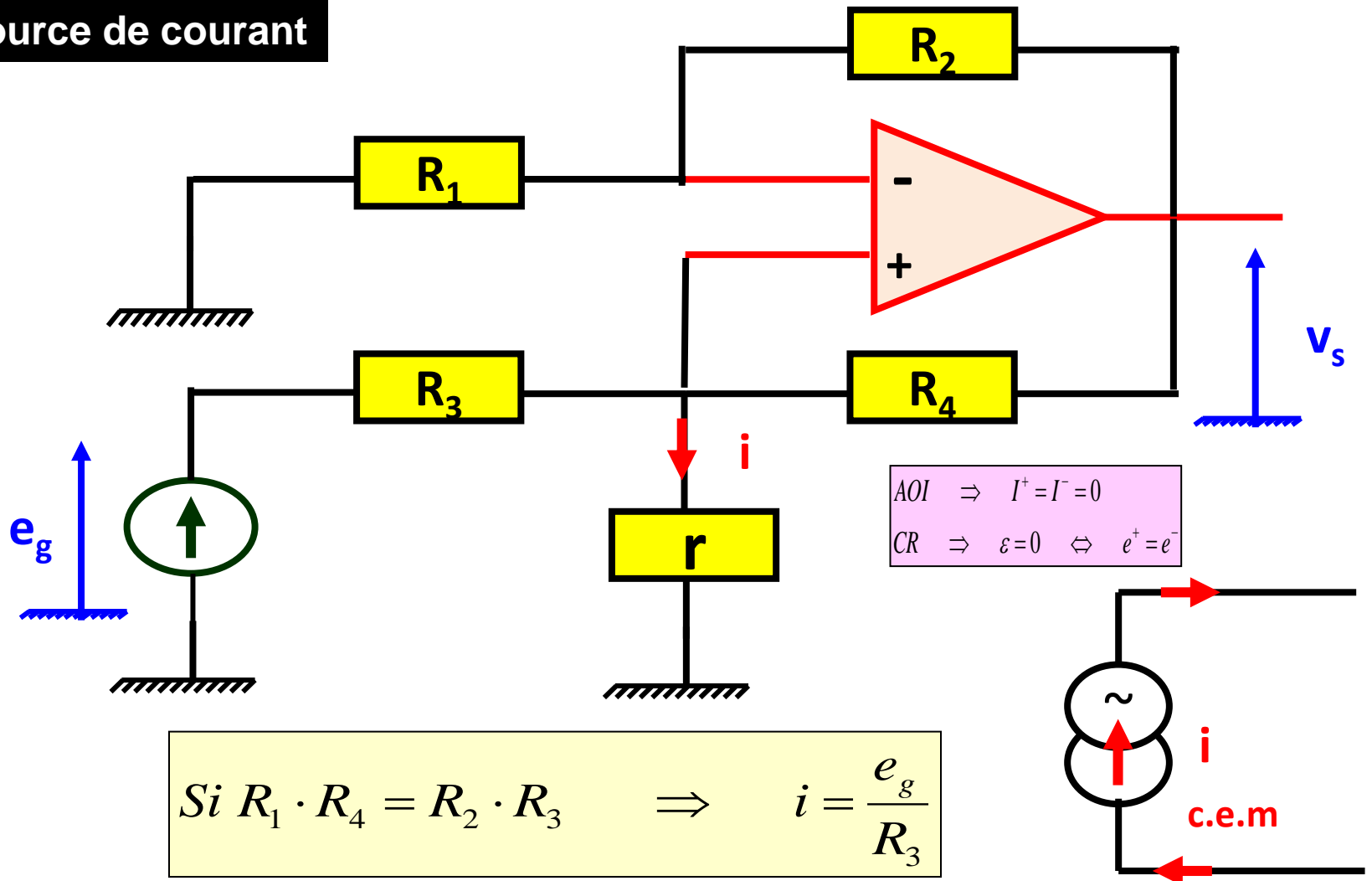




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



**Source de courant**



$$Si R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \Rightarrow i = \frac{e_g}{R_3}$$

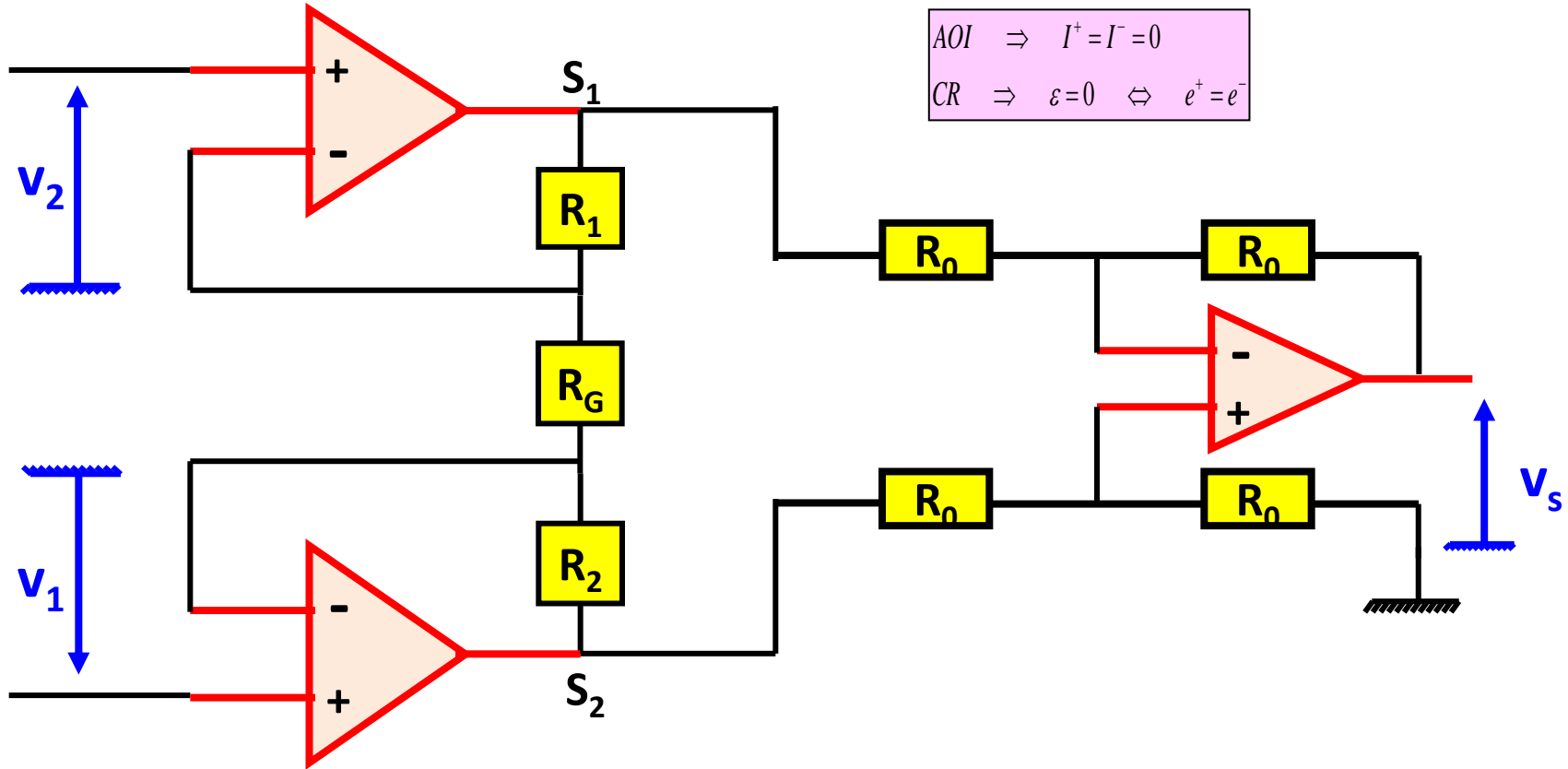
- Fournit un courant  $i$  indépendant du circuit de charge (d'impédance  $r$  ici)
- Montage nommé source de Howland



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Amplificateur d'instrumentation



$$v_s = \left( 1 + \frac{R_2 + R_1}{R_G} \right) \cdot (v_1 - v_2)$$

Si  $R_1 = R_2 = R_G = R_0$

$$v_s = 3 \cdot (v_1 - v_2)$$



## III. Montages à régime linéaire dépendant de la fréquence



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



1°) Filtre actif passe bas de 1<sup>er</sup> ordre

2°) Filtre actif passe haut de 1<sup>er</sup> ordre



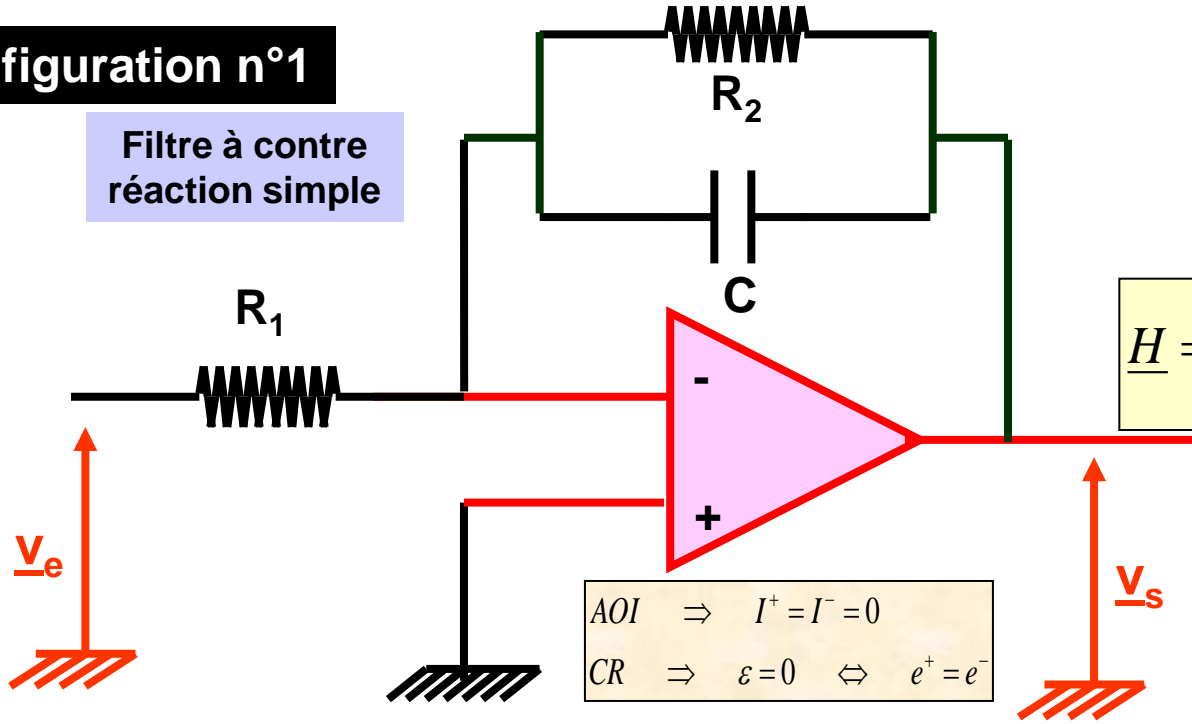
# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 1°) Filtre actif passe bas de 1<sup>er</sup> ordre

### Configuration n°1

Filtre à contre réaction simple



$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$\underline{H} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j R_2 C \omega}$$

$$\begin{aligned} AOI &\Rightarrow I^+ = I^- = 0 \\ CR &\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^- \end{aligned}$$

→ Gain d'un amplificateur inverseur :

$$H_0 = A = -\frac{R_2}{R_1}$$

→ Fréquence de coupure :

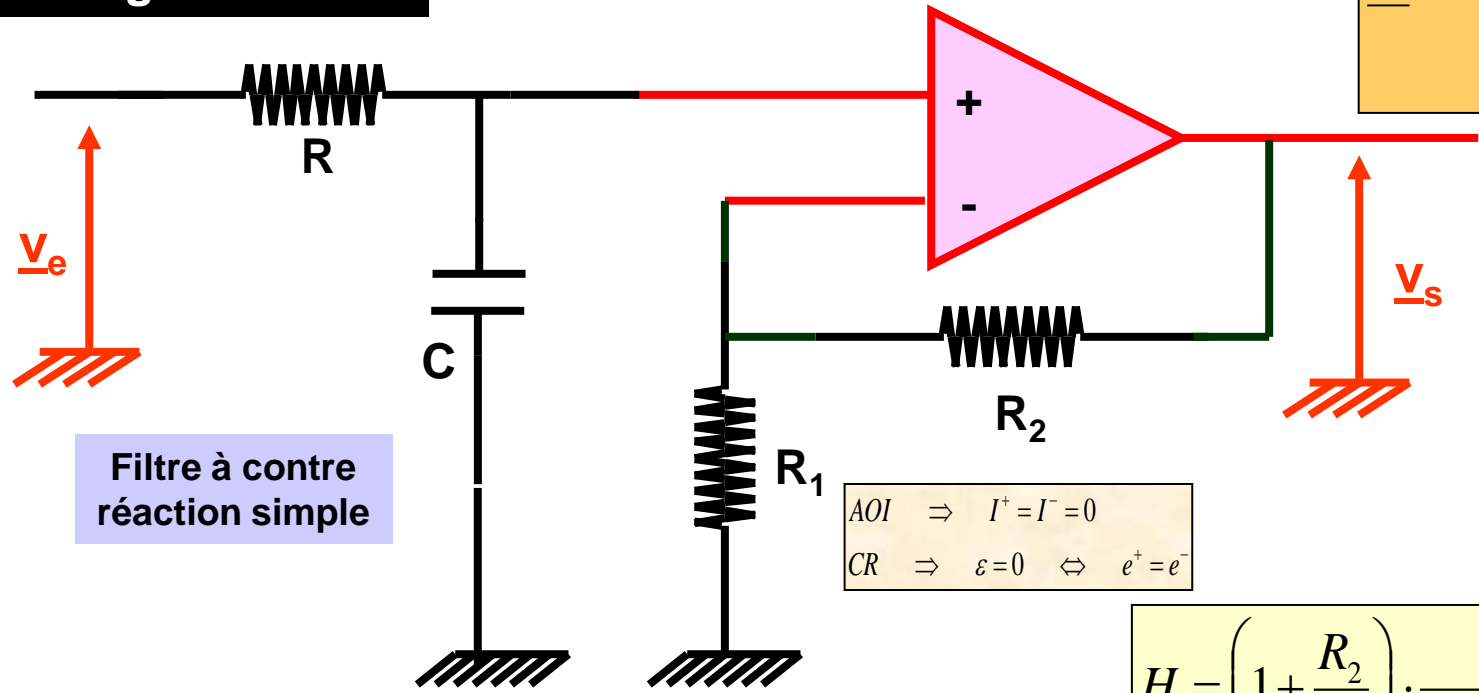
$$f_c = \frac{1}{2 \pi R_2 C}$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Configuration n°2



Filtre à contre réaction simple

$$\underline{H} = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$\begin{aligned} AOI &\Rightarrow I^+ = I^- = 0 \\ CR &\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^- \end{aligned}$$

$$\underline{H} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{1}{1 + j R C \omega}$$

→ Gain d'un amplificateur non inverseur :  $H_0 = A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

→ Fréquence de coupure :  $f_c = \frac{1}{2 \pi R C}$

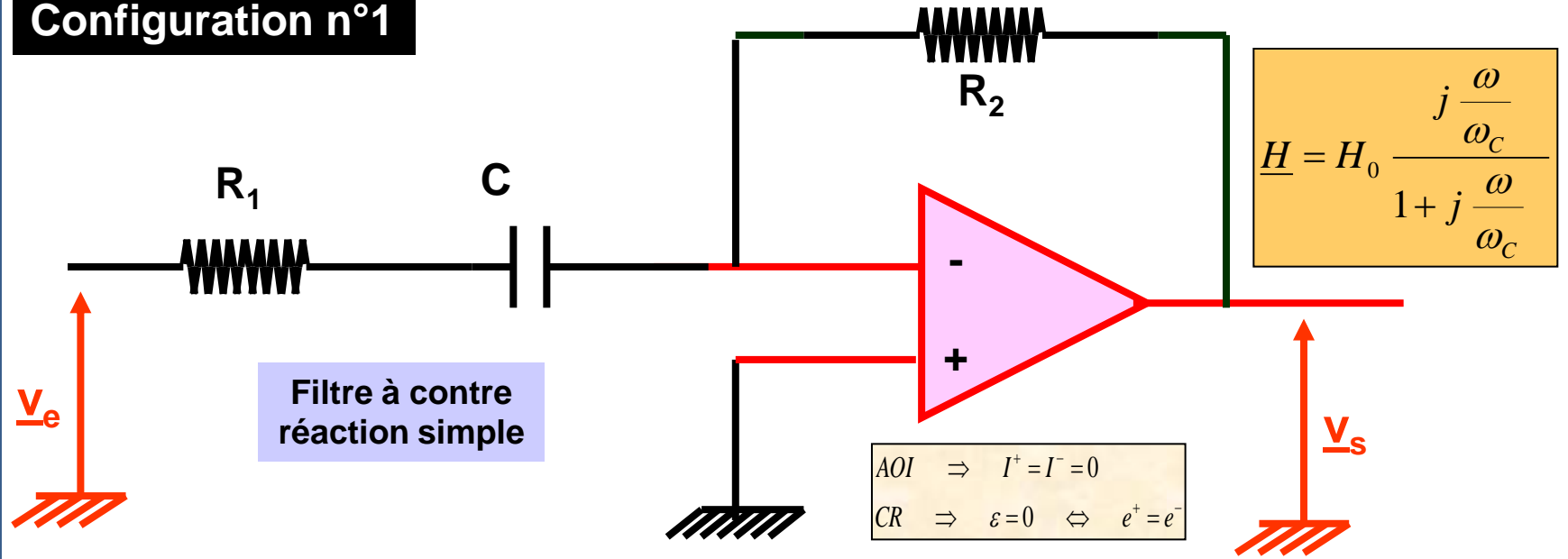


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 2°) Filtre actif passe haut de 1<sup>er</sup> ordre

### Configuration n°1



→ Gain d'un amplificateur inverseur :

$$H_0 = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$\underline{H} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{j R_1 C \omega}{1 + j R_1 C \omega}$$

→ Fréquence de coupure si :

$$f_c = \frac{1}{2 \pi R_1 C}$$

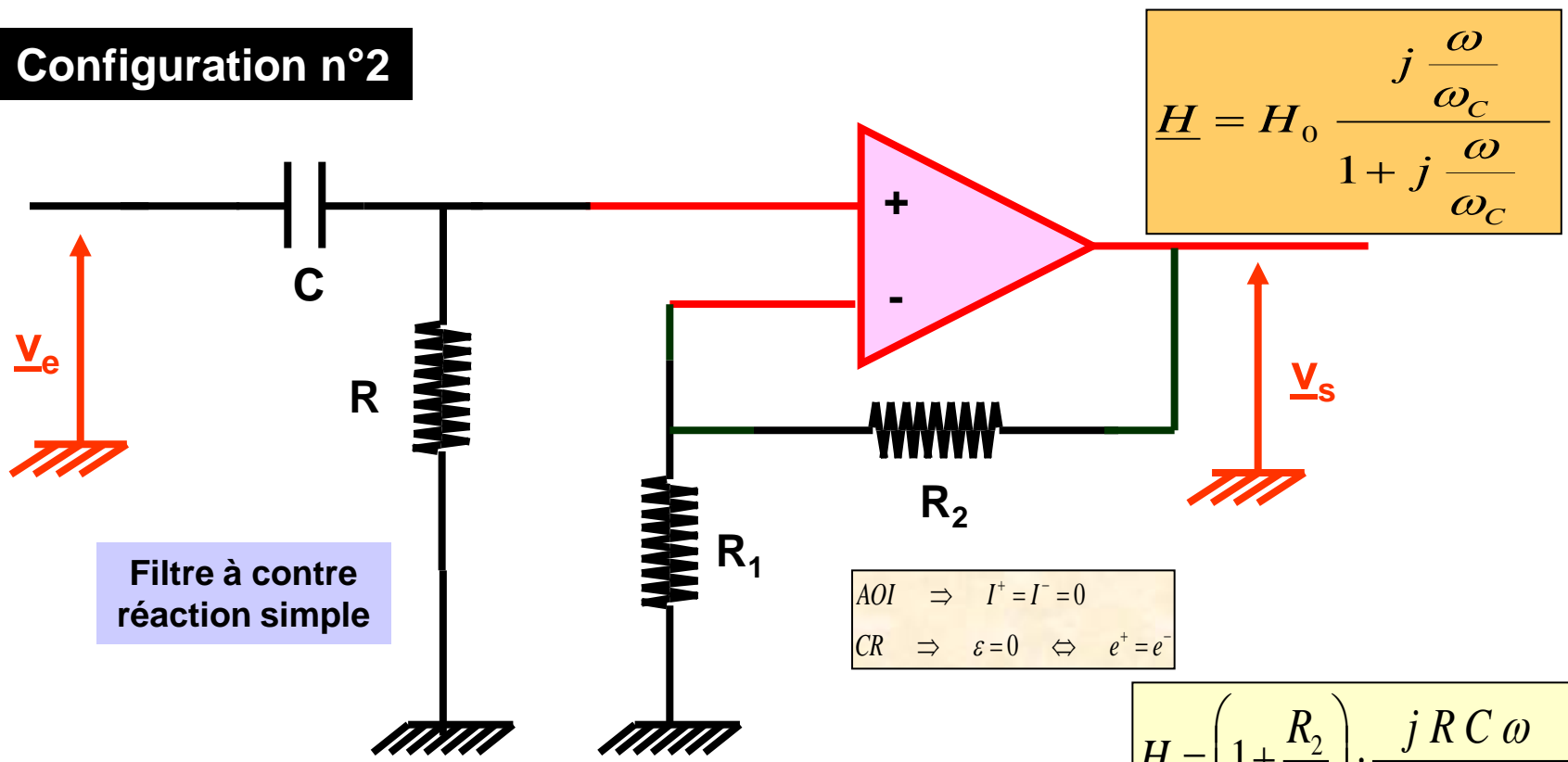




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Configuration n°2



Filtre à contre réaction simple

$$\underline{H} = H_0 \frac{j \frac{\omega}{\omega_c}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

$$\begin{aligned} AOI &\Rightarrow I^+ = I^- = 0 \\ CR &\Rightarrow \varepsilon = 0 \Leftrightarrow e^+ = e^- \end{aligned}$$

$$\underline{H} = \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot \frac{j R C \omega}{1 + j R C \omega}$$

→ Gain d'un amplificateur non inverseur :  $A = H_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

→ Fréquence de coupure :  $f_c = \frac{1}{2 \pi R C}$



## IV. Montages à régime non linéaire



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



- 1°) Comparateurs simples de valeur relative
- 2°) Comparateurs simples de valeur absolue
- 3°) Comparateurs à seuils ou à hystérésis (ou triggers de Scmitt)

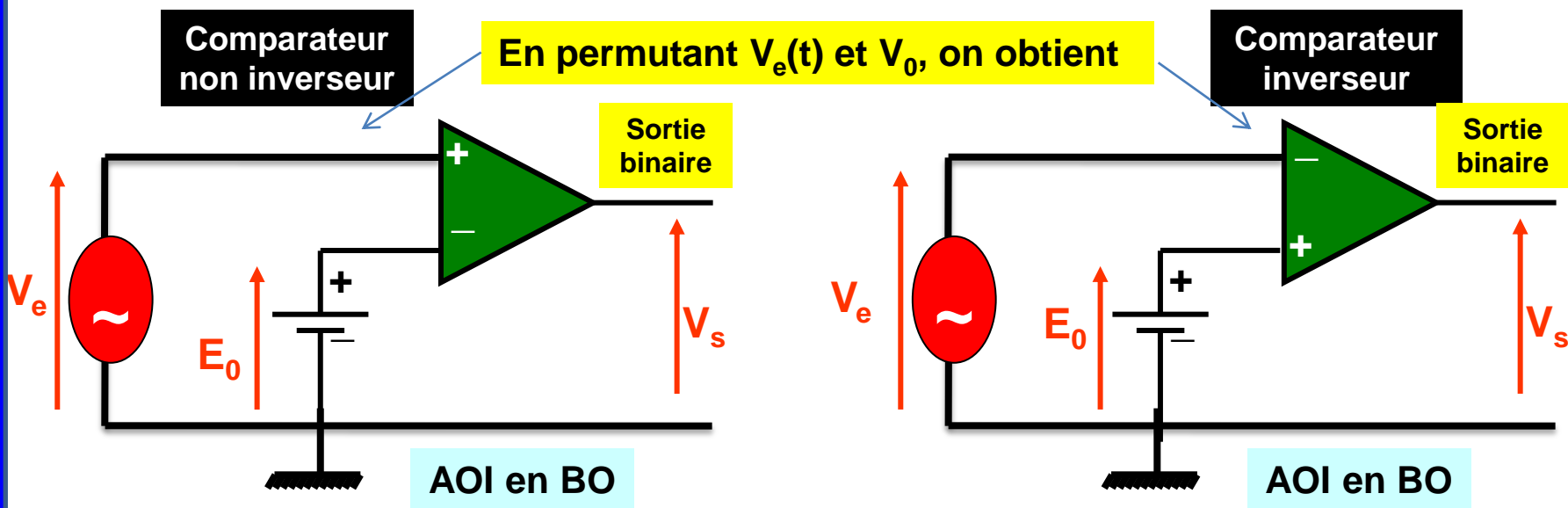


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 1°) Comparateurs simples de valeur relative

► On distingue deux types de montages comparateurs selon les positions respectives de  $V_e(t)$  et  $V_{REF} = E_0$  sur les entrées du comparateur.



Montages comparateurs simples de valeur relative

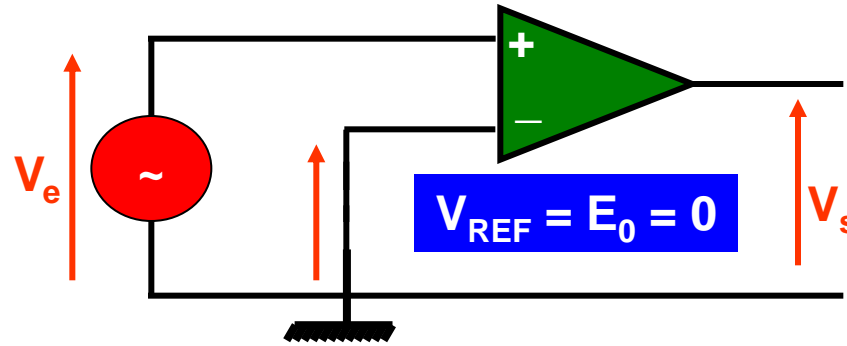
$E_0 = 0$

$E_0 > 0$

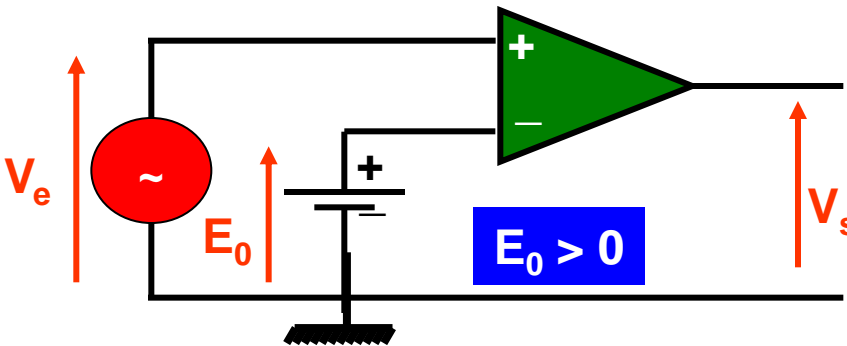
$E_0 < 0$

## Montage comparateur simple non inverseur de valeur relative :

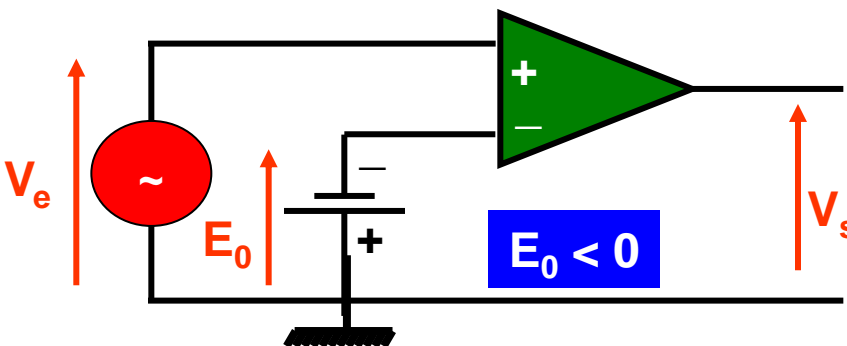
Montage n°1



Montage n°2



Montage n°3

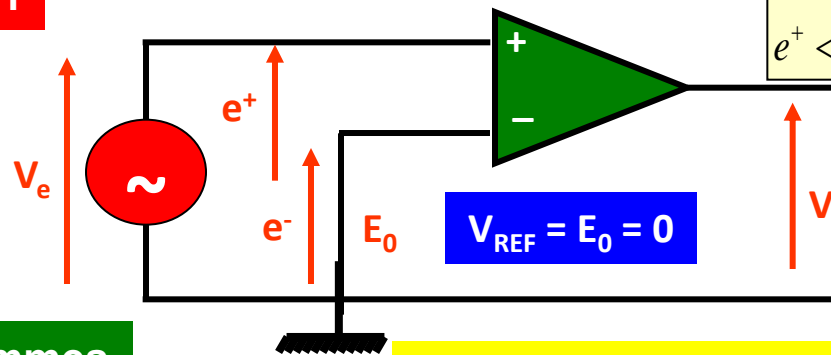




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage n°1



$$e^+ > e^- (\varepsilon > 0) \Leftrightarrow V_e > 0 \Rightarrow s = +V_{sat} \approx V^+$$

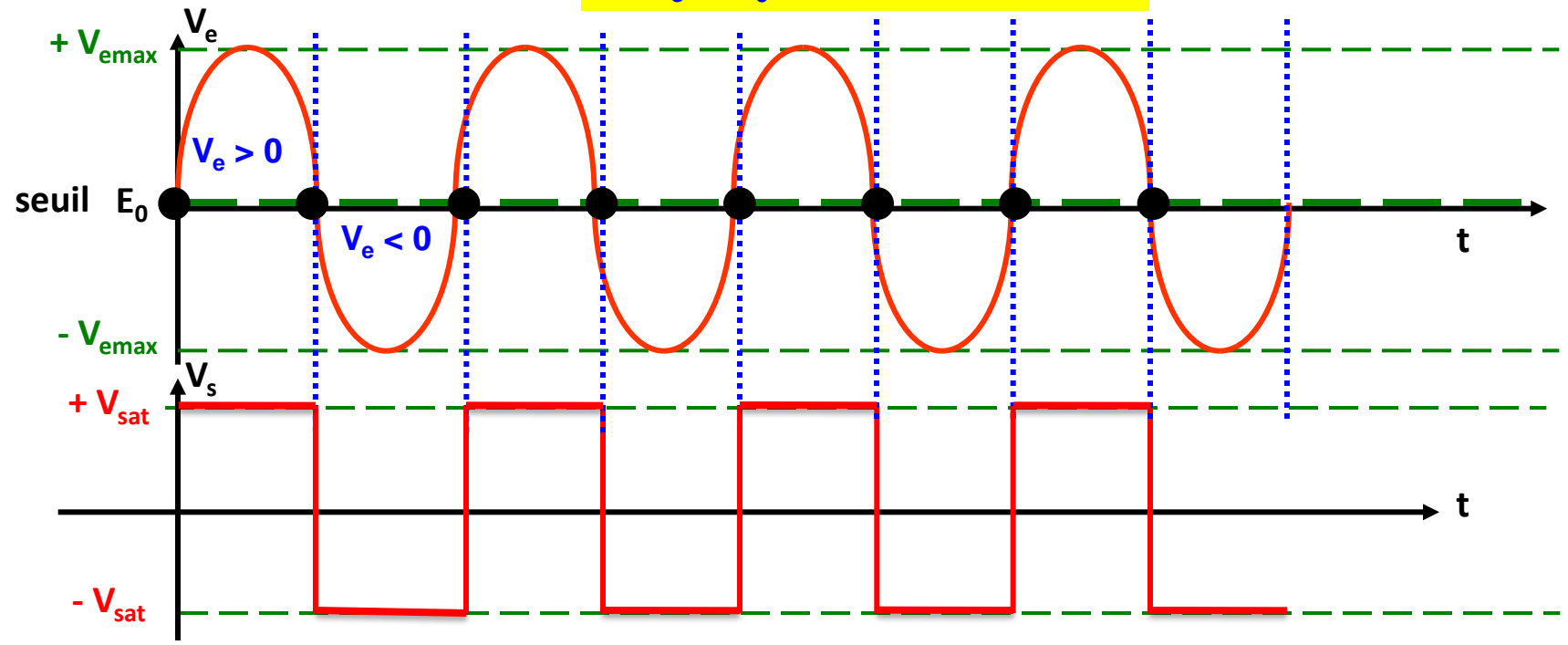
$$e^+ < e^- (\varepsilon < 0) \Leftrightarrow V_e < 0 \Rightarrow s = -V_{sat} \approx V^-$$

$$V_e = 0 \Leftrightarrow \varepsilon = 0$$

0 : seuil de basculement

## Chronogrammes

Si  $V_e = E_0 = 0 \rightarrow$  basculement

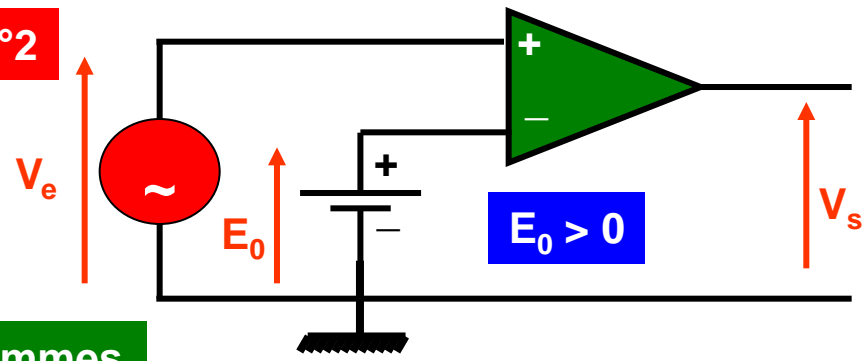




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



**Montage n°2**



$$e^+ > e^- (\varepsilon > 0) \Leftrightarrow V_e > V_0 \Rightarrow s = +V_{sat} \approx V^+$$

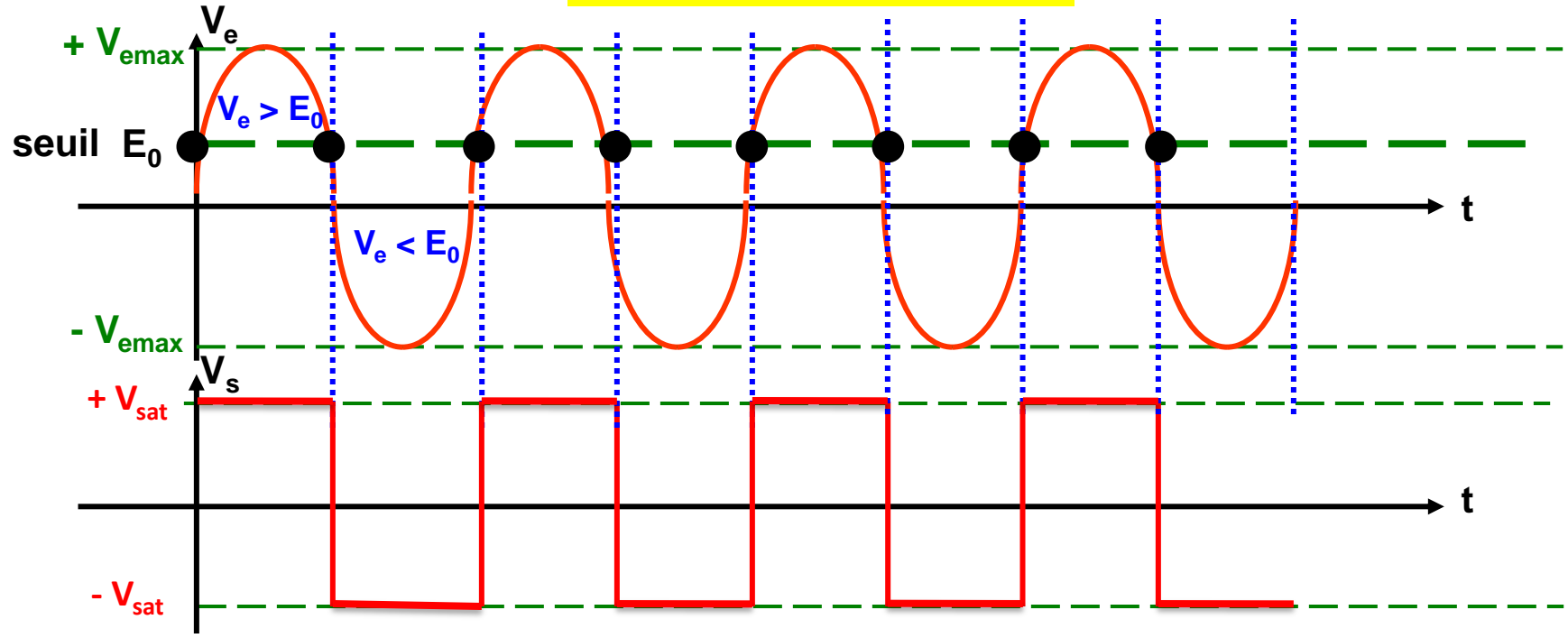
$$e^+ < e^- (\varepsilon < 0) \Leftrightarrow V_e < V_0 \Rightarrow s = -V_{sat} \approx V^-$$

$$V_e = V_0 \Leftrightarrow \varepsilon = 0$$

$V_0$  : seuil de basculement

**Chronogrammes**

Si  $V_e = E_0 \rightarrow$  basculement

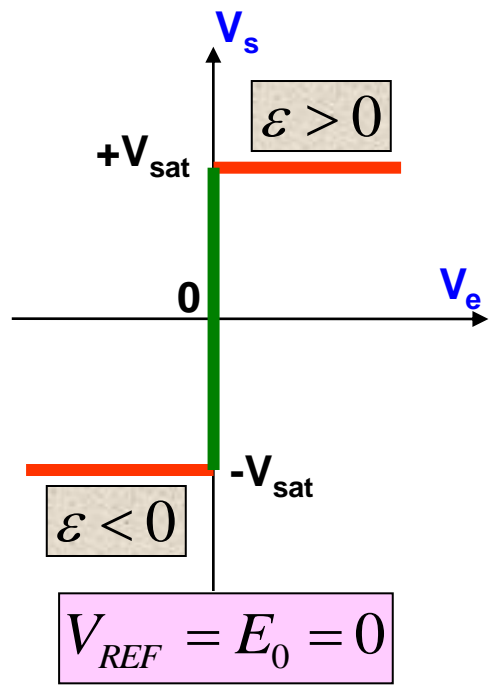
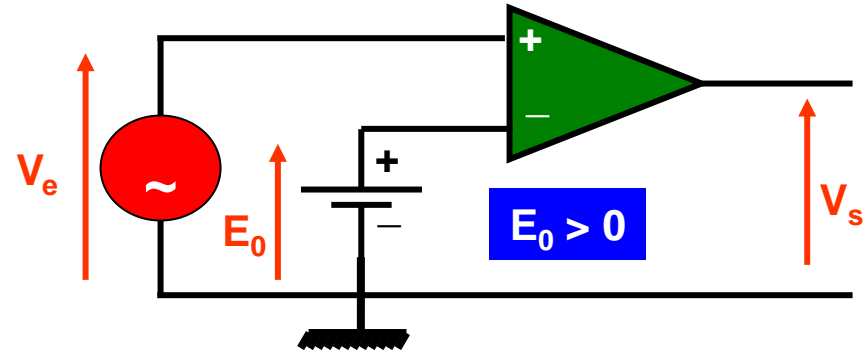
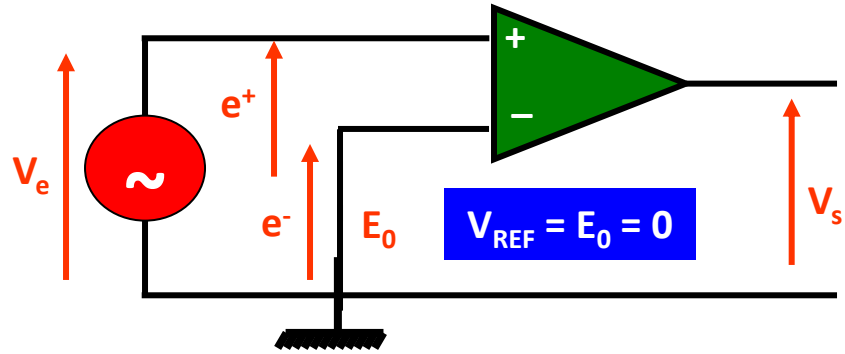




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

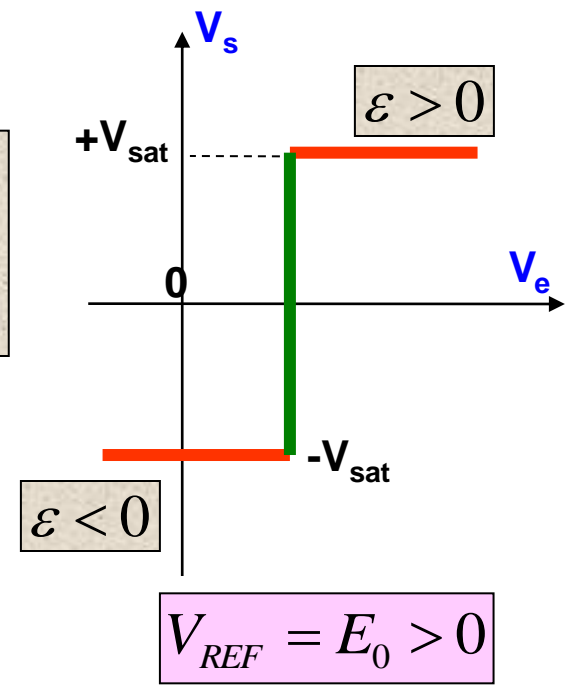


## Fonctions de transfert des comparateurs simples non inverseurs



$$\varepsilon = e^+ - e^- = V_e - V_{REF} = V_e - E_0$$

$\varepsilon > 0$	$V_e > E_0$	$V_s = +V_{sat}$
$\varepsilon < 0$	$V_e < E_0$	$V_s = -V_{sat}$





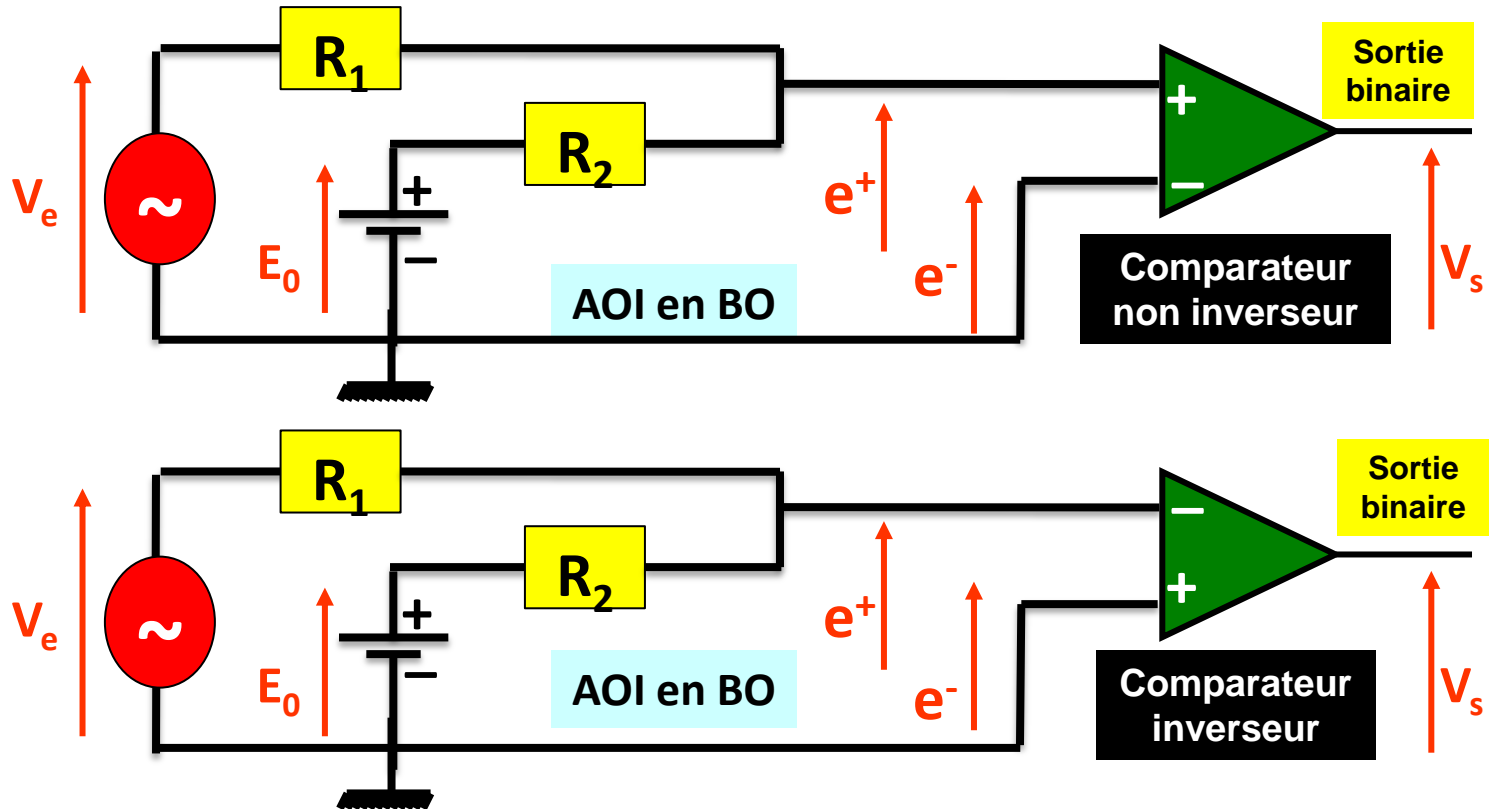


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## 2°) Comparateurs simples de valeur absolue

► On distingue deux types de montages comparateurs selon les positions respectives de  $V_e(t)$  et  $V_{REF} = E_0$  sur les entrées du comparateur.



Montages comparateurs simples de valeur absolue

$E_0 = 0$

$E_0 > 0$

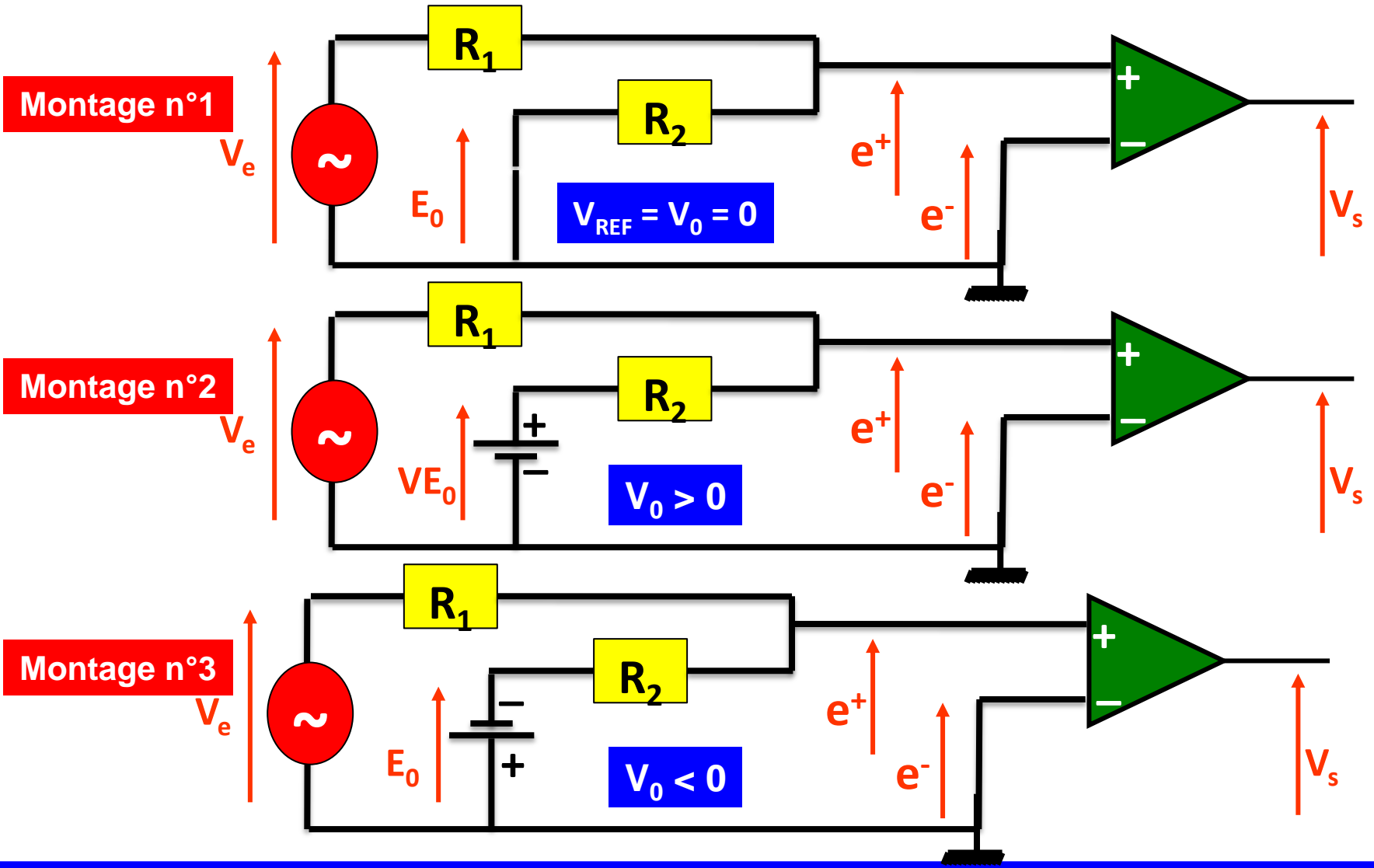
$E_0 < 0$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage comparateur simple non inverseur de valeur absolue :

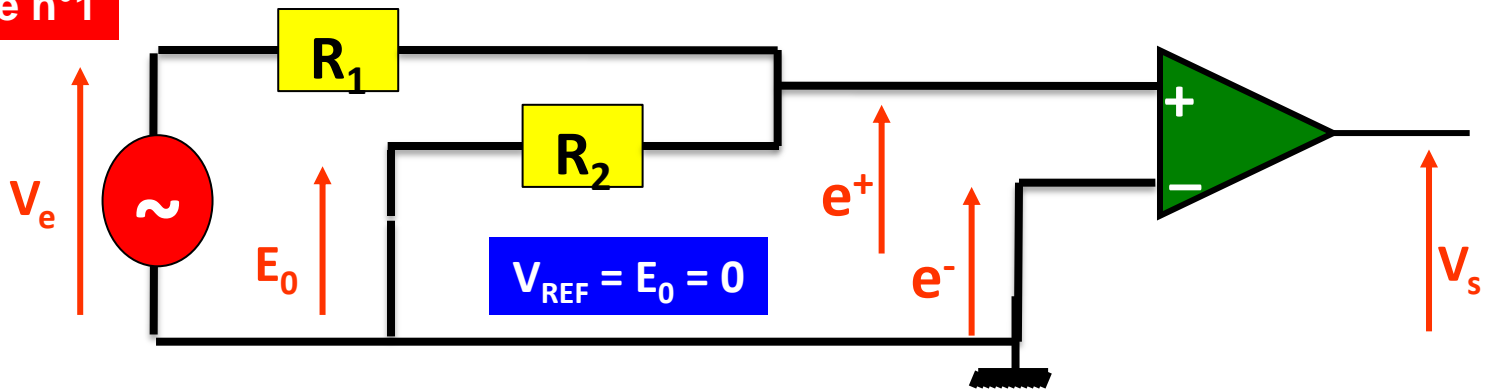




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



Montage n°1



$$e^- = 0 \quad \text{et} \quad e^+ = V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{Basculement :} \quad \text{si } e^+ = e^- = 0$$

$$0 = V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_e = 0 \Rightarrow \text{Seuil : } V_{seuil} = 0$$

$$V_s = +V_{sat} \quad \text{si} \quad e^+ > e^- \Rightarrow V_e > 0 \Rightarrow V_e > V_{seuil}$$

$$V_s = -V_{sat} \quad \text{si} \quad e^+ < e^- \Rightarrow V_e < 0 \Rightarrow V_e < V_{seuil}$$

Basculement si  $V_e = 0$

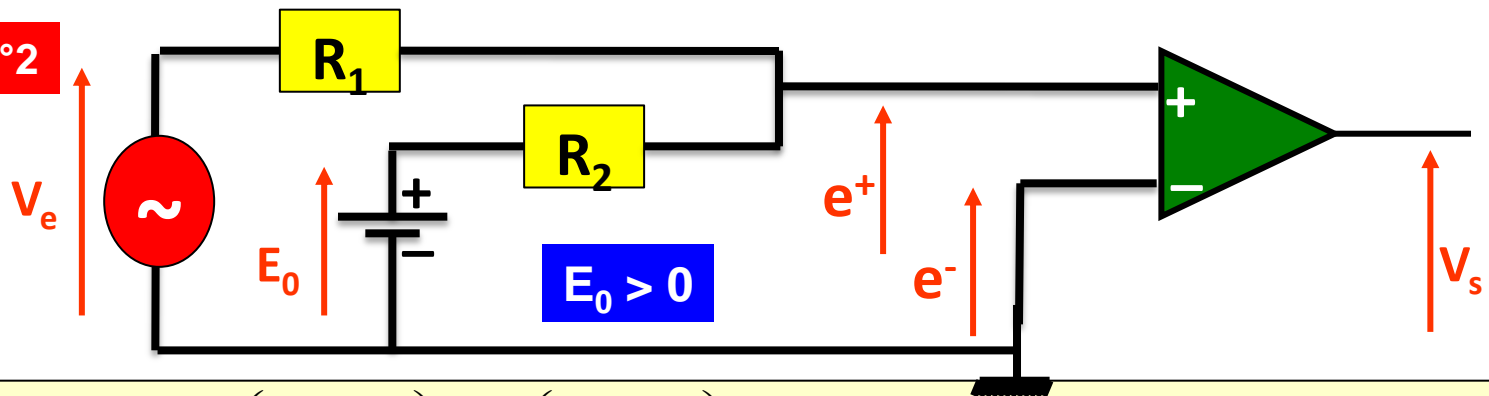
$V_{seuil} = 0$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



**Montage n°2**



$$e^- = 0 \quad \text{et} \quad e^+ = E_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{Basculement :} \quad \text{si } e^+ = e^- = 0$$

$$0 = E_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_e = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) E_0 \Rightarrow \text{Seuil : } V_{seuil} = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) E_0$$

$$V_S = +V_{sat} \quad \text{si} \quad e^+ > e^- \Rightarrow E_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) > 0 \Rightarrow V_e > - \frac{R_1}{R_2} E_0 = V_{seuil}$$

$$V_S = -V_{sat} \quad \text{si} \quad e^+ < e^- \Rightarrow E_0 \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) < 0 \Rightarrow V_e < - \frac{R_1}{R_2} E_0 = V_{seuil}$$

$$\text{Basculement si} \quad V_e = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) E_0$$

$$V_{seuil} < 0$$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



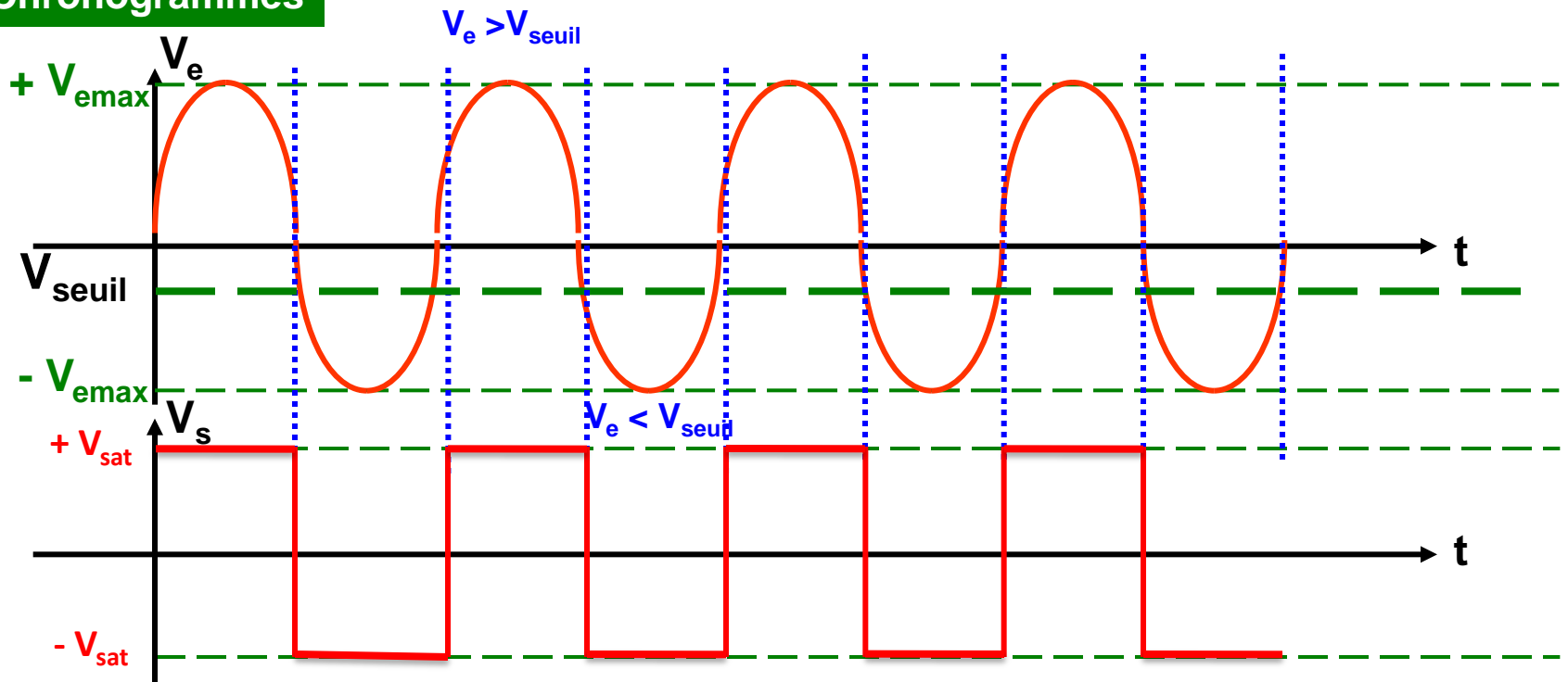
$$V_S = +V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e > -\frac{R_1}{R_2} V_0 = V_{seuil}$$

$$V_S = -V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e < -\frac{R_1}{R_2} V_0 = V_{seuil}$$

Basculement si  $V_e = V_{seuil} = -\left(\frac{R_1}{R_2}\right) V_0$

Si  $V_e = V_{seuil} \rightarrow$  basculement

## Chronogrammes





# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel

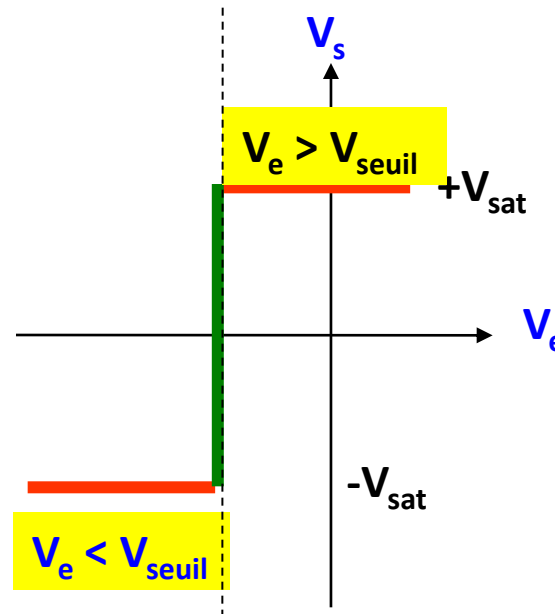


## Fonction de transfert

$$V_S = +V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e > -\frac{R_1}{R_2} \cdot E_0 = V_{seuil}$$

$$V_S = -V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e < -\frac{R_1}{R_2} \cdot E_0 = V_{seuil}$$

$$\text{Basculement si} \quad V_e = V_{seuil} = -\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \cdot E_0$$

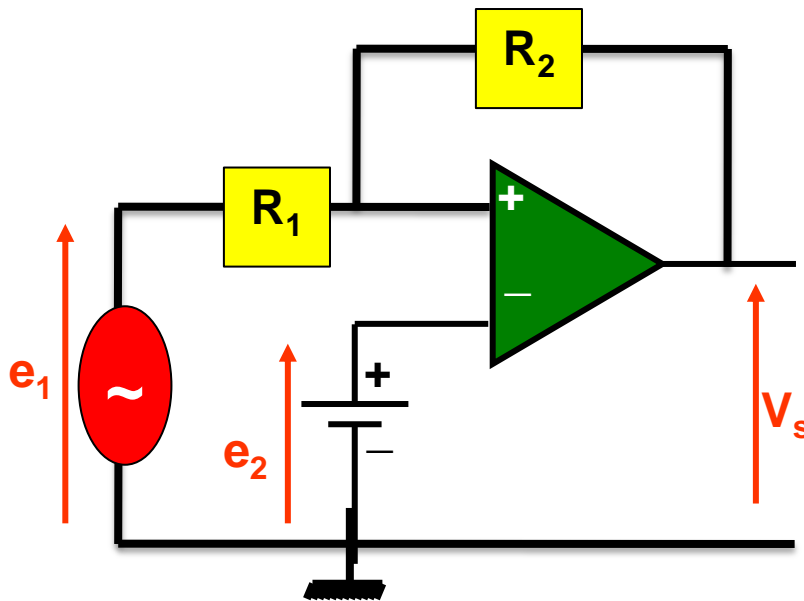


$$V_{seuil} < 0$$

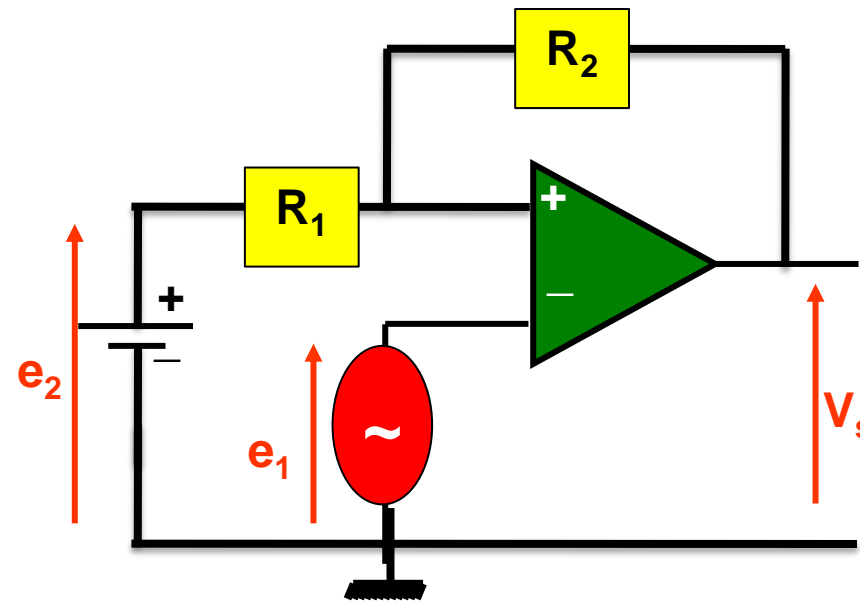


## 3°) Comparateurs à seuils ou à hystérésis (Trigger de Schmitt)

► Dans le cas général, les entrées  $e_1$  et  $e_2$  du montage reçoivent d'une part le signal à comparer  $v_e(t)$  et d'autre part une tension de référence  $V_{REF} = E_0$



**Trigger non inverseur**



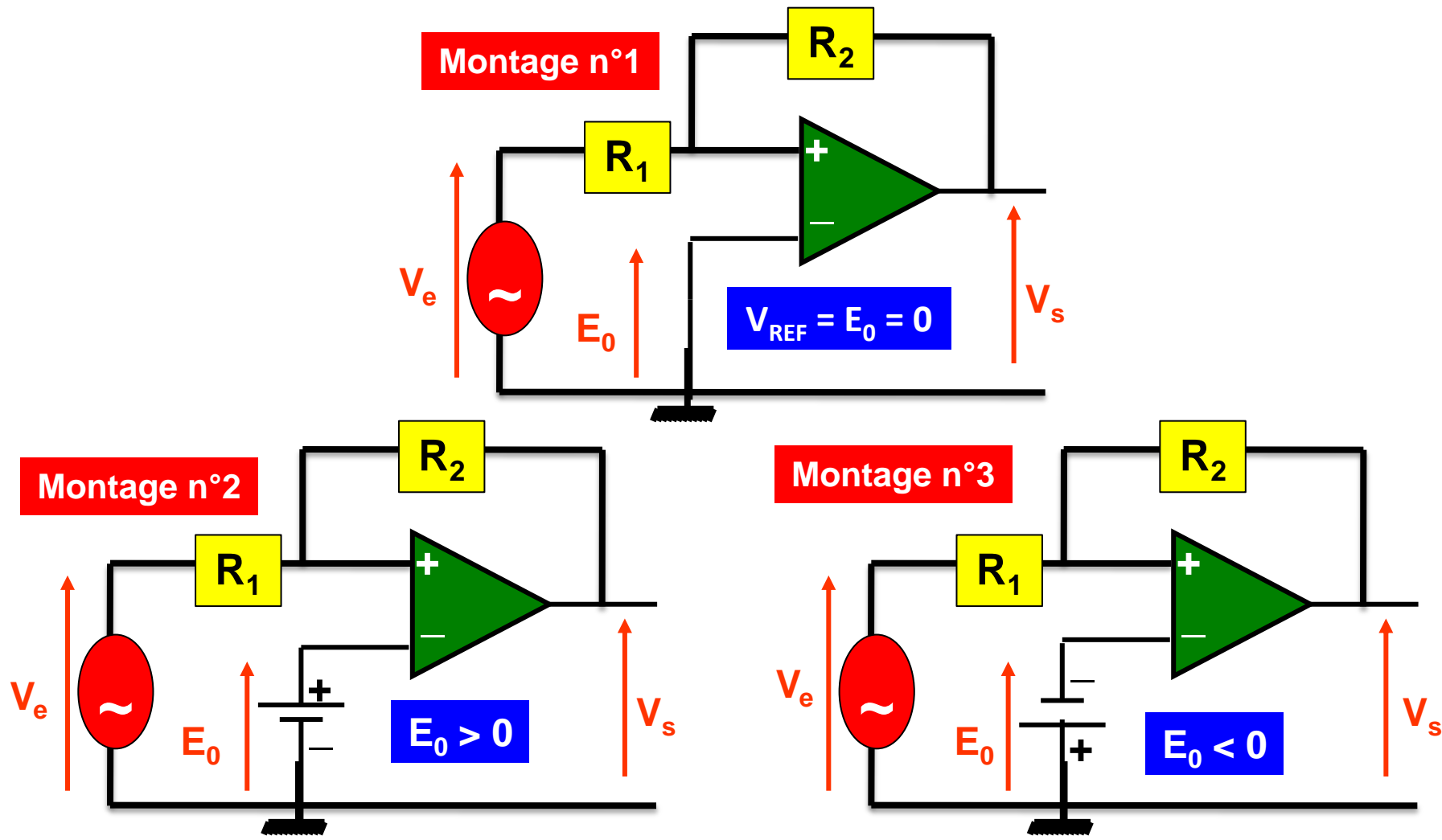
**Trigger inverseur**



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage comparateur à hystérésis non inverseur (Trigger non inverseur) :



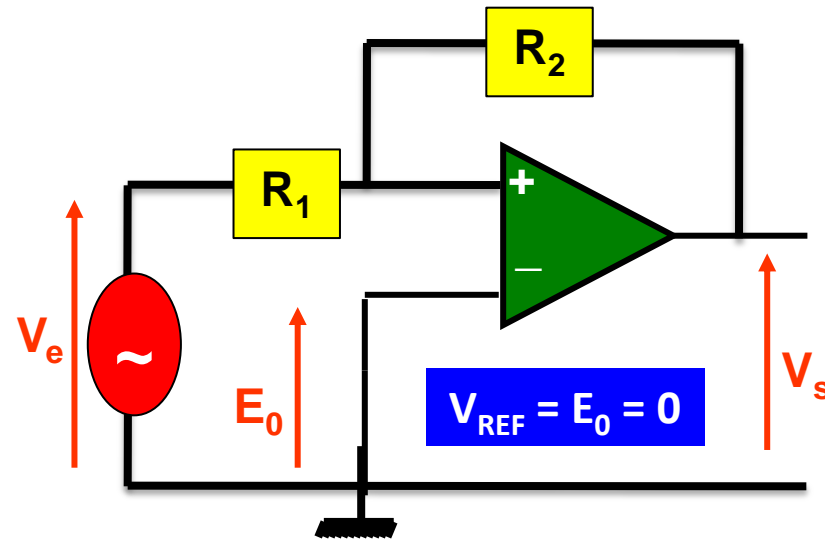




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage n°1



$$e^+ = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{et} \quad e^- = E_0 = 0 \quad \text{Basculement si } e^+ = e^-$$

$$0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \Rightarrow \quad V_e = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_s$$

$$\text{Les seuils : } V_{1/2} = V_{H/B} = \pm \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{Sat} \quad \text{car} \quad V_s = \pm V_{Sat}$$

$V_H$  et  $V_B$  (seuils de commutation de la sortie) sont les valeurs de la tension  $V_e$  qui font changer la valeur de la sortie  $V_s$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



$$e^+ = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{et} \quad e^- = 0 \quad \text{Basculement si } e^+ = e^- = 0$$

$$0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_e = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_s$$

$$\text{Les 2 seuils : } V_H = + \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat} \quad \text{et} \quad V_B = - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat}$$

$$\text{Lorsque } V_s = +V_{sat} \quad \text{alors} \quad e^+ > e^- \Rightarrow V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) > 0 \Rightarrow V_e > - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_0 = V_B$$

$$\text{Lorsque } V_s = -V_{sat} \quad \text{alors} \quad e^+ < e^- \Rightarrow -V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) < 0 \Rightarrow V_e < + \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_0 = V_H$$

$$\text{Si } V_e > V_B \Rightarrow V_s = +V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e < V_H \Rightarrow V_s = -V_{sat}$$



$$\text{Si } V_e < V_B \Rightarrow V_s = -V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e > V_H \Rightarrow V_s = +V_{sat}$$

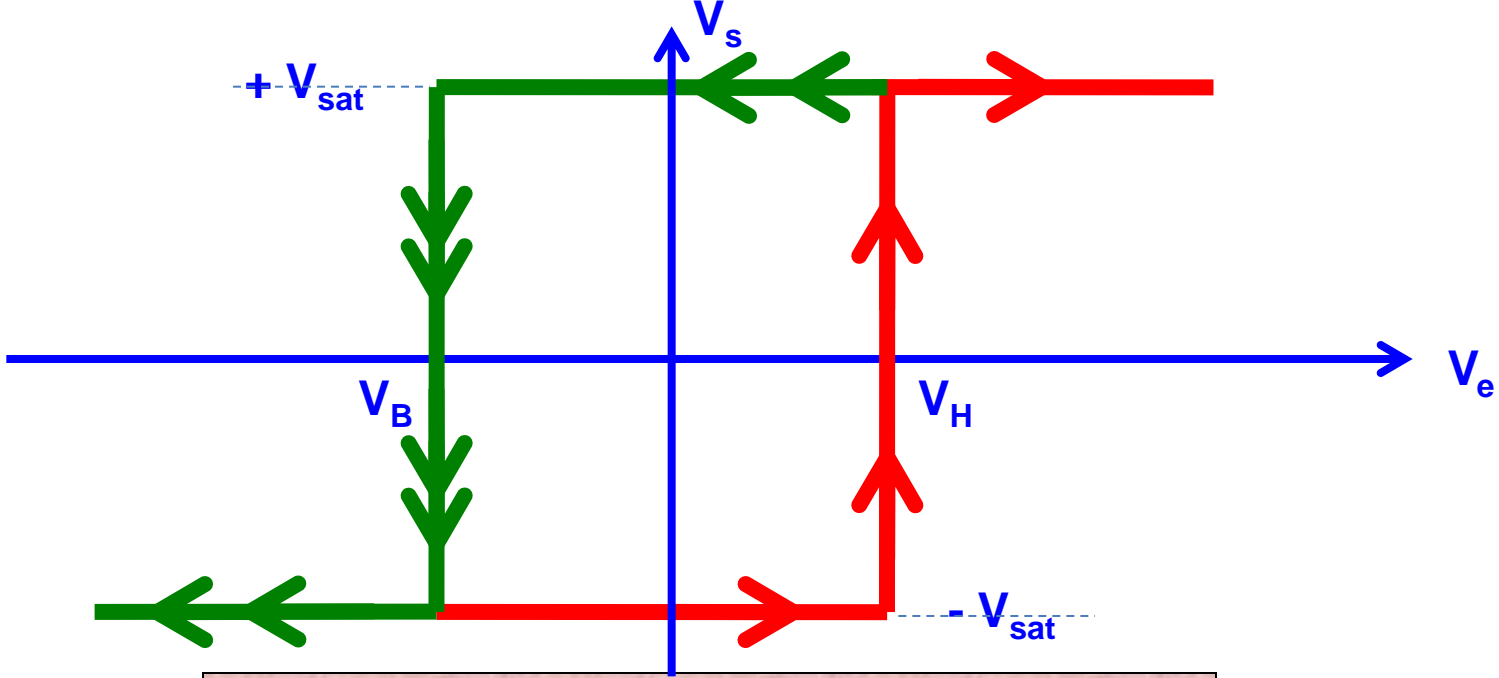


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



1<sup>er</sup> cycle :  $V_s$  passe de  $-V_{sat}$  à  $+V_{sat}$  (seuil :  $V_H$ )  
 2<sup>ème</sup> cycle :  $V_s$  passe de  $+V_{sat}$  à  $-V_{sat}$  (seuil :  $V_B$ )

Cycle d'hystérésis :  $V_s = f(V_e)$



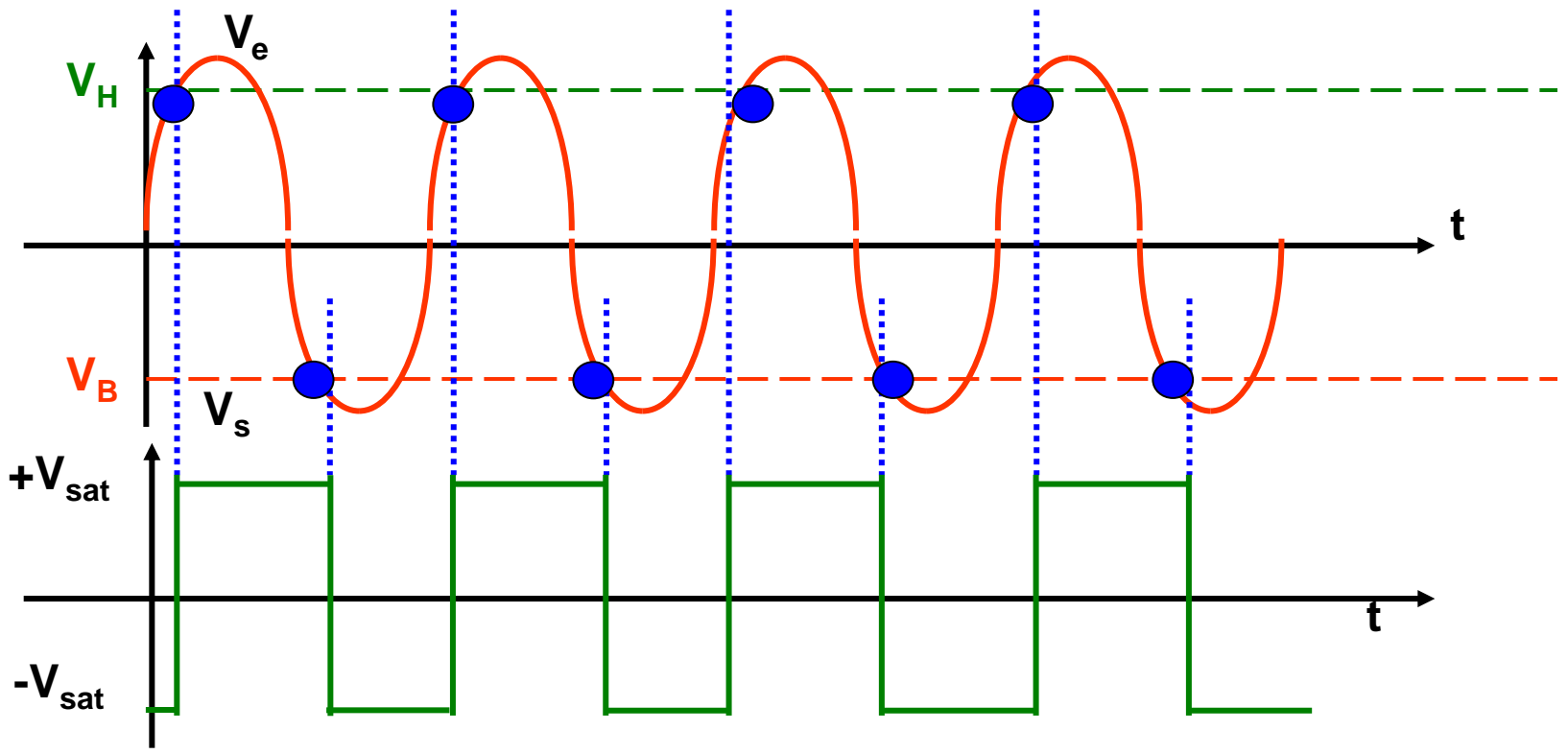
$V_s = +V_{sat}$  si  $V_e > V_B$  et  $V_e > V_H$   
 $V_s = -V_{sat}$  si  $V_e < V_H$  et  $V_e < V_B$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



$$\begin{array}{l}
 V_S = +V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e > V_B \quad \text{et} \quad V_e > V_H \\
 V_S = -V_{sat} \quad \text{si} \quad V_e < V_H \quad \text{et} \quad V_e < V_B
 \end{array}$$

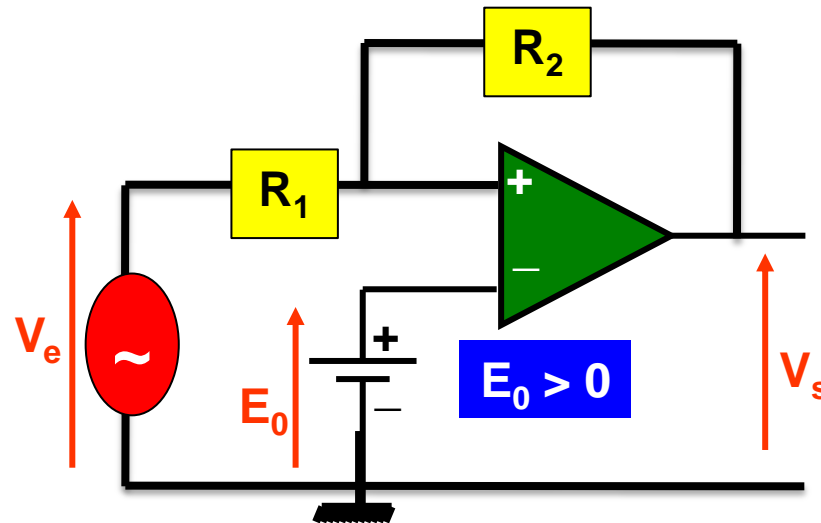




# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



## Montage n°2



$$e^+ = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{et} \quad e^- = E_0 \quad \text{Basculement si } e^+ = e^-$$

$$E_0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \Rightarrow \quad V_e = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) E_0 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_s$$

$$\text{Les seuils : } V_{1/2} = V_{H/B} = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \right) E_0 \pm \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{Sat}$$

$V_H$  et  $V_B$  (seuils de commutation de la sortie) sont les valeurs de la tension  $V_e$  qui font changer la valeur de la sortie  $V_s$



# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



$$e^+ = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad \text{et} \quad e^- = V_0 \quad \text{Basculement si } e^+ = e^-$$

$$V_0 = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \Rightarrow V_e = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_0 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_s$$

$$\text{Les seuils : } V_H = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_0 + \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat} \quad \text{et} \quad V_B = \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_0 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat}$$

$$V_H > 0$$

$$V_B < 0$$

$$\text{Lorsque } V_s = +V_{sat} \quad \text{alors} \quad e^+ > e^- \Rightarrow V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) > V_0 \Rightarrow V_e > \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_0 - \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat} = V_B$$

$$\text{Lorsque } V_s = -V_{sat} \quad \text{alors} \quad e^+ < e^- \Rightarrow -V_{sat} \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) + V_e \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) < V_0 \Rightarrow V_e < \left( \frac{R_1 + R_2}{R_2} \right) V_0 + \left( \frac{R_1}{R_2} \right) V_{sat} = V_H$$

$$\text{Si } V_e > V_B \Rightarrow V_s = +V_{sat}$$

$$\text{Si } V_e < V_H \Rightarrow V_s = -V_{sat}$$

$$0 < V_0 < V_{sat}$$

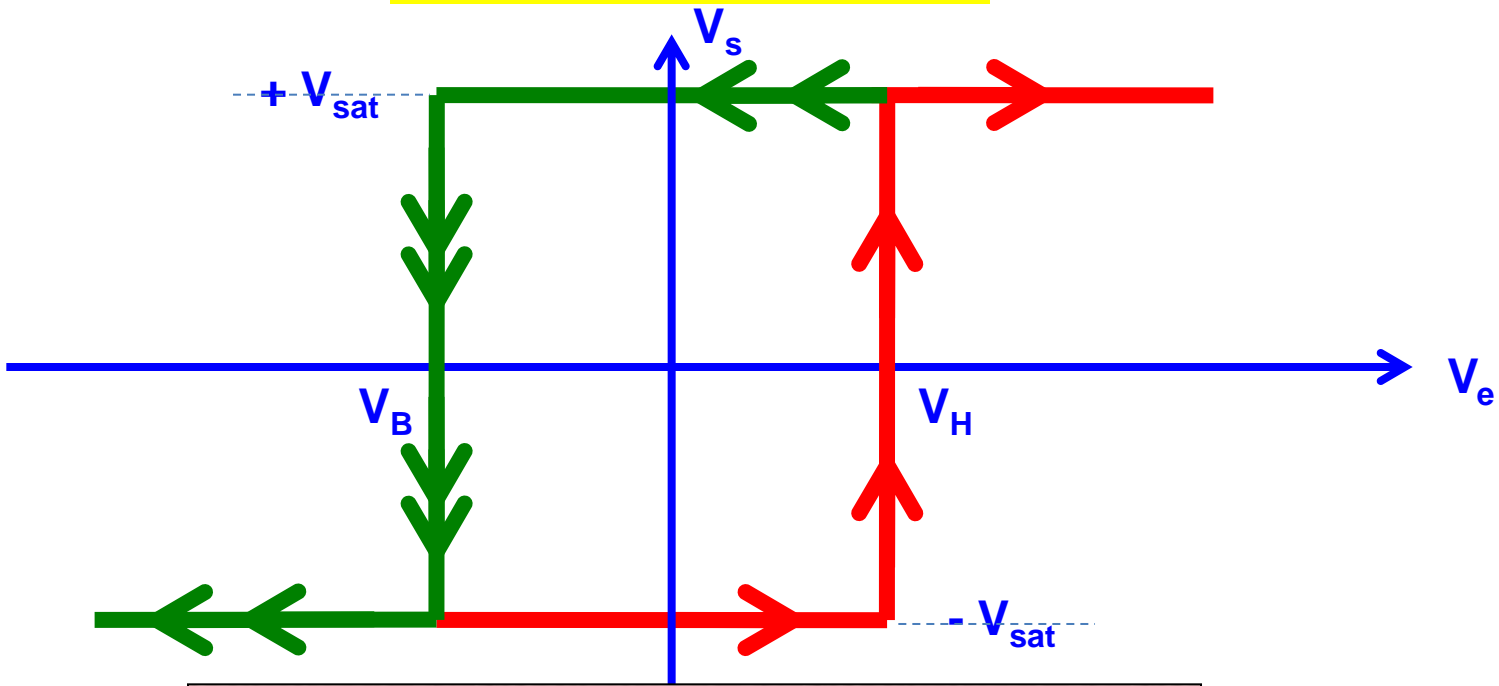


# Chapitre VIII : L'amplificateur opérationnel



1<sup>er</sup> cycle :  $V_s$  passe de  $+V_{sat}$  à  $-V_{sat}$  (seuil :  $V_B$ )  
 2<sup>ème</sup> cycle :  $V_s$  passe de  $-V_{sat}$  à  $+V_{sat}$  (seuil :  $V_H$ )

Cycle d'hystérésis :  $V_s = f(V_e)$



$V_s = +V_{sat}$  si  $V_e > V_B$  et  $V_e > V_H$   
 $V_s = -V_{sat}$  si  $V_e < V_H$  et  $V_e < V_B$



## Fin du chapitre VIII

# Amplificateur Opérationnel





## Fin de l'exposé de cours

**Module : E141**

# Circuits Électriques et Électroniques « CEE »