

# Amplificateur Opérationnel en régime linéaire et ses applications

Adil KOUKAB

**EPFL**

**EPFL**  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

ELECTRONICS LABORATORY  
**leg**

---

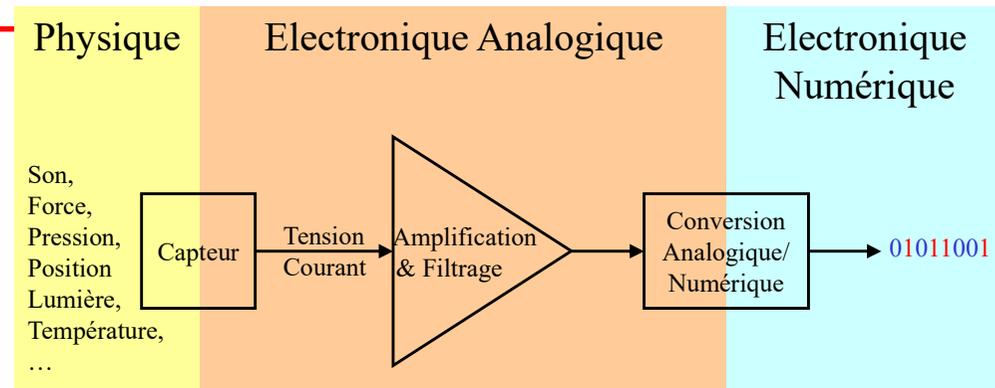
# Plan

---

- AmpliOp et Amplificateur de tension: Modèle et Généralités
- Amplificateur opérationnel Idéal
  - AmpliOp en en boucle ouverte
- AmpliOp en régime linéaire: Réaction négative ou Contre-Réaction
  - Montages à gain indépendant de la fréquence
    - Inverseur
    - Non Inverseur
- Quelques Applications

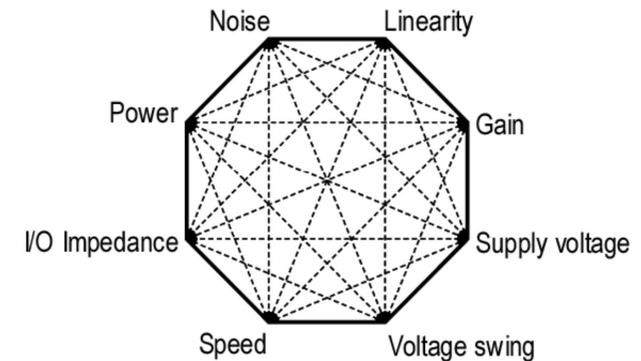
# Interface avec le capteur: Forcement Analogique

- Lecture de:
  - Tension
  - Courant / charge



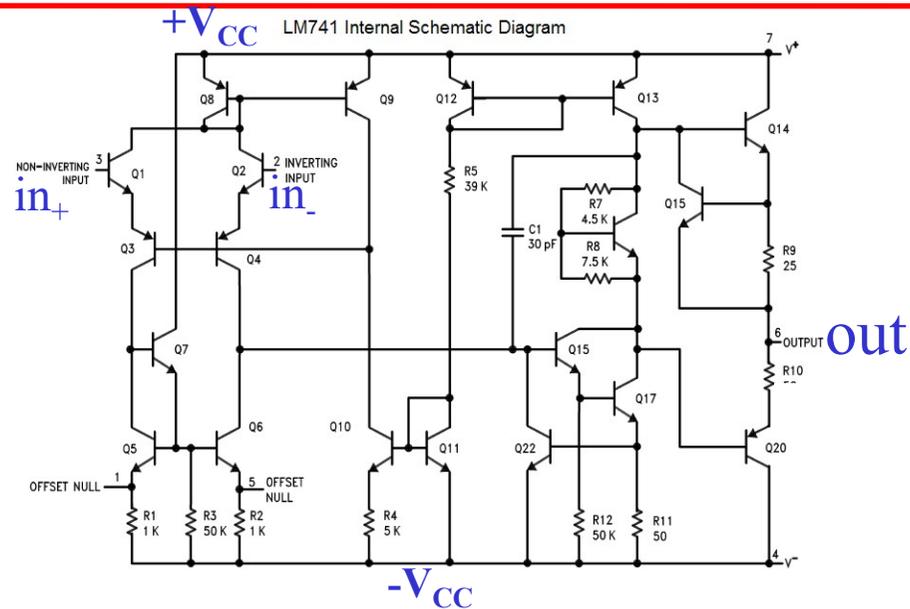
- Problématique / Imperfections:

- Faible niveau de signal
- Non-linéarité
- Bruit électronique ...

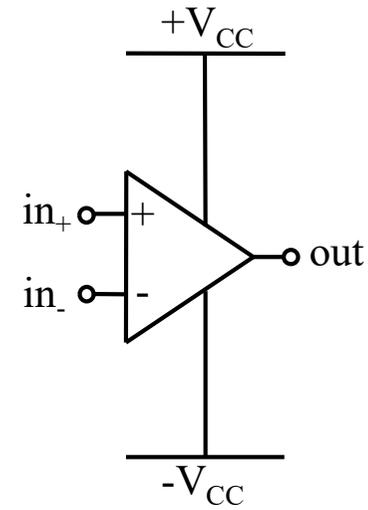


- Conditionnement analogique du signal:  
Amplification et Filtrage  
→ **Amplificateur opérationnel & contre-réaction**

# Amplificateur Opérationnel (comme Boite Noire): Circuit, Symbole et Alimentation



Schémas du LM741



Symbole

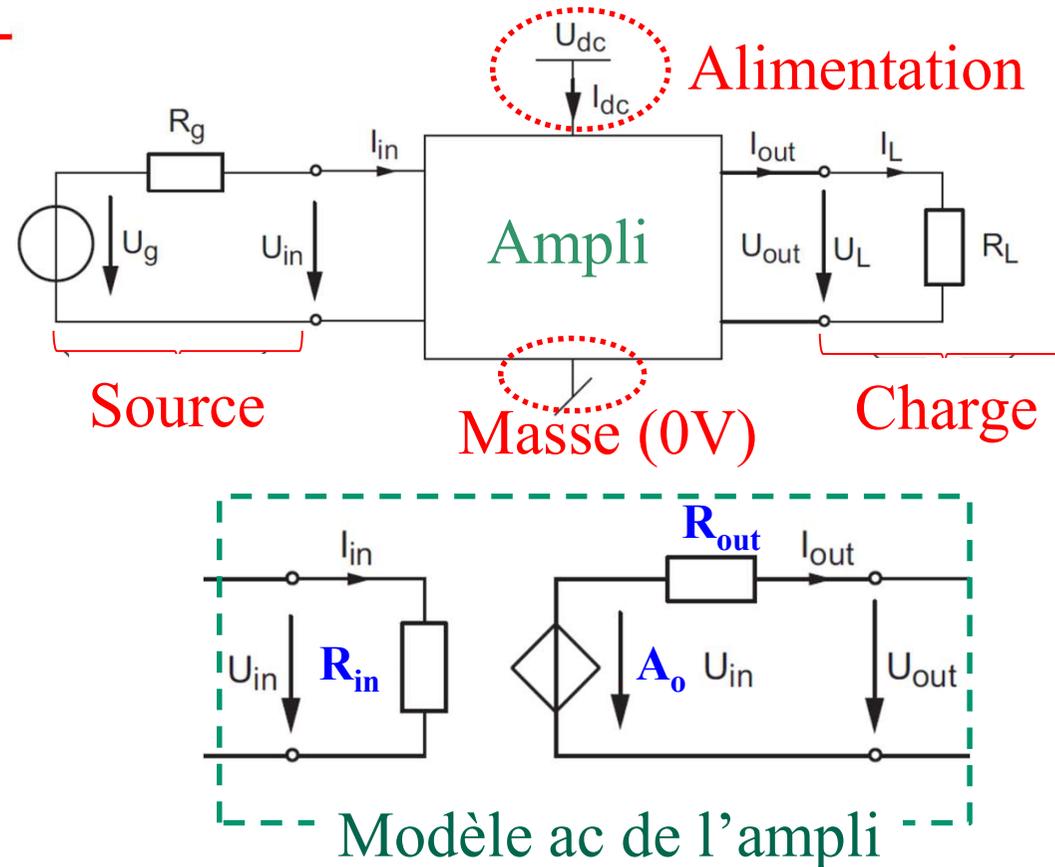
- 2 tensions d'alimentation:  $+V_{CC}$  et  $-V_{CC}$  avec  $V_{CC} = 5$  à  $18$  V
- Point milieu des alimentations = référence de potentiels (masse)
- Une entrée différentielle  $\equiv$  deux entrées, une inverseuse (in-) et une non-inverseuse (in+)
- Une sortie Out: avec  $-V_{CC} \leq V_{out} \leq V_{CC}$



Informations nécessaires pour le modèle de l'ampli:

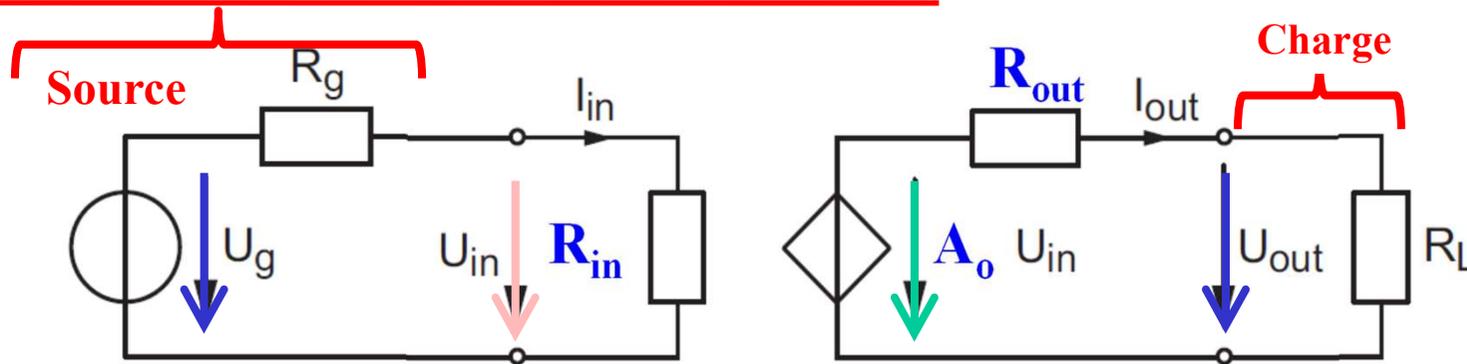
- $R_{in}$  résistance d'entrée ;  $A_o$  Gain à vide ou sans la charge;  $R_{out}$  Résistance de sortie

# Amplificateur de tension: Généralités



- $R_{in}$  résistance d'entrée ( $=U_{in}/I_{in}$ )
- $A_o$  Gain à vide ou sans la charge ( $=U_{out}/U_{in}$  pour  $R_L \rightarrow \infty$ )
- $R_{out}$  Résistance de sortie ( $U_{out}/I_{out}$  pour  $U_{in} = 0$ )

# Amplificateur de tension: Généralités



- Gain total en tension:

$$A_T = \frac{U_{out}}{U_g} = \frac{U_{out}}{A_o U_{in}} \frac{A_o U_{in}}{U_{in}} \frac{U_{in}}{U_g} = \frac{\overbrace{R_L}^{\text{Atténuation}}}{R_L + R_{out}} A_o \frac{\overbrace{R_{in}}^{\text{Atténuation}}}{R_{in} + R_g}$$

$$\xrightarrow[\substack{R_{out} \rightarrow 0 \\ R_{in} \rightarrow \infty}]{\text{}} A_T = \frac{U_{out}}{U_g} = A_o$$

- L'amplificateur est idéal (sans atténuation) si:
  - $R_{out} \rightarrow 0$  ;  $R_{in} \rightarrow \infty$  et  $A_o \rightarrow \infty$  (expliqué ultérieurement)

---

# Plan

---

- AmplOp et Amplificateur de tension: Modèle et Généralités
- Amplificateur opérationnel Idéal
  - AmpliOp en en boucle ouverte
- AmpliOp en régime linéaire: Réaction négative ou Contre-Réaction
  - Montages à gain indépendant de la fréquence
    - Inverseur
    - Non Inverseur
- Quelques Applications

# Gain, $R_{in}$ et $R_{out}$ de l'AO idéal

- Gain boucle ouverte de l'AO,  $A$

$$V_{out} = A \Delta V = A (V^+ - V^-)$$

$$A \rightarrow \infty \quad (A > 10^5)$$

- Résistance de sortie

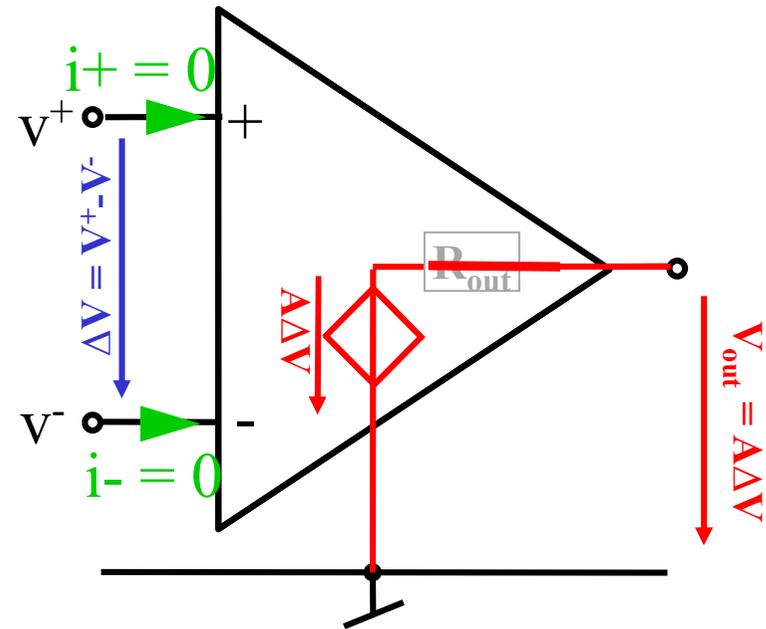
$$R_{out} \rightarrow 0$$

⇒ Gain indépendant de la charge

⇒ Possibilité de cascader plusieurs étages

- Résistance d'entrée

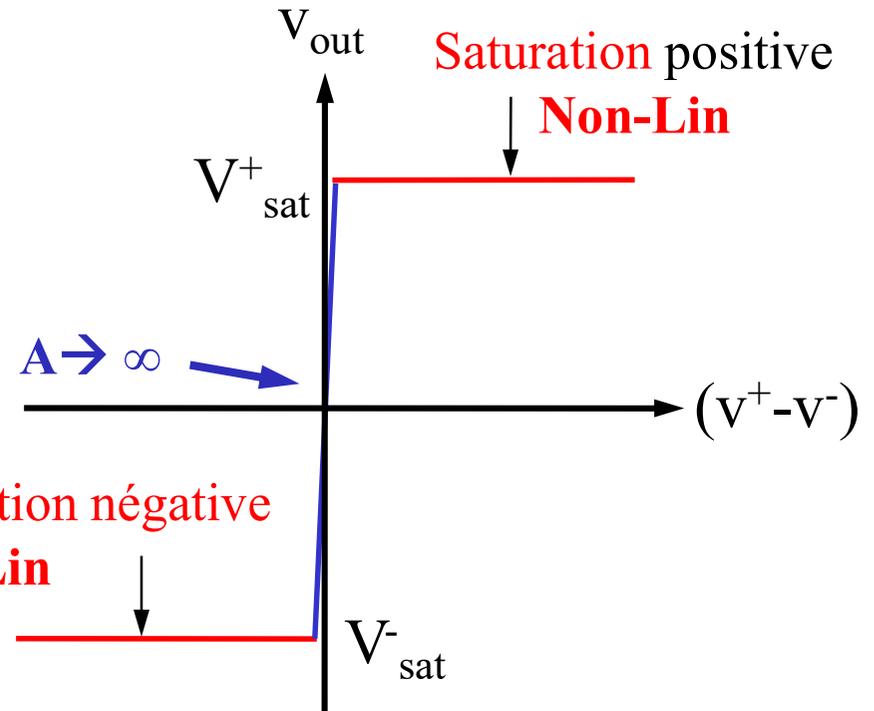
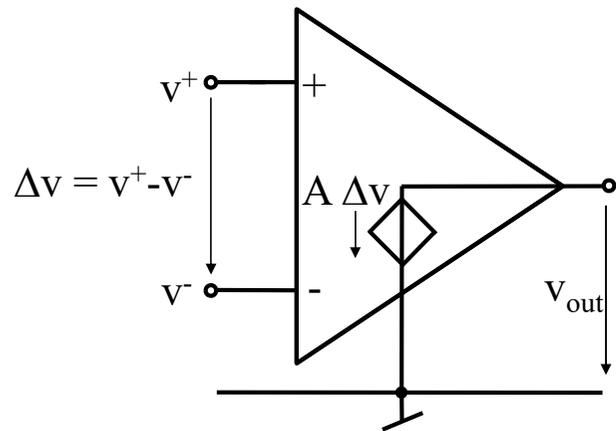
$$R_{in} \rightarrow \infty \rightarrow i^+ = i^- = 0$$



**Rq:** ☹️  $A$  est peu précis et très sensible aux variations des procédés de fabrication et de température



## Définition: AO en boucle ouverte (régime non-linéaire → comparateur)



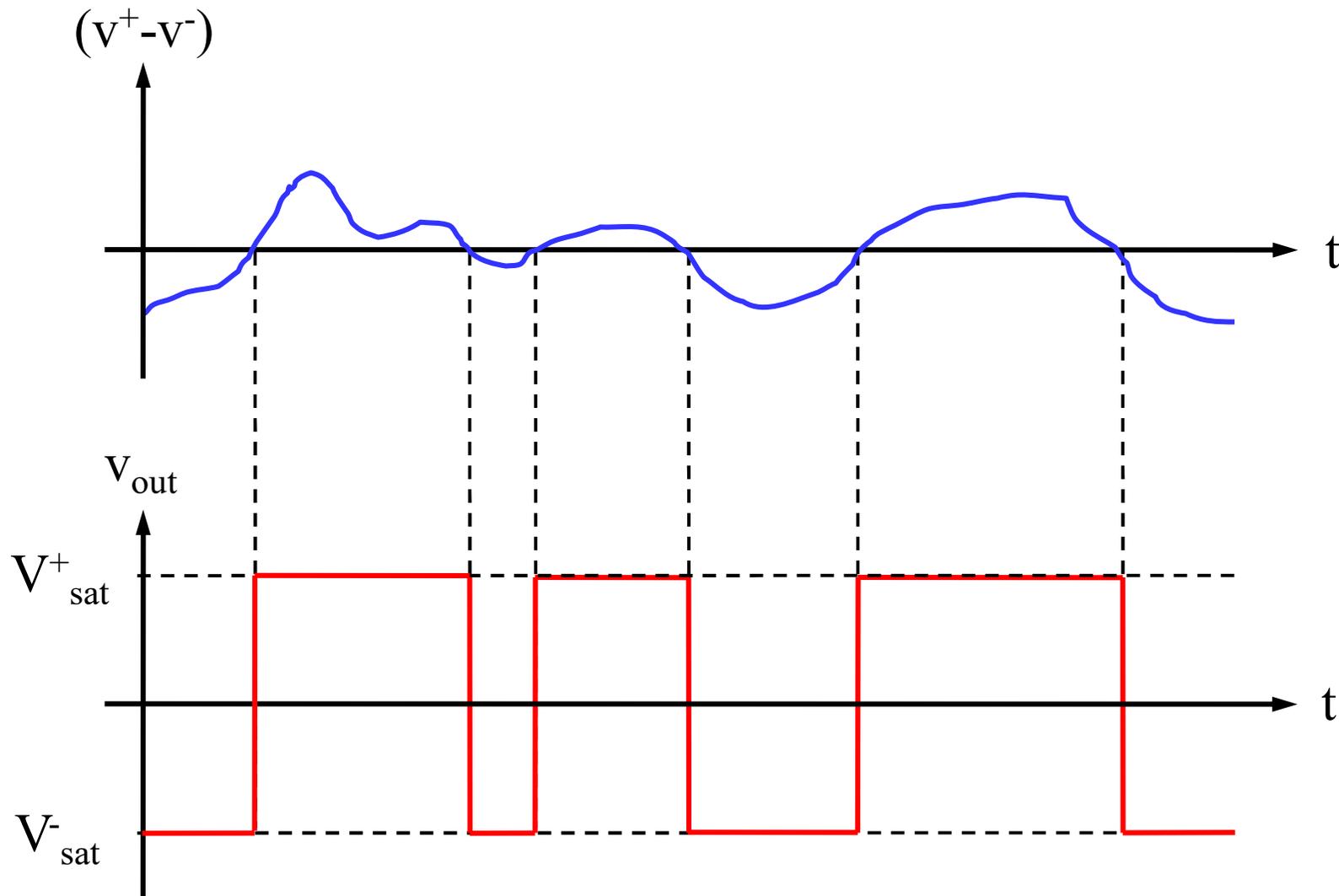
$$V_{out} = A \Delta V = A (V^+ - V^-)$$

$$A \rightarrow \infty$$

$$V_{sat}^- \leq V_{out} \leq V_{sat}^+$$

$$V_{sat}^\pm \approx \pm V_{cc}$$

# AO en boucle ouverte $\equiv$ Comparateur



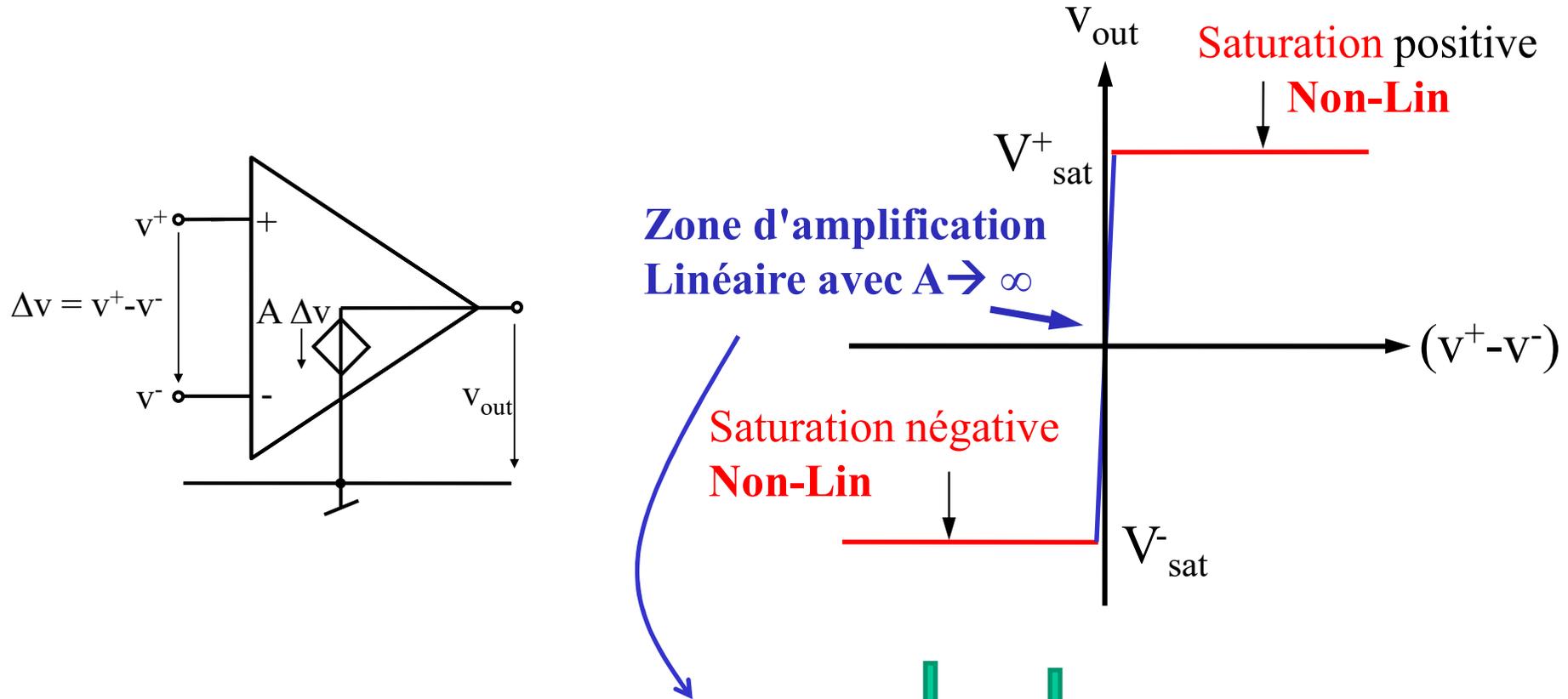
---

# Plan

---

- AmplOp et Amplificateur de tension: Modèle et Généralités
- Amplificateur opérationnel Idéal
  - AmpliOp en en boucle ouverte
- AmpliOp en régime linéaire: Réaction négative ou Contre-Réaction
  - Montages à gain indépendant de la fréquence
    - Inverseur
    - Non Inverseur
- Quelques Applications

# AmpliOp (Zone d'Amplification Linéaire)

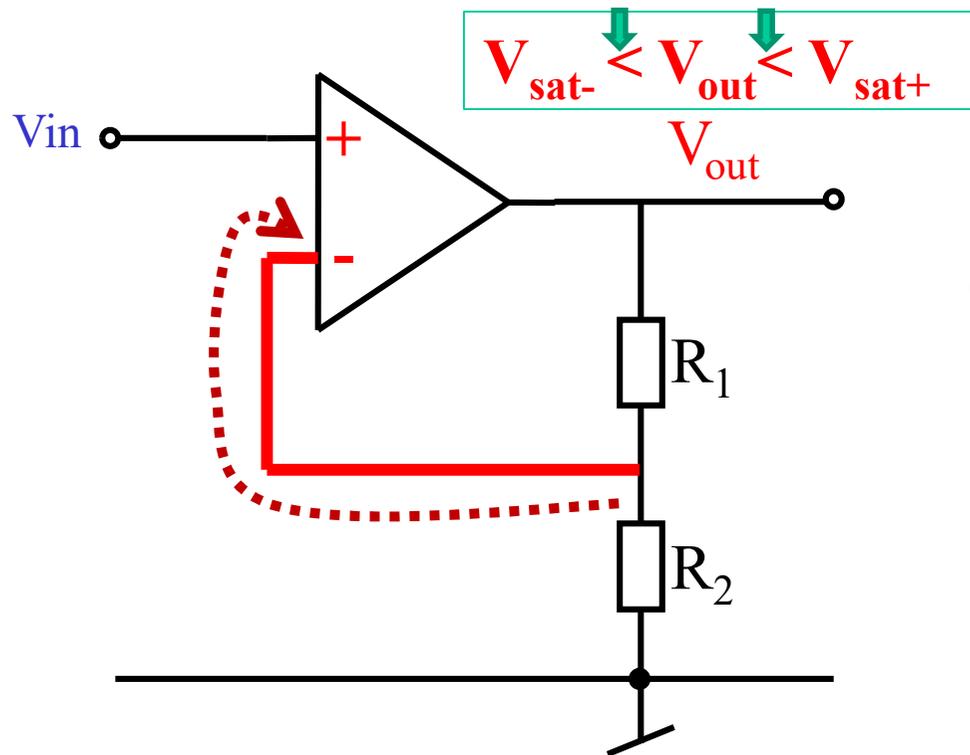


En régime linéaire  $V_{sat-} < V_{out} < V_{sat+}$

Possible seulement pour  $\rightarrow v^+ \approx v^-$

↔ Ajout d'une Contre-Réaction 🤔

# Régime Linéaire : AO en contre-réaction ou réaction négative (→ Amplificateurs de tension et Filtres)



$$V_{out} = A \Delta V = A (V^+ - V^-)$$

$$A = \infty (A > 10^5) \text{ et } V_{out} \text{ finie}$$

$$\Delta V = V^+ - V^- = 0$$

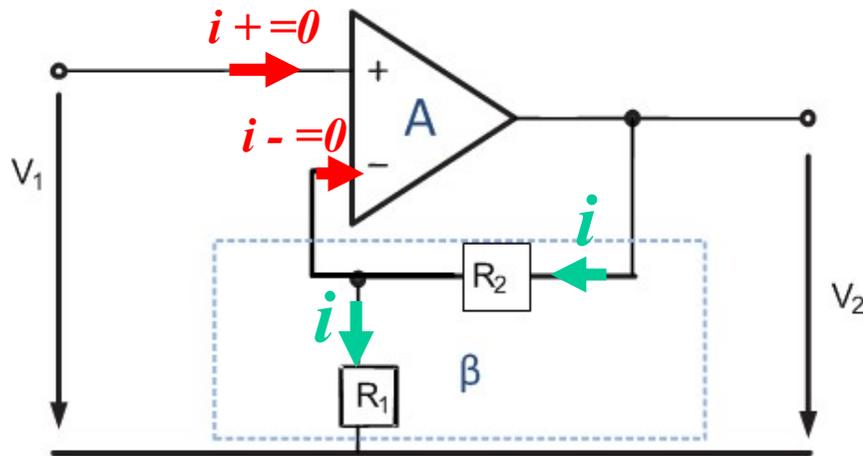
(AO idéal)

$$\Rightarrow V^+ \approx V^-$$

S'il existe un chemin entre la sortie de l'amplificateur et l'entrée inverseuse - → L'amplificateur est maintenu dans la zone linéaire (asservissement)

## Ex: Amplificateur non-inverseur

### Gain boucle fermée ( $G = \frac{v_2}{v_1}$ ) par analyse complète



- Gain de l'AO:

$$v_2 = A(v_+ - v_-)$$

$$= A(v_1 - v_-)$$

- AO idéal:  $i_{\pm} = 0 \rightarrow i(R_1) = i(R_2)$   
 $\rightarrow$  on peut appliquer diviseur de tension

$$v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_2$$

- Substitution

$$v_2 \left( 1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = A v_1 \quad G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 + A \frac{R_1}{R_1 + R_2}} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

- Gain  $G$  indépendant de  $A$  (si  $A \rightarrow \infty$ ).
- $G$  s'exprime comme un rapport de résistances

😊😊 Faible sensibilité de  $G$  aux variations des procédés de fabrication et de température

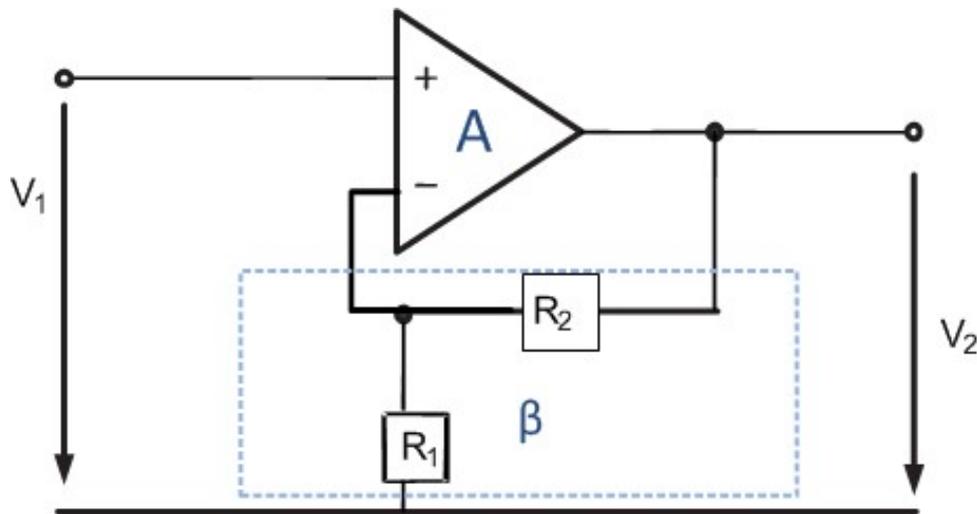
---

## Ex: Amplificateur non-inverseur

### Gain boucle fermée ( $G = \frac{v_2}{v_1}$ ) par analyse simple

---

- On considère dès le début que le Gain de l'AO est infinie, et donc que le régime linéaire (réaction négative) conduit à:  $v_+ = v_-$

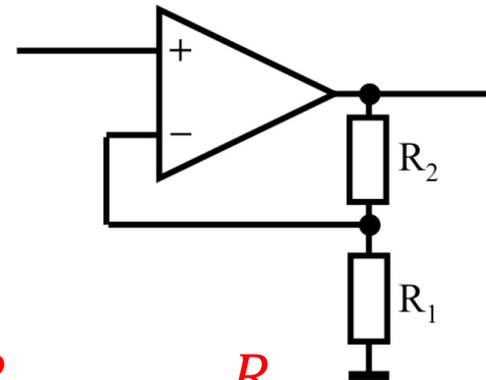
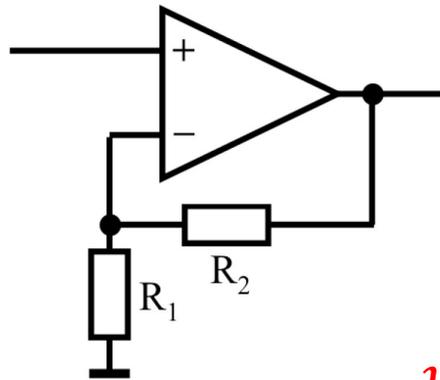


$$v_+ = v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_2$$

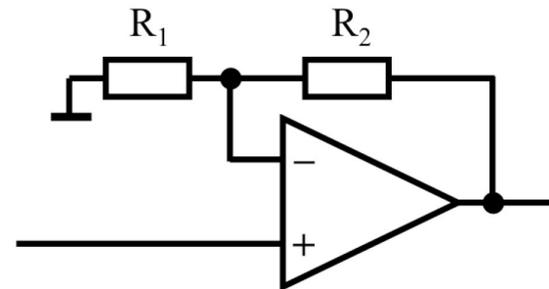
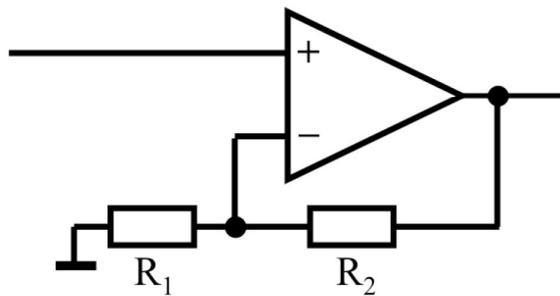
et  $v_+ = v_1$

$$G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

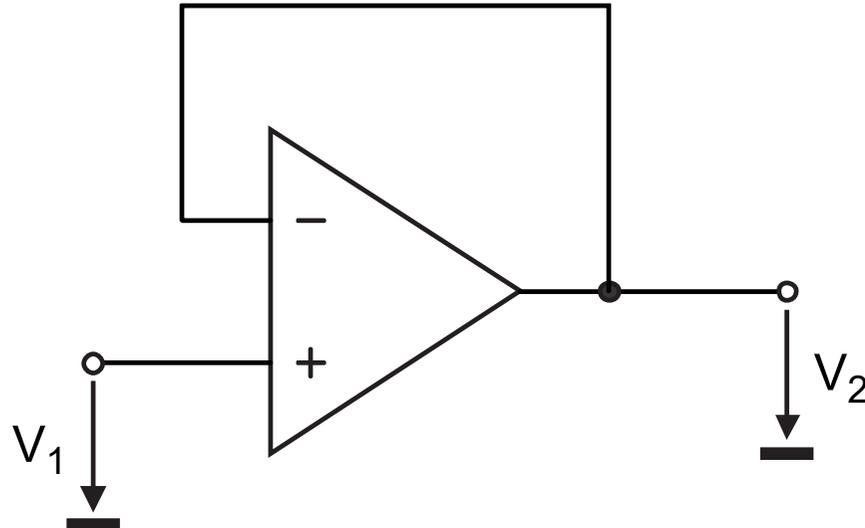
# Amplificateur non-inverseur: Variantes graphiques



$$G_{N\_INV} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



# Suiveur: Analyse complète



(Rq:  $\equiv$  Ampli N\_Inv avec  $R_2 = 0$  et  $R_1 \rightarrow \infty$ ):

$$v_2 = A(v_+ - v_-)$$

$$v_+ = v_1 \quad ; \quad v_- = v_2$$

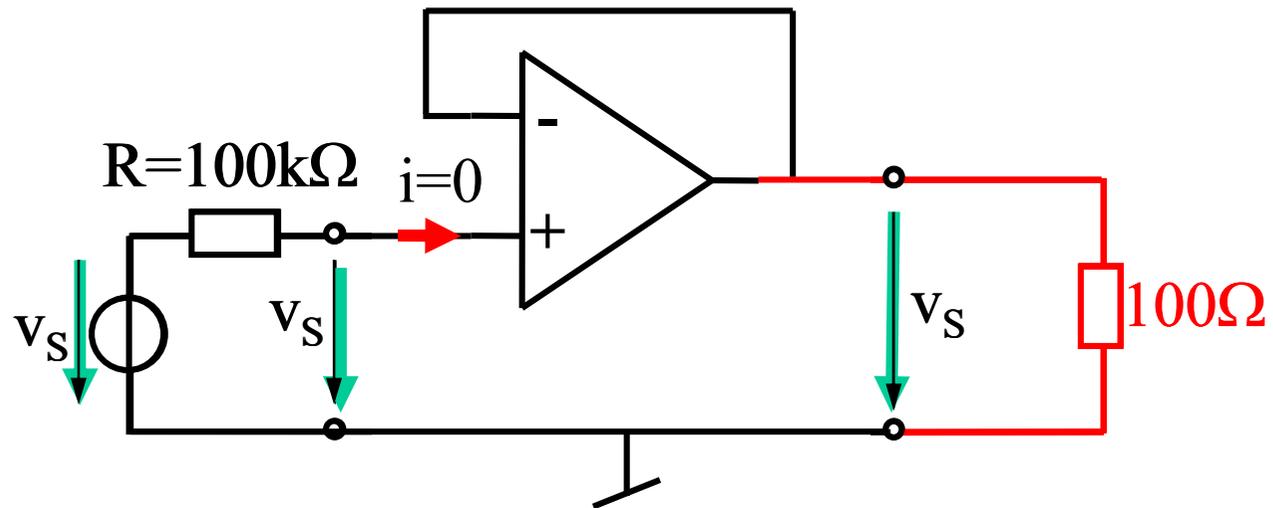
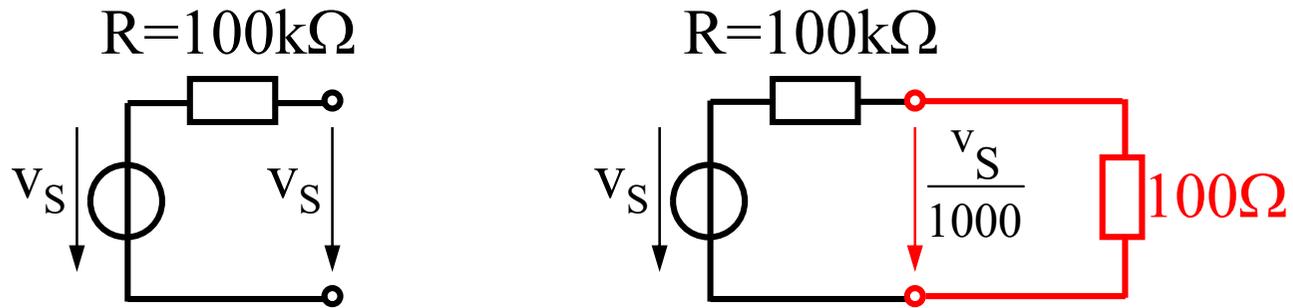
$$v_2 = A(v_1 - v_2)$$
$$\rightarrow v_2(1 + A) = Av_1$$

$$G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 + A}$$

$$\xrightarrow{A \rightarrow \infty} G = 1$$

- Quel est l'intérêt? 🤔
- Réponse:  $R_{in} \rightarrow \infty$  et  $R_{out} \rightarrow 0$

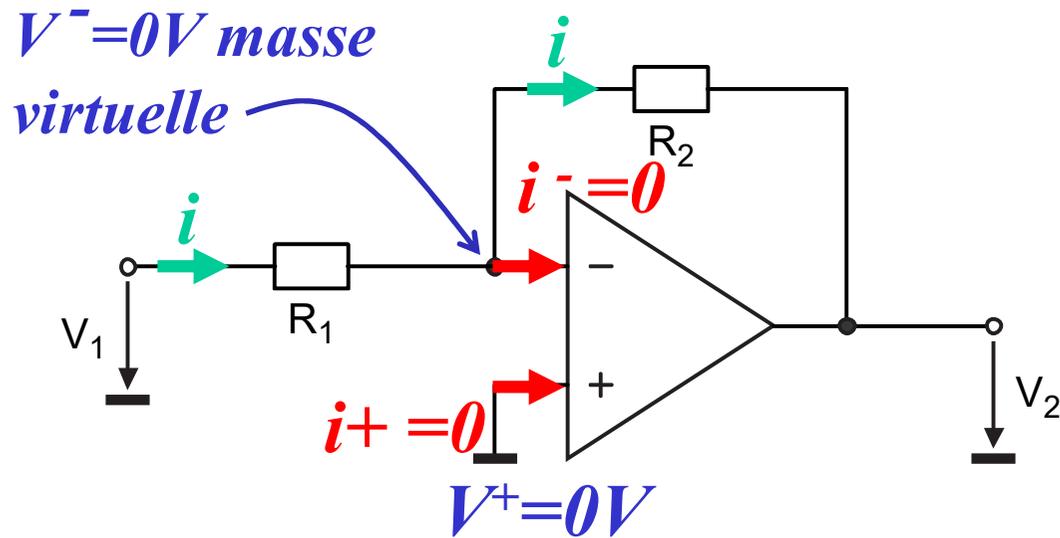
# Explication...



Le montage suiveur a l'avantage de ne tirer aucun courant de la source et de maintenir  $v_s$  à la sortie tout en fournissant du courant dans la charge nécessaire pour cela.

# Amplificateur inverseur

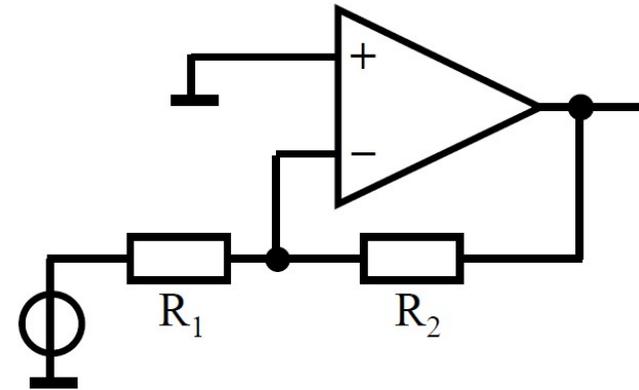
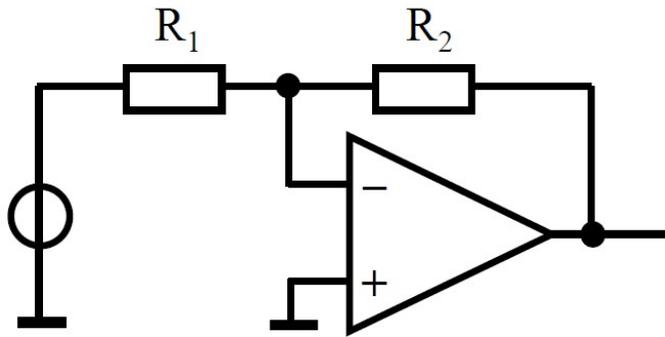
- Réaction Négative:  $v_+ = v_- = 0$
- AO idéal:  $i_{\pm} = 0 \rightarrow i(R_1) = i(R_2)$



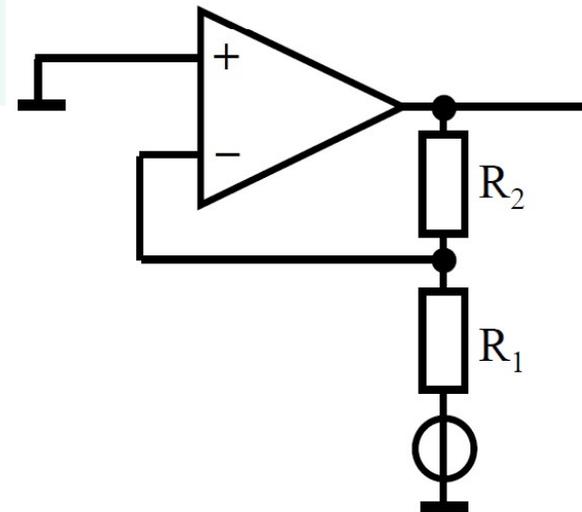
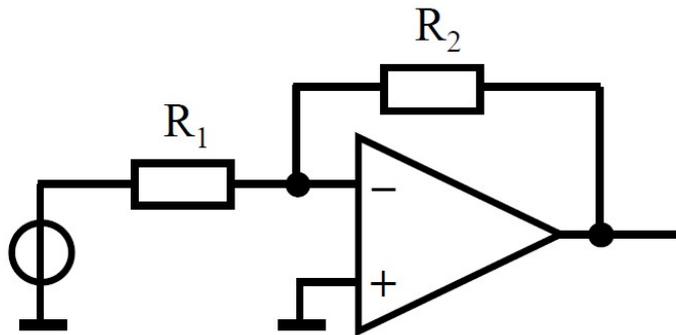
$$\Leftrightarrow i = \frac{v_1}{R_1} = -\frac{v_2}{R_2}$$
$$\Leftrightarrow$$

$$G = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

# Amplificateur inverseur: Variantes graphiques



$$G_{INV} = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$



---

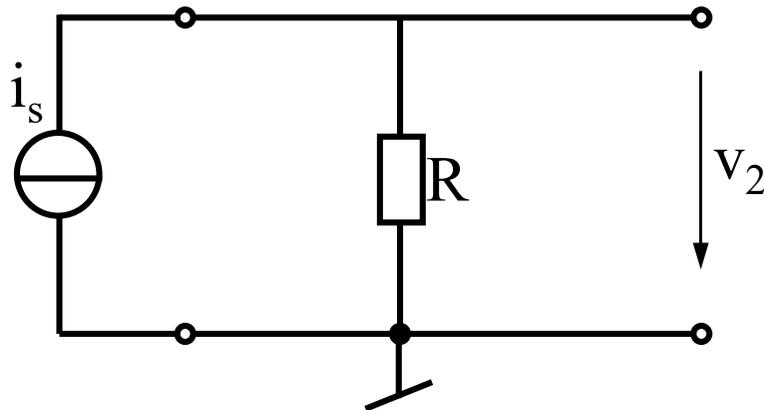
# Plan

---

- AmplOp et Amplificateur de tension: Modèle et Généralités
- Amplificateur opérationnel Idéal
  - AmpliOp en en boucle ouverte
- AmpliOp en régime linéaire: Réaction négative ou Contre-Réaction
  - Montages à gain indépendant de la fréquence
    - Inverseur
    - Non Inverseur
- Quelques Applications

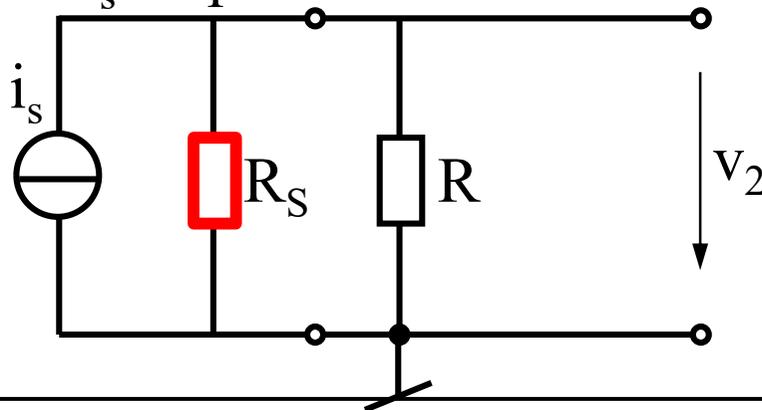
# Convertisseur courant-tension

Conversion courant-tension au moyen d'une simple résistance:



$$V_2 = Ri_s$$

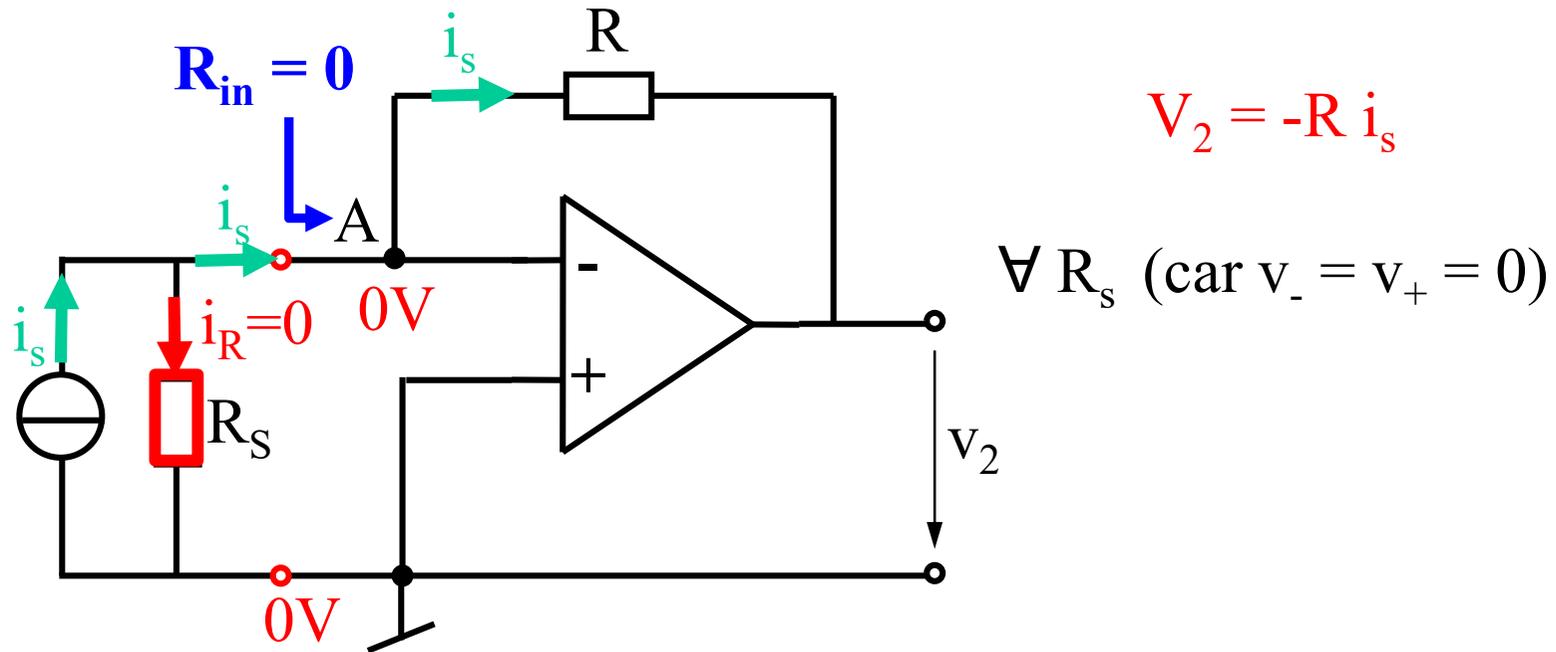
Si la source de courant est imparfaite c.à.d elle a une résistance de fuite  $R_s$  en parallèle ?



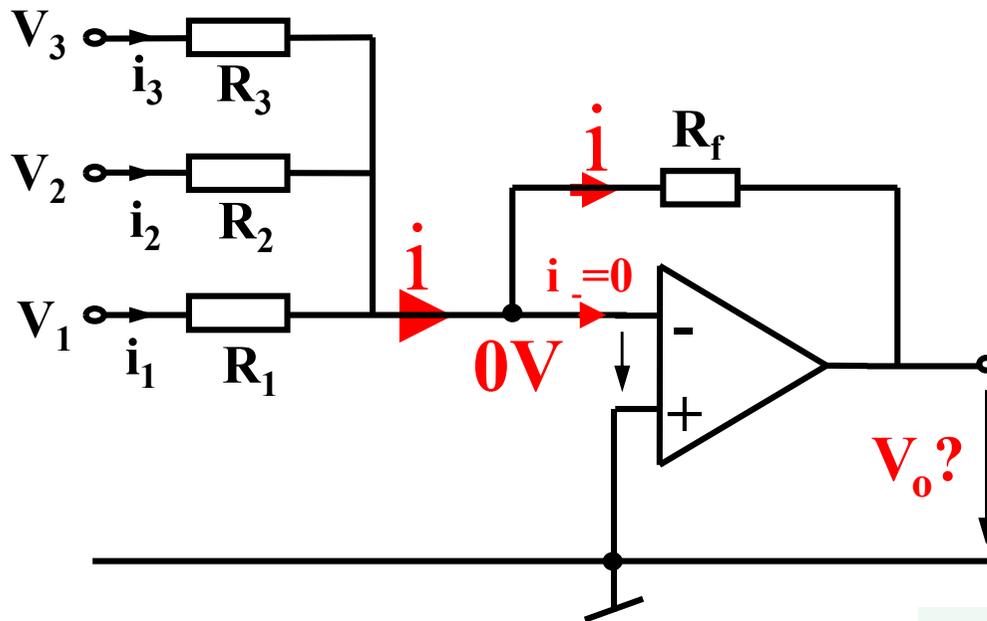
$$V_2 = \frac{R_s R}{R_s + R} i_s < Ri_s$$

# Convertisseur courant-tension

Montage à AO avec source imparfaite:



# Sommateur de tensions



$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

$$V_- = 0 \rightarrow i_1 = \frac{V_1}{R_1}; i_2 = \frac{V_2}{R_2}; i_3 = \frac{V_3}{R_3}$$

$$\rightarrow i = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3}$$

$$i_- = 0 \rightarrow V_o = -R_f i$$

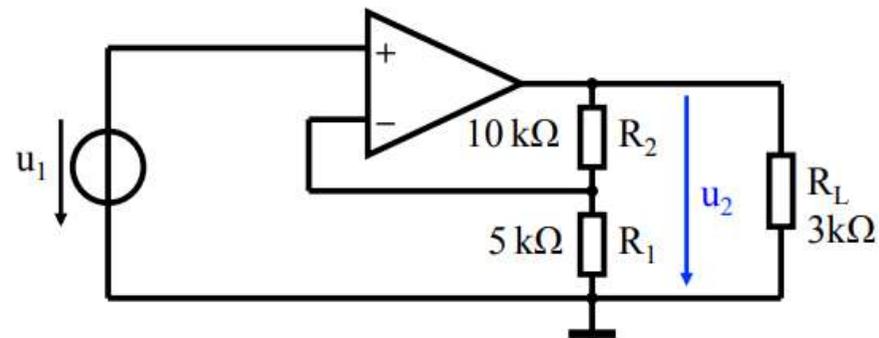
$$\Rightarrow V_o = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} \right)$$

Somme pondérée (extensible à n termes). Chaque coefficient de pondération est indépendant et ajustable par une seule résistance en entrée

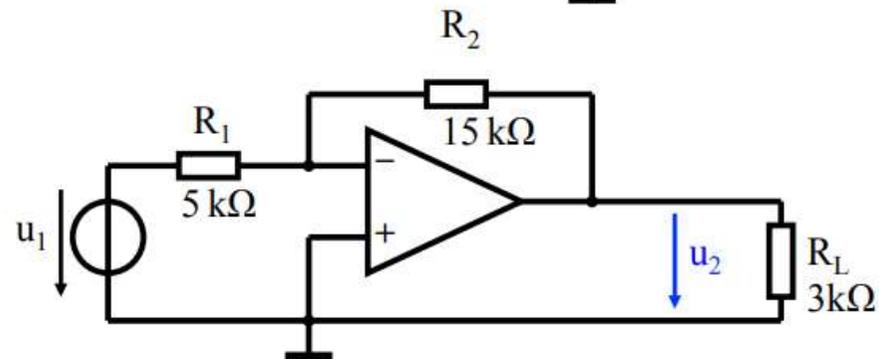
# Exercice d'application:

Pour les deux circuits ci-dessous:

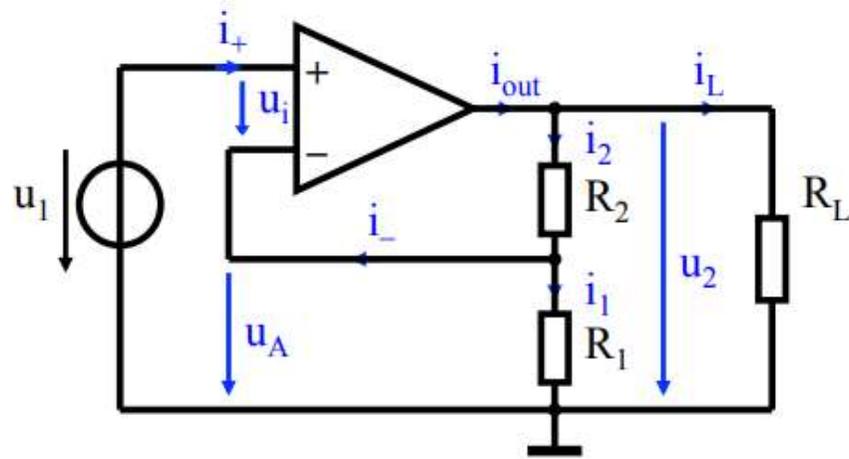
- déterminer la relation  $u_2 = f(u_1)$  ;
- calculer tous les courants et dessiner leur trajet et leur sens positif réel pour  $u_1 = +3 \text{ V}$  et respectivement  $u_1 = -3 \text{ V}$  .



Amplificateur  
non-inverseur



Amplificateur  
inverseur



Ampli Op idéal en réaction négative

$$\Rightarrow u_i = 0 \text{ et } i_- = 0$$

$$u_i = 0 \Rightarrow u_A = u_1$$

$$i_- = 0 \Rightarrow i_2 = i_1 = u_A / R_1 = u_1 / R_1$$

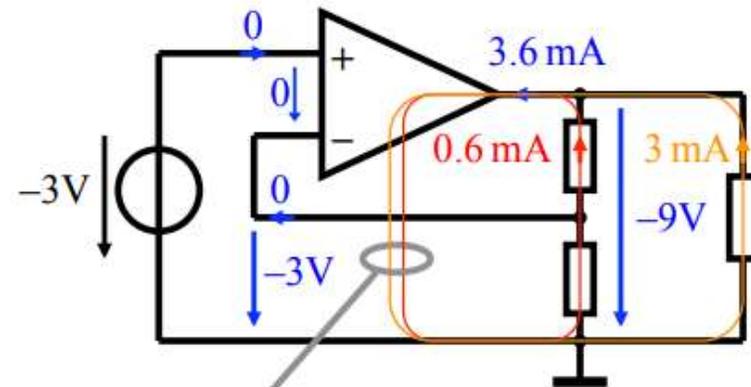
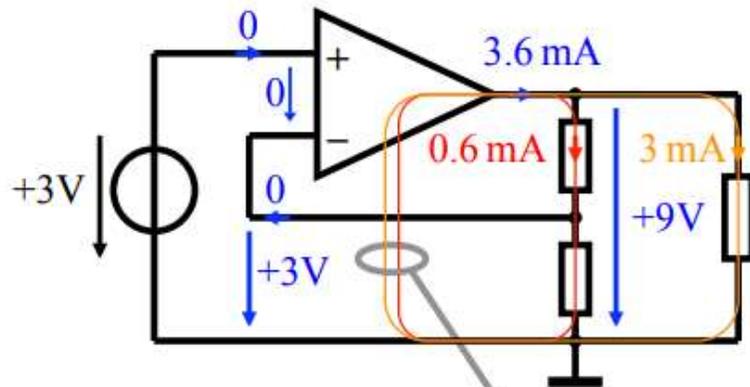
$$u_2 = R_1 i_1 + R_2 i_2 = u_1 (R_1 + R_2) / R_1$$

$$\mathbf{u_2 = +3 \cdot u_1}$$

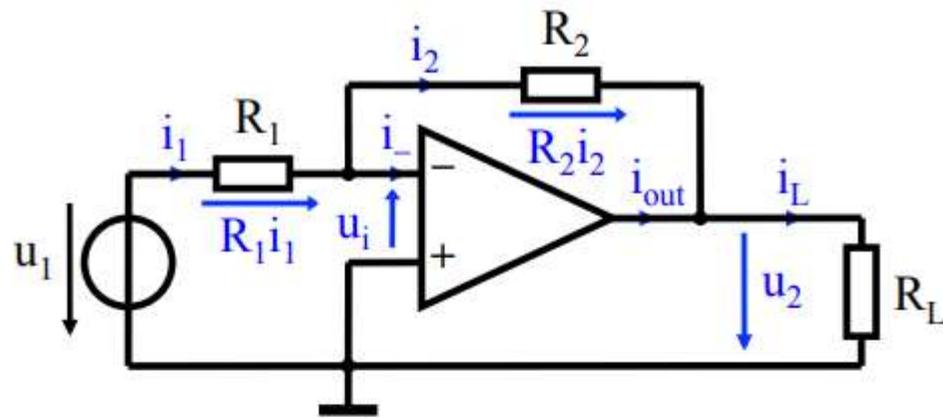
Ce résultat ne dépend pas de  $R_L$ ,  
donc pas de  $i_L$ , ni de  $i_{out}$ .

$$i_L = u_2 / R_L$$

$$i_{out} = i_2 + i_L$$



à travers les alimentations non-représentées



Ampli Op idéal en réaction négative

$$\Rightarrow u_i = 0 \text{ et } i_- = 0$$

$$u_i = 0 \Rightarrow R_1 i_1 = u_1 \text{ et } R_2 i_2 = -u_2$$

$$i_- = 0 \Rightarrow i_2 = i_1 = u_1 / R_1$$

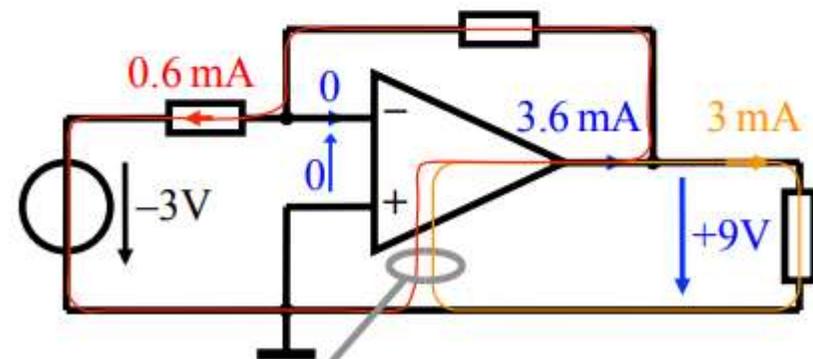
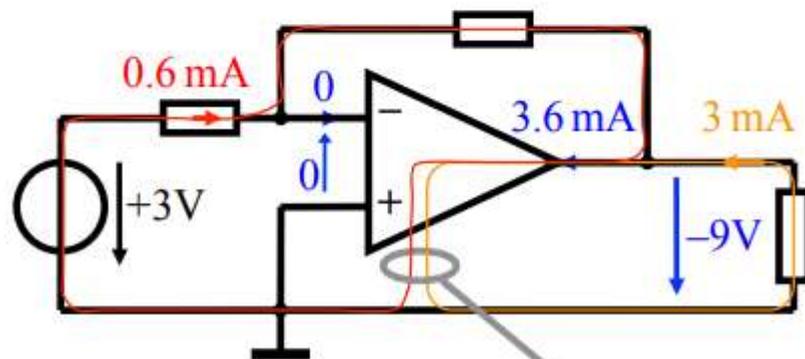
$$u_2 = -R_2 i_2 = -u_1 \cdot R_2 / R_1$$

$$\mathbf{u_2 = -3 \cdot u_1}$$

Ce résultat ne dépend pas de  $R_L$ ,  
donc pas de  $i_L$ , ni de  $i_{out}$ .

$$i_L = u_2 / R_L$$

$$i_{out} = -i_2 + i_L$$



à travers les alimentations non-représentées