Amplificateur Opérationnel en régime linéaire et ses applications

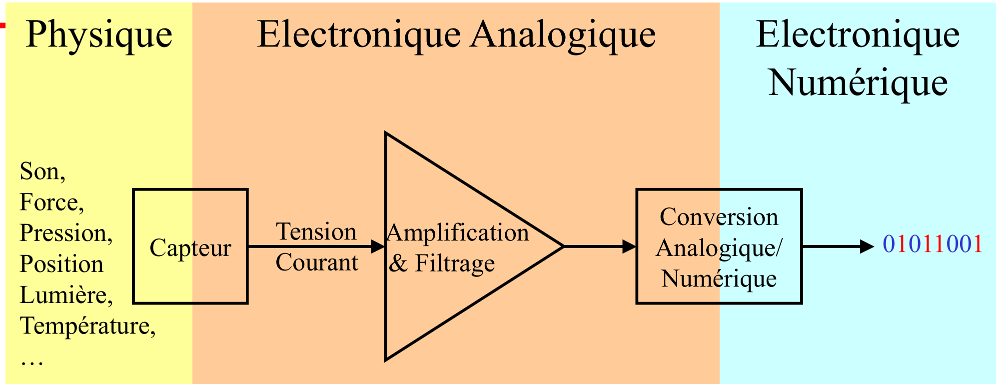
Adil KOUKAB

EPFL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
ELECTRONICS LABORATORY leg

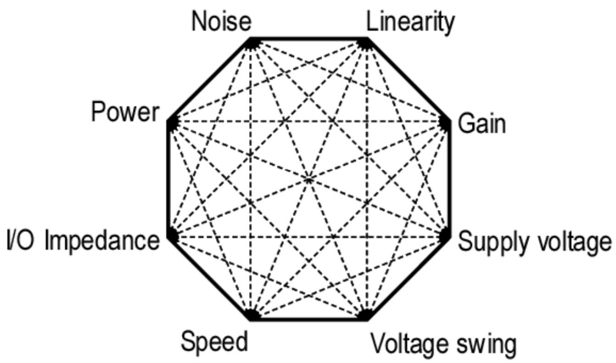
Plan

- Amplificateur Opérationnel Architecture d'un système de mesure
- Amplificateur opérationnel Idéal
- Réaction négative (Régime linéaire): Définition
- Réaction négative
  - Montages à gain indépendant de la fréquence
    - Inverseur
    - Non Inverseur
    - Exemples et Applications

Interface avec le capteur: Forcement Analogique

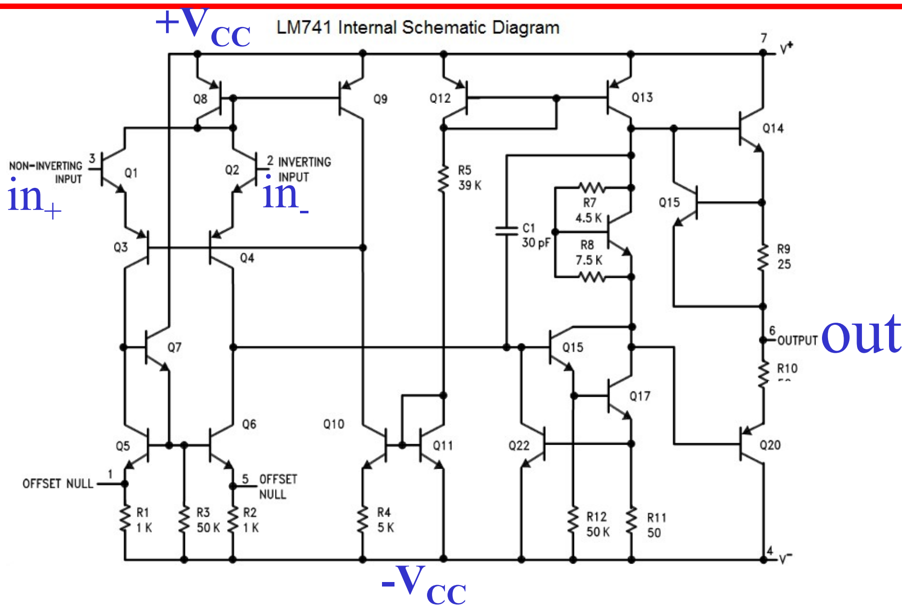


- Lecture de:
  - Tension
  - Courant / charge
- Problématique / Imperfections:
  - Faible niveau de signal
  - Non-linéarité
  - Bruit électronique …

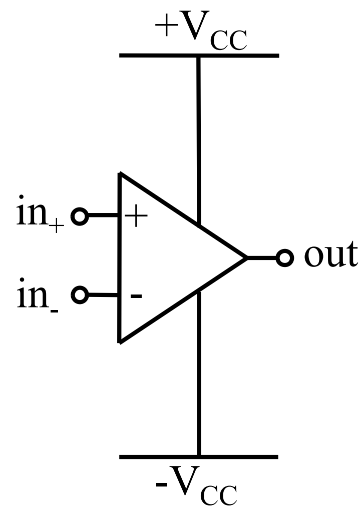


- Conditionnement analogique du signal:
  Amplification et Filtrage
  → Amplificateur opérationnel & contre-réaction

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



Schémas du LM741



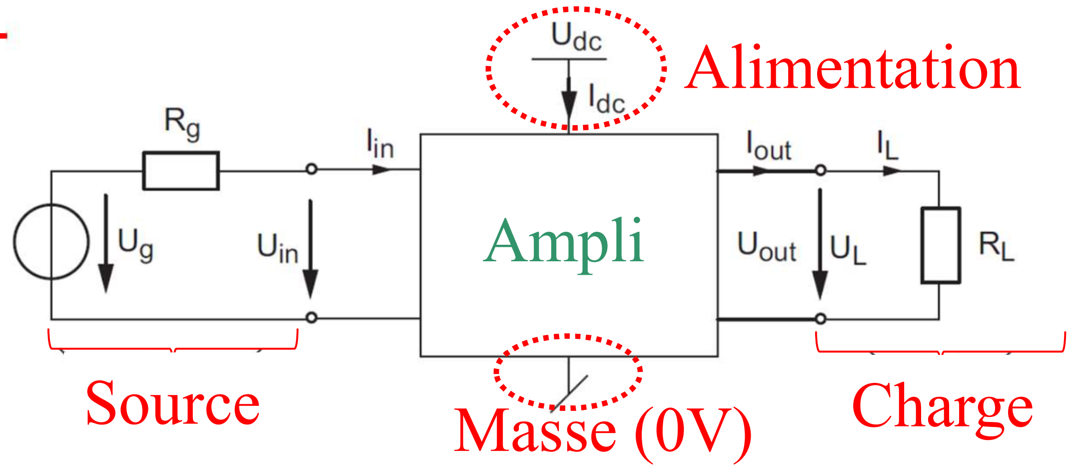
Symbole

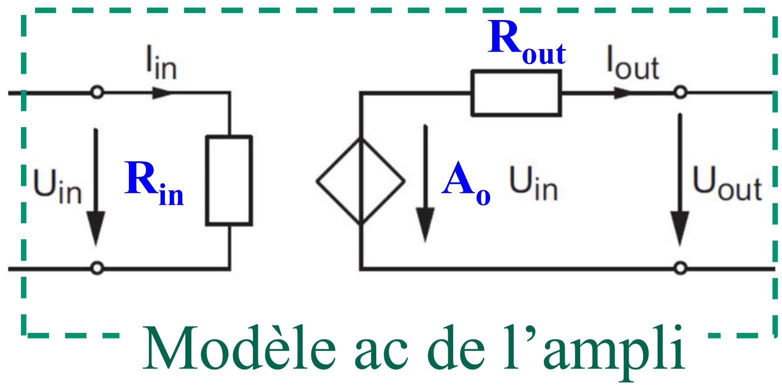
- 2 tensions d'alimentation: $+V_{CC}$ et $-V_{CC}$ avec V_{CC} = 5 à 18 V
- Point milieu des alimentations = référence de potentiels (masse)
- Une entrée différentielle ≡ deux entrées, une inverseuse (in-) et une non-inverseuse (in+)
- Une sortie Out: avec $-V_{cc} \leq V_{out} \leq V_{cc}$

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

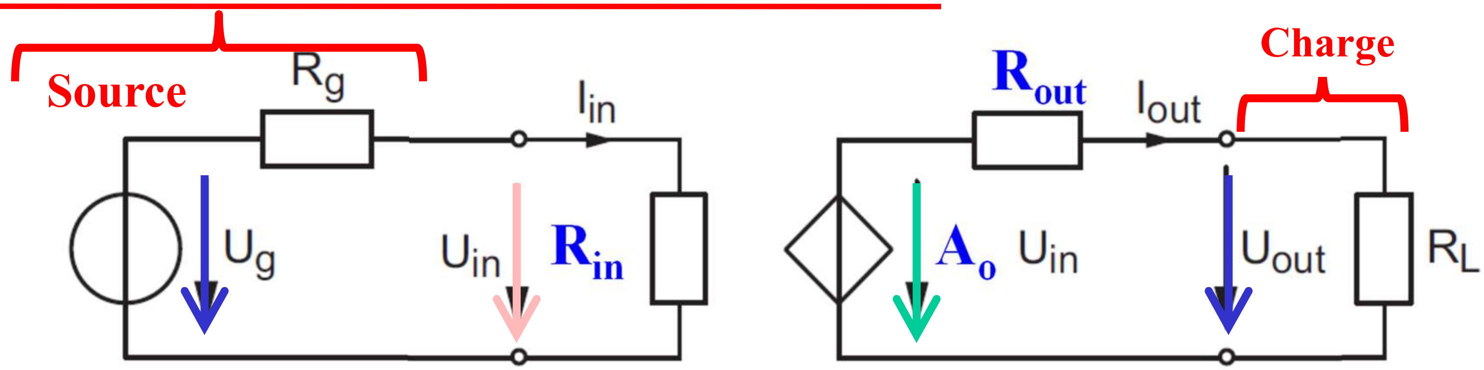
Amplificateur de tension: Généralités





- 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:

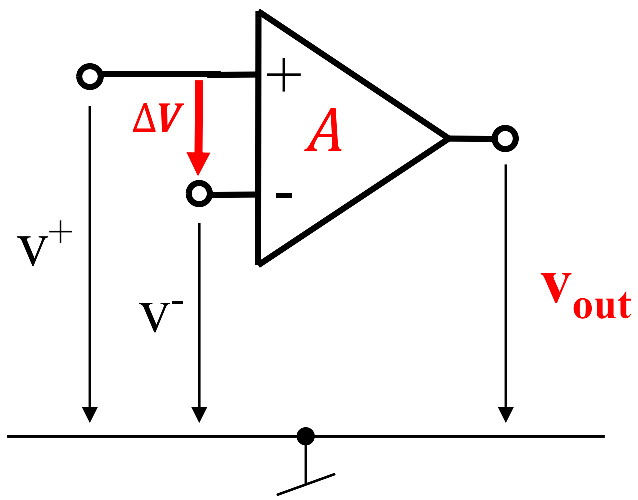
$$A_T = \frac{U_{out}}{U_g} = \frac{U_{out}}{A_o U_{in}} \frac{A_o U_{in}}{U_{in}} \frac{U_{in}}{U_g} = \frac{\overbrace{R_L}^{\text{Atténuation}}}{R_L + R_{out}} A_o \frac{\overbrace{R_{in}}^{\text{Atténuation}}}{R_{in} + R_g}$$

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

- L'amplificateur est idéal (sans atténuation) si:

- $R_{out} \rightarrow 0$; $R_{in} \rightarrow \infty$ et $\boldsymbol{A_o} \rightarrow \infty$ (expliqué ultérieurement)

Gain de l'AO



Gain en boucle ouverte: A

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

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

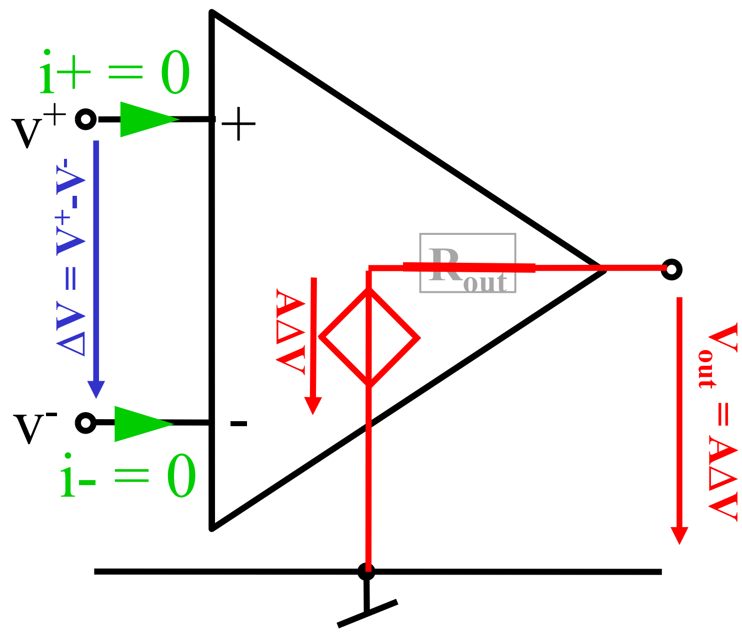
$$A \rightarrow \infty\ (A > 105)$$

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

R_{in} et R_{out} de l'AO idéal

Gain boucle ouverte de l'AO

$A \rightarrow \infty$



Résistance d'entrée

$R_{in} \rightarrow \infty$

$\Rightarrow$ **$i^+ = i^- = 0$**

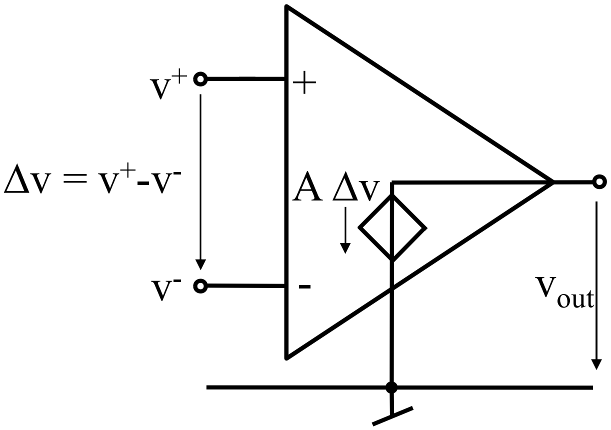
Résistance de sortie

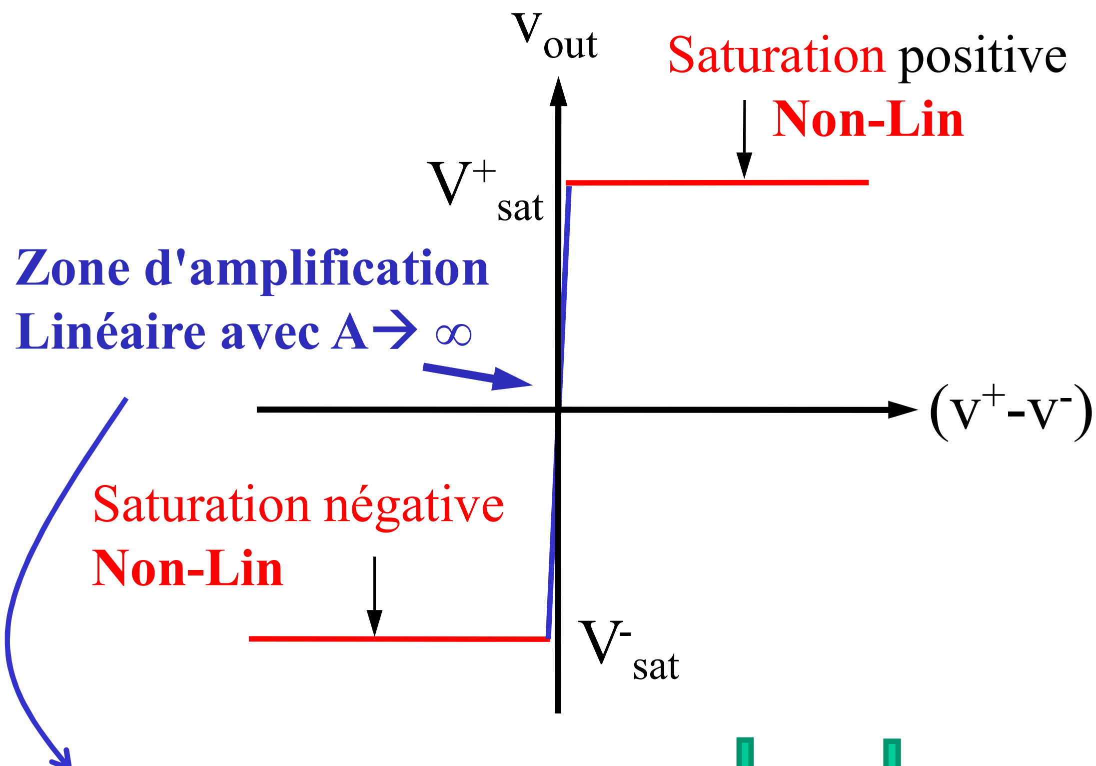
$R_{out} \rightarrow 0$

$\Rightarrow$ **Gain indépendent de la charge**

$\Rightarrow$ **Possibilité de cascader plusieur étages**

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





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

$$A \rightarrow \infty$$

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

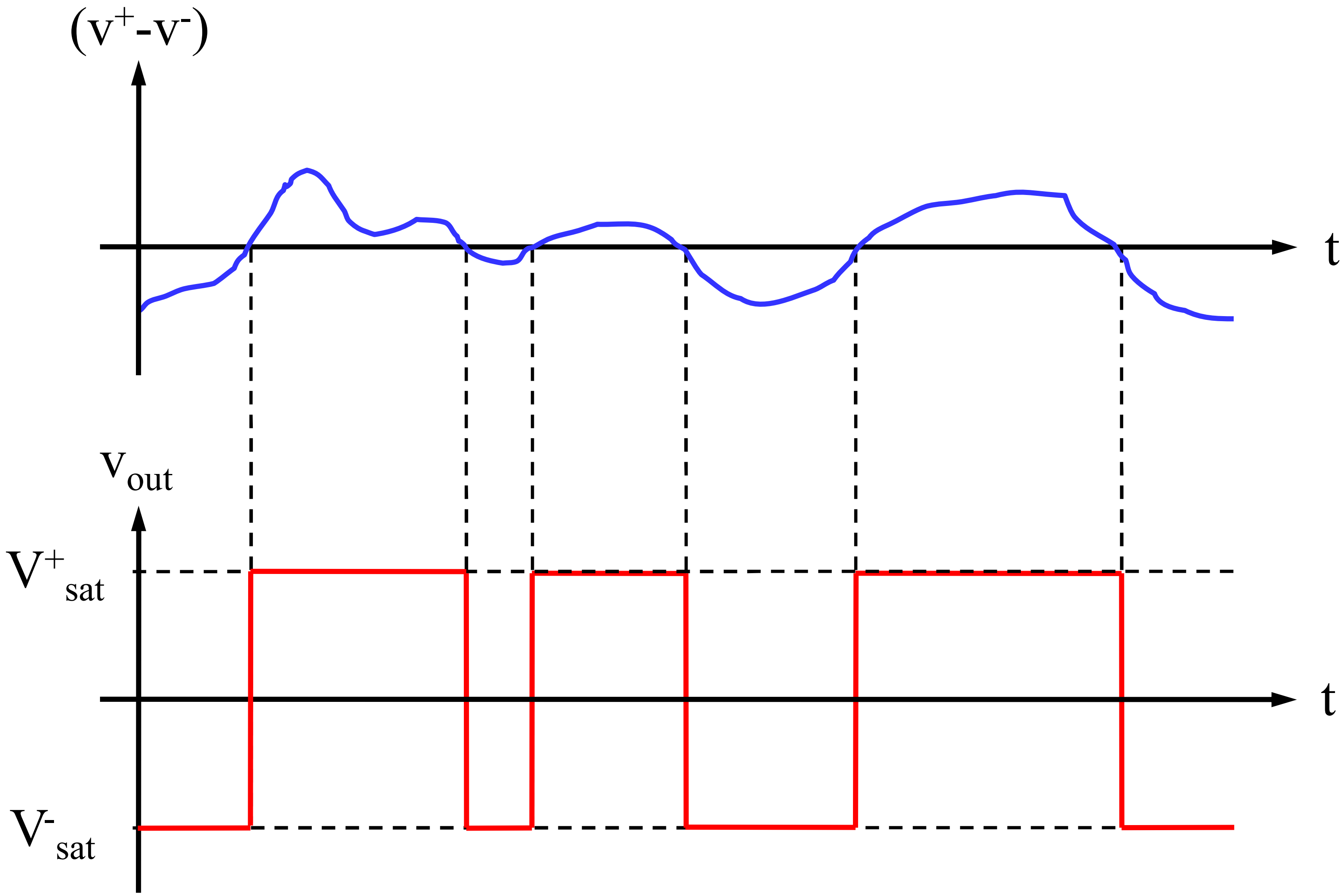
$$V^{\pm}_{sat} \approx \pm V_{cc}$$

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

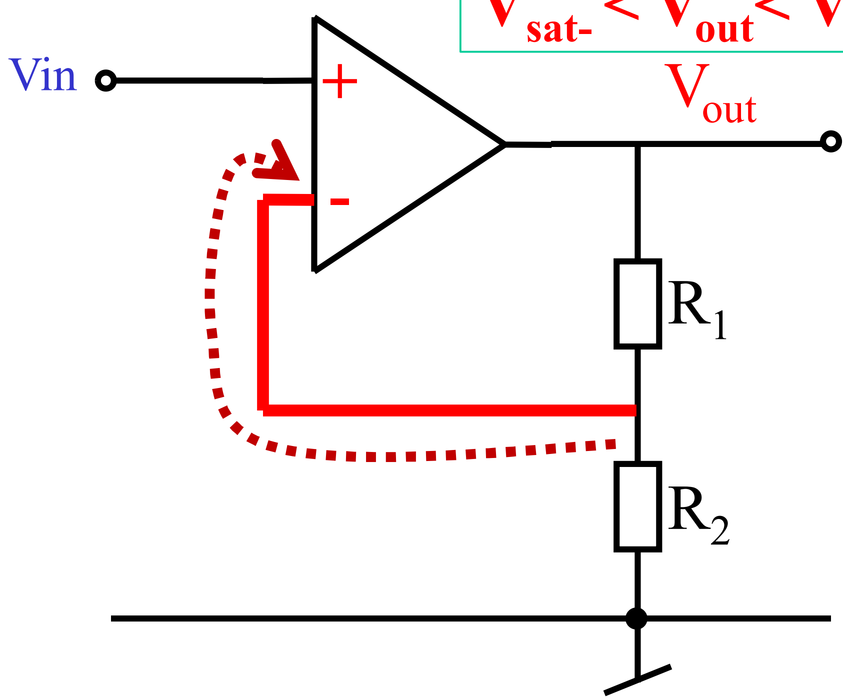
Possible seulement pour => $v^+ \approx v^-$

→ (notion de contre-réaction)

AO en boucle ouverte ≡ Comparateur



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



$$V_{sat-} < V_{out} < V_{sat+}$$

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

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

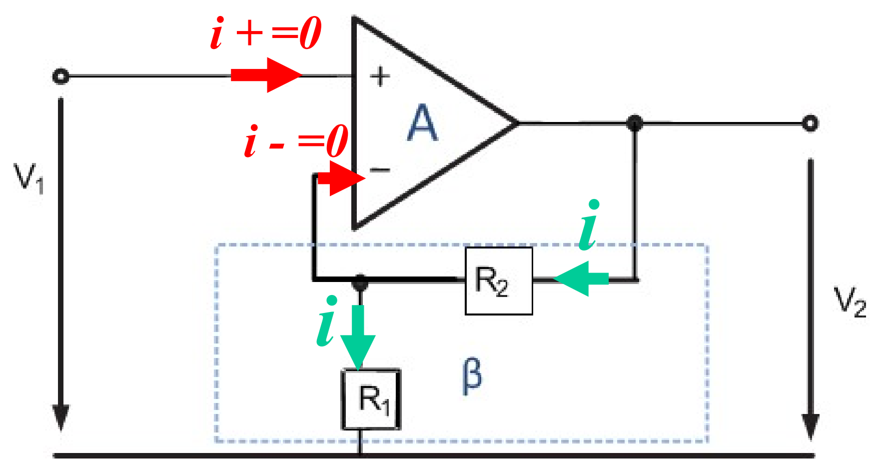
$$\boldsymbol{\Delta V = V^{+} - V^{-} = 0}$$

(AO idéal)

$$\boxed{\Rightarrow V^{+} \approx V^{-}}$$

S'il existe un chemin entre la sortie de l'amplificateur et l'entrée inverseuse - → L'amplificateur est maintenu dans la zone linaire (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: $i\pm = 0 \rightarrow i(R_1)=i(R_2)$

  → on peut appliquer diviseur de tension

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

- Substitution

$$v_2\left(1 + A\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) = Av_1 \quad G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 + A\frac{R_1}{R_1 + R_2}} \xrightarrow[A\to\infty]{} G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

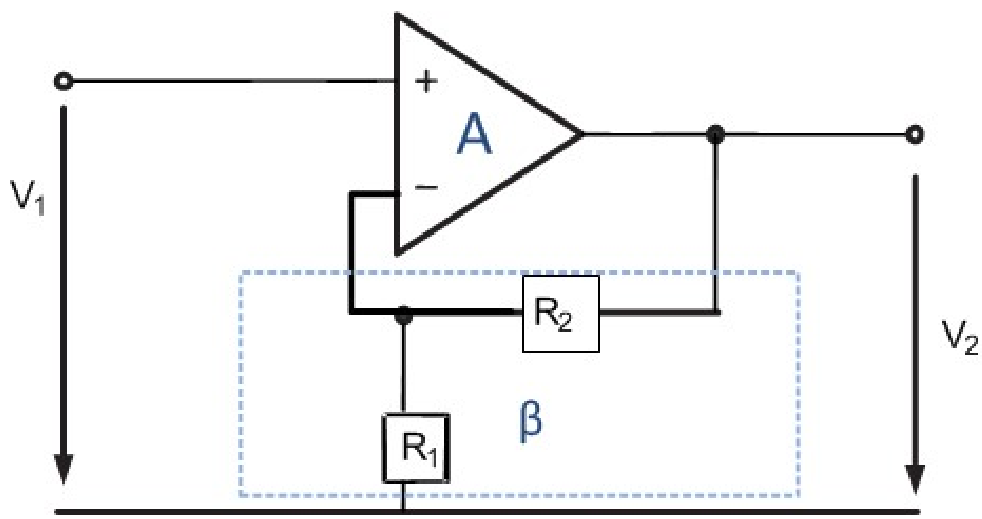
1. Gain G indépendant de A (si A→∞).
2. G s'exprimé comme un rapport de résistances

→ ☺ ☺ Faible sensibilité de G aux variations des procédés de fabrication et de température

EPFL

Ex: Amplificateur non-inverseur
Gain boucle fermée ($G = \frac{v_2}{v_1}$) par analyse simple

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

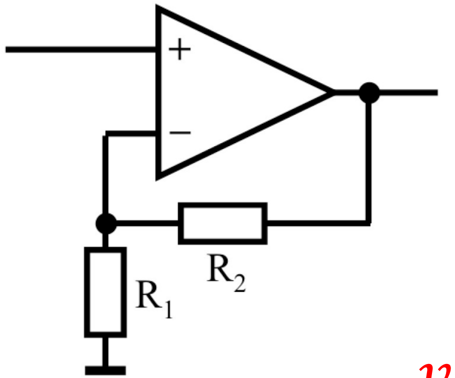


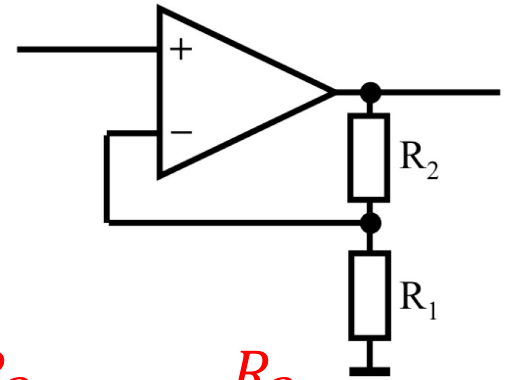
$$v_+ = v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_2$$

et $\quad v_+ = v_1$

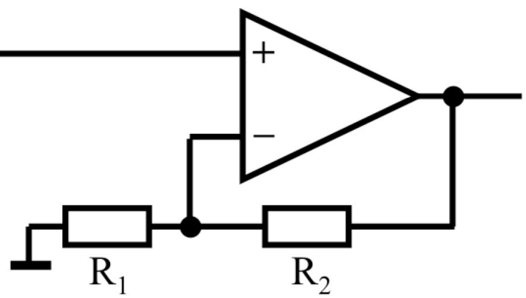
$$G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

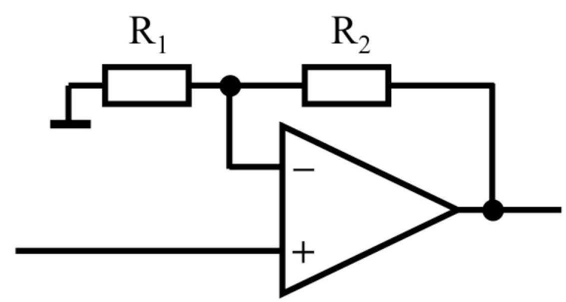
Amplificateur non-inverseur: Variantes graphiques



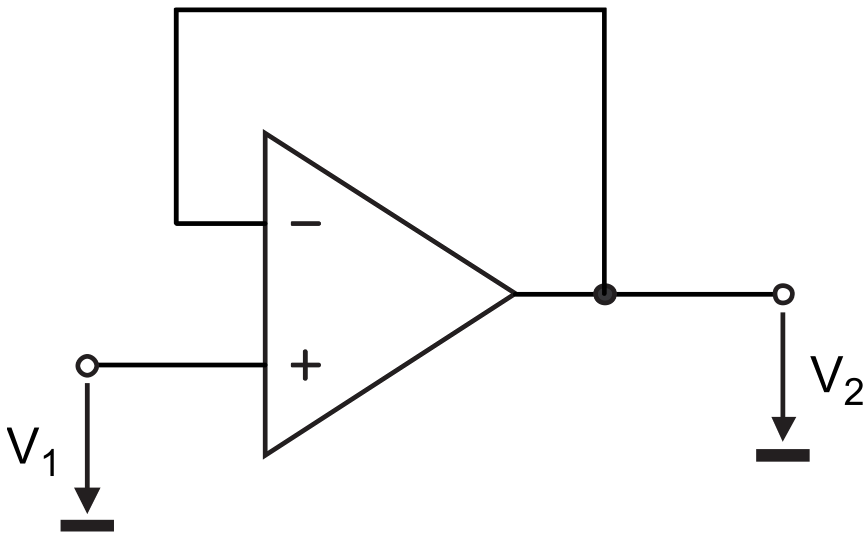


$$G_{N\_INV} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$





Suiveur: Analyse complète



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

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

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

(Rq: ≡ Ampli N_Inv avec $R_2 = 0$ et $R_1 \rightarrow \infty$):

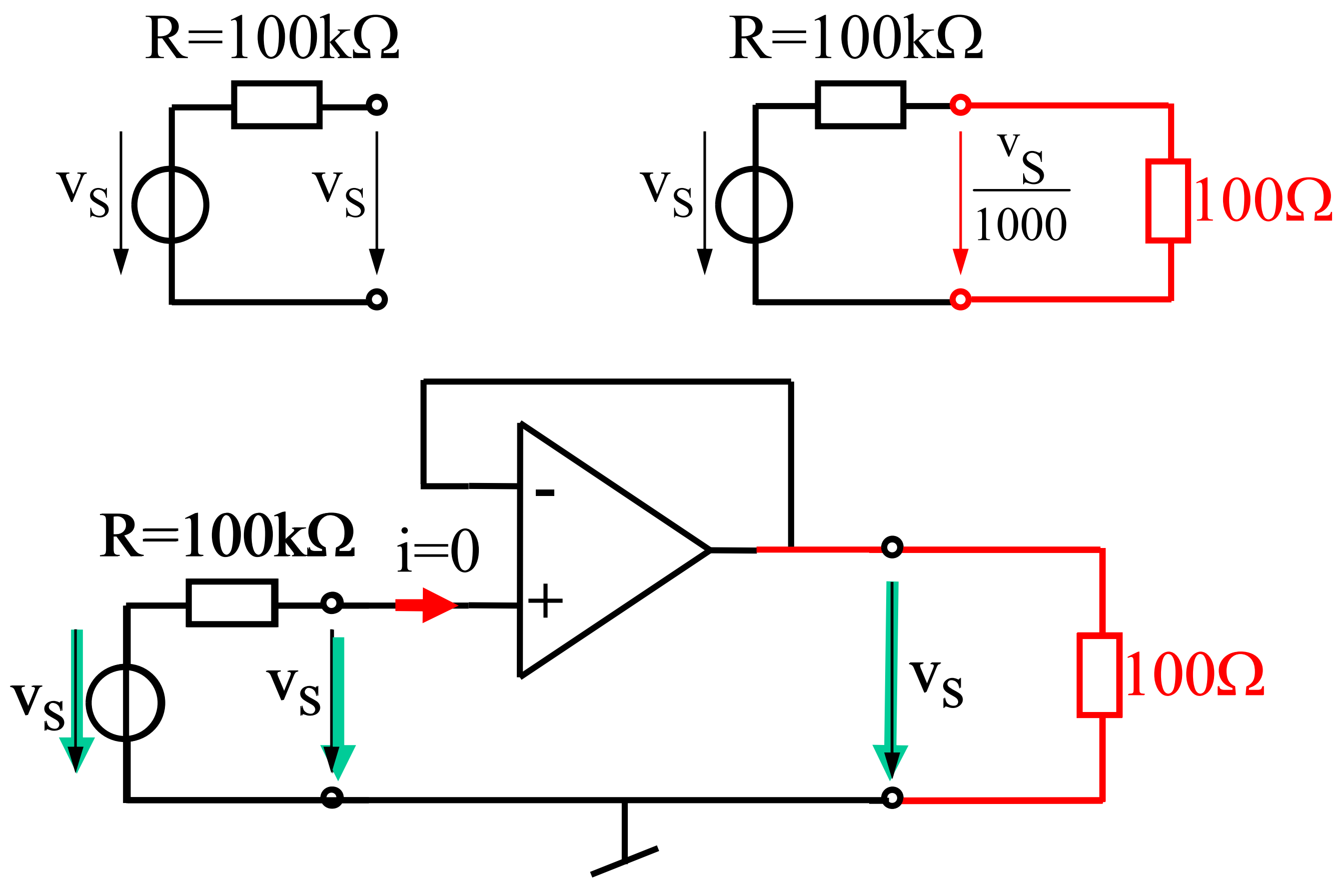
$$G = \frac{v_2}{v_1} = \frac{A}{1 + A}$$

$$\boxed{\xrightarrow[A\to\infty]{} \mathbf{G = 1}}$$

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

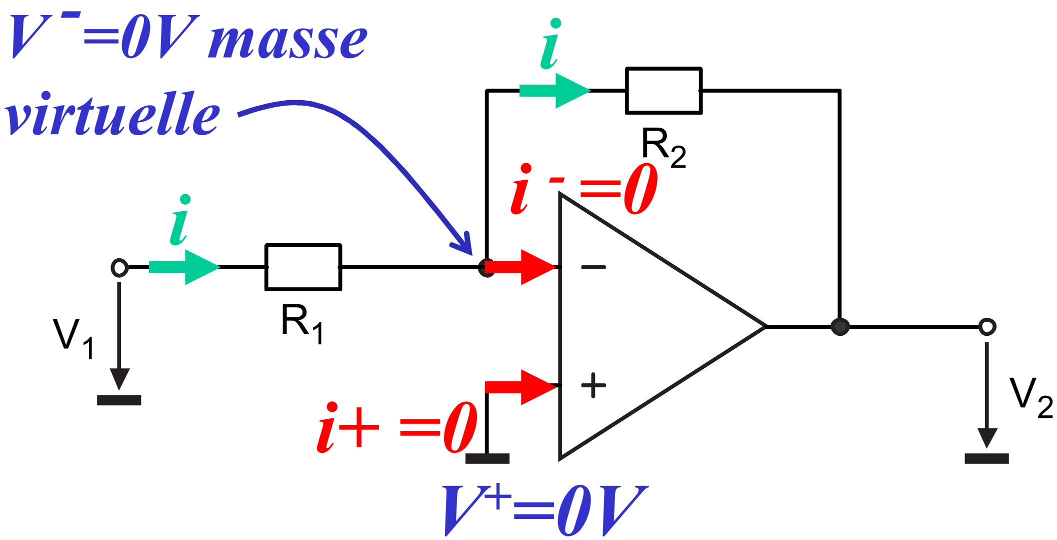
EPFL

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: $i_\pm = 0 \rightarrow i(R_1)=i(R_2)$

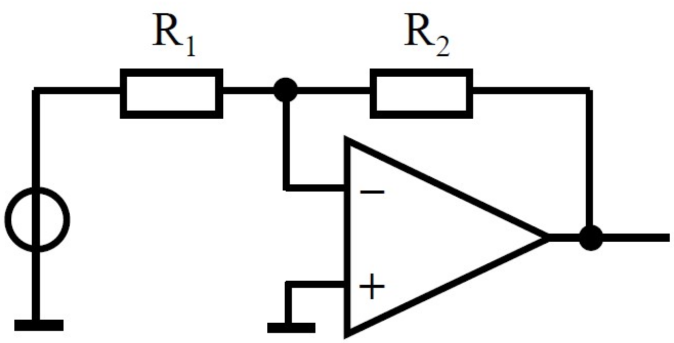
$$\Leftrightarrow$$

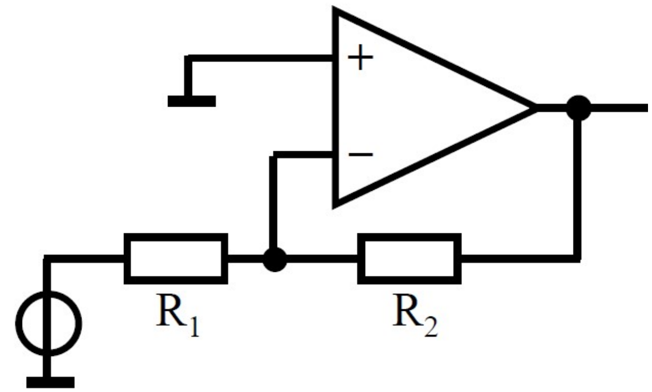
$$i = \frac{v_1}{R_1} = -\frac{v_2}{R_2}$$

$$\Leftrightarrow$$

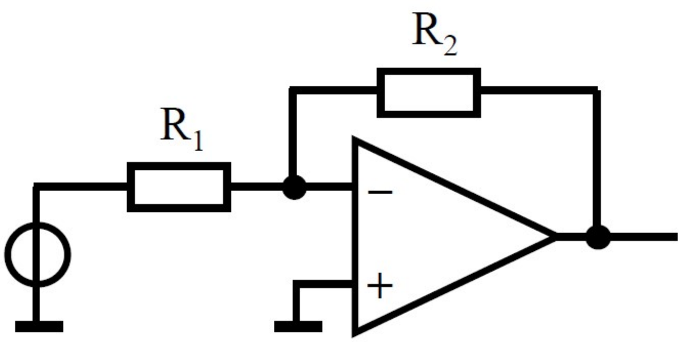
$$G = \frac{v_2}{v_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

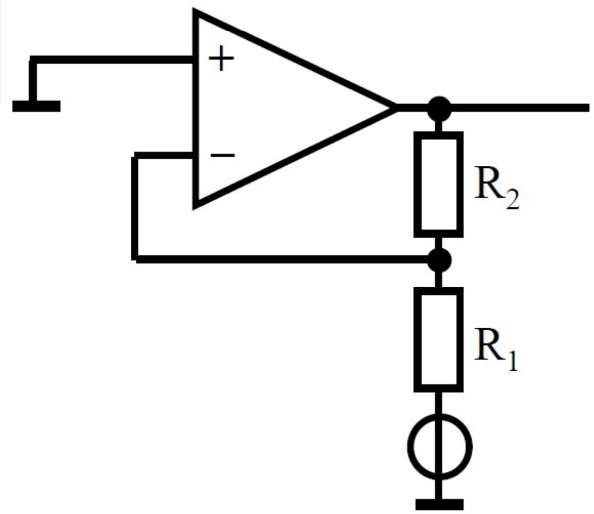
Amplificateur inverseur: Variantes graphiques





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





Impérfection de l'AmpliOp:

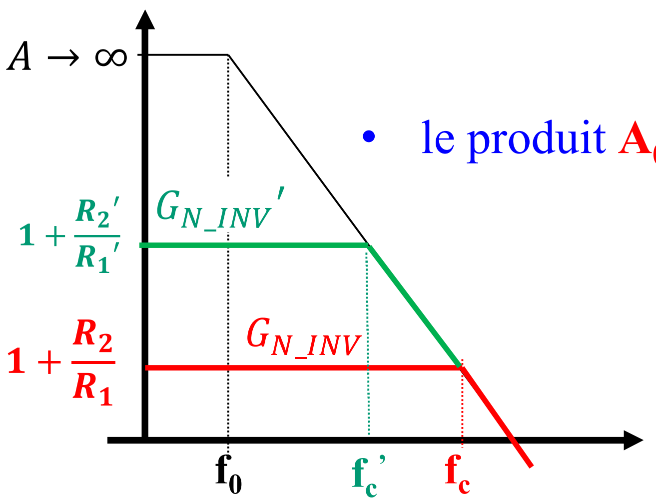
AO idéal:

$$\begin{cases} R_{in} \to \infty \Rightarrow \mathrm{i+} = \mathrm{i-} \\ A \to \infty \quad \Rightarrow (\mathbf{AO} + \mathbf{ReacNeg}) \Rightarrow \mathrm{v}^+ = \mathrm{v}^- \\ R_{out} \to 0 \Rightarrow \text{Gain indep de } R_L \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} G_{N\_INV} = \dfrac{v_2}{v_1} = 1 + \dfrac{R_2}{R_1} \\ G_{INV} = \dfrac{v_2}{v_1} = -\dfrac{R_2}{R_1} \end{cases}$$

AO réel: $A \to \infty$ *seulement pour* $f < fo$

$$\Rightarrow \begin{cases} G_{N\_INV} = 1 + \dfrac{R_2}{R_1} \\ G_{INV} = \dfrac{v_2}{v_1} = -\dfrac{R_2}{R_1} \end{cases} \textit{seulement pour } f < f_c$$

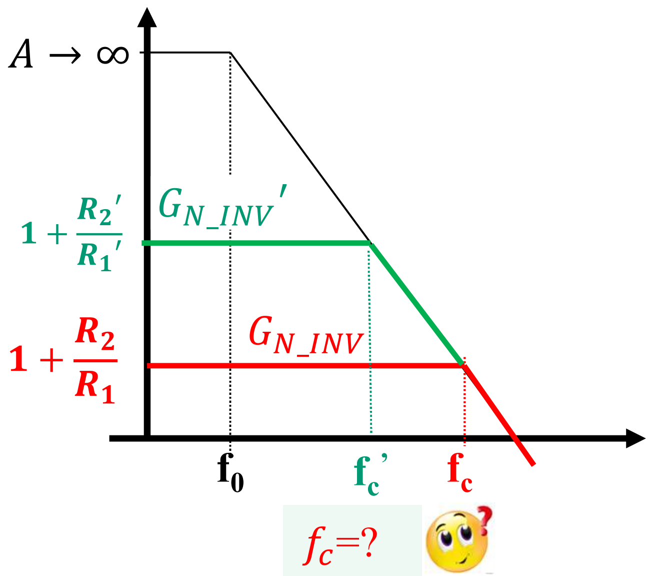


- le produit $\mathbf{A_0.f_0}$ est appelé le produit **Gain·Band-passante ou GBW [Hz]**

- GBW est une caractéristique de l'AmpliOp donnée par le fabricants: Ex: GBW (LM741) ≈ 1 MHz et GBW (LM356) ≈ 5MHz.

f_c=?

Gain·Band-passante ou GBW [Hz]



- On peut aussi démontrer que:

$$GBW = A_o f_o = G_{N\_INV} f_c = G_{N\_INV}' f_c'$$

Conclusion:

- Si on connait G_{N_INV} on peut déterminer f_c (c.à.d. f_{BW} **ou** f_{-3dB})
- Si G ↗ ⟺ f_c ↘ : On troque du gain pour de la bande passante.

Limitation en fréquence «**Grands Signaux**»: Taux de variation limité: “slew-rate”

- Slew Rate (Sr = $(dVout/dt)_{Max}$) ≡ Taux de variation maximale de la tension de sortie permise par l’AO
- Sr = **0.5 V/µs** pour le LM 741, **13 V/µs** pour TL 071 et 072, **12 V/µs** pour LF356
- Cette limitation est due au courant finie qui charge et décharge le capacités internes de l’AO.

- <u>Conséquences pratiques du Sr</u>

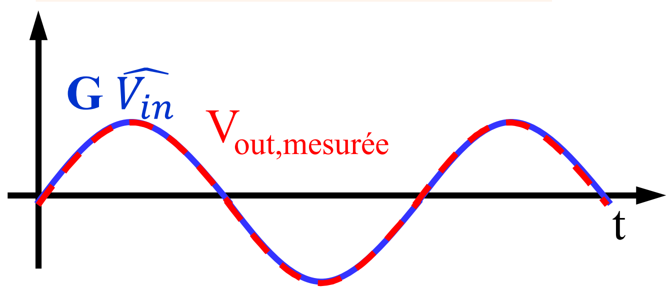
Ex: soit le signal de sortie théorique d’un Ampli de gain G:

$$V_{out} = G\,\widehat{V_{in}}\sin(2\pi f t)$$

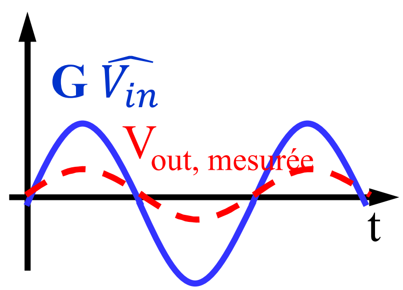
→ *Variation maximale de signal de sortie:* →

$$\left.\frac{dV_{out}}{dt}\right|_{max} = G\,\widehat{V_{in}}\,\underbrace{2\pi f}_{\omega}$$

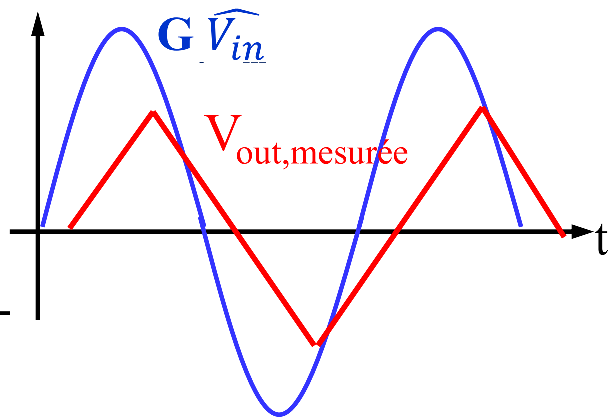
Si $G\widehat{V_{in}}\,2\pi f$ < Sr →
<u>Régime petits signaux</u>
si $f < f_{BW}$ → pas d’atténuation ni distorsion



Si $G\widehat{V_{in}}2\pi f$ < Sr →
<u>Régime petits signaux</u>
si $f > f_{BW}$ → Atténuation sans distorsion



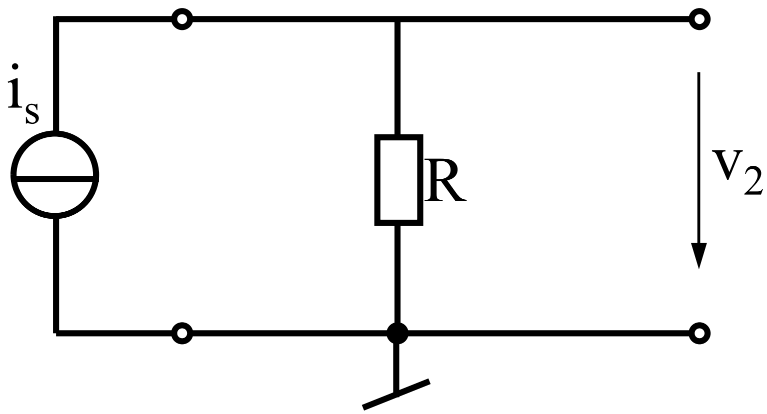
$G\widehat{V_{in}}2\pi f$ > Sr →
<u>régime grands signaux</u>
→ Distorsion (à $f < f_{BW}$)



Exemples et Applications de l'AO

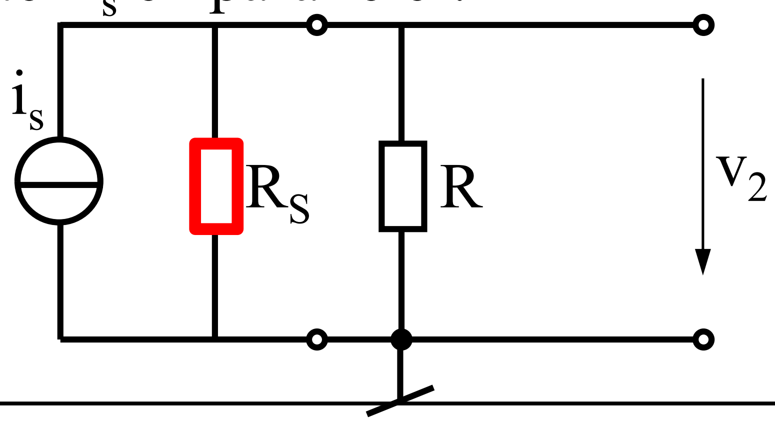
Convertisseur courant-tension

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



$$V_2 = R i_s$$

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

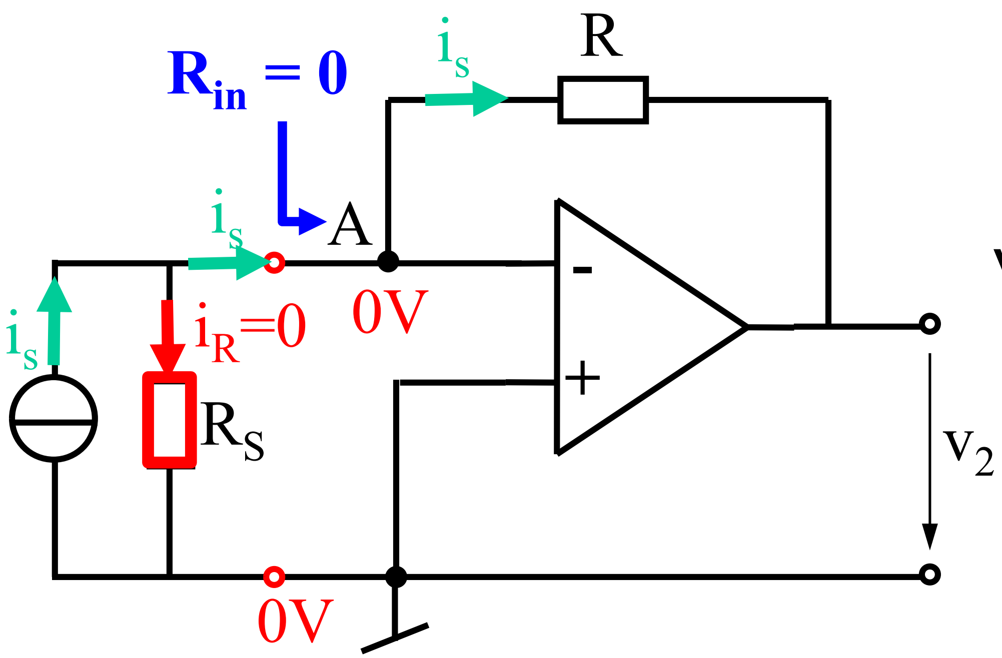


$$V_2 = \frac{R_S R}{R_S + R} i_s < R i_s$$

EPFL

Convertisseur courant-tension

Montage à AO avec source imparfaite:

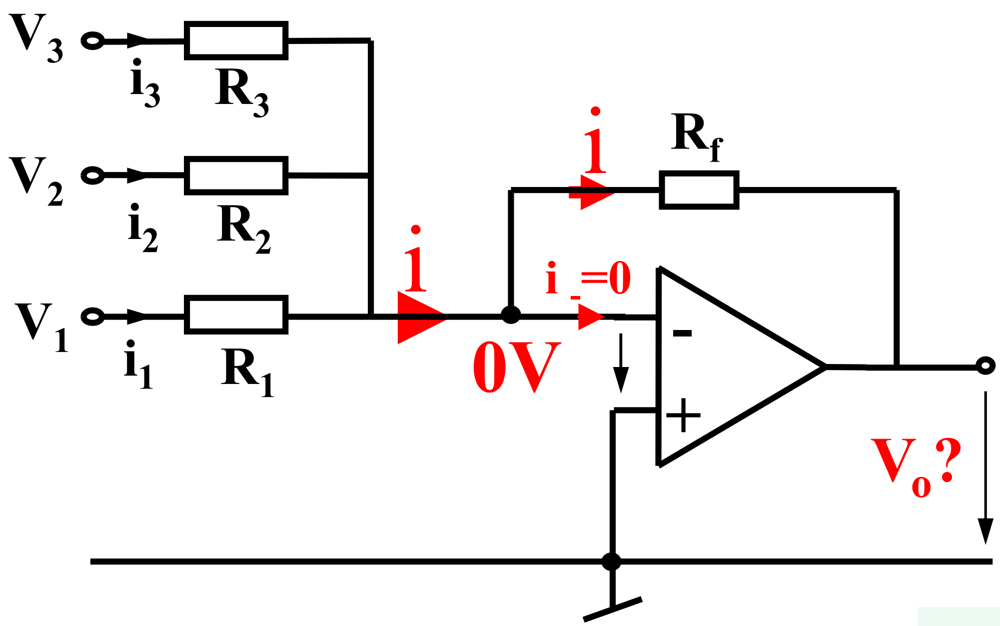


$V_2 = -R\, i_s$

$\forall\, R_s$ (car $v_- = v_+ = 0$)

EPFL

Sommateur de tensions



$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

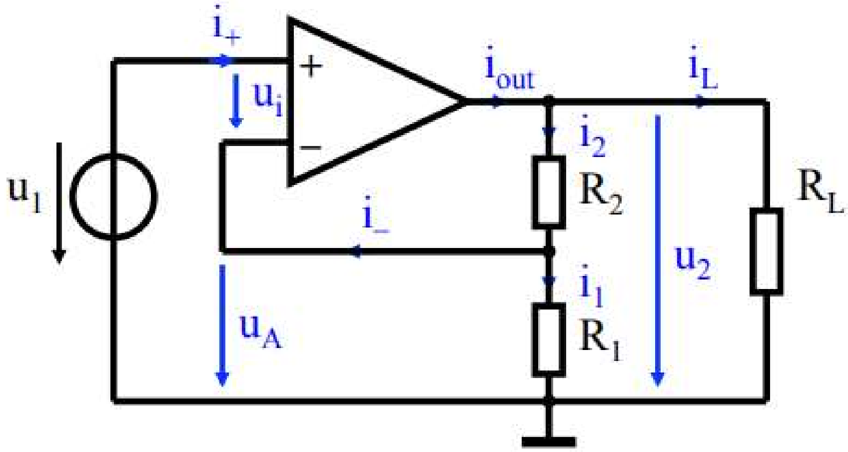
$$V_- = 0 \rightarrow i_1 = \frac{V_1}{R_1}; i_2 = \frac{V_2}{R_2}; i_3 = \frac{V_3}{3}$$

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

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

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

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



Ampli Op idéal en réaction négative

=> $u_i = 0$ et $i_- = 0$

$u_i = 0$ => $u_A = u_1$

$i_- = 0$ => $i_2 = i_1 = u_A/R_1 = u_1/R_1$

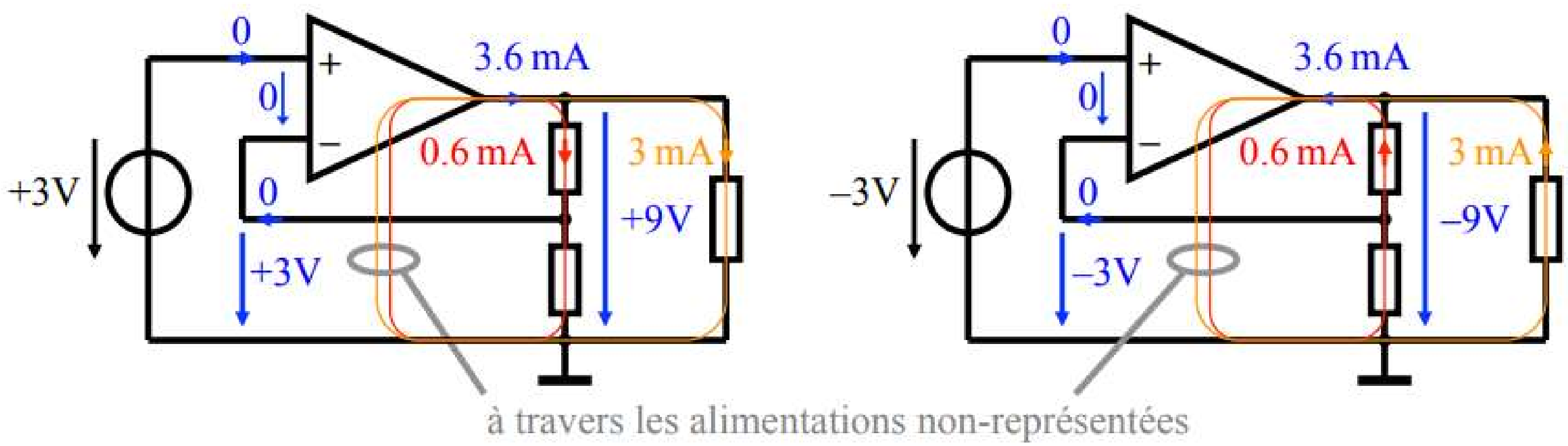
$u_2 = R_1 i_1 + R_2 i_2 = u_1(R_1+R_2)/R_1$

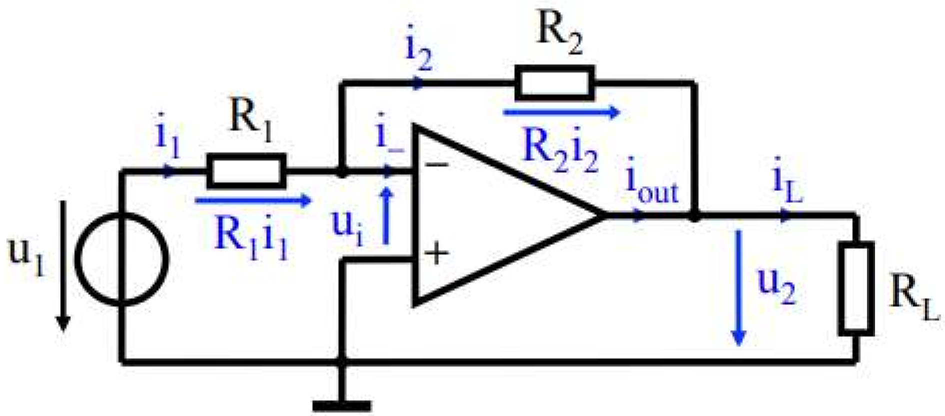
$$\mathbf{u_2 = +3 \cdot u_1}$$

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

$i_L = u_2/R_L$

$i_{out} = i_2 + i_L$





Ampli Op idéal en réaction négative

=> $u_i = 0$ et $i_- = 0$

$u_i = 0$ => $R_1 i_1 = u_1$ et $R_2 i_2 = -u_2$

$i_- = 0$ => $i_2 = i_1 = u_1/R_1$

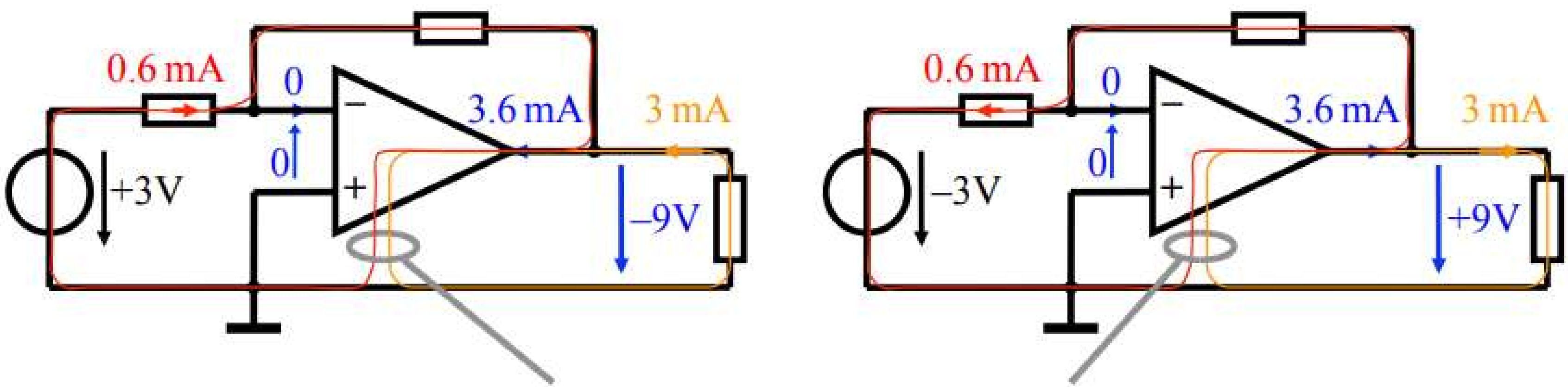
$u_2 = -R_2 i_2 = -u_1 \cdot R_2/R_1$

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

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