

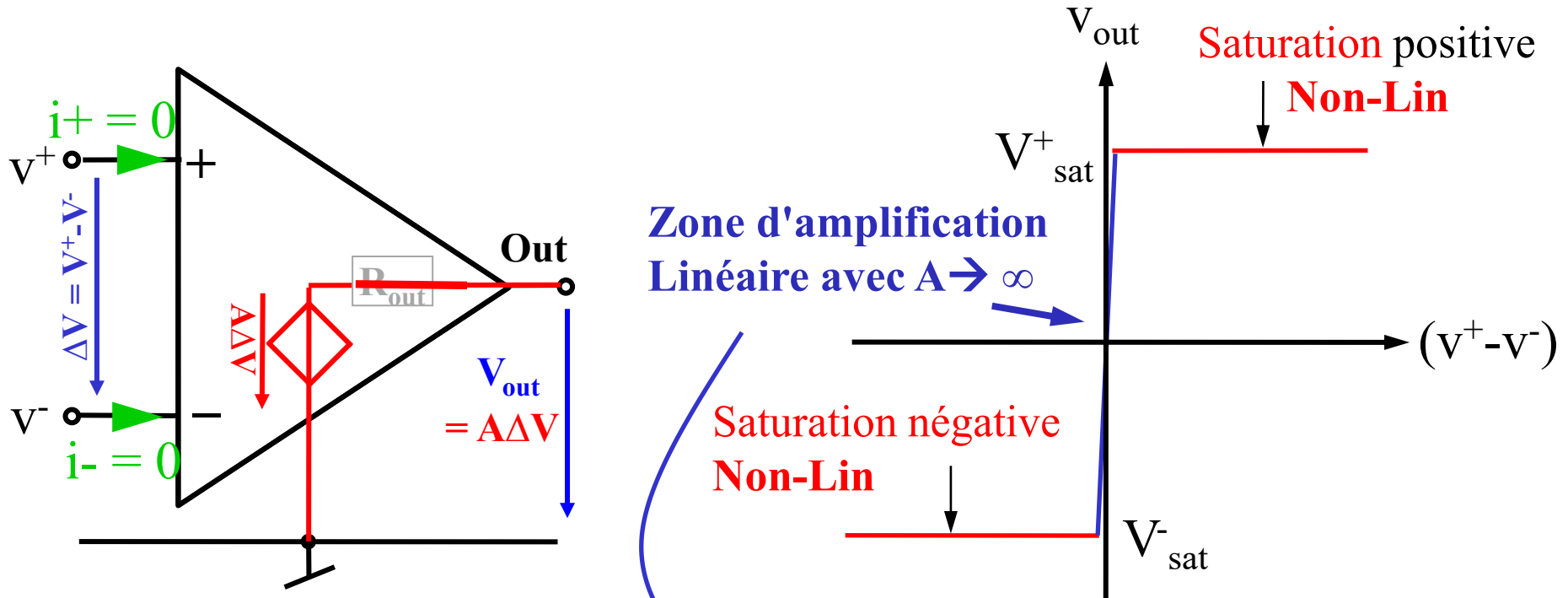
Imperfections de l'A0 et effets de la réaction négative

Electronique I
Adil KOUKAB

Imperfections d'un AO

- Ampli-Op et réaction négative (Rappel)
- Imperfection 1: Gain imprécis de l'AO et effet de la réaction négative sur précision du Gain
- Imperfection 2: Limitation fréquentielle en petits signaux (Band passante de L'AO ou “**Band-Width**”)
- Effet de la réaction négative sur la bande passante
- Imperfection 2: Limitation en fréquence - grand signaux
 - (Taux de variation limité: “slew-rate”)
- Imperfection 3: Tension de décalage «Offset» et chaîne d'amplification
- Imperfection 4: Courants de polarisation

Rappel: AmpliOp idéal + Boucle ouverte



En régime linéaire $V_{sat-} < V_{out} < V_{sat+}$
Possible seulement pour $\rightarrow v^+ \approx v^-$

↔ Ajout d'une Contre-Réaction pour se maintenir dans la zone linéaire

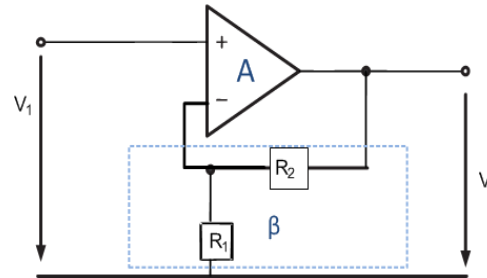


Rappel: AmpliOp idéal + réaction négatif → Régime linéaire

AO idéal:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{in} \rightarrow \infty \Rightarrow i_+ = i_- \\ A \rightarrow \infty \Rightarrow (\text{AO} + \text{ReacNeg}) \\ \quad \Rightarrow v^+ = v^- \\ R_{out} \rightarrow 0 \Rightarrow \text{Gain indep de } R_L \end{array} \right.$$

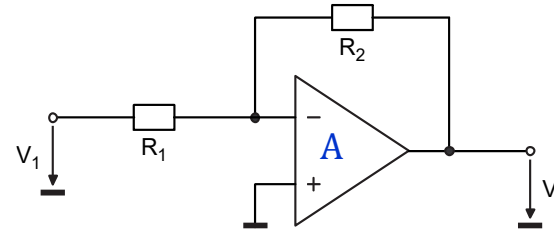
Amplificateur non-inverseur



$$G: \text{Gains boucle fermée} = \frac{v_2}{v_1}$$

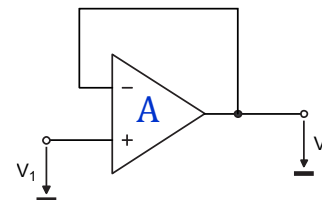
$$G_{N_INV} = \frac{v_2}{v_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Amplificateur inverseur



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

Suiveur



$$G_{N_Suiv} = \frac{v_2}{v_1} = 1$$

Imperfection 1: Gain imprécis de l'AO

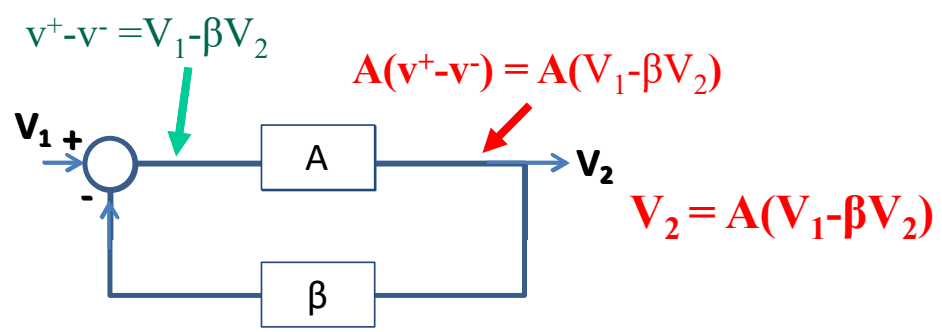
Effet de la réaction négative sur la précision du Gain

Complexité de l'AO → Gain A peu précis et sensible aux variations des procédés de fabrication, de température et de tensions (PVT) 🤔

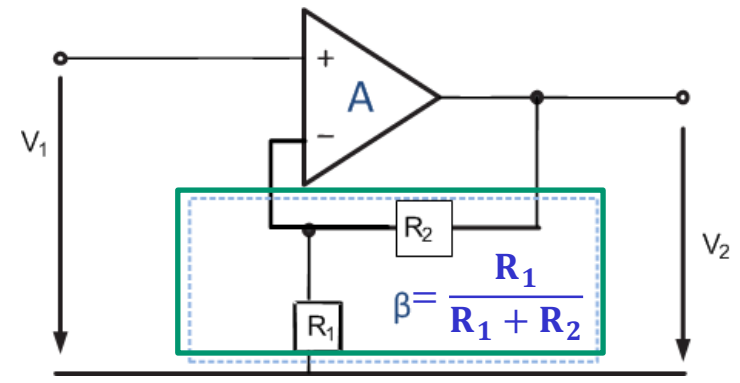
→ Solution: + Réaction Négative

Cas particulier de l'Ampli Non-Inverseur

Model générique de l'Ampli à contre réaction



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \xrightarrow{A \rightarrow \infty} \beta^{-1}$$



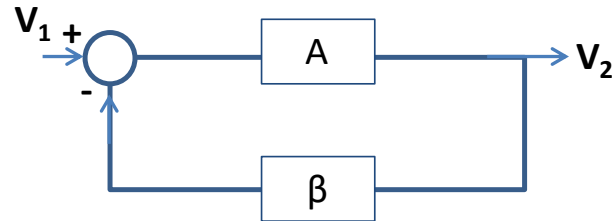
$V_2 = A(V^+ - V^-)$ avec $V^+ = V_1$ et $V^- = \beta V_2$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A}{1 + A \underbrace{\frac{R_1}{R_1 + R_2}}_{\beta}} \xrightarrow{A \rightarrow \infty} 1 + \frac{R_2}{R_1} = \beta^{-1}$$

V_2/V_1 : Gain Boucle Fermée (A_{bf}); $A\beta$: Gain Boucle Ouverte; β : Facteur de Contre Réaction

Effet de la réaction négative sur le Gain

Intérêt du Gain infini de l'AO



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx_{A \rightarrow \infty} \beta^{-1} = fct \left(\frac{R_2}{R_1} \right)$$

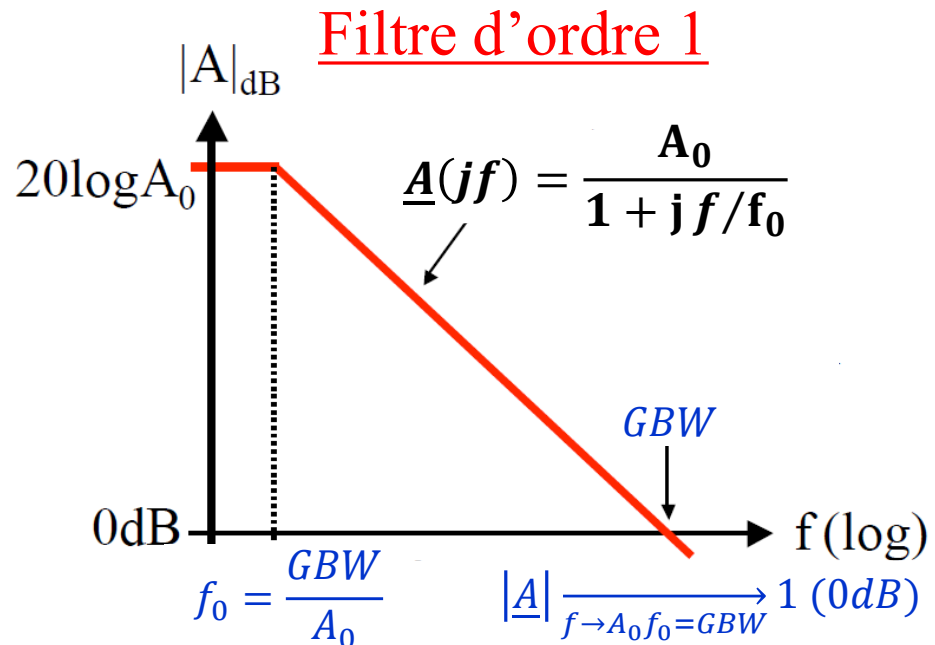
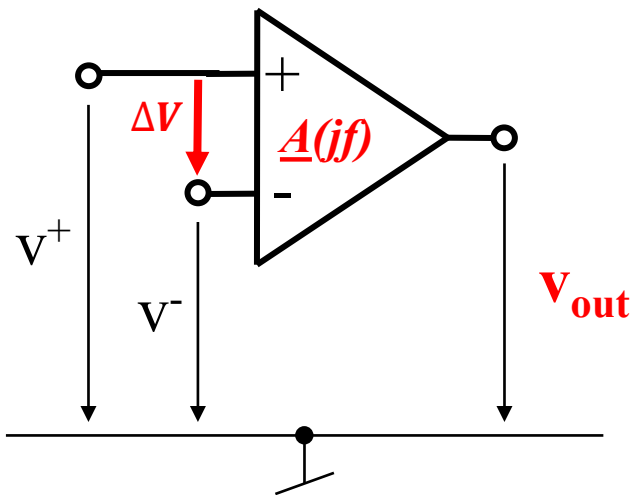
- Le gain boucle fermée ne dépend plus de A mais seulement de β^{-1} , si A très grand ($1/A\beta \rightarrow 0$).
- Avec β^{-1} exprimée en fct d'un **rapport de deux résistances**
 - **→ Peu sensible aux variations PVT “Process-Voltage-Temperature”**
- Alors que A est “PVT-dependent” (du fait de la complexité de l'AO)

La contre-réaction rend donc le gain boucle fermée peu sensible aux imperfections de l'AO pour autant que le gain de ce dernier soit suffisamment élevé. 🧐

Imperfection 2: Bande passante finie en petits signaux



- Un AO réel a un gain élevé (A_0) seulement en basses fréquences
- Au-delà d'une certaine fréquence f_0 (**Bande passante**) le gain diminue de -20dB/décade
- On définit le paramètre **GBW** (**GainBandWidth** [Hz]) comme étant le produit $A_0 \cdot f_0$.
- GBW est aussi la fréquence pour laquelle le gain est égal à 1 (0dB)



GBW est une caractéristique de l'AmpliOp donnée par le fabricant:

Ex: GBW (LM741) ≈ 1 MHz et GBW (LM356) ≈ 5 MHz.

Effet de la contre réaction sur BW: Model générique

Filtre d'ordre 1

$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + jf/f_0}$$

Gain boucle fermée: A_{bf}

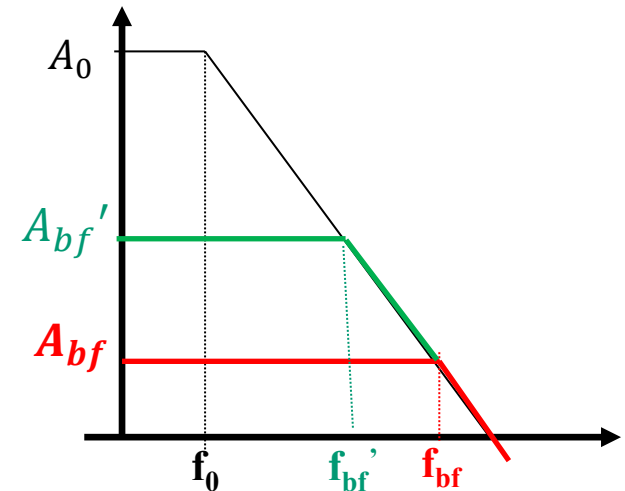
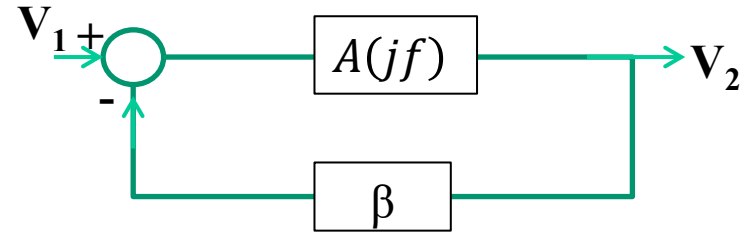
$$A_{bf}(jf) = \frac{V_2}{V_1} = \frac{A(jf)}{1 + \beta A(jf)} = \frac{\frac{A_0}{1 + jf/f_0}}{1 + \beta \frac{A_0}{1 + jf/f_0}} = \frac{A_0}{1 + \beta \frac{A_0}{1 + jf/f_0}}$$

$$\frac{A_0}{1 + \beta A_0} \frac{1}{1 + jf/(1 + \beta A_0)f_0} = \underbrace{A_{bf}}_{\text{Filtre d'ordre 1}} \frac{1}{1 + jf/f_{bf}}$$

Filtre d'ordre 1

$$\text{Avec } A_{bf} = \frac{A_0}{1 + \beta A_0} \text{ et } f_{bf} = (1 + \beta A_0)f_0$$

$$\text{Rq: } A_{bf} f_{bf} = A_0 f_0 = GBW = \text{Cst}$$



- **GBW est une constante (donnée du fabricant) → si on connaît A_{bf} on connaît ω_{bf} et vice-versa.**
- **La contre-réaction permet de troquer du gain contre de la bande passante.**

Imperfection 3: Limitation en fréquence «Grands Signaux» et Taux de variation limité “slew-rate”

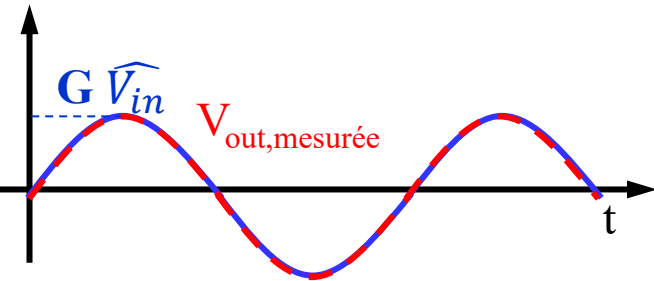
- Slew Rate ($Sr = (dV_{out}/dt)_{Max}$) \equiv Taux de variation maximale possible de la tension à la sortie de l'AO
- $Sr = 0.5 \text{ V}/\mu\text{s}$ pour le LM 741, $13 \text{ V}/\mu\text{s}$ pour TL 071 et 072, $12 \text{ V}/\mu\text{s}$ pour LF356
- Cette limitation est due au courant finie qui charge et décharge les capacités internes de l'AO.

• Conséquences pratiques du Sr

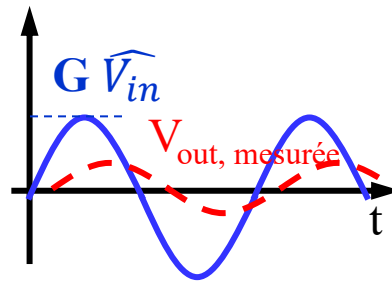
Ex: soit le signal de sortie théorique:

$$V_{out} = G \widehat{V}_{in} \sin(\omega t) \quad \rightarrow \quad \left. \frac{dV_{out}}{dt} \right|_{max} = G \widehat{V}_{in} \omega$$

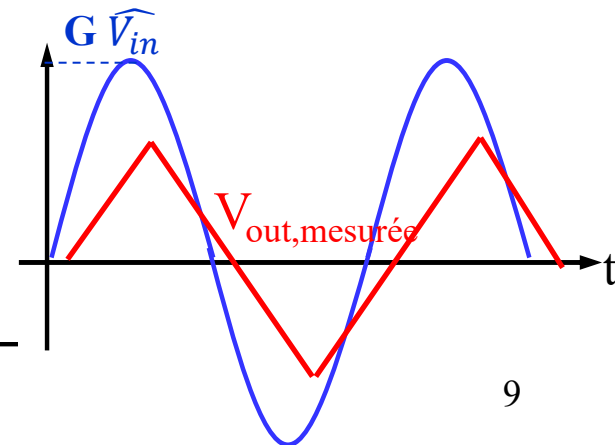
Si $A_0 \widehat{V}_{in} \omega < Sr \rightarrow$ régime
petits signaux
si $\omega < \omega_{BW} \rightarrow$ pas
d'atténuation ni distorsion



Si $A_0 \widehat{V}_{in} \omega < Sr \rightarrow$ régime
petits signaux
si $\omega > \omega_{BW} \rightarrow$ Atténuation
sans distorsion



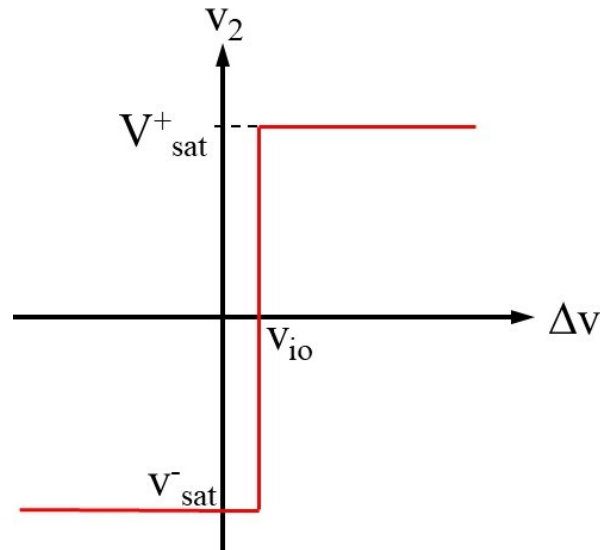
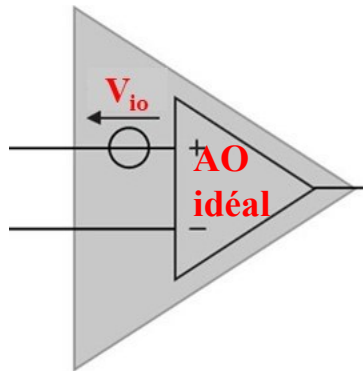
$A_0 \widehat{V}_{in} \omega > Sr \rightarrow$ régime **grands signaux**
 \rightarrow Distorsion (même si $\omega < \omega_{BW}$)



Imperfections 4: Offset

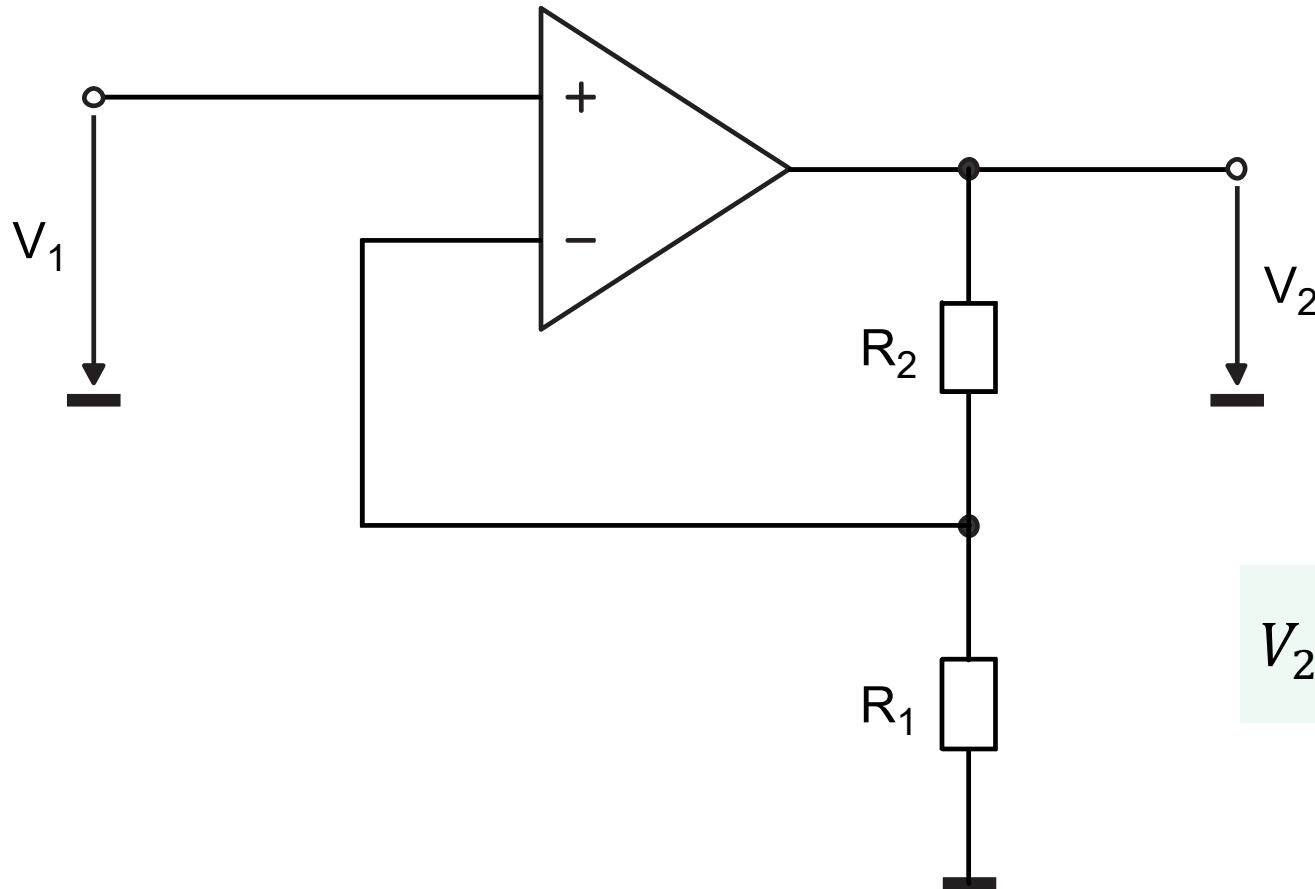
- La tension de décalage ou « offset » est due à un défaut de symétrie causé par à un pareillement imparfait des composants de l'AO réel.
- Elle se manifeste par une tension V_{io} **continue positive ou négative (DC)** entre ses entrées + et - .

Modèle:



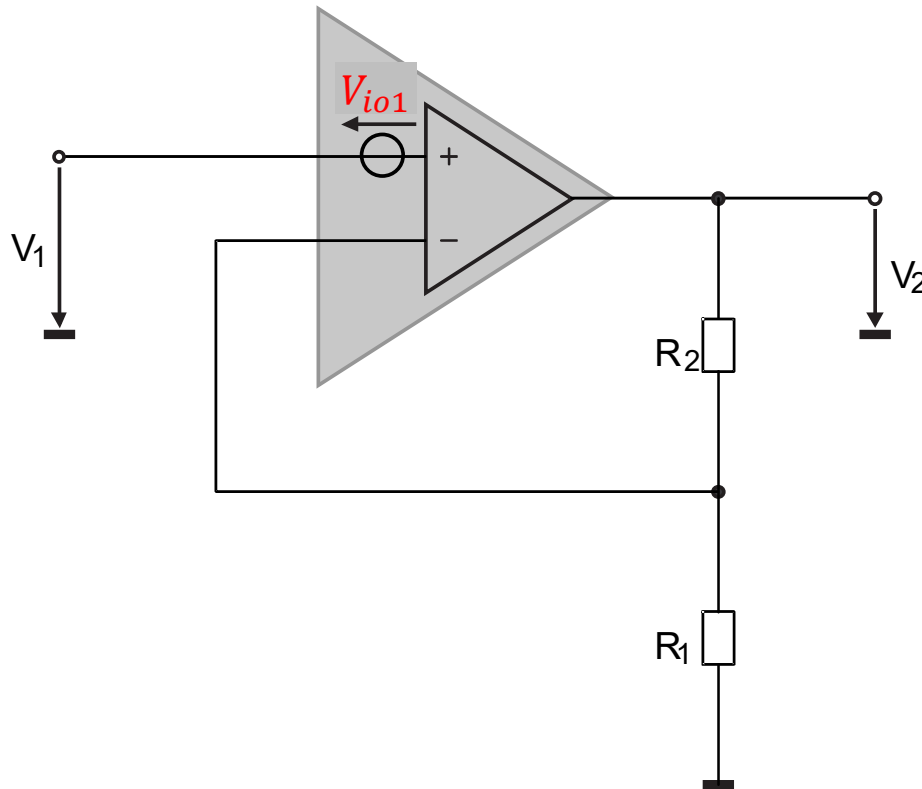
- Les fabricants donnent une valeur **absolue** maximale de l'offset $V_{io,max}$
 - (Ex: 7.5 mV pour LM741; 3 mV pour TL072; 10 mV pour LF356;)

Amplificateur opérationnel idéal



$$V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

Amplificateur opérationnel avec: Offset

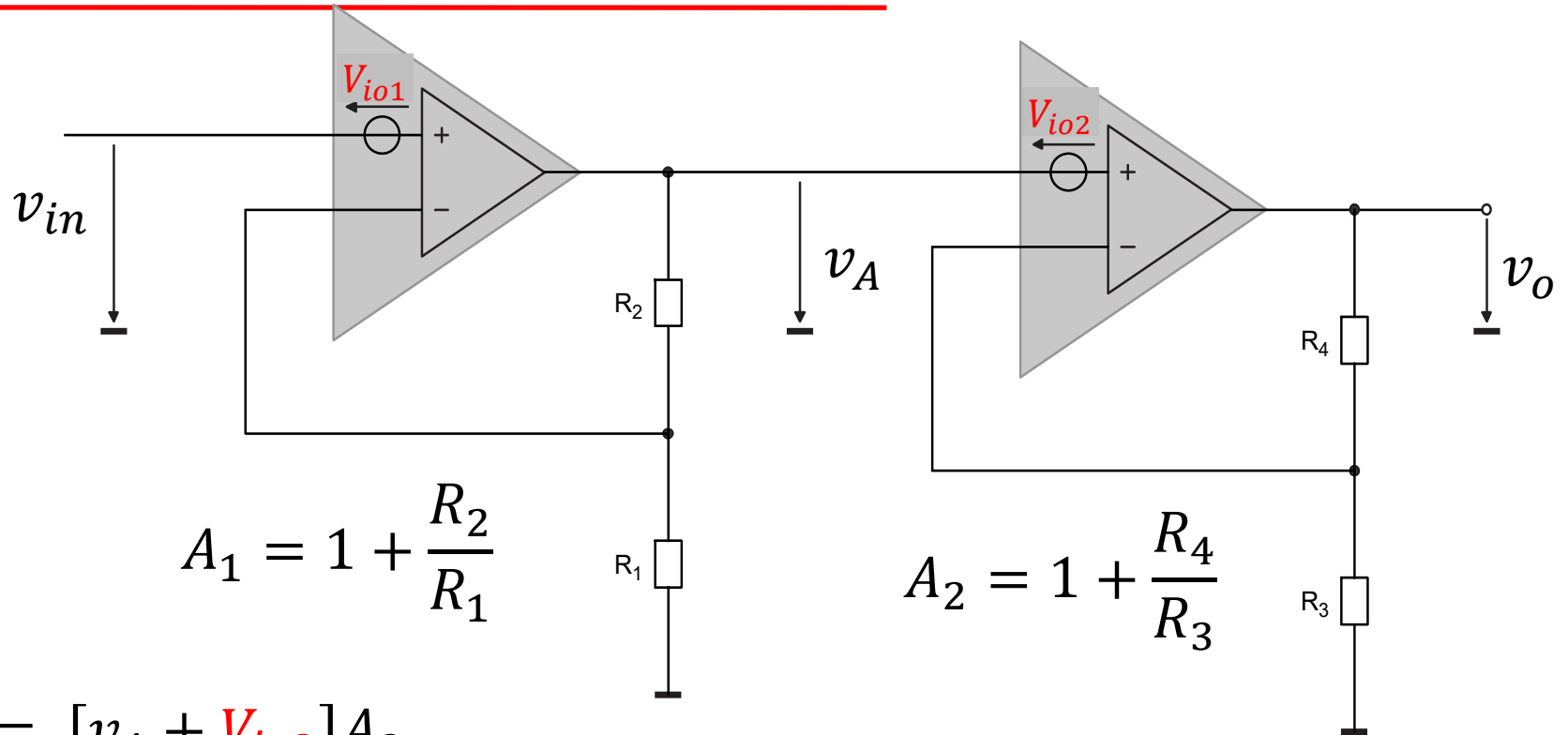


$$V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (V_+)$$

$$V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} (V_1 + V_{io1})$$

- V_{offset} est amplifiée de la même manière que le signal utile.
- Elle engendre une tension continue indésirable à la sortie
- Son effet est d'autant plus néfaste que le gain est élevé.

L'offset dans une chaîne d'amplification



$$A_1 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$A_2 = 1 + \frac{R_4}{R_3}$$

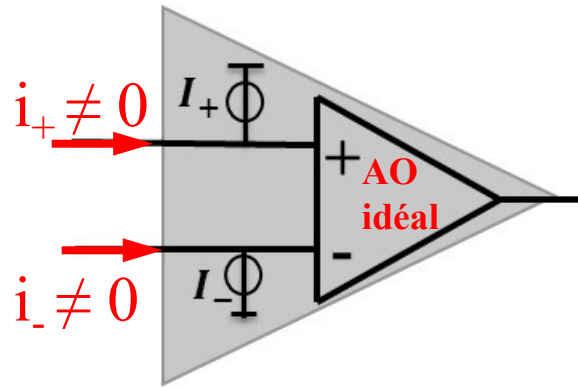
$$v_o = [v_A + V_{io2}]A_2$$

$$= [(v_{in} + V_{io1})A_1 + V_{io2}]A_2$$

$$v_o = A_1 A_2 v_{in} + \underbrace{A_1 A_2}_{\text{!}} V_{io1} + A_2 V_{io2}$$

! L'offset du premier étage est dominant (car $\times A_1 A_2$)

Imperfection 5: Courants de polarisation



- L'AO réel a une impédance d'entrée très grande mais pas infinie
 $\rightarrow i_{+/-} \neq 0$
- Fabrication monolithique $\rightarrow i_+$ et i_- proches mais pas égaux
 $\rightarrow |i_+ - i_-| \ll |i_{\pm}|$

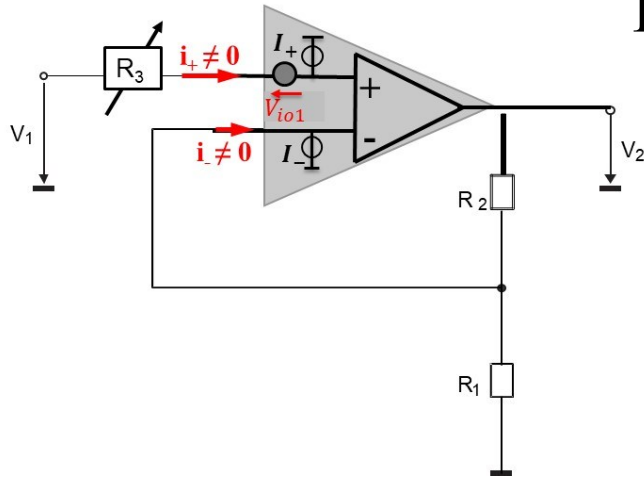
Les fabricants donnent donc deux caractéristiques de l'AO:

Input bias current: i_+ et i_- (~ 80 nA pour LM741)

Input offset current: $|i_+ - i_-|$ (~ 20 nA pour LM741)

- V_{io} et $i_{+/-}$ induisent une tension continue non désirée en sortie.
- V_{io} et $i_{+/-}$ sont indépendants \rightarrow se superposent.

Exo: 1- Calculer la tension continue à l'offset et aux courants de polarisation pour le circuit ci- dessous?
 Choisir R_3 pour la minimiser? (noter que $|i_+ - i_-| \ll |i_+|$)



En utilisant la superposition, on démontre que:

$$V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{io1} - \frac{R_1 + R_2}{R_1} R_3 i_+ + R_2 i_-$$

Si $\frac{R_1 + R_2}{R_1} R_3 = R_2$ c.à.d. $R_3 = R_2 // R_1$, V_2 devient:

$$V_2 = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1 + \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{io1} + R_2 (i_- - i_+)$$

Puisque $(i_- - i_+) \ll i_+$ et i_-

cela minimise effectivement l'impact des courants de polarisation