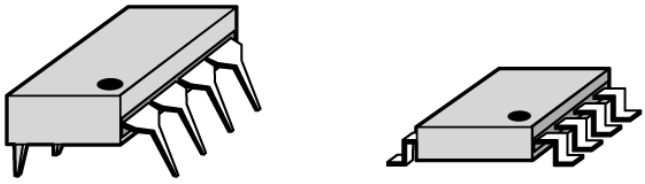
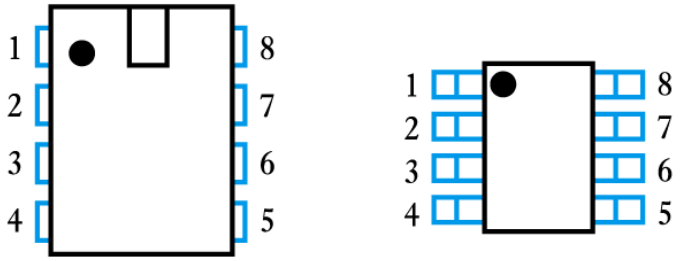
Amplificateurs Opérationnels

- Introduction
- Amplificateur opérationnel idéal
- Circuits de base à ampli op
- Autres circuits
- Amplificateur opérationnel réel
- Choix des composants
- Effet de la rétroaction sur l'ampli op

Introduction

- **Amplificateur Opérationnel** (**Ampli op** ou **Op amps**):
  - Un des élements le plus utilisé en électronique
  - Réalisation en circuits intégrés (integrated circuits: ICs)
    - Souvent DIL ou SMT

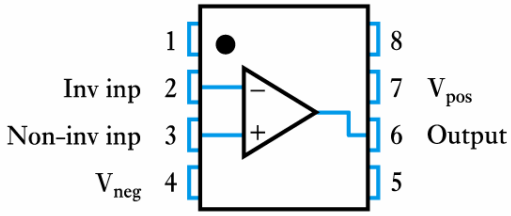




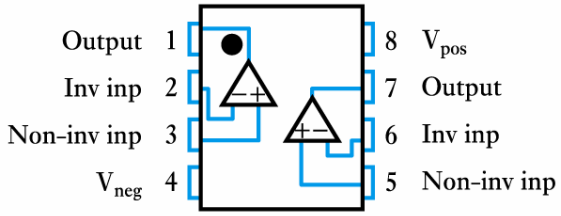
(a) A DIL package (b) An SMT package

Composants

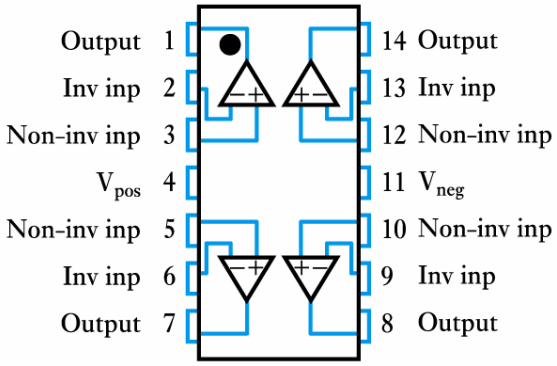
- Un seul élément peut contenir plusieurs ampli ops



(a) A single op-amp



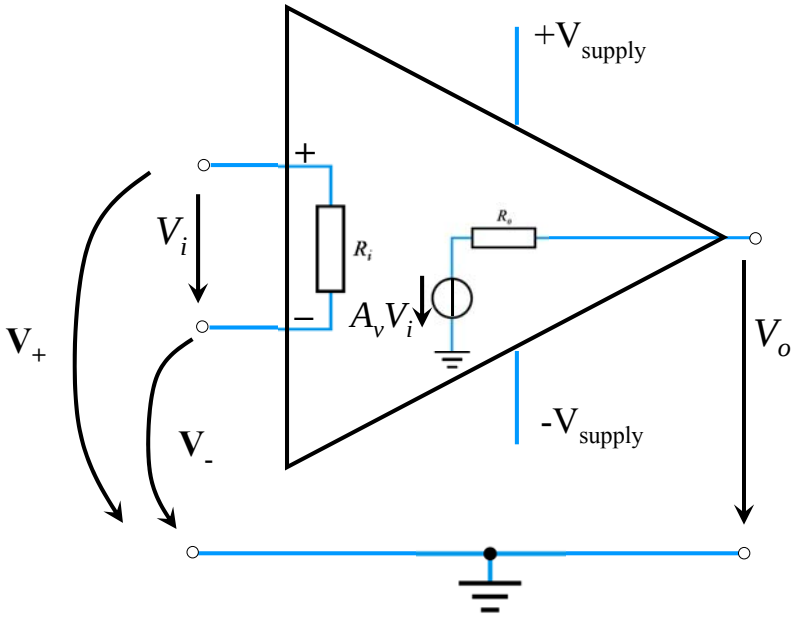
(b) A dual op-amp



(c) A quad op-amp

Amplificateur Opérationnel Idéal

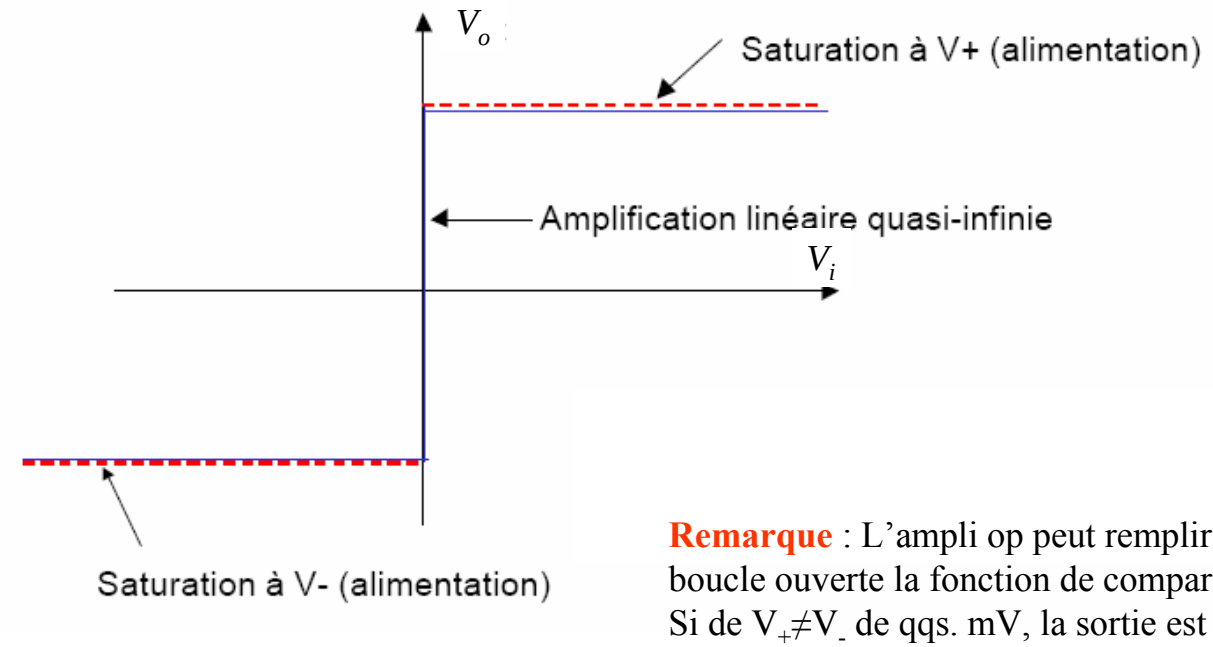
- Dans le cas *idéal* un ampli op est modélisé comme un amplificateur de tension idéal: $A = \infty$, $R_i = \infty$ and $R_o = 0$
- L'ampli-op idéal est souvent utilisé pour analyser le fonctionnement du circuit



Circuit équivalent d'un ampli op idéal

Caractéristique de transfert de l'ampli op en boucle ouverte

Amplification très grande (∞)→ pente de V_o=f(Vi)→∞

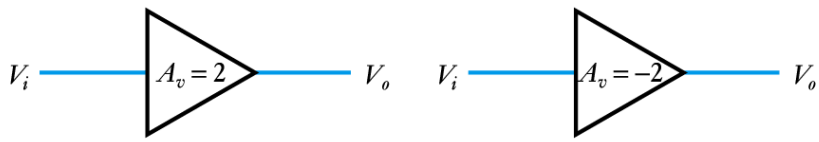


Remarque : L'ampli op peut remplir en boucle ouverte la fonction de comparateur : Si de $V_+ \neq V_-$ de qqs. mV, la sortie est saturée + ou -.

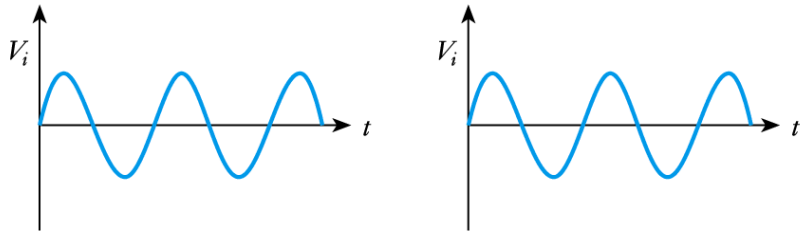
Circuits de base avec amplificateur opérationnel

- Amplificateurs:

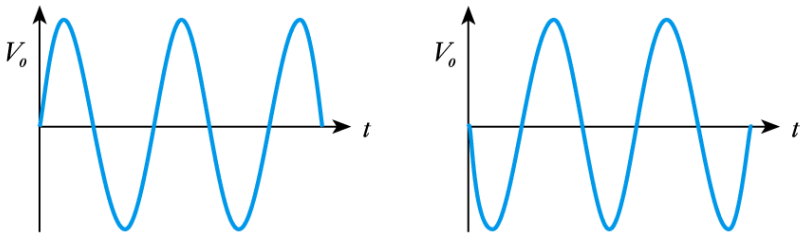
non-inverseur **inverseur**



- Nous pouvons utiliser le principe de rétroaction négative pour analyser le circuit



- Cependant, **l'analyse est plus simple en supposant que l'ampli op est idéal**



(a) A non-inverting amplifier (b) An inverting amplifier

Amplificateur non-inverseur

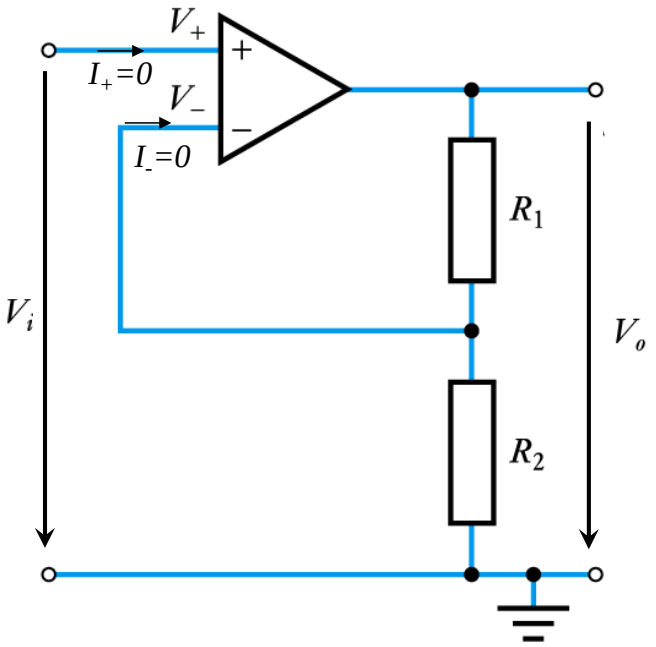
- **Analyse**

  Le gain de l'ampli op est infinie, si V_o est finie alors:

  $V_+ - V_- = 0$

  $V_+ = V_- = V_i$

  La résistance d'entrée de l'AO (ampli op) est ∞, le courant d'entrée est donc nul, par conséquent:



$$V_- = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_i = V_o \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Exemple

- **Exemple 8.1** du livre

  Concevoir un amplificateur non-inverseur de gain 25

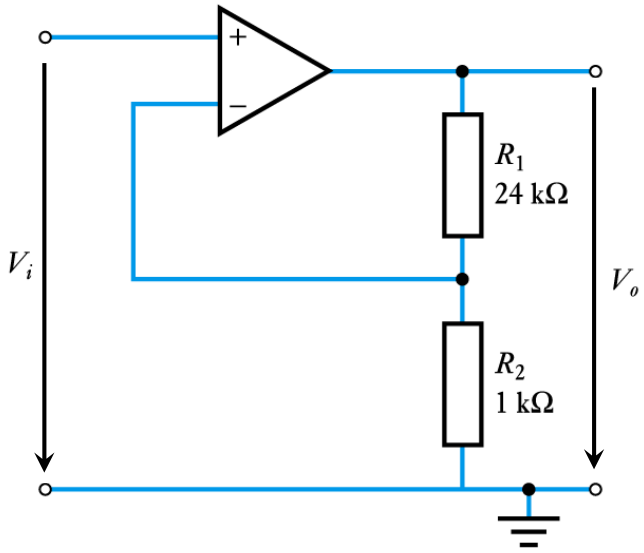
$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_2} = 25$$

$$R_1 + R_2 = 25R_2$$

$$R_1 = 24R_2$$

On peut choisir par exemple R_2 = 1 kΩ et R_1 = 24 kΩ



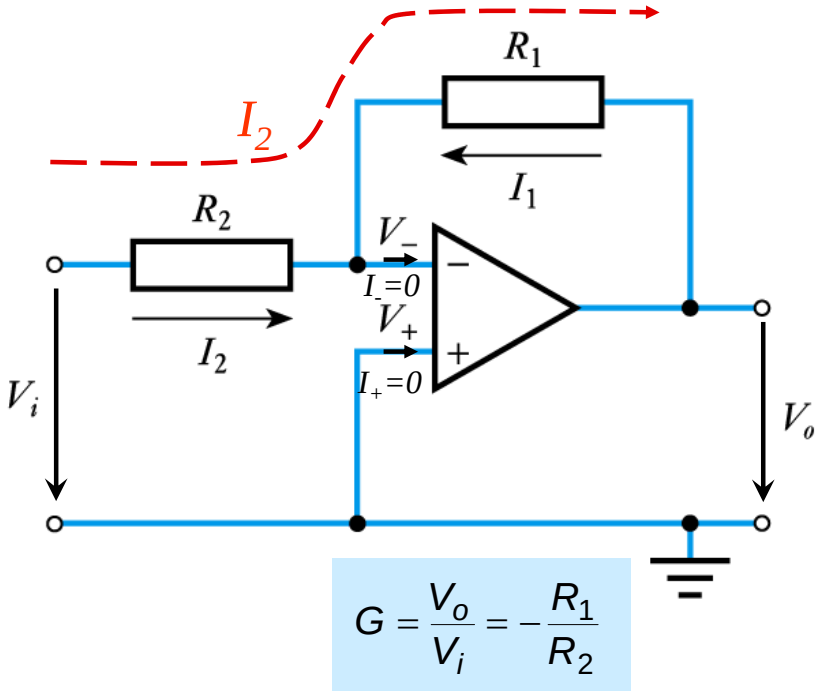
Amplificateur inverseur

- **Analyse**

  Le gain de l'ampli-op est infinie, si V_o est finie alors:

  $V_+=V_-=0$

  La résistance d'entrée de l'AO est ∞, le courant d'entrée est donc nul, par conséquent:



$$\begin{cases} I_1 = \dfrac{V_o - V_-}{R_1} = \dfrac{V_o - 0}{R_1} = \dfrac{V_o}{R_1} \\ I_2 = \dfrac{V_i - V_-}{R_2} = \dfrac{V_i - 0}{R_2} = \dfrac{V_i}{R_2} \end{cases}$$

$$\frac{V_o}{R_1} = -\frac{V_i}{R_2} \longleftarrow I_1 = -I_2$$

$$G = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$$

V_- est gardée à 0V: elle est considérée comme **la terre virtuelle**

Exemple

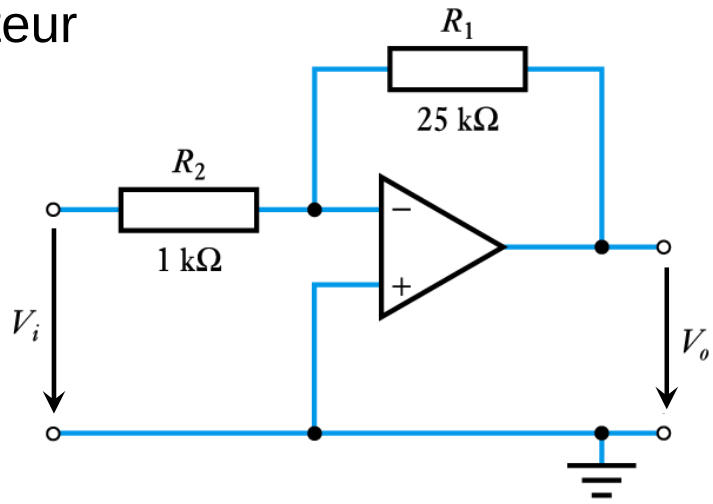
- **Exemple 8.1** du livre

  Concevoir un amplificateur inverseur de gain -25

$$G = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_1}{R_2}$$

$$-\frac{R_1}{R_2} = -25$$

$$R_1 = 25R_2$$



On peut choisir par exemple R_2 = 1 kΩ et R_1 = 25 kΩ

Autres circuits: Suiveur de tension

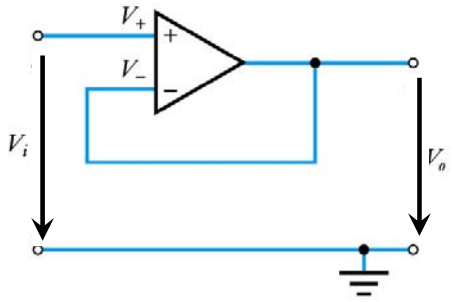
- **Un amplificateur de gain 1**

Analyse

Il s'agit d'un cas particulier de l'amplificaeur non-inverseur avec $R_1 = 0$ et $R_2 = \infty$

donc

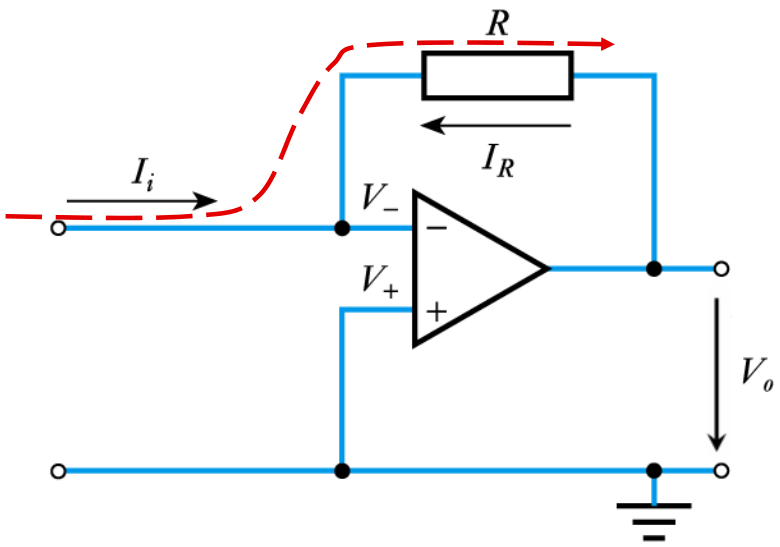
$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{R_1}{R_2} + 1 = \frac{0}{\infty} + 1 = 1$$



le gain du circuit est égal à 1

- Avantage:
  - Résistance d'entrée très élevée
  - Résistance de sortie très faibe
  - Utilisé comme **suiveur (buffer)** pour ne pas tirer du courant de la source

Convertisseur de courant-tension



$$V_o = -I_i R$$

- Avantage:
  - Le courant de la source n'est pas modifié

Amplificateur de différence

Soustracteur

① $$V_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_1$$

② $$I_2 = \frac{V_2 - V_o}{R_1 + R_2} = \frac{V_2 - V_-}{R_2}$$

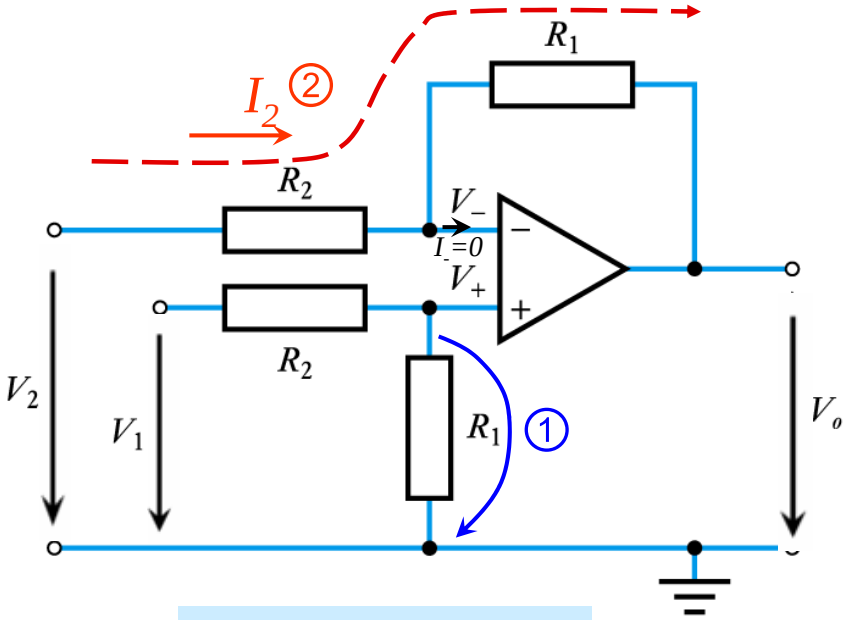
$$V_- = V_2 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}(V_o - V_2)$$

$$V_- = V_+$$

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_1 = V_2 + \frac{R_2}{R_1 + R_2}(V_o - V_2)$$

$$R_1 V_1 = (R_1 + R_2) V_2 + R_2 (V_o - V_2)$$

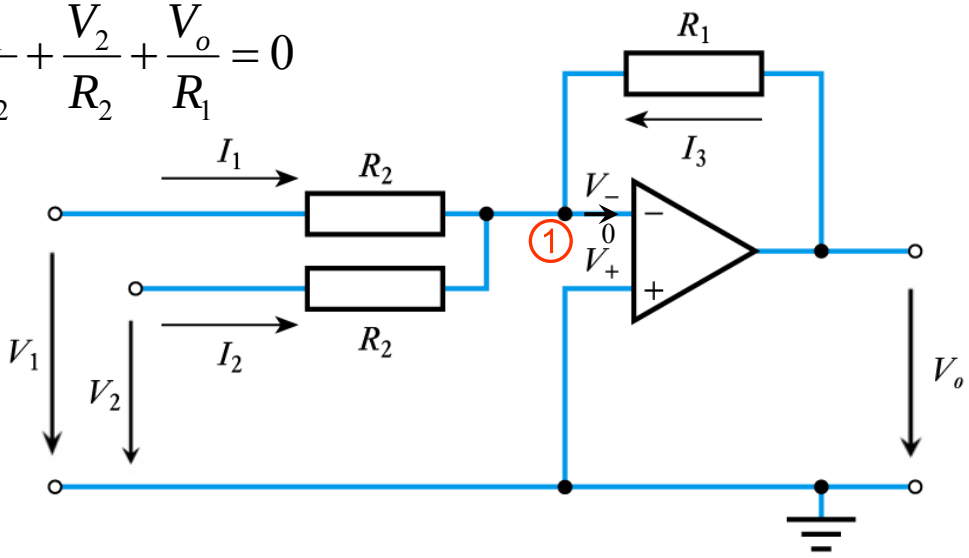
$$R_1 (V_1 - V_2) = R_2 V_o + R_2 V_2 - R_2 V_2$$



$$V_o = (V_1 - V_2)\frac{R_1}{R_2}$$

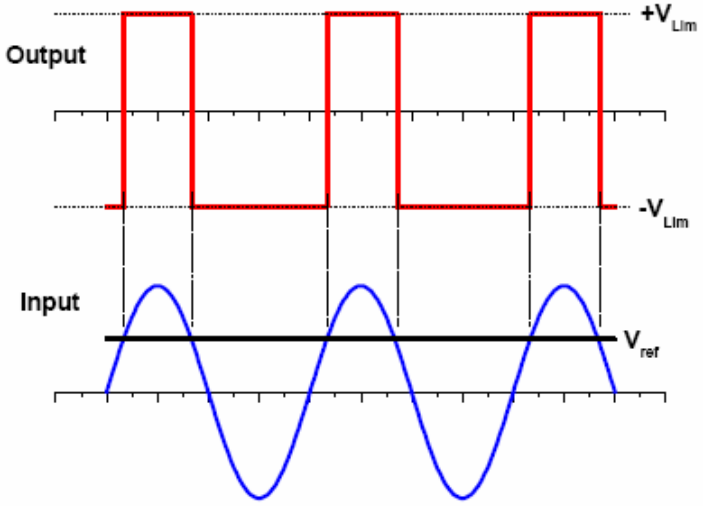
Sommateur inverseur

① $$I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V_1}{R_2} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_o}{R_1} = 0$$

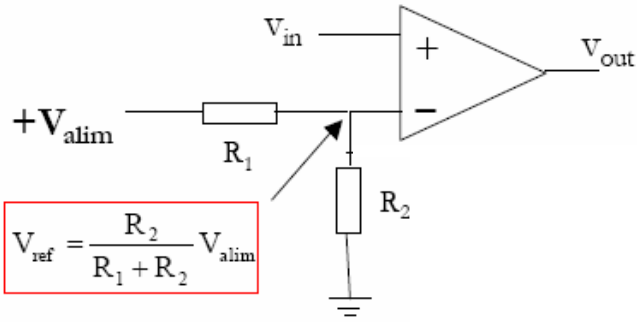


$$V_o = -(V_1 + V_2)\frac{R_1}{R_2}$$

Comparateur

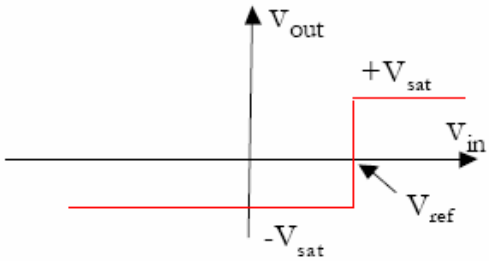


Operational Amplifier as Comparator

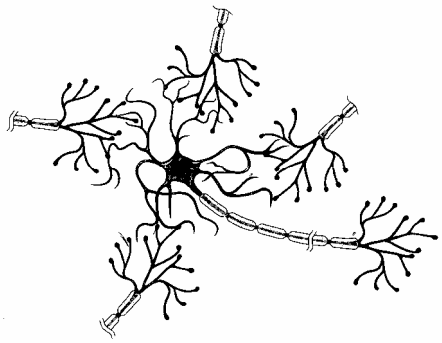


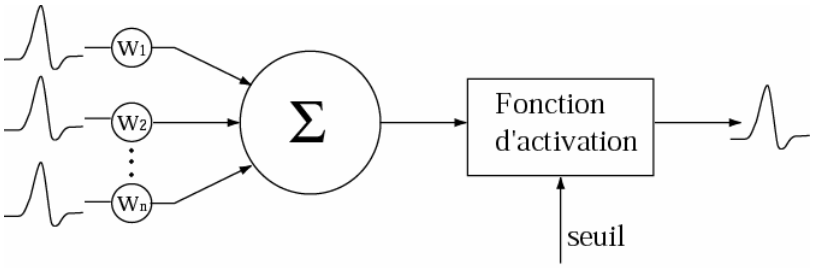
$$V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{alim}$$

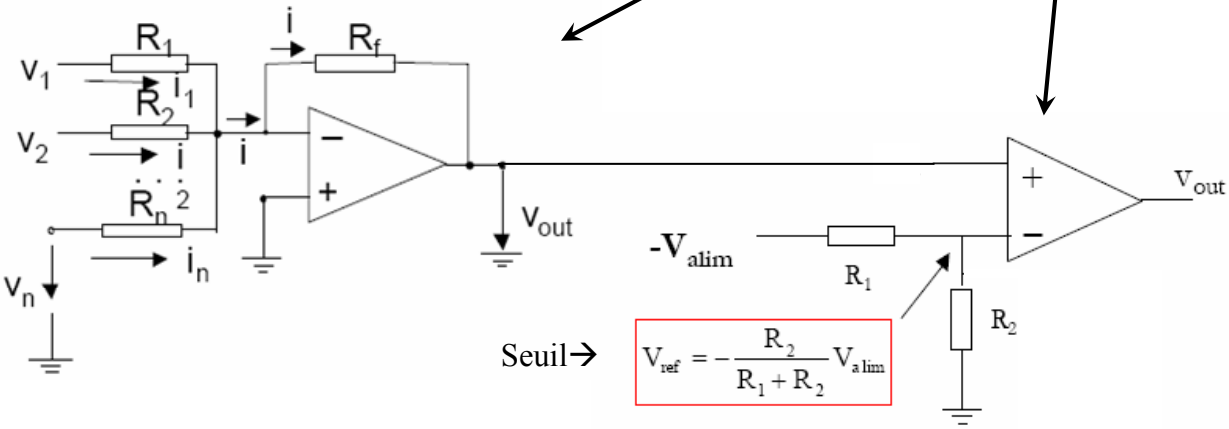
Caractéristique de transfert :



Exemple: Neurone, un sommateur et un comparateur

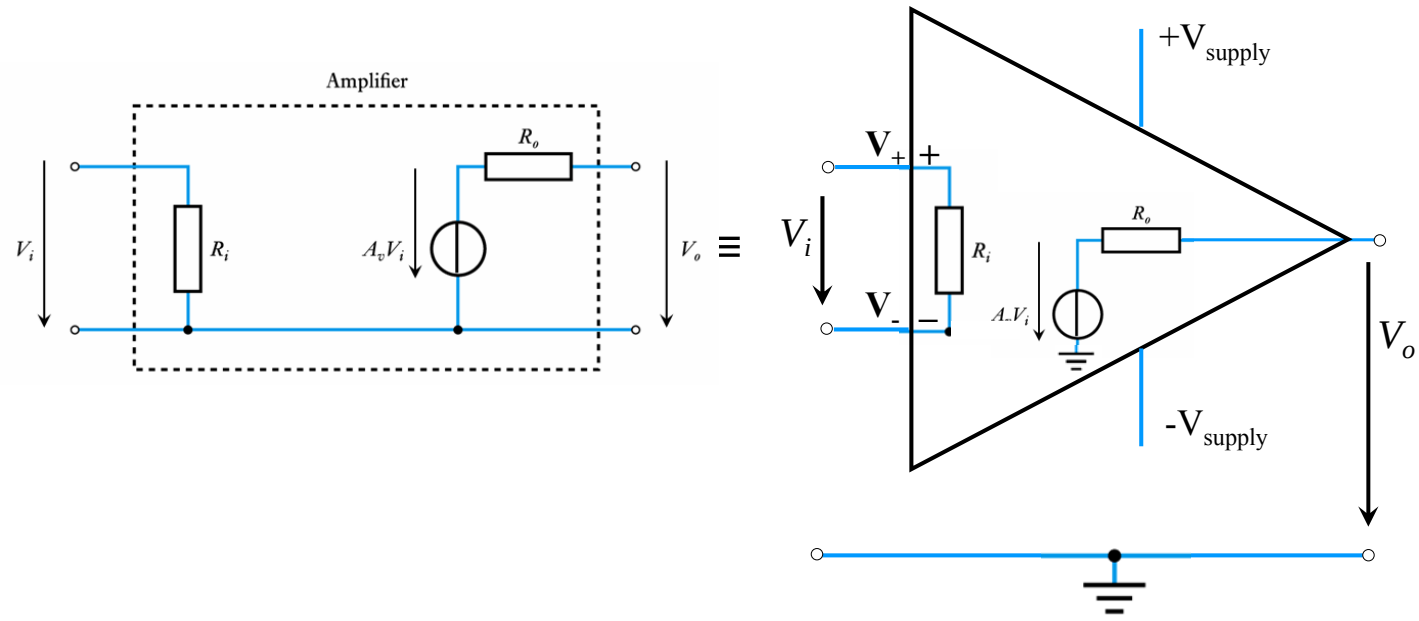




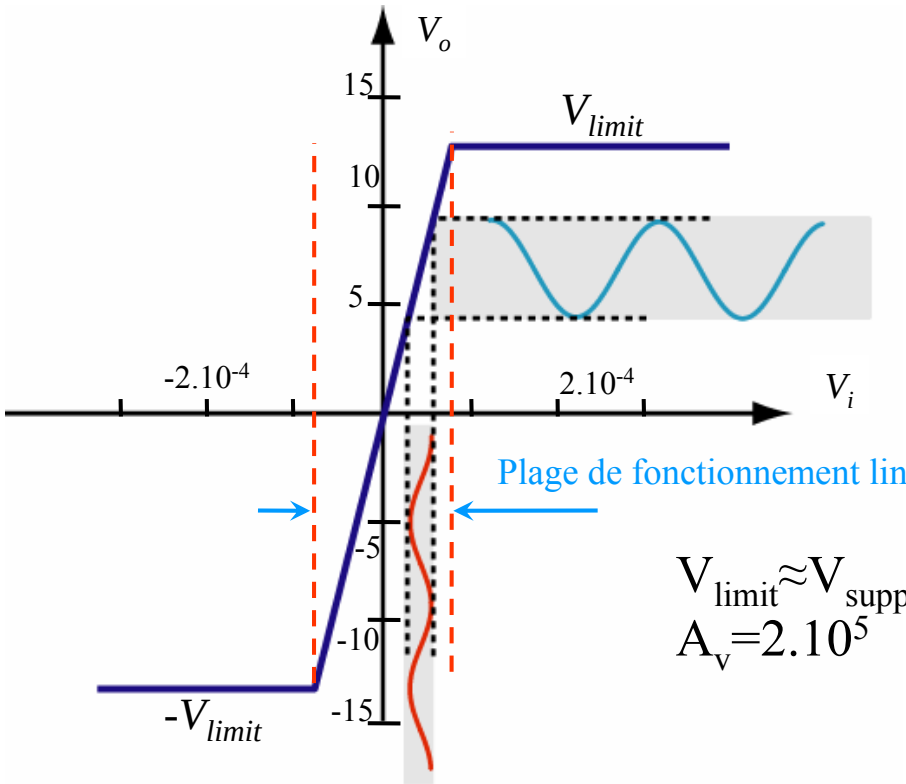


Seuil→ $$V_{ref} = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{alim}$$

Amplificateur opérationnel réel



Ampli op réel: caractéristiques de transfert



$V_{limit} \approx V_{supply} = \pm 12V$

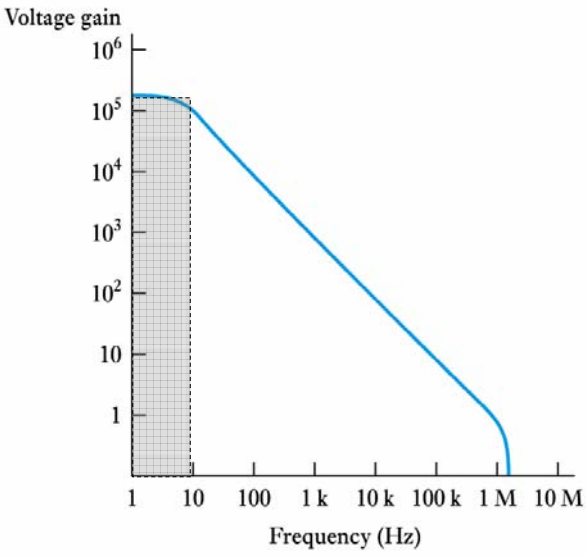
$A_v = 2.10^5$

Exemple: AO 741

- **Gain de tension**
  - 100 à 140 dB (10^5 à 10^7) en général. On peut avoir des gains plus élevés: 160 dB (10^8)
  - Pour AO 741: 106 dB (2×10^5)
- **Résistance d'entrée**
  - pour AO 741: 2 MΩ (typique)
  - Nous trouvons facilement des AO avec $R_i = 10^{12}\ \Omega$
- **Résistance de sortie**
  - Pour AO 741: 75 Ω (typique)
  - Souvent la valeur de courant de sortie est fournie. Pour AO 741: 20 mA
- **Tension d'alimentation**
  - +15 V et – 15 V, +5 V et – 5 V, +3 V et – 3 V, etc…
  - AO 741 accepte de: ±5 V à ±18 V
  - Certains AO montent jusqu'à ±30 V
  - Certains d'autre: ±1.5 V, ou une alimentation unipolaire: 4 à 30 V
- **Tension de sortie**
  - Limitée par la tension d'alimentation: pour AO 741, avec une alimentation ±15 V, la tension maximum de sortie est ±13 V

Exemple : AO 741

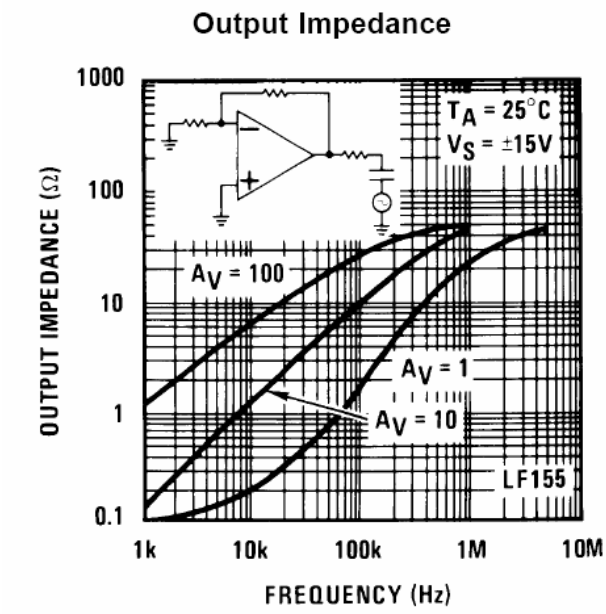
- **Réponse fréquentielle**
  - La fréquence de coupure est de **quelques Hz**
  - La largeur de bande à gain unité est souvent utilisée pour la largeur de bande

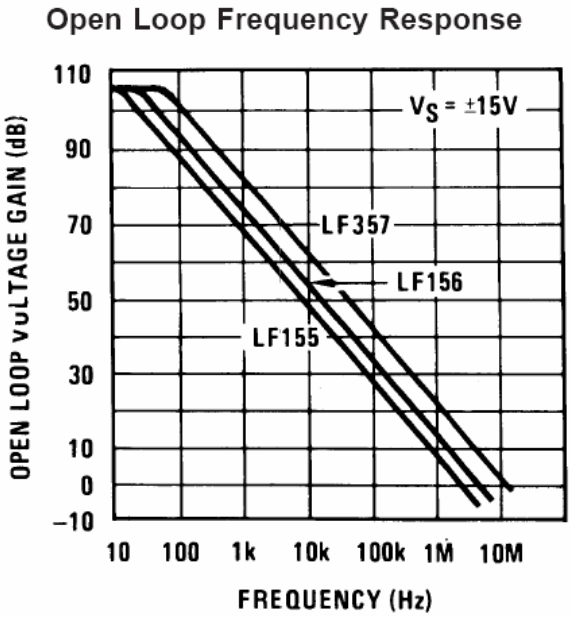


Exemple: AO 741

Exemple: LF155 de National Semiconducteur

Résistance d'entrée: $10^{12}\Omega$





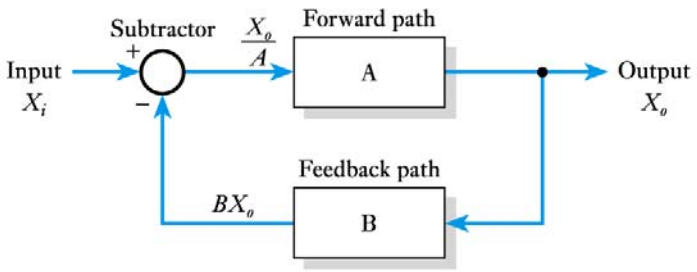
Choix des composants

- Pour être proche de l'AO idéal, il faut:
  - gain du circuit << gain de l'AO
  - Résistances du circuit<< la résistance d'entrée de l'AO
  - Résistance du circuit >> résistance de sortie de l'AO
- Généralement les résistances du circuit varient de 1 kΩ – 100 kΩ

Les effets de la rétroaction dans les circuits AO

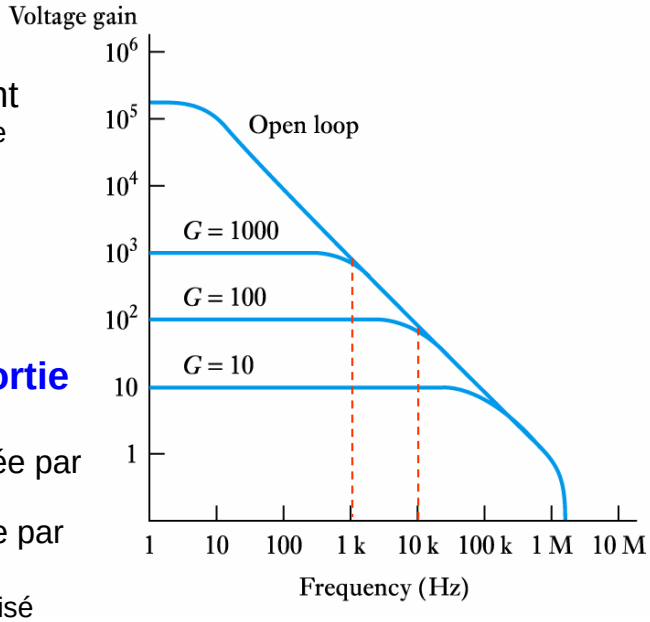
- **Effet sur le Gain**
  - La rétroaction négative *diminue* le gain de A à $A/(1 + AB)$
  - En retour, nous avons un gain fixé et stable
  - La condition $A >> 1/B$ doit être vraie

$$G = \frac{X_o}{X_i} = \frac{A}{1 + AB}$$



Les effets de la rétroaction dans les circuits AO

- **Effet sur la largeur de bande (Bandwith: BW)**
  - gain × largeur de bande ≈ constant
    - La largeur de bande est augmentée de $(1 + AB)$
  - **Exemple AO 741**
    - gain × bandwidth ≈ 10^6
    - pour gain = 1000 BW ≈ 1000 Hz
    - pour gain = 100 BW ≈ 10000 Hz

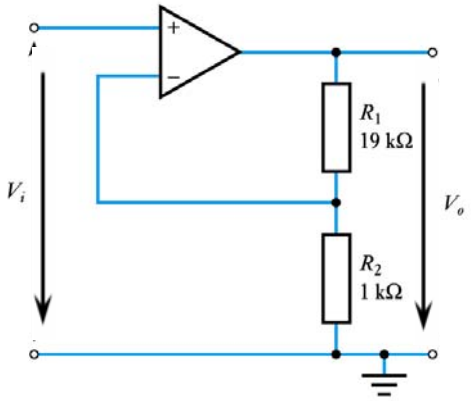


- **Effet sur la résistance d'entrée/sortie**
  - Pour une rétroaction en tension:
    - la résistance d'entrée est multipliée par $(1 + AB)$
    - La résistance de sortie est divisée par $(1 + AB)$
  - **Exemple**: Un AO de gain 2×10^5 est utilisé pour faire un amplificateur de gain 100:

$$A = 2 \times 10^5$$
$$B = 1/G = 0.01$$
$$(1 + AB) = (1 + 2000) \approx 2000$$

Exemple

- **Exemple 8.4** du livre
  - Déterminer la résistance d'entrée et de sortie du circuit en supposant que l'AO utilisé est le 741



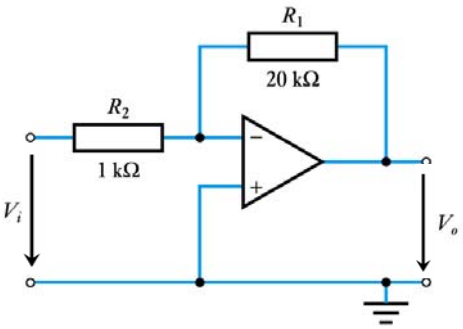
Gain boucle ouverte (A) du 741 est 2×10^5
Gain boucle fermée ($1/B$) est 20, $B = 1/20 = 0.05$
$(1 + AB) = (1 + 2 \times 10^5 \times 0.05) = 10^4$

Résistance de sortie du 741 (75 Ω) est divisée par 10^4 → 7.5 mΩ

Résistance d'entrée du 741 (2 MΩ) est multipliée par 10^4 → 20 GΩ

Remarque

- La résistance d'entrée (sortie) augmente (diminue) si la rétroaction applique une tension à l'entrée (sortie)
- Dans les autres cas (si la rétroaction applique un courant à l'entrée ou à la sortie) la résistance d'entrée (sortie) diminue (augmente).
- **Exemple 8.5** du livre
  - déterminer les résistances d'entrée et de sortie du circuit ci-dessous en supposant que l'ampli op est un AO 741



$(1 + AB) = (1 + 2 \times 10^5 \times 0.05) = 10^4$
La rétroaction mesure une *tension* donc *réduit* la résistance de sortie de AO (75Ω) de 10^4 → 7.5 mΩ
La rétroaction diminue un *courant* à l'entrée. Dans ce cas l'entrée voit R_2 reliée à la terre virtuelle, la résistance d'entrée est donc 1 kΩ

Key Points

- Ampli op est parmi les composanrs les plus utilisés
- Un AO idéal a un gain infini, une R_i infinie et une R_o nulle
- Pour calculer le gain d'un circuit à AO nous supposons souvent que l'AO est idéal
- On peut améliorer les performances d'un AO en utilisant un circuit de rétroaction
- Les caractéristiques des AO sont données par le fabricant sous forme de data sheet
- Il existe une variété de circuits à AO