

Chapitre 4:

Amplificateur opérationnel

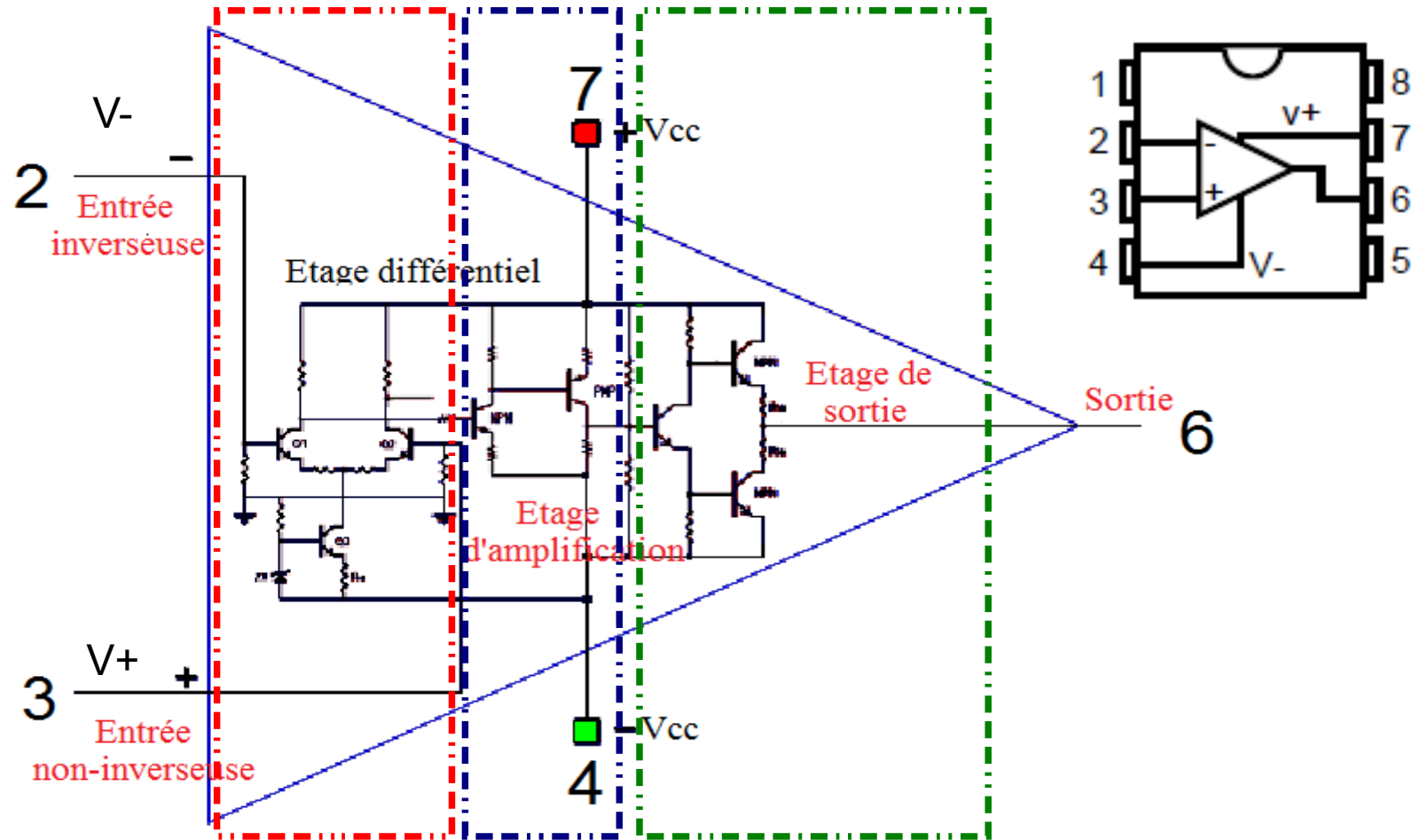


Copyright c2005
T.Kato JA9TTT/JH1WBU

Introduction

- ◆ C'est un circuit intégré, c'est à dire qu'il est formé d'une multitude de composants électroniques élémentaires (résistances, transistors, condensateurs, diodes, etc...) formant un circuit complexe et intégrés dans un boîtier.
- ◆ Il constitue une brique de base dans un circuit électronique.
- ◆ Il peut réaliser diverses opérations sur un signal électrique: Amplification, Comparaisons, soustractions, additions, déphasages (décalages dans le temps), filtrages, etc...

Amplificateur opérationnel: schéma interne

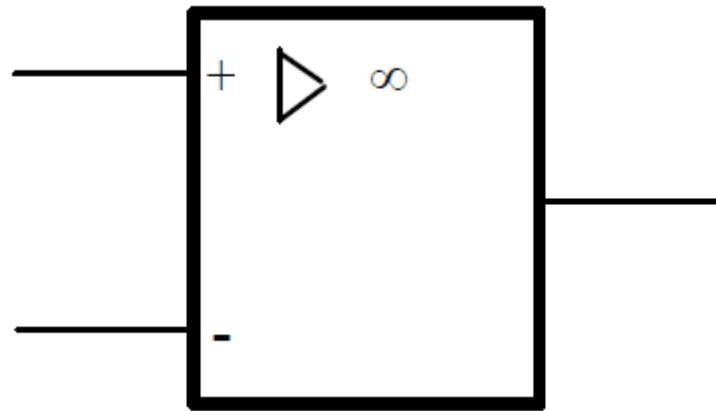


L' amplificateur opérationnel comprend trois étages :

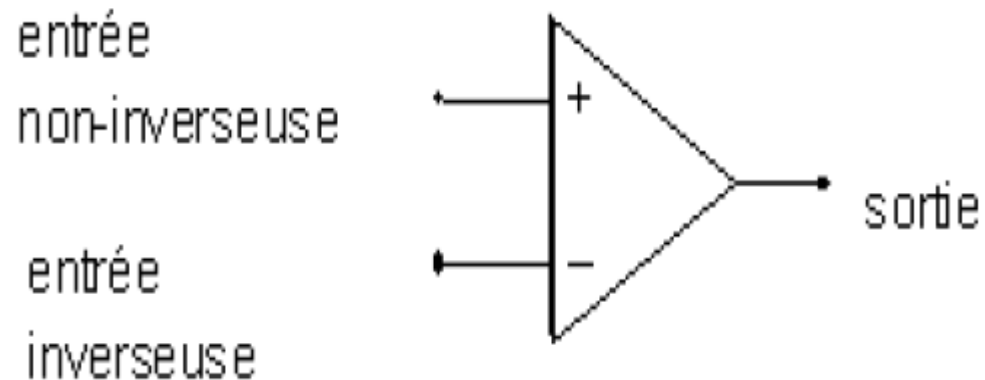
- ◆ un étage d'entrée différentiel chargé d'amplifier une différence de potentiel entre deux signaux (V_+ et V_-) : $A (V_+ - V_-)$,
- ◆ un étage présentant un très fort gain, idéalement proche de l'infini,
- ◆ un étage de sortie permettant de délivrer le signal de sortie avec une faible résistance

Amplificateur opérationnel: Symbole

Le symbole normalisé AFNOR (Association Française de NORmalisation)



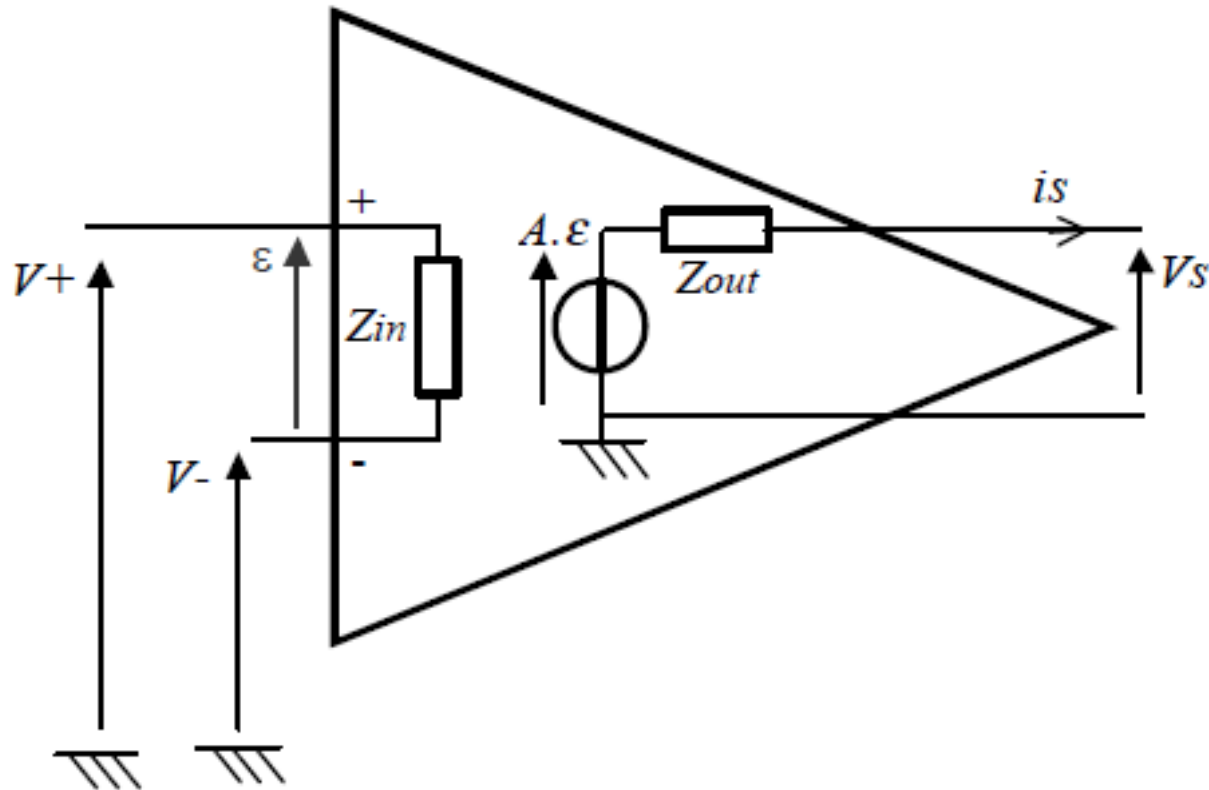
Le symbole généralement utilisé



Caractéristiques essentielles d'un AmplioP

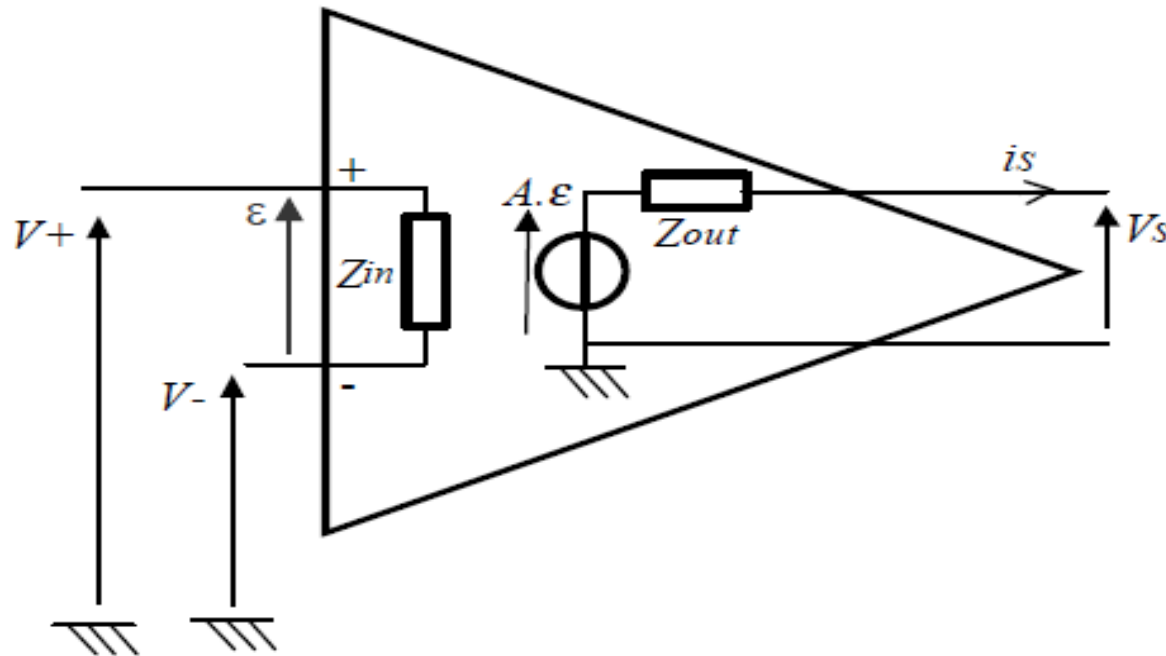
Amplificateur opérationnel: schéma

- ◆ V_- : la tension entre l'entrée inverseuse et le potentiel de référence
- ◆ V_+ : la tension entre l'entrée positive et le potentiel de référence
- ◆ ε : la tension d'entrée différentielle ($V_+ - V_-$)



Amplificateur opérationnel: Caractéristiques

- ♦ Son **amplification** aux fréquences basses est **considérable** (par exemple de 10^3 à 10^9), cela est dû aux nombreux étages amplificateurs qu'il comporte : $V_s = A (V_+ - V_-) = A \varepsilon$
- ♦ Bien sur, quelque soit le gain, la **tension de sortie** ne peut **jamais dépasser la tension d'alimentation**,
- ♦ Le module de **l'amplification décroît lorsque la fréquence augmente** (par suite des «capacités parasites» des transistors) mais sa bande passante est souvent considérable (par exemple plusieurs dizaines de mégahertz)

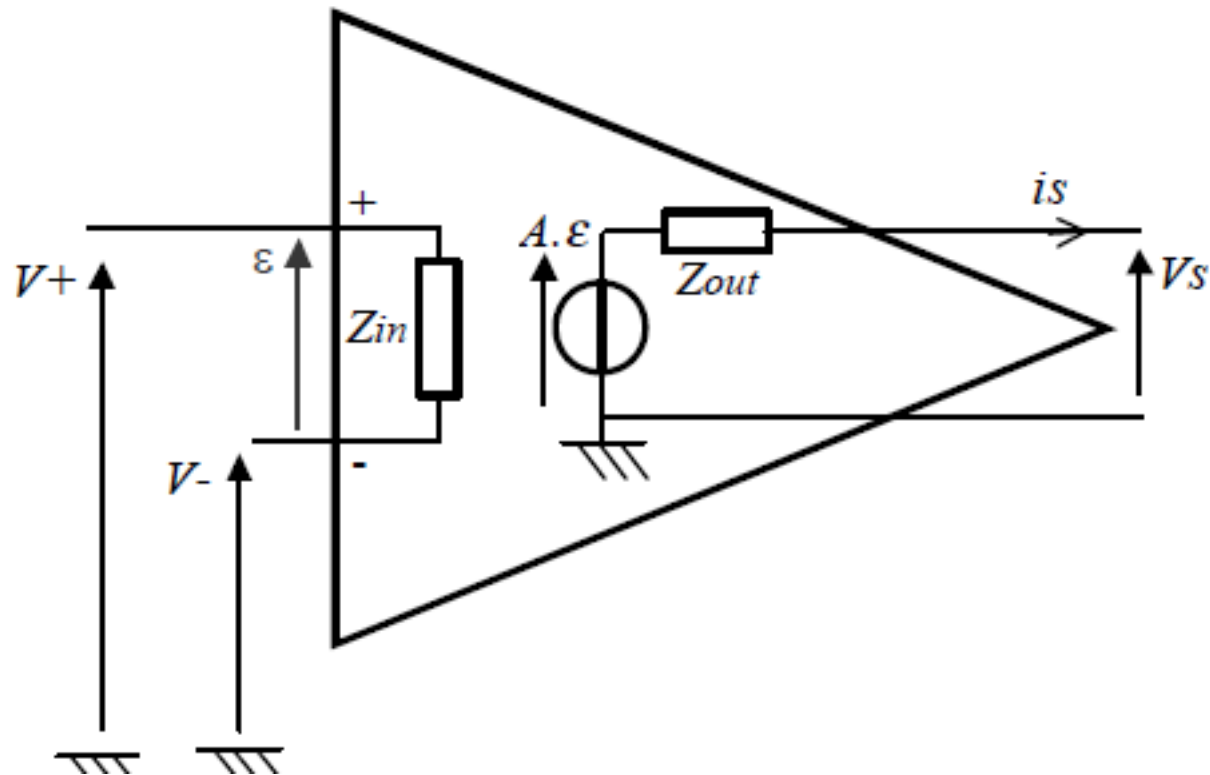


Amplificateur opérationnel: Caractéristiques

- ♦ Son **impédance d'entrée** est très **élevée** (de l'ordre de $M\Omega$) :

$$Z_{in} = \frac{(V^+ - V^-)}{I^+}$$

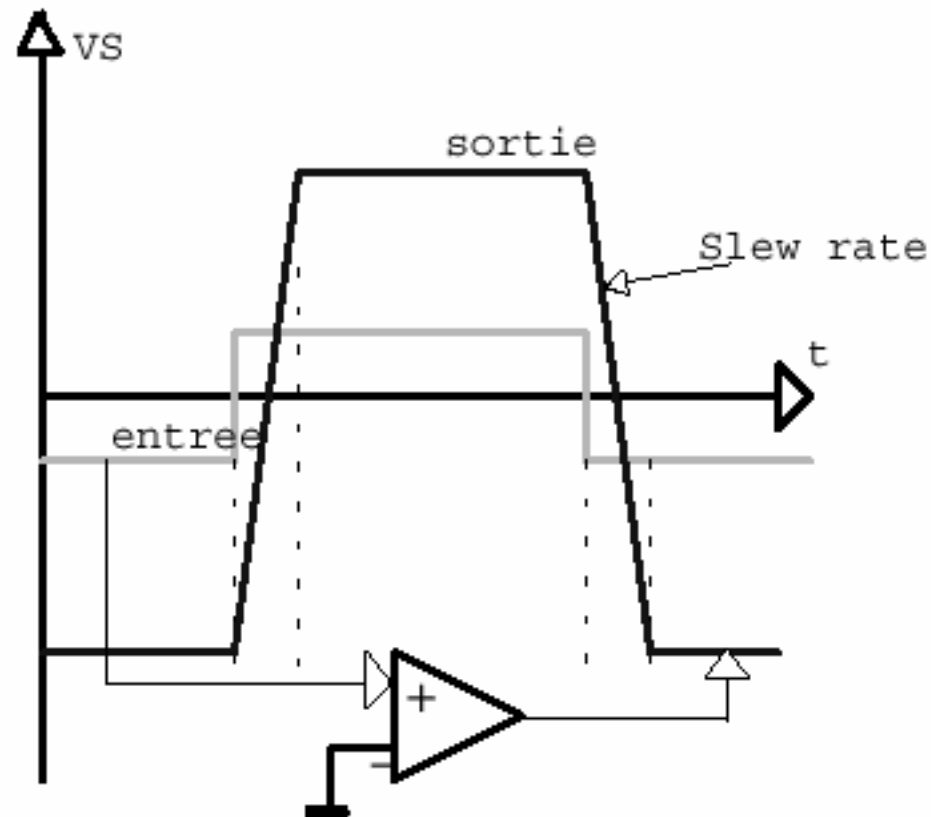
- ♦ Son **impédance de sortie** (Z_{out}) est très **faible** (au maximum quelques kilohms).



Amplificateur opérationnel: Caractéristiques

♦ Le Slew rate (SL) (ou la vitesse de balayage) est la vitesse de croissance maximale de la tension de sortie.

Il s'exprime en volts par micro seconde



♦ Tension de décalage ou tension d'offset (V_d) : C'est une tension continue qui serait nécessaire d'appliquer entre les deux entrées pour avoir $V_s = 0V$.

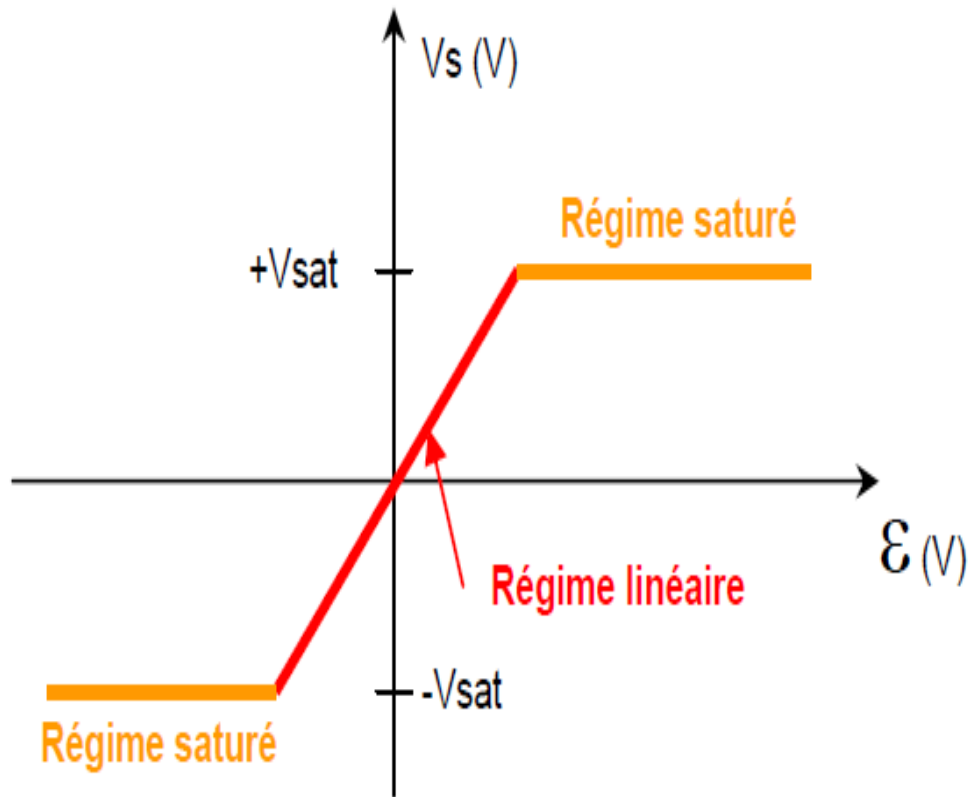
♦ Courant de décalage: c'est le pendant de la tension Offset pour les courants de polarisation

$$I_d = I_+ - I_-$$

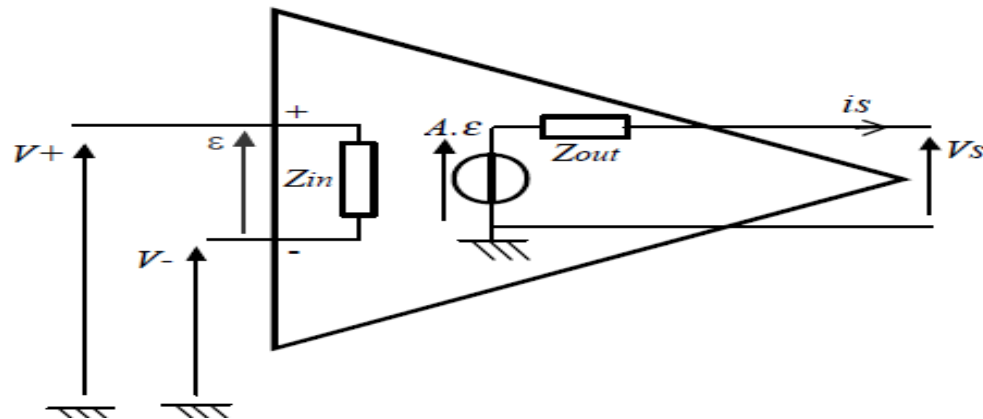
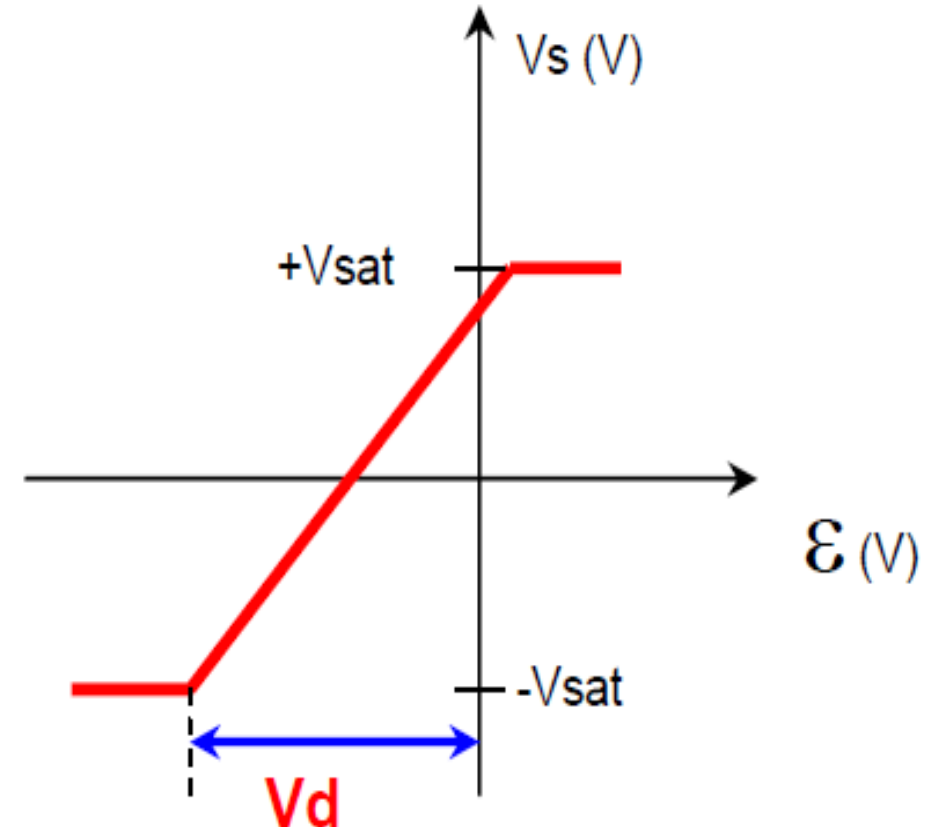
Amplificateur opérationnel: Caractéristiques

Caractéristique de transfert : $V_s = f(\epsilon)$

Avec un Offset $= V_d = 0$



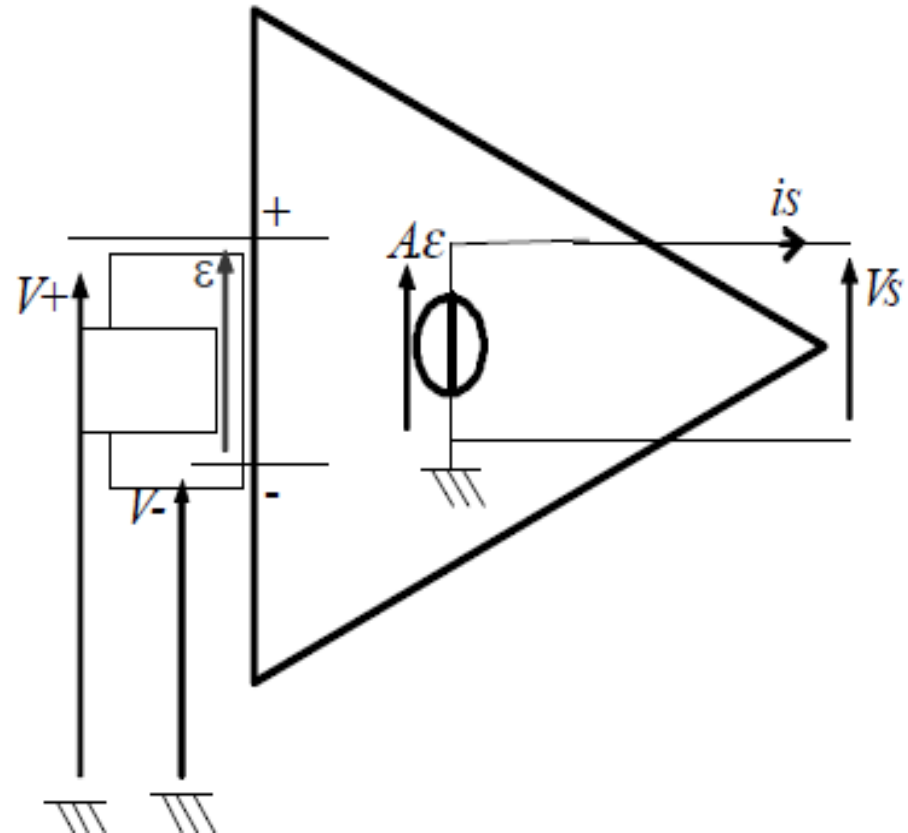
Avec Offset $= V_d \neq 0$



Amplificateur opérationnel parfait

Hypothèses d'idéalité

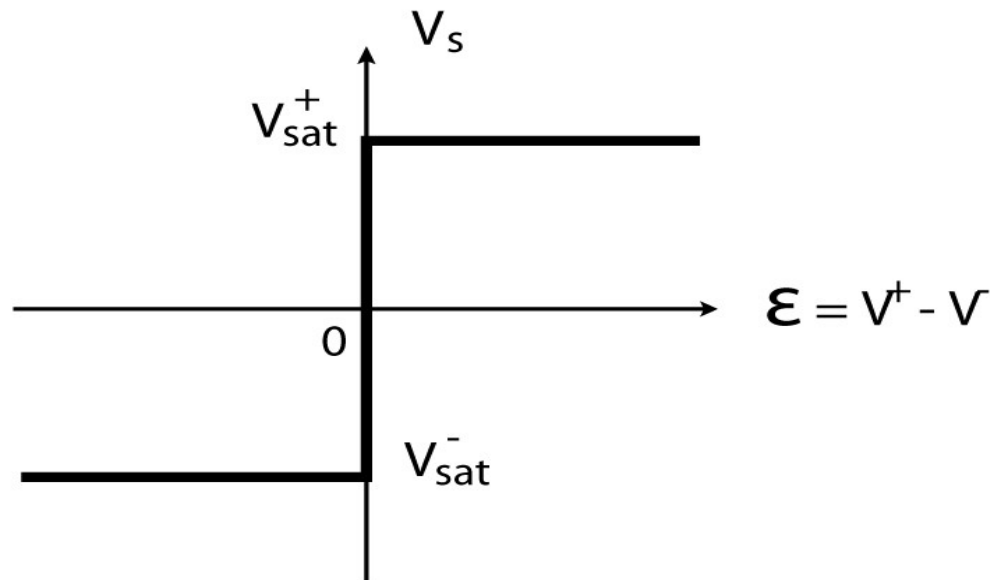
- ◆ Gain $A = \infty$
- ◆ Impédance d'entrée $Z_{in} = \infty$
- ◆ Impédance de sortie $Z_{out} = 0$
- ◆ Bande passante $= \infty$
- ◆ Slew rate $= \infty \text{ V}/\mu\text{S}$



Amplificateur opérationnel parfait

On distingue deux modes de fonctionnement :

- **Régime linéaire** : $\varepsilon = 0$ soit $V^+ = V^-$ et $V_{sat}^- < V_S < V_{sat}^+$.
- **Régime saturé** :
 - haut : $\varepsilon > 0$ soit $V^+ > V^-$ et $V_S = V_{sat}^+$
 - bas : $\varepsilon < 0$ soit $V^+ < V^-$ et $V_S = V_{sat}^-$



En régime linéaire

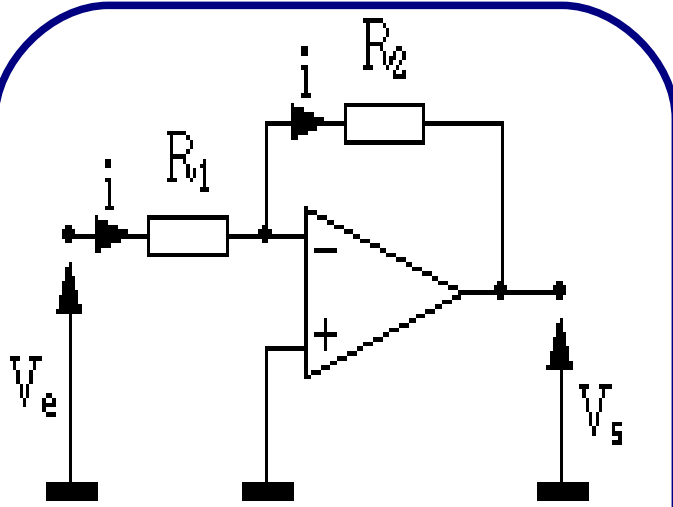
$$\mathbf{i^+ = i^- = 0 \text{ et } \varepsilon = V^+ - V^- = 0}$$

Montages de base à AO en régime linéaire

Montages d'amplification

Amplification

Montage inverseur



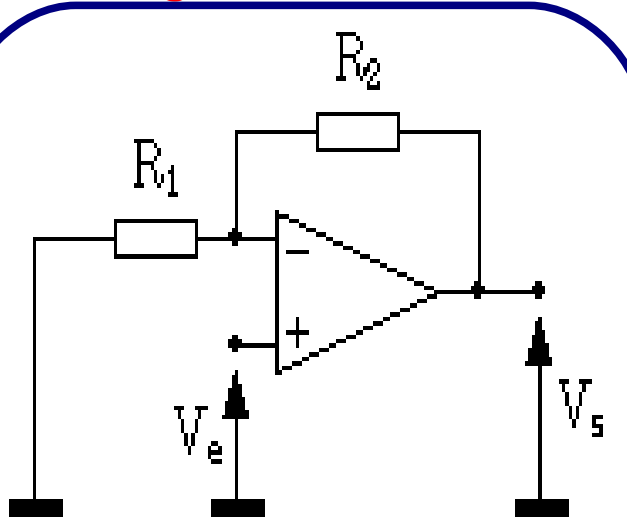
$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_e = R_1$$

$$Z_s = 0$$

Le choix de R1 est basé sur un compromis entre Ze et Av

Montage non-inverseur



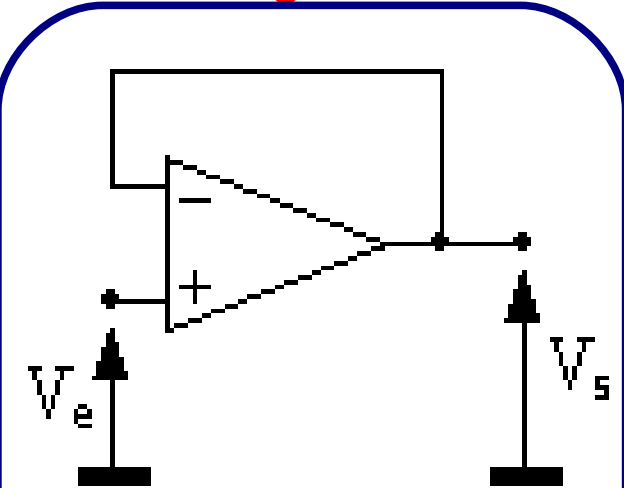
$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$Z_e = \infty$$

$$Z_s = 0$$

Av > 1 quelque soit R1 et R2

Montage suiveur



$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = 1$$

$$Z_e = \infty$$

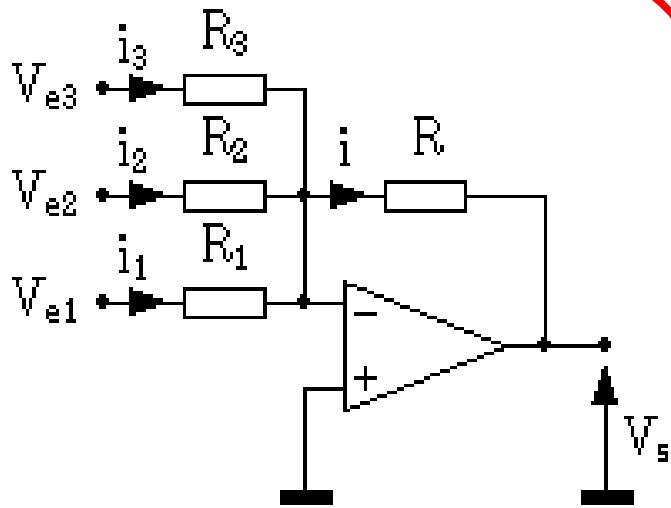
$$Z_s = 0$$

Montage non-inverseur
Avec R1 = ∞ et R2 = 0

Montages opérationnels

Montages opérationnels : Sommateur- soustracteur (différentiel)

Montage sommateur inverseur

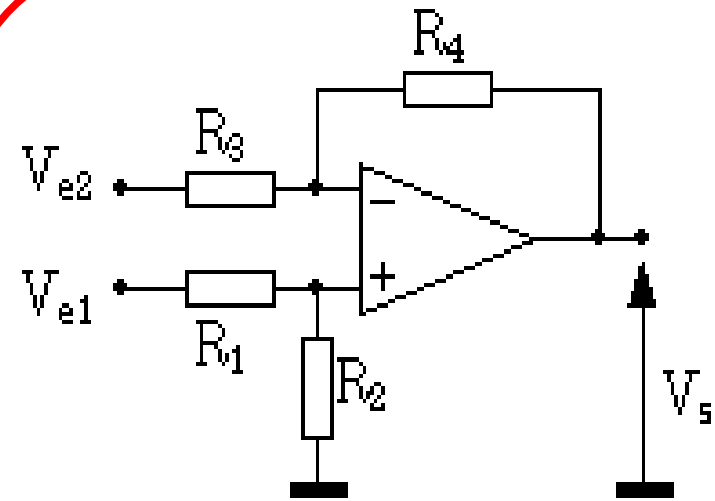


$$V_s = - \left(V_{e1} \frac{R}{R_1} + V_{e2} \frac{R}{R_2} + V_{e3} \frac{R}{R_3} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R$

→ $V_s = -(V_{e1} + V_{e2} + V_{e3})$

Montage soustracteur (différentiel)



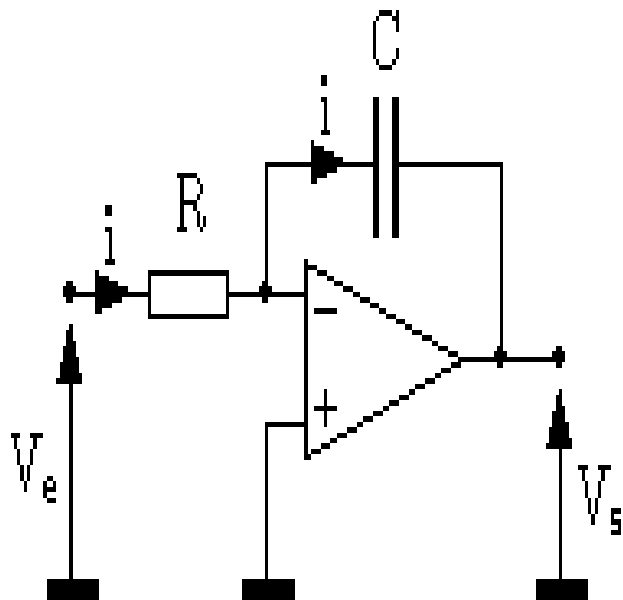
$$V_s = V_{e1} \frac{1 + \frac{R_4}{R_3}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} - V_{e2} \frac{R_4}{R_3}$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$

→ $V_s = V_{e1} - V_{e2}$

Montages opérationnels : Intégrateur- dérivateur

Montage intégrateur

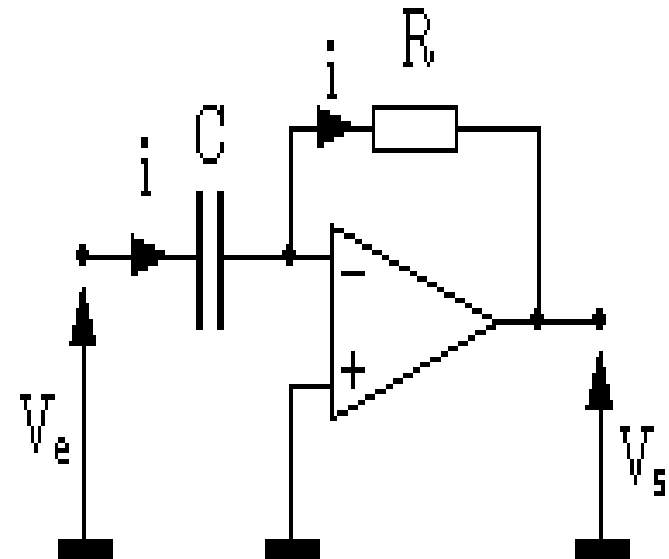


$$q = C V_s$$

$$q = \int -i dt$$

$$V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$

Montage dérivateur



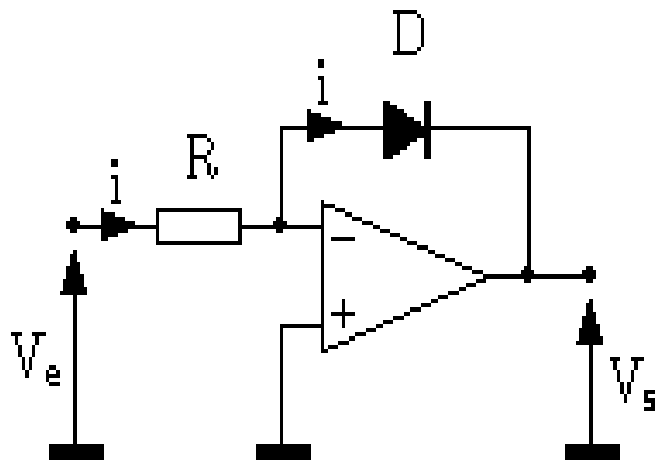
$$q = C V_e$$

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$V_s = -RC \frac{dV_e}{dt}$$

Montages opérationnels : Logarithme-Exponentiel

Montage logarithmique

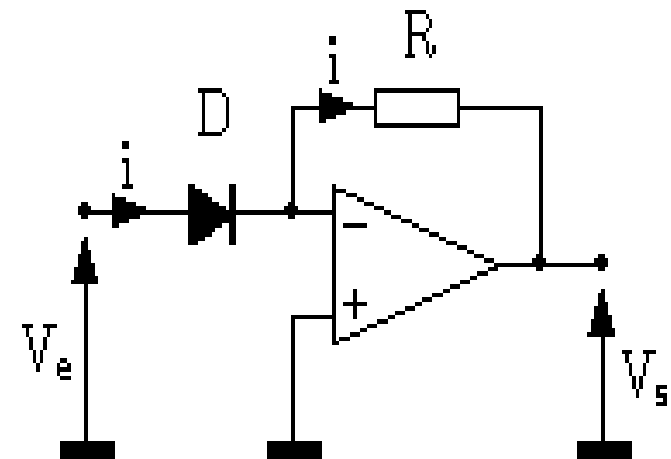


$$i = I_f e^{\frac{qV_d}{kT}}$$

$$V_d = \frac{kT}{q} \text{Log} \left(\frac{i}{I_f} \right)$$

$$V_s = -\frac{kT}{q} \text{Log} \left(\frac{V_e}{RI_f} \right)$$

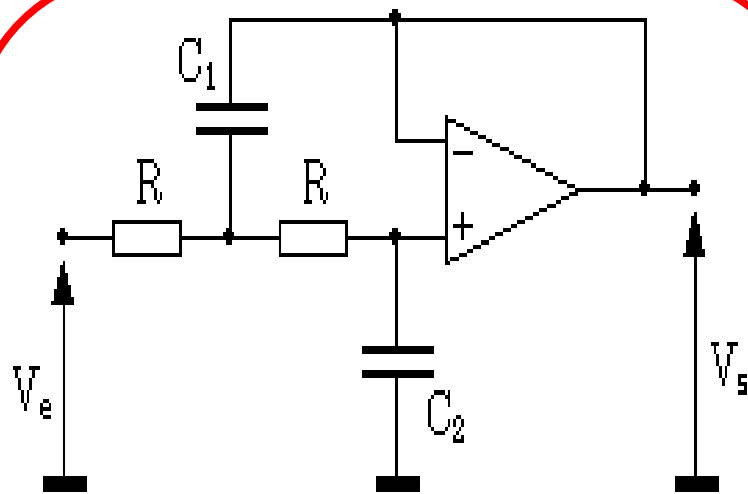
Montage exponentiel



$$V_s = -RI_f e^{\frac{qV_e}{kT}}$$

Filtres actifs

Passé bas 2ème ordre

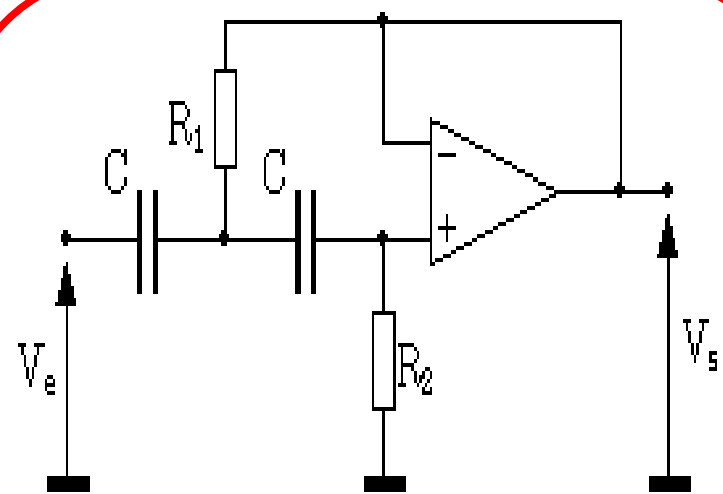


$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + 2RC_2j\omega - R^2C_1C_2\omega^2}$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + 2zj \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{R\sqrt{C_1 C_2}} \quad z = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}}$$

Passé haut 2ème ordre



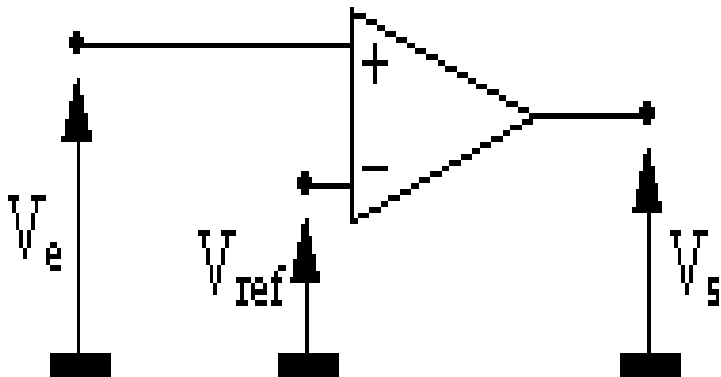
$$H(j\omega) = \frac{-R_1R_2C^2\omega^2}{1 + 2R_1Cj\omega - C^2R_1R_2\omega^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{C\sqrt{R_1 R_2}}$$

$$z = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

Montages de base à AO en régime de saturation

Comparateur de valeur relative



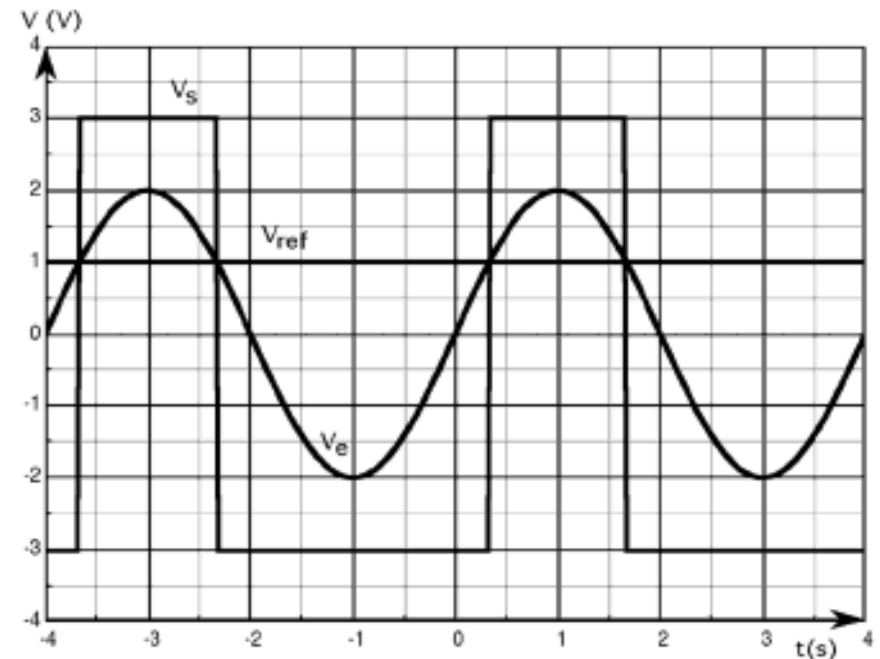
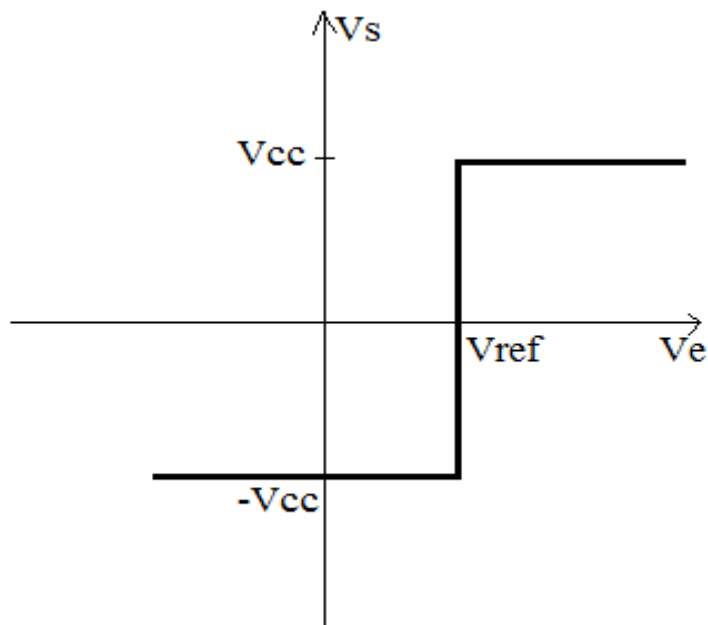
Une tension inconnue V_e est appliquée sur l'entrée positive

Si $V_e > V_{ref}$ alors $V_s = +V_{cc}$

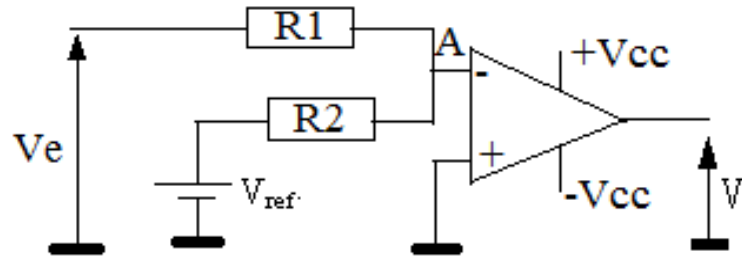
Si $V_e < V_{ref}$ alors $V_s = -V_{cc}$

Exemple : $V_{cc} = 3V$ et $V_{ref} = 1V$

Caractéristique statique :



Comparateur de valeur absolue



$V_+ = 0$ donc le passage de V_s d'un état à un autre se produira quand la tension V_- sera égale à zéro.

En appliquant Milmann :

$$V_- = V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_s = +V_{cc} \text{ si } V_+ > V_- \longrightarrow 0 > V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \longrightarrow V_e < -V_{ref} \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_s = -V_{cc} \text{ si } V_+ < V_- \longrightarrow 0 < V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_{ref} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \longrightarrow V_e > -V_{ref} \frac{R_1}{R_2}$$

Le basculement aura lieu quand: $V_e = -V_{ref} \frac{R_1}{R_2}$

Il faut que V_e et V_{ref} soient de polarité différente

Exercice :

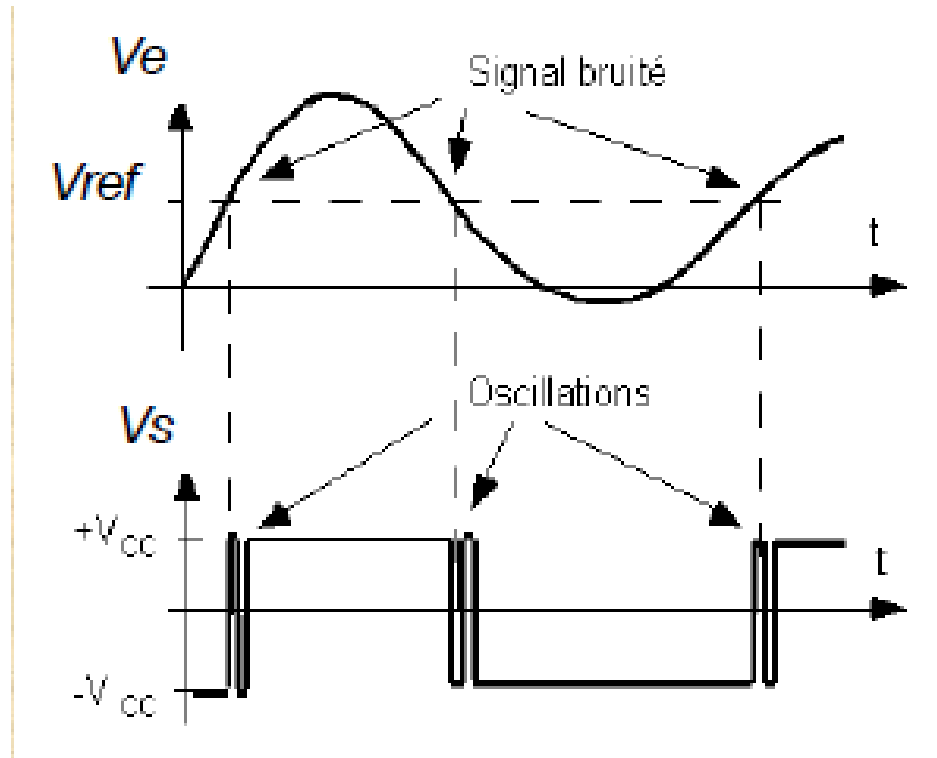
$V_{ref} = 5V$, $V_{cc} = +15V$, $R_1 = R_2 = 1k\Omega$,

Tracez la caractéristique V_s en fonction de V_e

Comparateur à hystérésis : Intérêt

En fait, le signal d'entrée est toujours entaché de bruit.

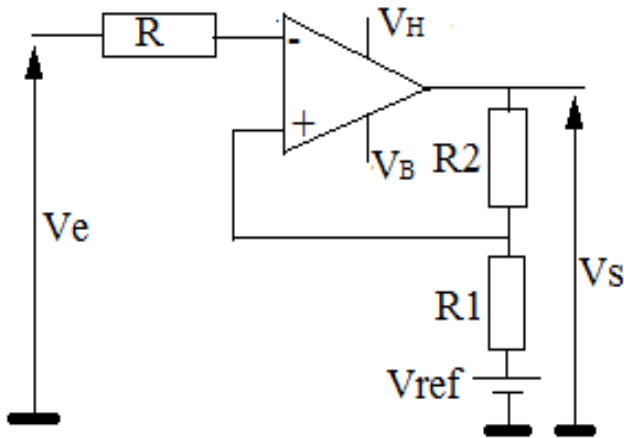
Si on n'en tient pas compte, des transitions rapides et intempestives entre les états haut et bas apparaissent



Les comparateurs à hystérésis apportent une immunité par rapport aux parasites présents sur le signal d'entrée.

Comparateur inverseur à hystérésis ou trigger de Smith

Introduction d'une réaction positive renvoyant une partie du signal de sortie sur l'entrée non inverseuse



$$V_+ = V_S R_1 / (R_1 + R_2) + V_{ref} R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$V_- = V_e$$

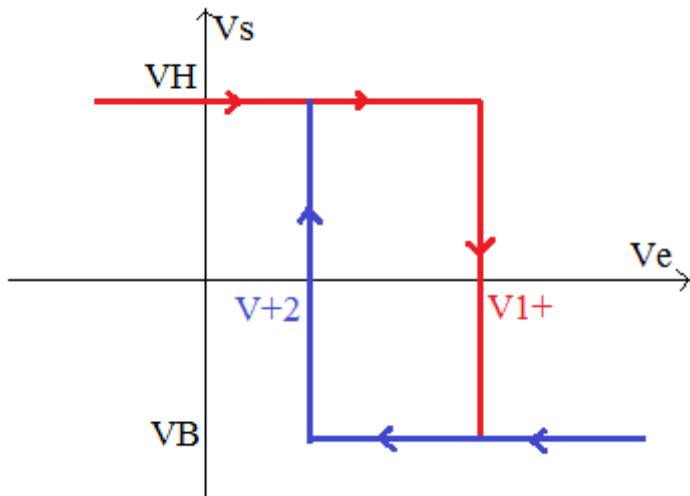
Il existe donc deux seuils de basculement :

$$V_S = V_H \quad \text{Si } V_e < V_{1+} \quad V_{1+} = V_H R_1 / (R_1 + R_2) + V_{ref} R_2 / (R_1 + R_2)$$

$$V_S = V_B \quad \text{Si } V_e > V_{2+} \quad V_{2+} = V_B R_1 / (R_1 + R_2) + V_{ref} R_2 / (R_1 + R_2)$$

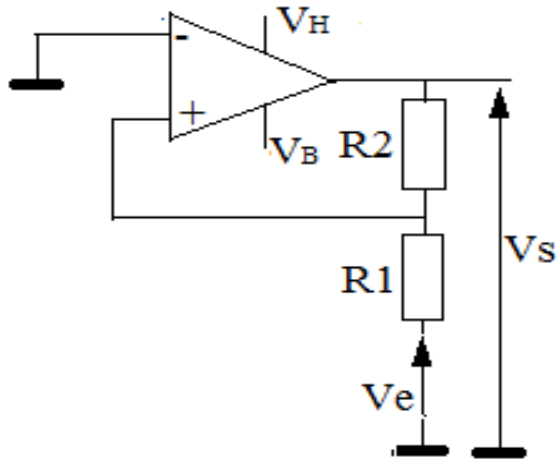
La différence entre ces deux seuils est appelée hystérésis

$$\Delta V = V_+ - V_- = (V_H - V_B) R_1 / (R_1 + R_2)$$



Il y a deux régions pour lesquelles l'état de la sortie est fixé. Dans la zone d'hystérésis, l'état de la sortie peut prendre les deux valeurs. La valeur prise **dépend de la valeur prise précédemment en dehors**. C'est une zone de mémorisation

Comparateur non inverseur à hystérésis ou trigger de Smith



$$V_+ = V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_- = 0$$

Le basculement aura lieu quand:

$$V_e = -V_s \frac{R_1}{R_2}$$

Il existe donc deux seuils de basculement selon la valeur de V_s

$$V_s = V_H \quad \text{Si} \quad V_{2+} = V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_H \frac{R_1}{R_1 + R_2} > 0 \quad V_e > -V_H \frac{R_1}{R_2}$$

$$V_s = V_B \quad \text{Si} \quad V_{1+} = V_e \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_B \frac{R_1}{R_1 + R_2} < 0 \quad V_e < -V_B \frac{R_1}{R_2}$$

