COURS – CI6

Capter et mettre en forme un signal électrique
Partie 2 - Modélisation de l'AOP en régime linéaire

TSI – Lycée Chaptal St Brieuc

Je dois être capable de :

- ***Connaître la modélisation de l'AOP***
- ***Identifier le régime de fonctionnement d'un AOP***
- ***Mettre en équation un montage en régime linéaire***
- ***Savoir appliquer les théorèmes de superposition et de Millman***
- ***Exprimer une fonction de transfert***
- ***Modéliser une structure sous la forme de schéma bloc***

1. Un AOP pour réaliser des fonctions

L'amplificateur linéaire intégré (ALI) ou AOP est très souvent employé pour réaliser des opérations analogiques de base :
Multiplication, soustraction, addition, dérivation, intégration --> montages LINEAIRES
Comparaison, redressement --> montages NON-LINEAIRES

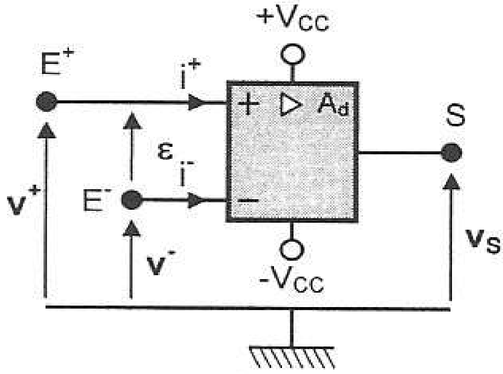
2. La représentation symbolique de l'AOP

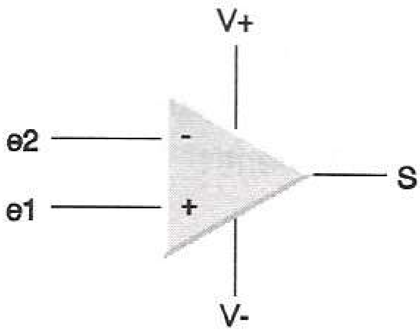
a. Le symbole

Sur le symbole de l'AOP, on distingue :

- $+Vcc/-Vcc$, bornes d'alimentations (alimentations symétrique ou non-symétrique),
- $E+$ entrée dite "non-inverseuse" $(V,^+ i^+)$
- $E-$ entrée dite "inverseuse" (V^-, i^-)
- S la sortie (Vs)

On distingue deux normalisations pour représenter l'AOP : représentation **européenne** (rectangle) ou **américaine** (Triangle)



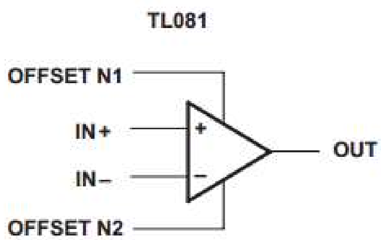


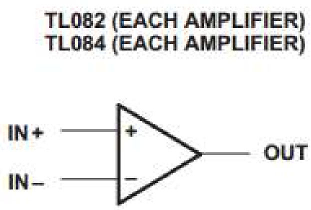
Les **alimentations ne sont pas toujours représentées** sur les schémas. Elles peuvent être de deux types :

- **symétrique** (par exemple $+Vcc = +12v$ et $-Vcc = -12v$)
- **monotension** (par exemple $+Vcc = +5v$ et $-Vcc = 0 = Gnd$)

b. Le circuit intégré dans les documentations techniques

Exemple du TL081 : les symboles



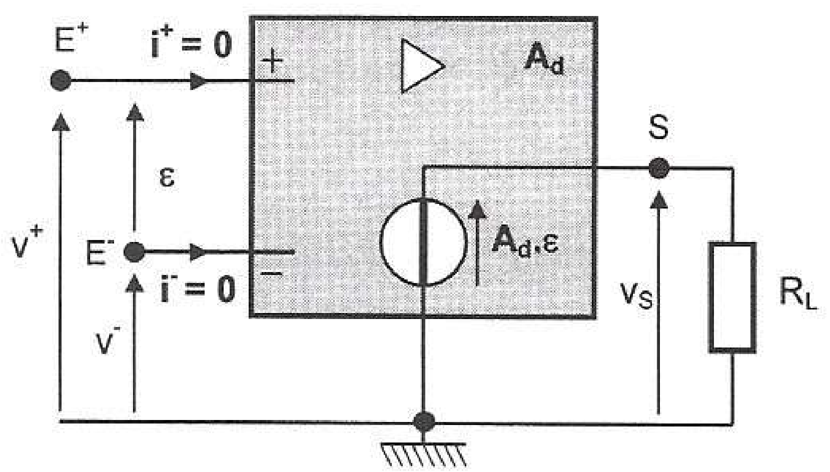


3. Caractéristique de transfert et modélisation idéale

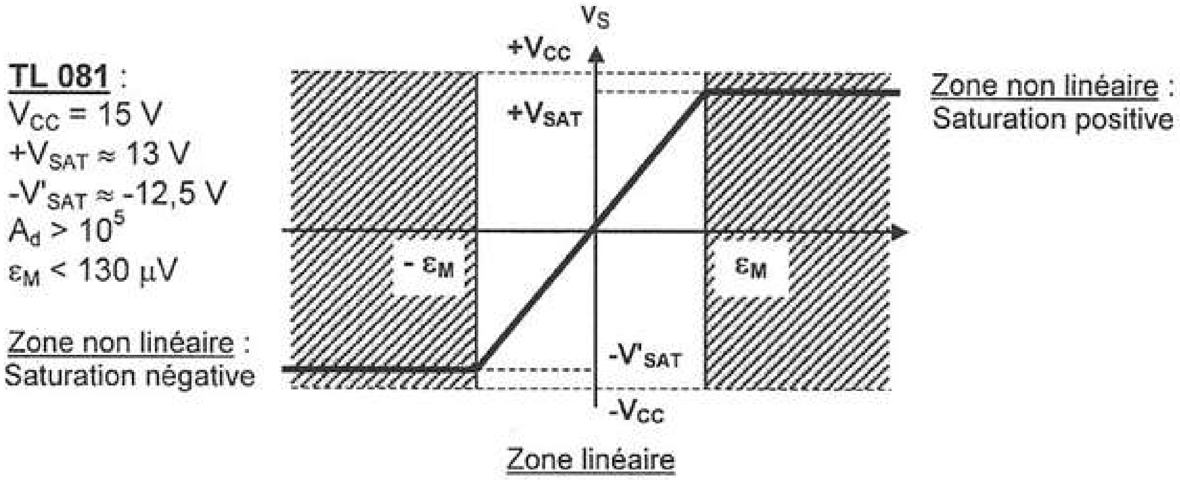
On donne la définition du modèle idéal (ou parfait)

- résistance d'entrée infinies, d'où $\boxed{i^+ = i^- = 0}$
- résistance du générateur de sortie nulle
- amplification différentielle Ad infinie quelque soit la fréquence
- tension différentielle en entrée $\boxed{\varepsilon = V^+ - V^-}$
- relation entre l'entrée et la sortie $\boxed{Vs = Ad.\varepsilon}$

On peut alors représenter la **structure interne de l'AOP** de la manière suivante :



On peut alors donner la **caractéristique de transfert** :



Vs est limitée par les **tensions de saturation** (positive ou négative)

4. Régimes de fonctionnement de l'AOP

Suivant l'organisation du montage, l'AOP fonctionne :

- en **régime linéaire** (lien entre S et E^-, **contre-réaction négative**)
- en **régime saturé** (lien entre S et E^+, **contre-réaction positive**)

Exemple de détection de surcharge de courant dans le moteur du portail CAME :

Schéma BLOC

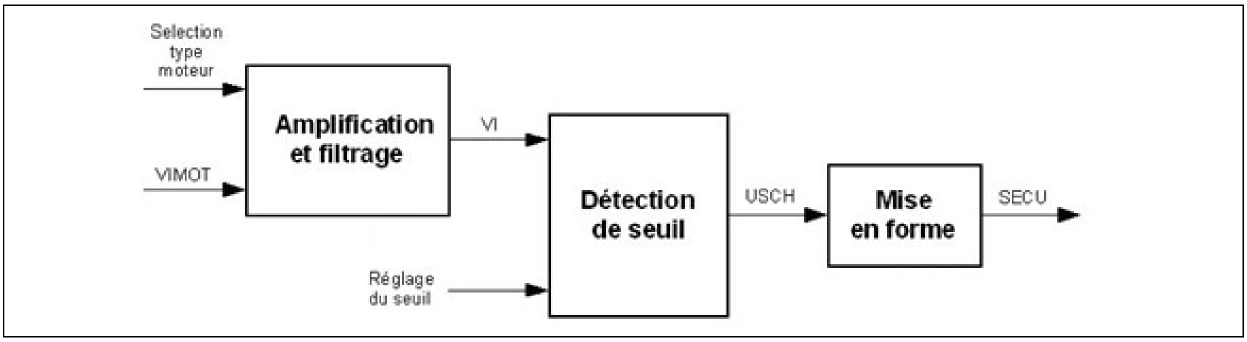
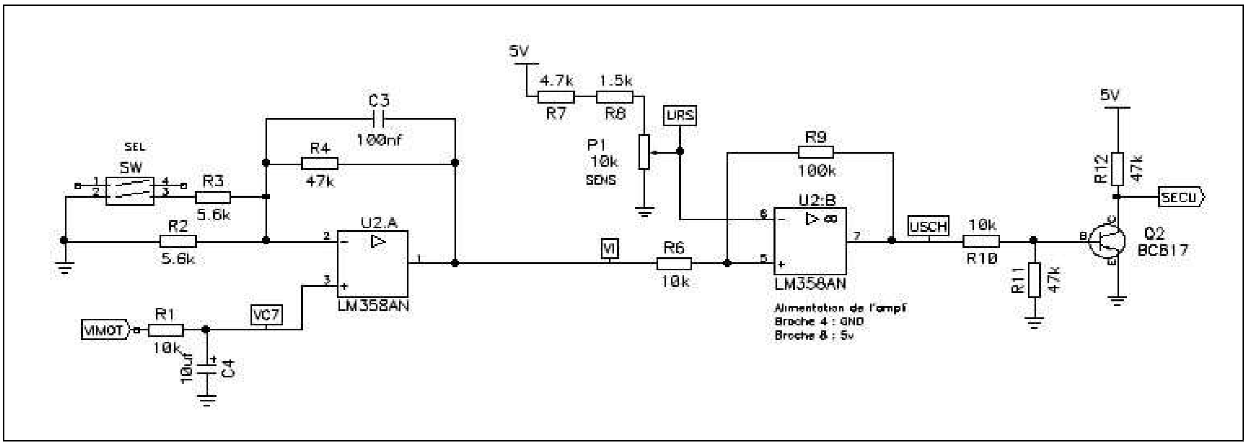
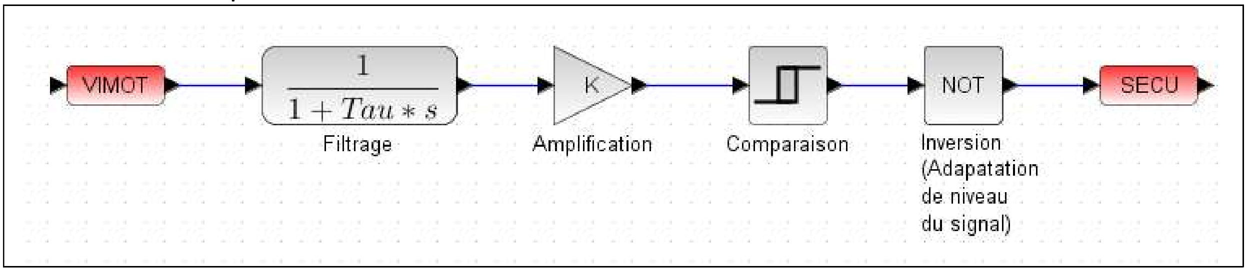


Schéma structurel



Modèle numérique



<u>**Très important, vous devez savoir reconnaître le régime de fonctionnement des AOP.**</u>

Dans cette exemple :

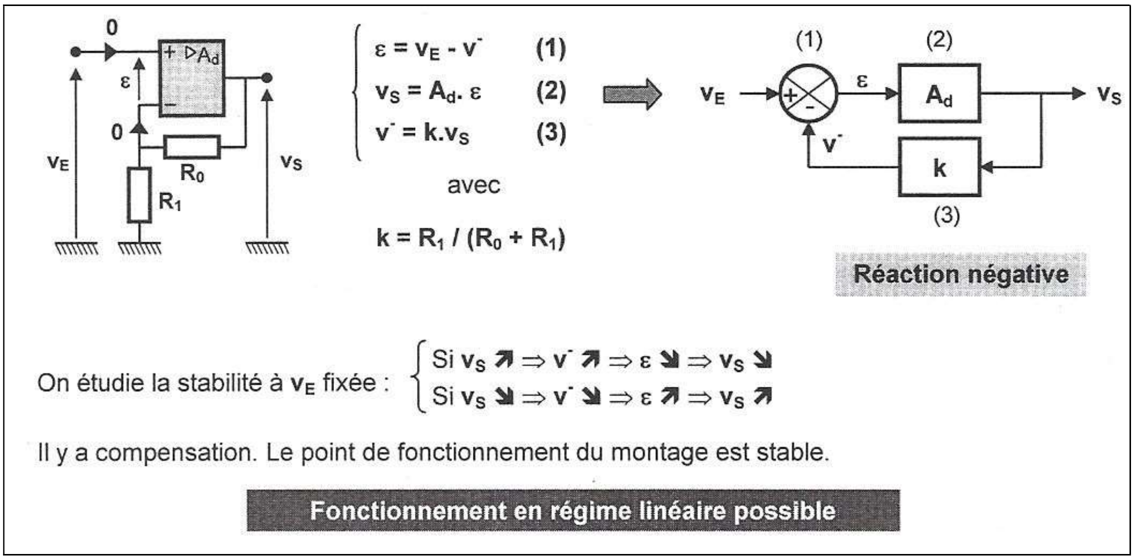
- l'AOP de référence U2A fonctionne en régime linéaire (lien entre S et E^- = la résistance $R4$, un condensateur $C3$),
- l'AOP de référence U2B fonctionne en régime de saturation ou de comparaison (lien entre S et E^+ = une résistance $R9$).

5. Généralités des montages de l'AOP en régime linéaire

L'astuce pour reconnaître un montage en **régime linéaire** :

Repérer si un fil ou un dipôle relie la sortie S à l'entré E^-, c'est la **contre-réaction négative**.

a. Comportement de ces montages :



b. Hypothèses pour la mise en équation :

En régime linéaire, on considère alors $\boxed{\boldsymbol{V^+ = V^-}}$ ou autrement dit $\boxed{\boldsymbol{\varepsilon = 0}}$

Dans les montages, on considère aussi l'AOP idéal, soit :

$\boxed{\boldsymbol{i^+ = i^- = 0}}$ $\boxed{\boldsymbol{Ad \to \infty}}$ $\boxed{\boldsymbol{Re \to \infty \quad Rs = 0}}$

c. Méthode :

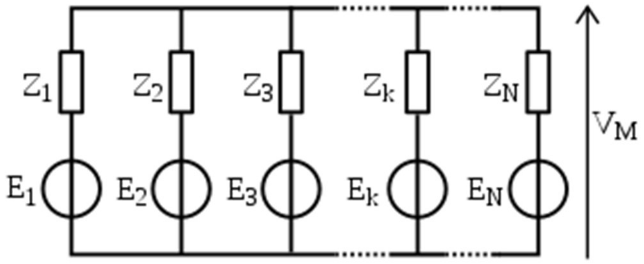
- Exprimer $\boldsymbol{V^+}$, exprimer $\boldsymbol{V^-}$
- Poser $\boldsymbol{V^+ = V^-}$ et rechercher l'expression de la fonction de transfert $Vs = f(Ve)$
- Suivant les cas, on peut aussi exprimer l'**amplification** $Av = Vs/Ve$ (ou **gain** du montage)
- Réaliser l'application numérique

d. Particularité de certains montages :

- On peut repérer un montage inverseur car le signal à amplifier entre sur l'entrée inverseuse E^- par le biais d'un dipôle.
- Pour un montage non-inverseur, le signal entre cette fois-ci sur l'entrée non-inverseuse E^+ par le biais d'un dipôle ou un fil.

e. Théorème de Millman

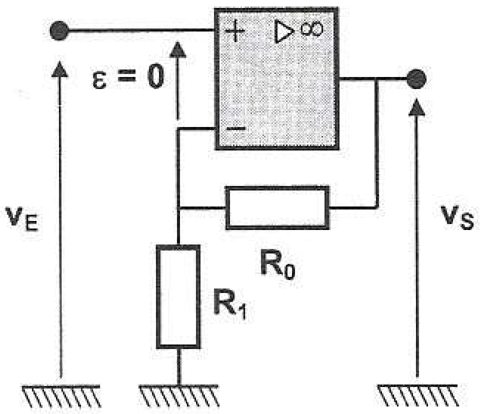
De manière générale, on peut écrire le théorème de Millman de la manière suivante :



$$V_M = \frac{\sum_{k=1}^{N} \frac{E_k}{Z_k}}{\sum_{k=1}^{N} \frac{1}{Z_k}} = \frac{\sum_{k=1}^{N} E_k . G_k}{\sum_{k=1}^{N} G_k} = \frac{\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} + \frac{E_3}{Z_3} + \cdots + \frac{E_k}{Z_k} + \cdots + \frac{E_N}{Z_N}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \cdots + \frac{1}{Z_k} + \cdots + \frac{1}{Z_N}}$$

6. Les principaux montages en régime linéaire

a. Montage amplificateur non-inverseur



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+} = \boldsymbol{V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

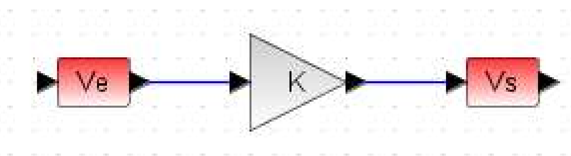
$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = V_E \\ \boldsymbol{V^-} = V_S . \frac{R_1}{R_0 + R_1} \end{cases}$$ avec le Pont diviseur

$$V_E = V_S . \frac{R_1}{R_0 + R_1} \qquad \boldsymbol{V_S = V_E . \left(1 + \frac{R_0}{R_1}\right)}$$

$$K = \frac{V_S}{V_E} = 1 + \frac{R_0}{R_1} \quad \text{avec} \quad K > 1$$

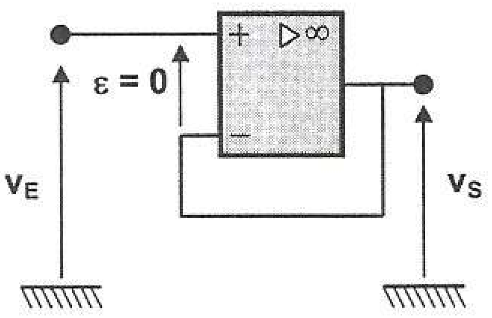
Concrètement, ce montage permet de multiplier V_E par une valeur positive appelée coefficient d'amplification K (en présentant une impédance d'entrée infinie).

Modélisation :



$\boldsymbol{K} > 1$

Cas particulier : le montage suiveur



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+} = \boldsymbol{V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

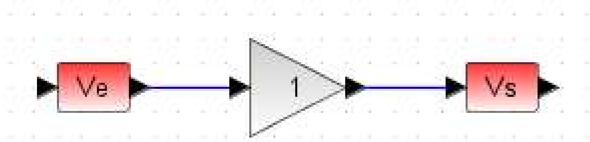
$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = V_E \\ \boldsymbol{V^-} = V_S \end{cases}$$

$$\boldsymbol{V_S = V_E}$$

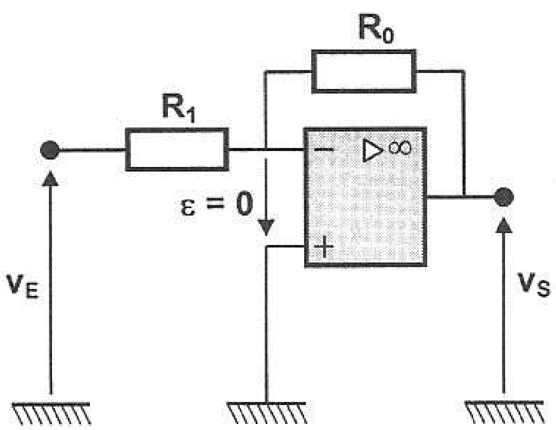
$$K = 1$$

Montage couramment utilisé pour "recopier" une tension, sans absorber de courant, car la résistance d'entrée du montage est infinie. En effet, un capteur (qui est souvent une source) peut présenter des comportements différents si il débite ou pas du courant. Ce montage rempli la fonction **d'adaptation d'impédance**, car il présente une résistance d'entrée infinie, et une résistance de sortie nulle (pour l'AOP considéré idéal).

Modélisation :



b. Montage amplificateur inverseur



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+} = \boldsymbol{V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = 0 \\ \boldsymbol{V^-} = V_S . \frac{R_1}{R_0+R_1} + V_E . \frac{R_0}{R_0+R_1} \end{cases}$$

avec Millman ou Superposition

$$V_S . \frac{R_1}{R_0 + R_1} + V_E . \frac{R_0}{R_0 + R_1} = 0$$

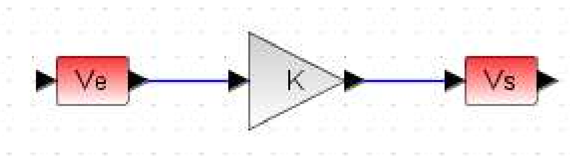
$$V_S . \frac{R_1}{R_0 + R_1} = -V_E . \frac{R_0}{R_0 + R_1}$$

$$\boldsymbol{V_S . = -V_E . \frac{R_0}{R_1}}$$

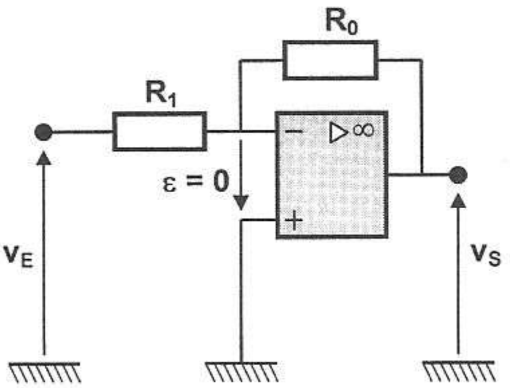
$$\boldsymbol{K = \frac{V_S}{V_E} = -\frac{R_0}{R_1}} \quad \text{avec} \quad K < 0$$

Concrètement, ce montage permet de multiplier V_E par une valeur négative appelée coefficient d'amplification K (en présentant une impédance $R_e = R_1$).

Modélisation :



$K < 0$



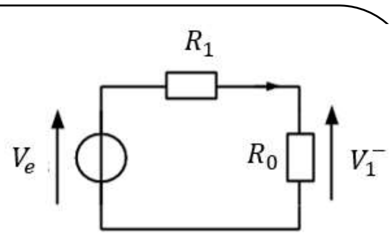
Remarque :

Il existe plusieurs solutions pour trouver l'expression de $\boldsymbol{V^-}$.

Avec le théorème de superposition :

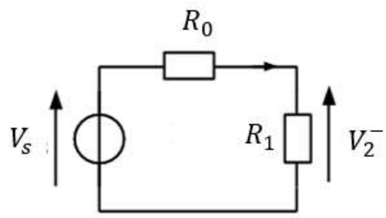
V_S est rendue passive :

$$V_1^- = \frac{V_e.R_0}{R_0 + R_1}$$



V_e est rendue passive :

$$V_2^- = \frac{V_s.R_1}{R_0 + R_1}$$



On en déduit $V^- = V_1^- + V_2^-$:

$$V^- = \frac{V_e.R_0}{R_0 + R_1} + \frac{V_s.R_1}{R_0 + R_1}$$

Vu que $V^+ = V^- = 0$:

$$0 = V_e.R_0 + V_s.R_1 \Leftrightarrow V_s = -V_e.R_0/R_1$$

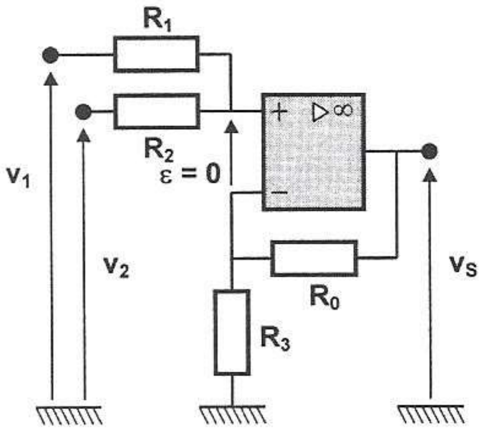
Avec le théorème de Millman :

$$V^- = \frac{\frac{V_s}{R_0} + \frac{V_e}{R_1}}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_1}}$$

Vu que $V^+ = V^- = 0$:

$$0 = \frac{V_s}{R_0} + \frac{V_e}{R_1} \Leftrightarrow V_s = -V_e.R_0/R_1$$

c. Montage amplificateur de somme



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+ = V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = V_1 . \frac{R_2}{R_1+R_2} + V_2 . \frac{R_1}{R_1+R_2} \\ \boldsymbol{V^-} = V_S . \frac{R_3}{R_3+R_0} \end{cases}$$

avec Superposition et Pont diviseur

$$V_1 . \frac{R_2}{R_1+R_2} + V_2 . \frac{R_1}{R_1+R_2} = V_S . \frac{R_3}{R_3+R_0}$$

$$\boldsymbol{V_S = \left(\frac{R_3+R_0}{R_3}\right) . \left(V_1 . \frac{R_2}{R_1+R_2} + V_2 . \frac{R_1}{R_1+R_2}\right)}$$

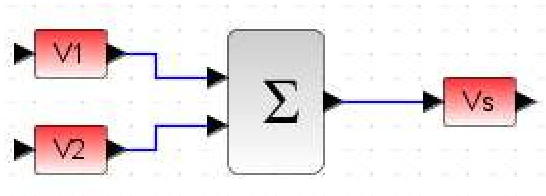
Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ alors

$$\boldsymbol{V_S = V_1 + V_2}$$

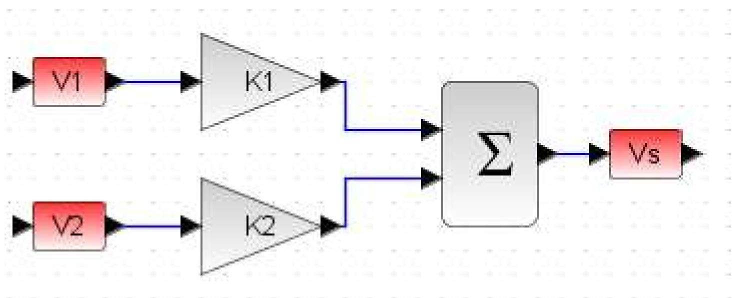
Ce montage permet d'additionner des signaux. Si les résistances ne sont pas égales, on peut pondérer chaque signal de manière indépendante.

Modélisation :

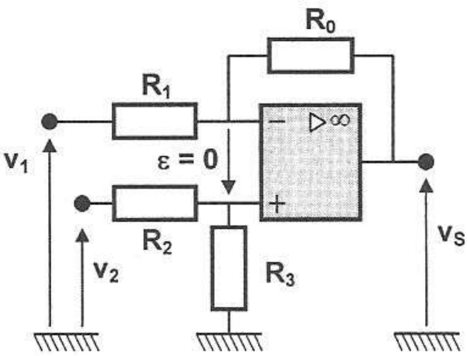
- Sans pondération avec $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$



- Avec pondération des entrées avec $K1 = \boldsymbol{\left(\frac{R_3+R_0}{R_3}\right) . \left(\frac{R_2}{R_1+R_2}\right)}$ et $K2 = \boldsymbol{\left(\frac{R_3+R_0}{R_3}\right) . \left(\frac{R_1}{R_1+R_2}\right)}$**, nouvelle expression** $\boldsymbol{V_S = K1 . V_1 + K2 . V_2}$



d. Montage amplificateur de différence



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+} = \boldsymbol{V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = V_2 . \dfrac{R_3}{R_2+R_3} \\ \boldsymbol{V^-} = V_1 . \dfrac{R_0}{R_1+R_0} + V_S . \dfrac{R_1}{R_1+R_0} \end{cases}$$

avec Superposition et Pont diviseur

$$V_2 . \frac{R_3}{R_2+R_3} = V_1 . \frac{R_0}{R_1+R_0} + V_S . \frac{R_1}{R_1+R_0}$$

$$\boldsymbol{V_S} = \left(\frac{\boldsymbol{R_1+R_0}}{\boldsymbol{R_1}}\right) . \left(\boldsymbol{V_2} . \frac{R_3}{R_2+R_3} - \boldsymbol{V_1} . \frac{R_0}{R_1+R_0}\right)$$

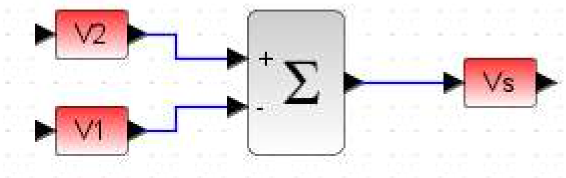
Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ alors

$$\boldsymbol{V_S = V_2 - V_1}$$

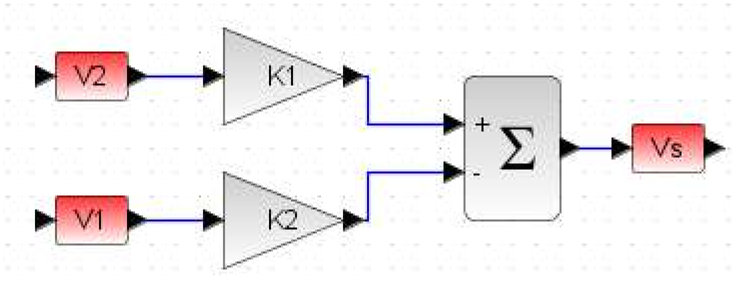
Ce montage permet d'additionner des signaux. Si les résistances ne sont pas égales, on peut pondérer chaque signal de manière indépendante.

Modélisation :

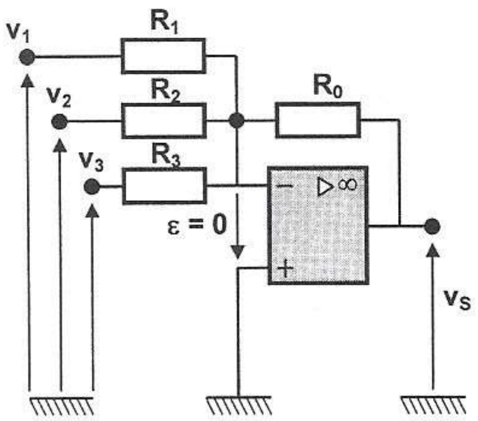
- Sans pondération avec $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$



- Avec pondération des entrées avec $K1 = \left(-\frac{\boldsymbol{R_0}}{\boldsymbol{R_1}}\right)$ et $K2 = \left(\frac{\boldsymbol{R_1+R_0}}{\boldsymbol{R_1}}\right) . \left(\frac{\boldsymbol{R_3}}{\boldsymbol{R_2+R_3}}\right)$, nouvelle expression $\boldsymbol{V_S = K2 . V_2 - K1 . V_1}$



e. Montage amplificateur de sommateur inverseur



Régime linéaire : $\boldsymbol{V^+} = \boldsymbol{V^-}$ **et** $\varepsilon = 0$

$$\begin{cases} \boldsymbol{V^+} = 0 \\ \boldsymbol{V^-} = \dfrac{\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}+\frac{V_3}{R_3}+\frac{V_S}{R_0}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_0}} \end{cases}$$ avec Millman

$$\frac{\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}+\frac{V_3}{R_3}+\frac{V_S}{R_0}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_0}} = \mathbf{0}$$ On peut simplifier !

$$\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}+\frac{V_3}{R_3}+\frac{V_S}{R_0} = \mathbf{0}$$

$$V_s = -R_0.\left(\frac{V_1}{R_1}+\frac{V_2}{R_2}+\frac{V_3}{R_3}\right)$$

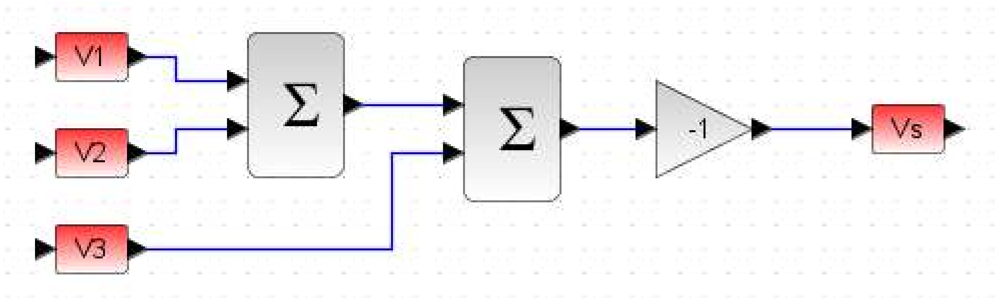
Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$ alors

$$\boldsymbol{V_S = -(V_1 + V_2 + V_3)}$$

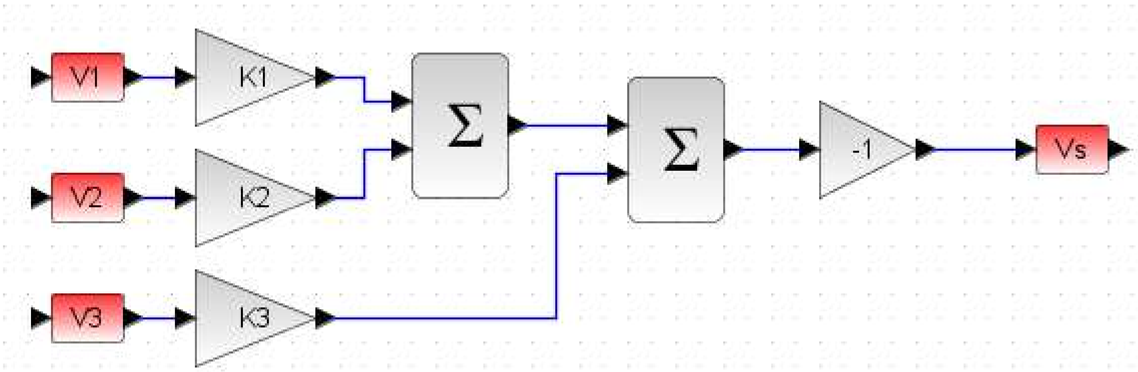
Ce montage permet d'additionner trois signaux, puis d'inverser le résultat obtenu.

Modélisation :

Sans pondération avec avec $R_1 = R_2 = R_3 = R_0$



- Avec pondération des entrées avec $K1 = \frac{R_0}{R_1}$, $K2 = \frac{R_0}{R_2}$ et $K3 = \frac{R_0}{R_3}$ d'où la nouvelle expression $\boldsymbol{V_S = -(K1.V_1 + K2.V_2 + K3.V_3)}$


V1
K1
V2
K2
V3
K3
Σ
Σ
-1
Vs