



# Les Amplificateurs Opérationnels

Principes et montages

Club de Robotique et d'Electronique  
Programmable de Ploemur

28 février 2021

- ▶ Document réalisé en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X par Nicolas Le Guerroué pour le Club de Robotique et d'Electronique Programmable de Ploemeur (CREPP)
  - ▶ Permission vous est donnée de copier, distribuer et/ou modifier ce document sous quelque forme et de quelque manière que ce soit.
  - ▶ Version du 28 février 2021
- ☎ 06.20.88.75.12
- ✉ [nicolasleguerroue@gmail.com](mailto:nicolasleguerroue@gmail.com)

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	Généralités . . . . .	4
1.2	Conventions . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Modélisation de l'AOP</b>	<b>6</b>
2.1	Modèle théorique . . . . .	6
2.2	Modèle réel . . . . .	6
2.3	Modes de fonctionnement . . . . .	7
2.3.1	Montages linéaires . . . . .	7
2.3.2	Montages comparateurs . . . . .	7
2.4	Résistance de charge . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Étude en mode linéaire</b>	<b>9</b>
3.1	Intérêt de l'étude . . . . .	9
3.2	Méthode de résolution . . . . .	9
<b>I</b>	<b>Montages</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Montage suiveur</b>	<b>11</b>
4.1	Présentation . . . . .	11
4.2	Montage . . . . .	11
4.3	Démonstration . . . . .	11
<b>5</b>	<b>Montage non-inverseur</b>	<b>14</b>
5.1	Présentation . . . . .	14
5.2	Montage . . . . .	14
5.3	Démonstration . . . . .	14
5.3.1	Exemple . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Montage inverseur</b>	<b>16</b>
6.1	Présentation . . . . .	16
6.2	Montage . . . . .	16
6.3	Démonstration . . . . .	16
6.4	Application . . . . .	17
<b>7</b>	<b>Montages comparateurs</b>	<b>18</b>
7.1	Présentation . . . . .	18
7.1.1	Comparateur non inverseur simple seuil . . . . .	18
	Présentation . . . . .	18
	Montage . . . . .	18
7.1.2	Comparateur inverseur simple seuil . . . . .	19
7.1.3	Comparateur non inverseur double seuil . . . . .	19

	Présentation . . . . .	19
	Montage . . . . .	20
	Application . . . . .	20
7.1.4	Comparateur inverseur double seuil . . . . .	23
	Montage . . . . .	23
	Démonstration . . . . .	23
<b>8</b>	<b>Montage intégrateur</b>	<b>25</b>
8.1	Présentation . . . . .	25
8.2	Montage . . . . .	25
8.3	Démonstration . . . . .	25
8.4	Application . . . . .	26
<b>9</b>	<b>Montage soustracteur</b>	<b>27</b>
9.1	Présentation . . . . .	27
9.2	Montage . . . . .	27
9.3	Démonstration . . . . .	27
9.4	Application . . . . .	28
<b>10</b>	<b>Montage sommateur</b>	<b>31</b>
10.1	Présentation . . . . .	31
10.2	Montage . . . . .	31
10.3	Démonstration . . . . .	31
	<b>Table des figures</b>	<b>31</b>

## Généralités

Un AOP (Amplificateur Opérationnel) est un composant actif qui permet de réaliser des opérations mathématiques (addition, soustraction, intégration, dérivation, etc) et du fait de sa miniaturisation et de sa fiabilité, on le rencontre aujourd'hui dans de nombreuses applications comme l'audio, la radio, l'asservissement...

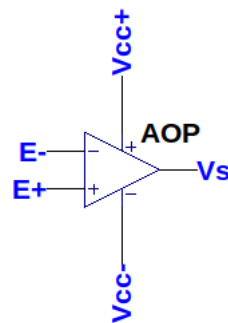


FIGURE 1.1 – Les entrées et sorties de l'AOP

Un AOP possède deux entrées notées appelées **entrée non inverseuse** et **entrée inverseuse**, une **sortie** et deux broches d'**alimentation**. L'AOP dispose souvent d'une alimentation symétrique ( $V_{cc+}$  et  $V_{cc-}$ ) avec comme référence de tension le point milieu (GND) des alimentations.

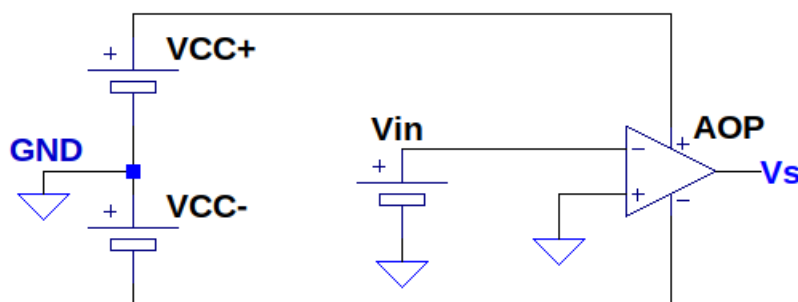


FIGURE 1.2 – L'alimentation d'un AOP

## Conventions

Afin de simplifier les calculs sur les AOP, quelques conventions ont été adoptées :

- La tension de sortie de l'AOP est notée  $V_s$

- La tension sur l'entrée inverseuse est appelée  $E_-$
- La tension sur l'entrée non inverseuse est appelée  $E_+$
- La tension différentielle ( $E + -E-$ ) est appelée  $\varepsilon$
- Le gain d'amplification différentiel de l'AOP est appelé  $A_d$  Ce gain est variable entre différentes familles d'AOP mais reste constant dans le temps
- Le gain d'amplification du montage est appelé  $A_0$  et varie en fonction des différents montages possibles

#### Remarque

L'alimentation des montages suivants ne sera pas représenté par souci de clarté.

## Modèle théorique

Dans un souci de simplification des calculs, un AOP peut être vu physiquement comme un composant ayant des caractéristiques parfaites. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- impédance d'entrée :  $Z \rightarrow +\infty \Omega$
- Impédance de sortie :  $Z = 0 \Omega$
- $Ad \rightarrow +\infty$
- $V_{smax} = V_{cc+}$
- $V_{smin} = V_{cc-}$
- Bande passante :  $F_{max} \rightarrow +\infty$

Cela se traduit par un modèle dont les deux entrées sont ouvertes (courant nul) et avec une tension de sortie qui ne serait pas affectée par le courant de sortie

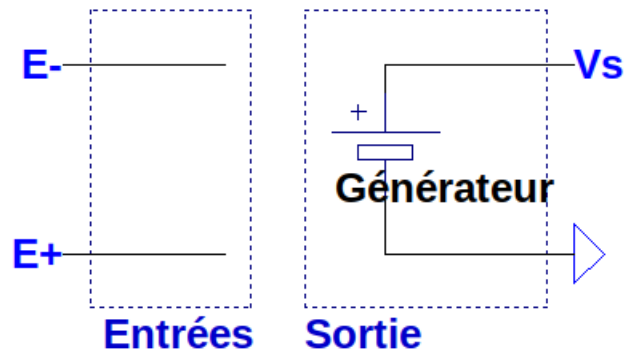


FIGURE 2.1 – Le modèle théorique de l'AOP

## Modèle réel

Cependant, il convient de noter que ce modèle n'est que théorique.

Du fait de la nature des composants constituant les AOP (transistors, condensateurs), la tension de sortie ne peut pas être égale à la tension d'alimentation.

Cette tension de sortie max est appelée  $V_{sat+}$  et  $V_{sat-}$

D'où le modèle suivant :

- impédance d'entrée :  $Z > 10^5 \Omega$
- Impédance de sortie :  $Z > 0 \Omega$  (courant de sortie max  $20mA$ )
- $Ad \gg 1000$
- $V_{smax} = V_{CCsat+}$
- $V_{smin} = V_{CCsat-}$
- Bande passante : imposée par le constructeur (Ex : le LM324 tolère 1MHz)

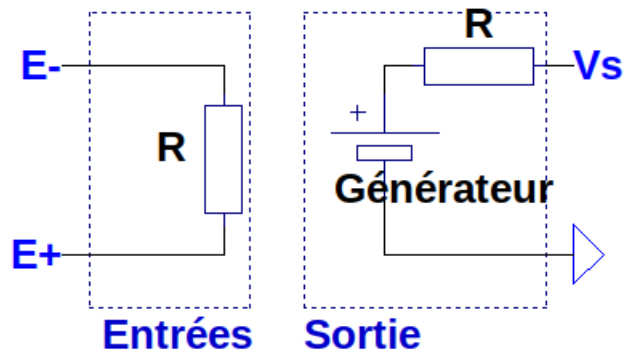


FIGURE 2.2 – Le modèle réel de l'AOP

Cependant, pour les calculs, l'hypothèse du courant d'entrée nul sera retenue, tout comme celle du gain  $Ad$

## Modes de fonctionnement

### Montages linéaires

Le signal  $V_s$  est une fonction mathématique du signal d'entrée  $V_e$ .

Dans certains cas, le signal de sortie conserve la forme du signal d'entrée sous couvert que l'AOP ne rentre pas en saturation.

Un montage linéaire impose un  $\varepsilon$  nul, sauf si l'AOP est saturé, c'est à dire si  $V_s = V_{sat}$

### Montages comparateurs

Le signal de sortie ne peut prendre que deux valeurs,  $V_{sat+}$  ou  $V_{sat-}$ . En l'absence de contre-réaction,  $V_s = \varepsilon Ad$



Une réaction est un retour du signal sur une des deux entrées. Celle ci peut être positive ou négative en fonction de l'entrée choisie (entrée -, réaction négative et entrée +, réaction positive).

Type de réaction	Positive	Négative	Aucune
Mode de fonctionnement	Comparateur	Linéaire	Comparateur

FIGURE 2.3 – Les modes de fonctionnement de l'AOP

## Résistance de charge

Il est possible de mettre une résistance de charge entre  $V_s$  et la masse.

Cette résistance symbolise un circuit relié directement à l'AOP.

Cependant, le courant de l'AOP étant limité à quelques dizaines de mA, il convient de prendre une résistance de charge  $R_c$  suffisamment grande ( $R_c > 1000\omega$ ).

Si  $R_c$  est suffisamment élevée, cette dernière n'influence pas la tension de sortie  $V_s$

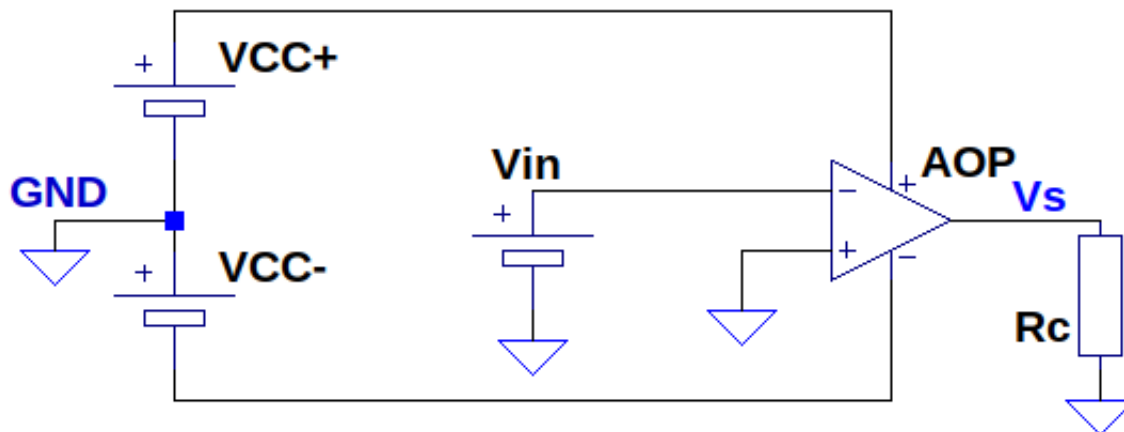


FIGURE 2.4 – La résistance de charge

## Intérêt de l'étude

Les AOP en fonctionnement linéaire permettent de réaliser les opérations mathématiques :

- **amplification** :  $V_s = A_0 \cdot V_e$   $A_0$  est le coefficient d'amplification du montage ( $A$  ne pas confondre avec  $A_d$  le coefficient d'amplification différentiel imposé par le constructeur)  
 $A_0$  peut être positif ou négatif
- **addition algébrique** :  $V_s = \sum_{k=0}^n V_k$
- **intégration et dérivation** (avec des condensateurs) à une constante près
- **logarithme et exponentielle**

## Méthode de résolution

La **réaction négative** (liaison entre la sortie et l'entrée inverseuse) impose un fonctionnement stable et linéaire, d'où  $\varepsilon = 0, E_+ = E_-$

L'hypothèse de la résistance d'entrée de l'AOP implique que  $I_+ = I_- = 0$

Afin de déterminer  $V_s$ , il faut exprimer  $E_+$  et  $E_-$  **en fonction des éléments du montage**.

**En égalisant les deux équations obtenues** ( $E_+ = k$  et  $E_- = k'$ ), on obtient une relation de type  $V_s = f(V_e)$

### Remarque

$I_s$  est issu d'une source de tension, il n'y a donc pas de loi simple permettant de déterminer sa valeur algébrique. Il ne faut pas avoir d'a priori sur son sens

# Première partie

## Montages

## Présentation

Ce montage permet de reproduire à l'identique une tension d'entrée. L'intérêt de ce montage réside dans le fait que l'impédance d'entrée de l'AOP est considérée comme infinie et que son impédance de sortie est considérée comme nulle.

Ainsi, le comportement de la charge en entrée ne sera pas affecté par l'AOP, le signal d'entrée ne sera donc pas modifié.

Ce montage sert donc à faire une **adaptation d'impédance**.

## Montage

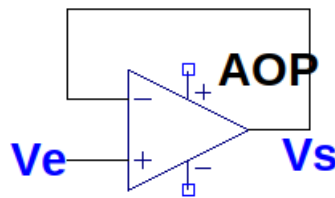


FIGURE 4.1 – Le montage suiveur

## Démonstration

La réaction négative implique que  $\varepsilon = 0$  (fonctionnement linéaire)

$$E_+ = V_e$$

$$E_- = V_s$$

$$\Rightarrow V_e = V_s$$

car  $E_+ = E_-$

**Exemple 1.** *On souhaite mesurer une tension au borne d'un capteur avec un appareil de mesure.*

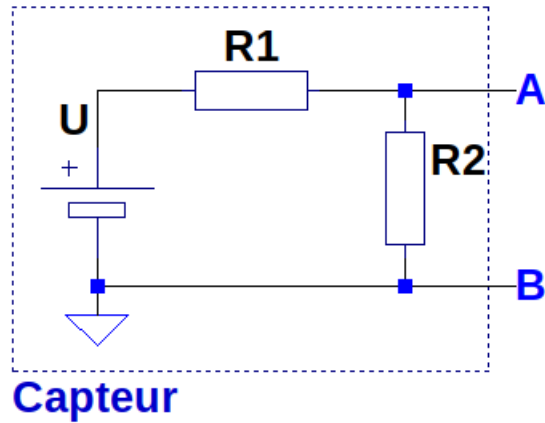


FIGURE 4.2 – Le capteur

On place ensuite une charge  $R_c$  au bornes de A et b. Cette résistance  $R_c$  représente l'appareil d'acquisition.

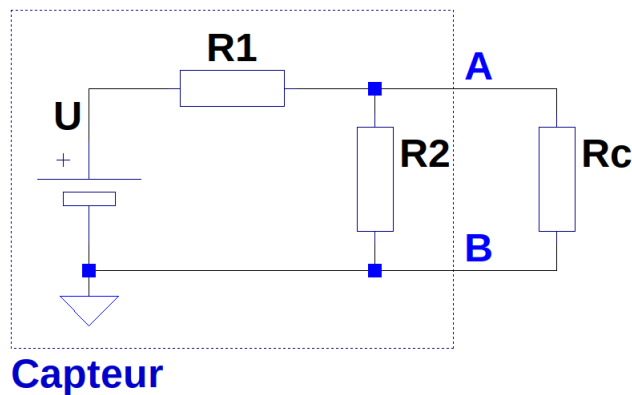


FIGURE 4.3 – Le modèle d'acquisition

**Question 1.** Quelle est l'influence de  $R_c$  sur  $U_{AB}$  dans le montage suivant ?

>>> **1.** Sans la charge  $R_c$  :

$$U_{AB} = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Avec la charge  $R_c$  :

$$U_{AB} = \frac{U \cdot R_{equ}}{R_1 + R_{equ}}$$

Avec  $R_{equ}$  la résistance équivalente entre  $R_2$  et  $R_c$

$$\text{Si } R_c \rightarrow +\infty \text{ alors } R_{equ} \rightarrow \frac{U_{AB} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Si } R_c \rightarrow +0 \text{ alors } R_{equ} \rightarrow 0 \Rightarrow U_{AB} \rightarrow 0$$

D'où le montage suivant, avec  $R_c \rightarrow +\infty$ , le signal n'est pas déformé.

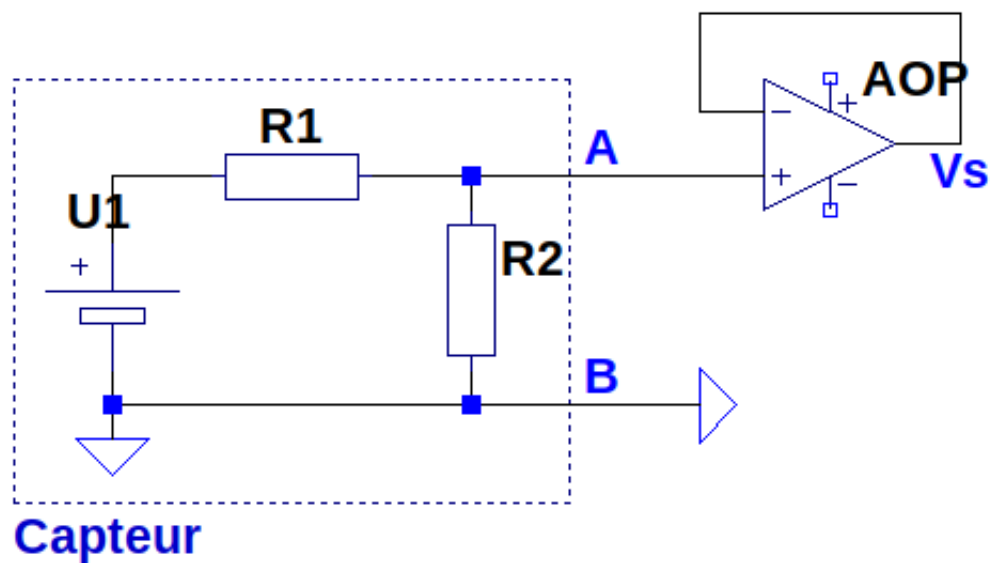


FIGURE 4.4 – L'adaptation d'impédance

## Présentation

Ce montage amplifie la tension  $V_e$  par un **gain**  $A_0$  **positif**.  
L'amplificateur reste en mode linéaire si  $V_e < V_{ccsat} \cdot A_0$

## Montage

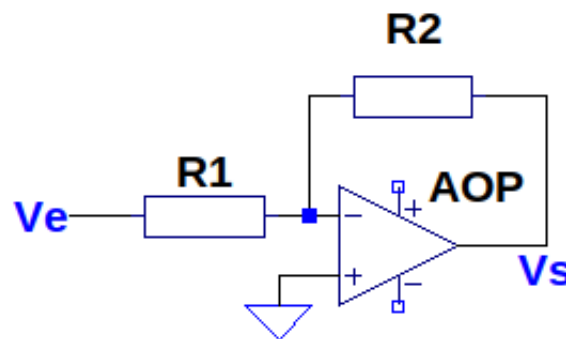


FIGURE 5.1 – Le montage amplificateur non inverseur

## Démonstration

Un AOP en mode linéaire impose  $\varepsilon = 0$  D'où  $E_+ = E_-$

$$E_+ = V_e$$

$$E_- = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$E_+ = E_- \Rightarrow V_e = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.1)$$

$$\Rightarrow \frac{V_e}{V_s} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow V_s = V_e \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (5.3)$$

$$(5.4)$$

## Exemple

**Exemple 2.** On souhaite amplifier un signal sinusoïdal par un coefficient  $k = 5$ .

On peut donc utiliser le montage précédent.

On prendra  $R_1 = 1k\Omega$  et  $R_2 = 4k\Omega$  pour avoir  $A_0 = 5$

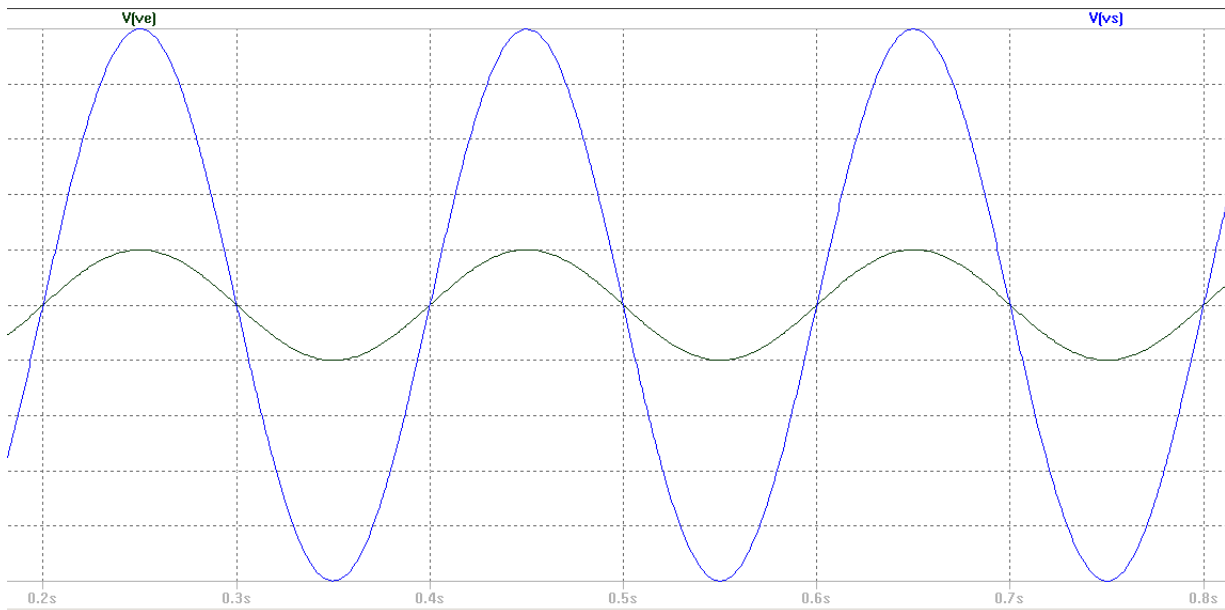


FIGURE 5.2 – Amplification du signal noir par 5



## Présentation

Ce montage amplifie la tension  $V_e$  par un gain  $A_0$  négatif.

## Montage

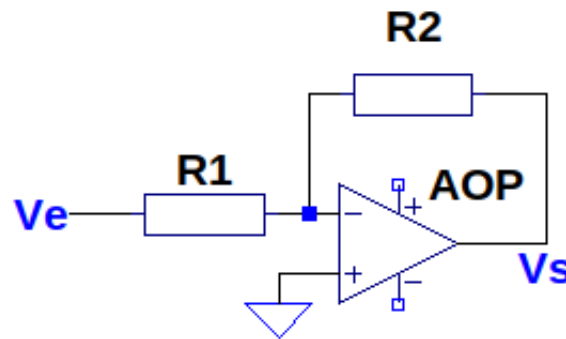


FIGURE 6.1 – Le montage amplificateur non inverseur

## Démonstration

Mode linéaire :  $\varepsilon = 0$

$$E_+ = 0 \quad (6.1)$$

$$E_- = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (6.2)$$

$$E_- = \frac{V_e \cdot R_2 + V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (6.3)$$

$$\Rightarrow \frac{V_e}{V_s} = -\frac{R_1}{R_2} \quad (6.4)$$

$$\Rightarrow V_s = -V_e \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (6.5)$$

Avec  $A_0 = -\frac{R_2}{R_1}$

## Application

**Exemple 3.** On souhaite amplifier un signal sinusoïdal par un coefficient  $k = -5$ .  
On peut donc utiliser le montage précédent.  
On prendra  $R_1 = 1k\Omega$  et  $R_2 = 5k\Omega$  pour avoir  $A_0 = -5$

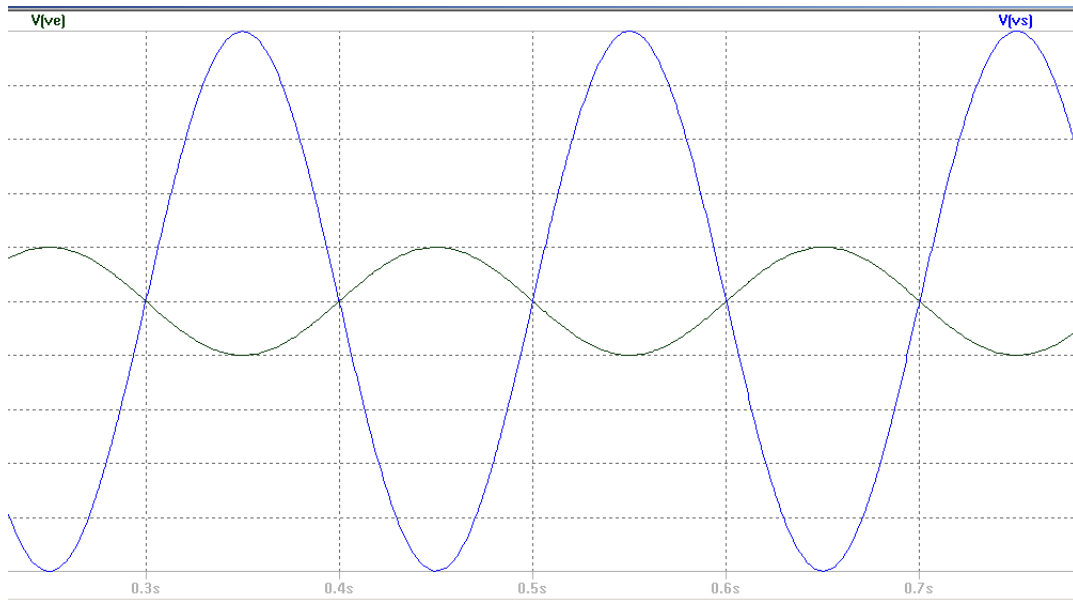


FIGURE 6.2 – Amplification du signal noir par -5

## Présentation

Un montage comparateur se reconnaît par son branchement :

- Aucune contre réaction n'est présente
- Une contre réaction a lieu sur l'entrée non inverseuse via un dipôle passif

Le montage comparateur permet de comparer deux tensions entre elles. Cependant, cette comparaison peut s'effectuer de plusieurs manières, avec un ou deux seuils, de manière inversée ou non...

## Comparateur non inverseur simple seuil

### Présentation

Ce montage permet de comparer simplement deux tensions entre elle.

### Montage

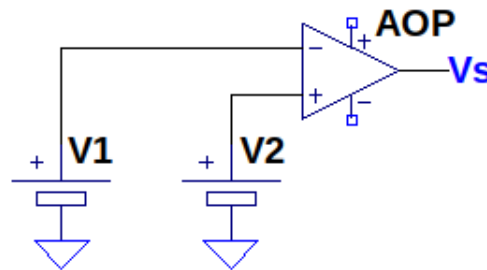


FIGURE 7.1 – Comparateur simple seuil

Ce mode est le plus simple et est régi de la manière suivante :

On sait que  $\varepsilon = E_+ - E_-$  et que  $V_s = \varepsilon \cdot A_d$  avec  $A_d = +\infty$   
(Circuit en boucle ouverte)

Si  $E_+ > E_-$  :

$$V_s = V_{sat+}$$

si  $E_+ < E_-$  :

$$V_s = V_{sat-}$$

Si  $V_2 = 0V$ , on obtient la caractéristique de transfert suivante

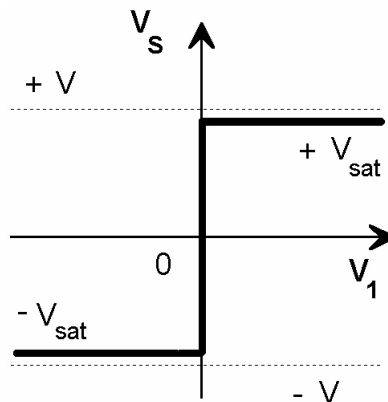


FIGURE 7.2 – Caractéristique de transfert,  $V_1$  est la tension d’entrée de l’AOP

## Comparateur inverseur simple seuil

Le raisonnement est le même sauf que les entrées sont inversées. De ce fait, le seuil de basculement se fait dans l’autre sens.

Si  $E_+ > E_-$  :

$$V_s = V_{sat-}$$

Si  $E_+ < E_-$  :

$$V_s = V_{sat+}$$

## Comparateur non inverseur double seuil

### Présentation

Ce type de montage permet d’éliminer les tensions “parasites”, c’est à dire les tensions bruitées et non indésirables.

## Montage

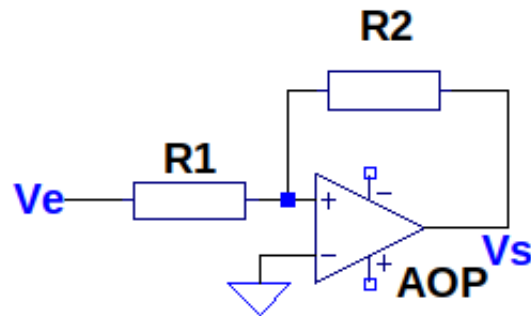


FIGURE 7.3 – Montage comparateur non inverseur double seuil

## Application

Par exemple, un capteur de lumière résistif (photo-résistance) sera sensible aux variations de lumière (nuages...).

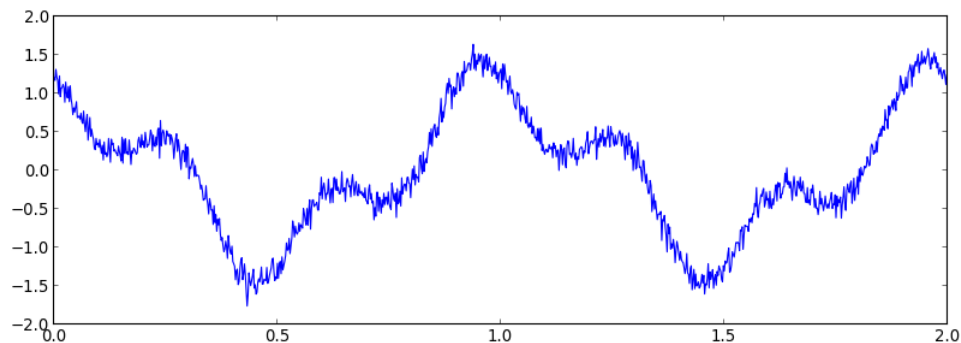


FIGURE 7.4 – Un signal bruité

Or, si on compare ce signal par rapport à une référence, on ne veut pas que le capteur déclenche plusieurs fois l'action.

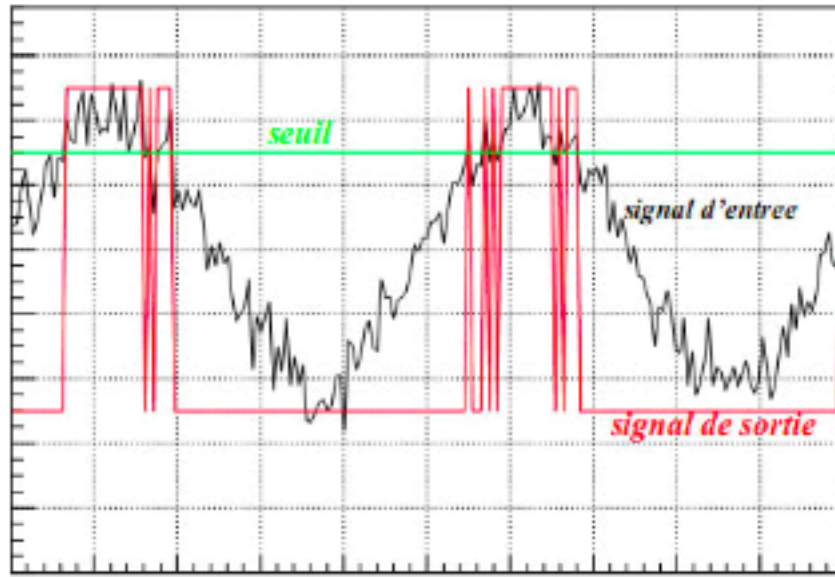


FIGURE 7.5 – Le cycle de déclenchement

Pour éviter ce problème, on utilise un comparateur à double seuil :  
toute les tensions parasites ayant une amplitude inférieure à la tension de différence entre les deux seuils seront ignorées.

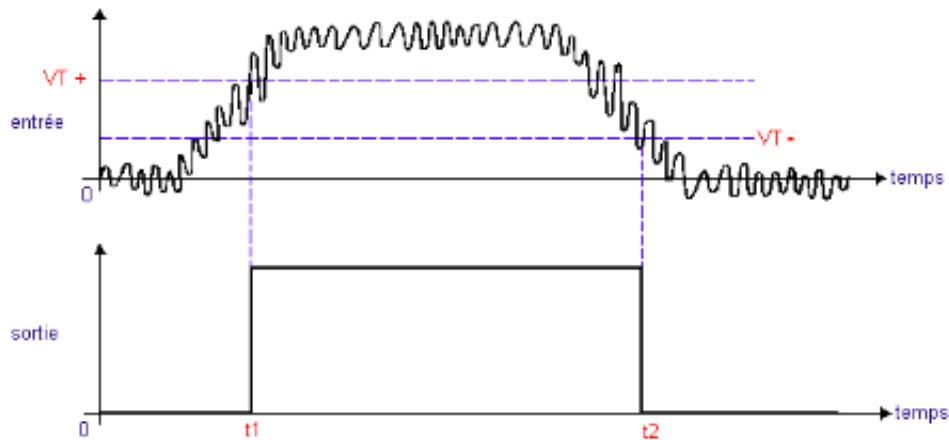


FIGURE 7.6 – Le principe

On va chercher les deux valeurs de basculement :

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

$$E_- = U_0 = 0$$

Étudions le cas où  $\varepsilon > 0$

$$\varepsilon > 0 \Leftrightarrow E_+ > E_- \quad (7.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2} > U_0 \quad (7.2)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2}{R_1 + R_2} > U_0 - \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.3)$$

$$\Leftrightarrow V_e R_2 > R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1 \quad (7.4)$$

$$\Leftrightarrow V_e > \frac{R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1}{R_2} \quad (7.5)$$

Ici,  $U_0 = 0$  et  $V_s = V_{sat+}$  car  $\varepsilon > 0$

D'où  $V_e > \frac{-V_{sat+} R_1}{R_2}$

#### Remarque

$U_0$  peut être différent de 0V en mettant une source de tension sur  $E_-$

Étudions le cas où  $\varepsilon < 0$  :

$$\varepsilon < 0 \Leftrightarrow E_+ < E_- \quad (7.6)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2} < U_0 \quad (7.7)$$

$$\Leftrightarrow \frac{V_e R_2}{R_1 + R_2} < U_0 - \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.8)$$

$$\Leftrightarrow V_e R_2 < R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1 \quad (7.9)$$

$$\Leftrightarrow V_e < \frac{R_1 + R_2 \cdot U_0 - V_s R_1}{R_2} \quad (7.10)$$

Ici,  $U_0 = 0$  et  $V_s = V_{sat-}$  car  $\varepsilon < 0$

D'où  $V_e < \frac{-V_{sat-} R_1}{R_2}$

On obtient deux seuils  $S1$  et  $S2$  de valeurs respectives :

$$\frac{-V_{sat+} R_1}{R_2} \text{ et } \frac{V_{sat-} R_1}{R_2}$$

Afin de basculer, la tension d'entrée doit dépasser  $S1V$  et afin de basculer dans l'autre sens, la tension d'entrée doit être inférieure à  $S2V$

On obtient le cycle d'hystérésis suivant :

$$(VB = S2 \text{ et } VH = S1)$$

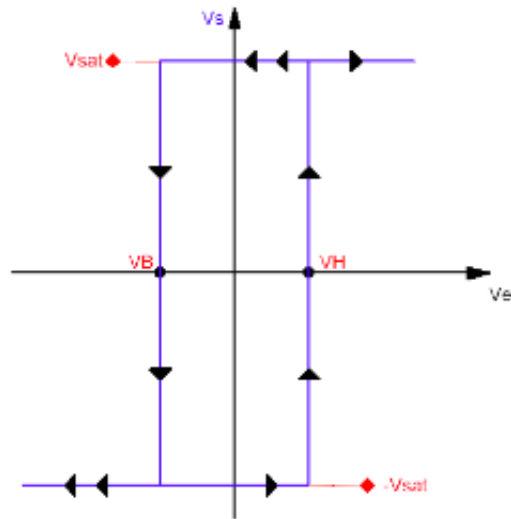


FIGURE 7.7 – Cycle d’hystérésis non inverseur

$$U_{milieu\_de\_cycle} = (V_{seuil1} + V_{seuil2}) \cdot 0.5$$

$$Largeur_{cycle} = V_{seuil1} - V_{seuil2}$$

## Comparateur inverseur double seuil

### Montage

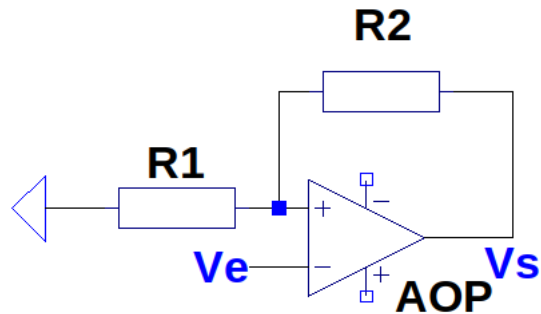


FIGURE 7.8 – Montage comparateur inverseur double seuil

### Démonstration

La démarche est rigoureusement identique avec  $\varepsilon > 0$ , on a  $V_s = V_{sat+}$  et pour  $\varepsilon < 0$  on a  $V_s = V_{sat-}$

On obtient le cycle d’hystérésis suivant :



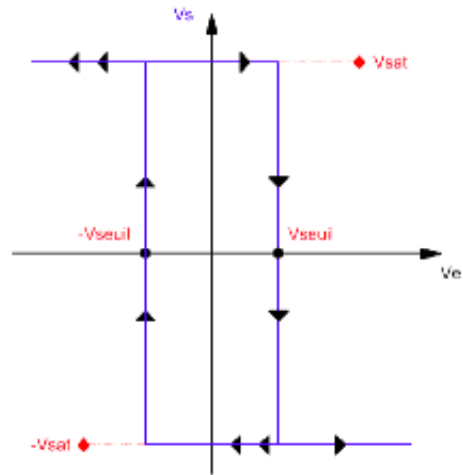


FIGURE 7.9 – Cycle d’hystérésis inverseur

## Présentation

Ce montage intègre une tension d'entrée.

En sortie, on obtient une tension  $V_s$  valant  $V_s = k \cdot \int V_e$

## Montage

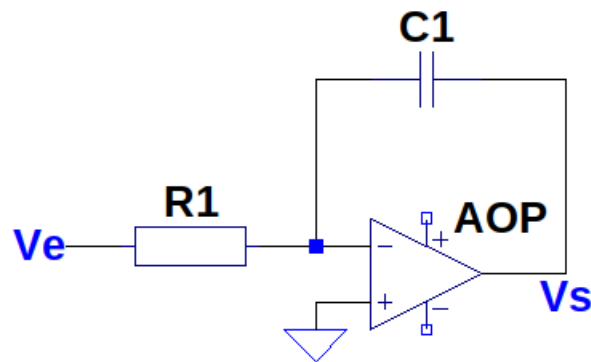


FIGURE 8.1 – Montage intégrateur

## Démonstration

Montage en mode linéaire car contre-réaction négative.

$$I_{R1} + I_{C1} = 0 \quad \Leftrightarrow I_{R1} = -I_{C1} \quad (8.1)$$

$$\Leftrightarrow \frac{E}{R} = -C \cdot \frac{dV_s}{dt} \quad (8.2)$$

$$\Leftrightarrow -\frac{1}{RC} \cdot E = \frac{dV_s}{dt} \quad (8.3)$$

$$\Leftrightarrow V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e \quad (8.4)$$

$$k = -\frac{1}{RC} \quad (8.5)$$

Ce montage est notamment présent dans certains Convertisseurs Analogiques Numériques dit “simple” ou “double” rampe.

## Application

**Exemple 4.** *On souhaite générer un signal triangulaire.*

En intégrant un signal rectangulaire, on obtient un signal triangulaire.

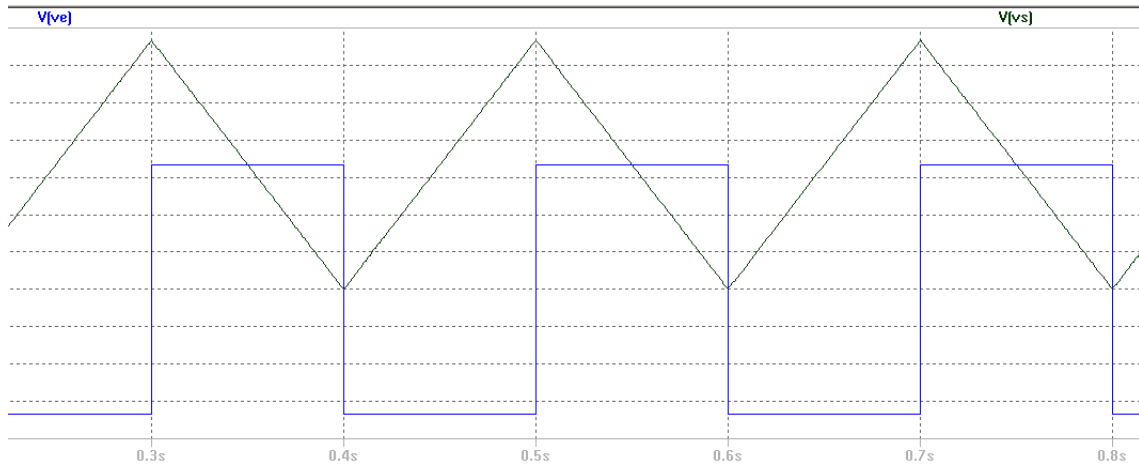


FIGURE 8.2 – Un signal triangulaire généré depuis un signal carré

Soit  $V_e = 2V$  ou  $V_e = -2V$

Si  $V_e = 2V$

$$k \int V_e = kV_e \cdot t + x \quad (8.6)$$

$$= -\frac{2}{RC}t + c \quad (8.7)$$

avec  $k = -\frac{1}{RC}$

$\Rightarrow$  droite d'équation  $y = -\frac{2}{RC}t + c$

Si  $V_e = -2V$

$$k \int V_e = kV_e \cdot t + x \quad (8.8)$$

$$= \frac{2}{RC}t + c \quad (8.9)$$

avec  $k = -\frac{1}{RC}$

$\Rightarrow$  droite d'équation  $y = \frac{2}{RC}t + c$

## Présentation

Ce montage permet de soustraire deux tensions d'entrée afin d'obtenir la différence en sortie.

## Montage

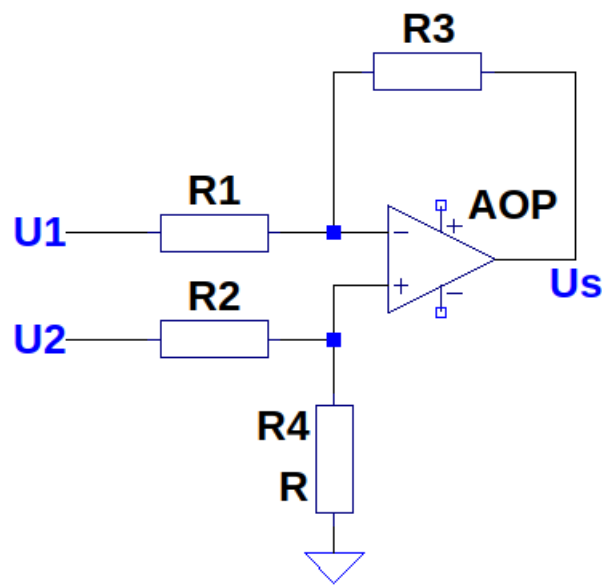


FIGURE 9.1 – Montage soustracteur

## Démonstration

Contre-réaction négative donc mode linéaire.

$$E_+ = U_2 \frac{R_4}{R_2 + R_4}$$

$$E_- = \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_5}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}} \quad (9.1)$$

$$= \frac{U_1 R_3 + U_5 R_1}{R_1 + R_3} \quad (9.2)$$

Or  $E_+ = E_-$

$$\Leftrightarrow U_2 \cdot \frac{R_4}{R_2 + R_4} = \frac{U_1 R_3 + U_5 R_1}{R_1 + R_3} \quad (9.3)$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_5 R_1}{R_1 + R_3} = \frac{U_2 R_4}{R_2 + R_4} - \frac{U_1 R_3}{R_1 + R_3} \quad (9.4)$$

$$\Leftrightarrow U_5 R_1 = \frac{R_4(R_1 + R_3)}{R_2 + R_4} - \frac{U_1 R_3}{R_1} \quad (9.5)$$

Si  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ , on obtient :

$$U_s = U_2 - U_1$$

## Application

**Exemple 5.** On souhaite mesurer une tension entre deux points  $A$  et  $B$  d'un circuit (tension différentielle)

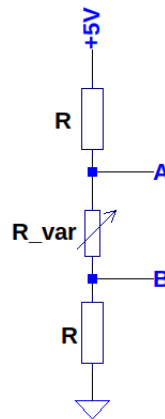


FIGURE 9.2 – Tension différentielle  $AB$

Pour étudier la différence de potentiel entre les deux points du circuit, on peut utiliser un montage soustracteur afin qu'en sortie du montage avec l'AOP, on ait :

$$V_s = V_a - V_b$$

On peut réaliser le montage suivant.

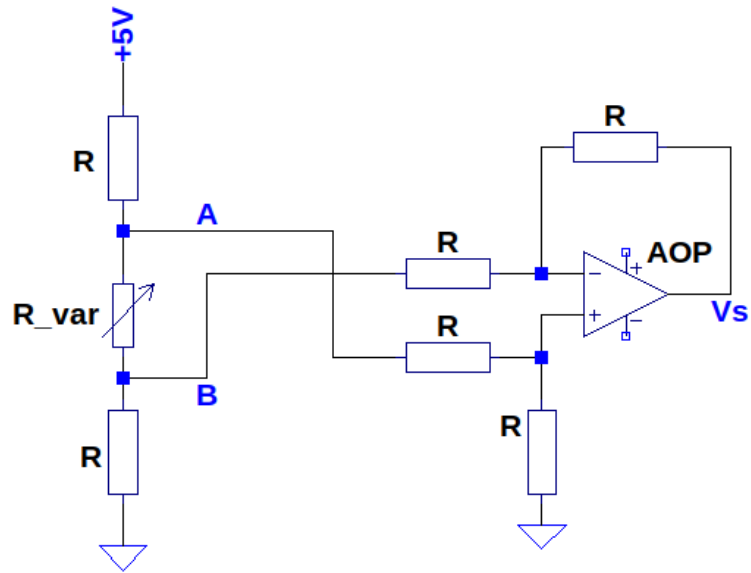


FIGURE 9.3 – Un montage pour lire une tension entre deux points

## Présentation

Ce montage permet d'additionner en sortie plusieurs tensions d'entrée. Avec ce montage, la tension de sortie est multipliée par un coefficient -1

## Montage

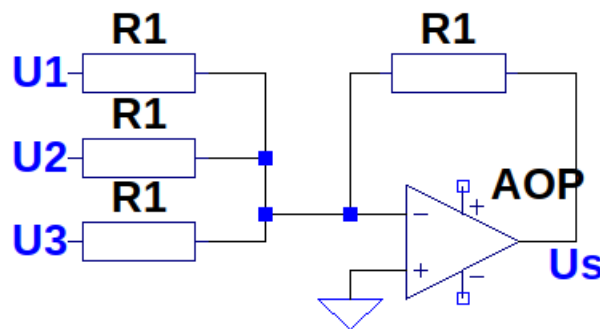


FIGURE 10.1 – Montage sommateur inverseur

## Démonstration

Contre-réaction négative donc montage linéaire.  
On applique le théorème de Millman<sup>1</sup>

$$\begin{aligned}
 E_+ &= 0 \\
 E_- &= \frac{\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_1} + \frac{U_s}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1}} = 0 \\
 &\Leftrightarrow \frac{U_1 + U_2 + U_s}{R_1} = 0 \quad (10.1)
 \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_s}{R_1} = \frac{-(U_1 + U_2)}{R_1} \quad (10.2)$$

$$\Leftrightarrow U_s = -(U_1 + U_2) \quad (10.3)$$

---

1. on fera abstraction de U3

1.1	Les entrées et sorties de l'AOP . . . . .	4
1.2	L'alimentation d'un AOP . . . . .	4
2.1	Le modèle théorique de l'AOP . . . . .	6
2.2	Le modèle réel de l'AOP . . . . .	7
2.3	Les modes de fonctionnement de l'AOP . . . . .	8
2.4	La résistance de charge . . . . .	8
4.1	Le montage suiveur . . . . .	11
4.2	Le capteur . . . . .	12
4.3	Le modèle d'acquisition . . . . .	12
4.4	L'adaptation d'impédance . . . . .	13
5.1	Le montage amplificateur non inverseur . . . . .	14
5.2	Amplification du signal noir par 5 . . . . .	15
6.1	Le montage amplificateur non inverseur . . . . .	16
6.2	Amplification du signal noir par -5 . . . . .	17
7.1	Comparateur simple seuil . . . . .	18
7.2	Caractéristique de transfert, $V_1$ est la tension d'entrée de l'AOP . . . . .	19
7.3	Montage comparateur non inverseur double seuil . . . . .	20
7.4	Un signal bruité . . . . .	20
7.5	Le cycle de déclenchement . . . . .	21
7.6	Le principe . . . . .	21
7.7	Cycle d'hystérésis non inverseur . . . . .	23
7.8	Montage comparateur inverseur double seuil . . . . .	23
7.9	Cycle d'hystérésis inverseur . . . . .	24
8.1	Montage intégrateur . . . . .	25
8.2	Un signal triangulaire généré depuis un signal carré . . . . .	26
9.1	Montage soustracteur . . . . .	27
9.2	Tension différentielle $AB$ . . . . .	28
9.3	Un montage pour lire une tension entre deux points . . . . .	29
10.1	Montage sommateur inverseur . . . . .	31