Les Amplificateurs Opérationnels

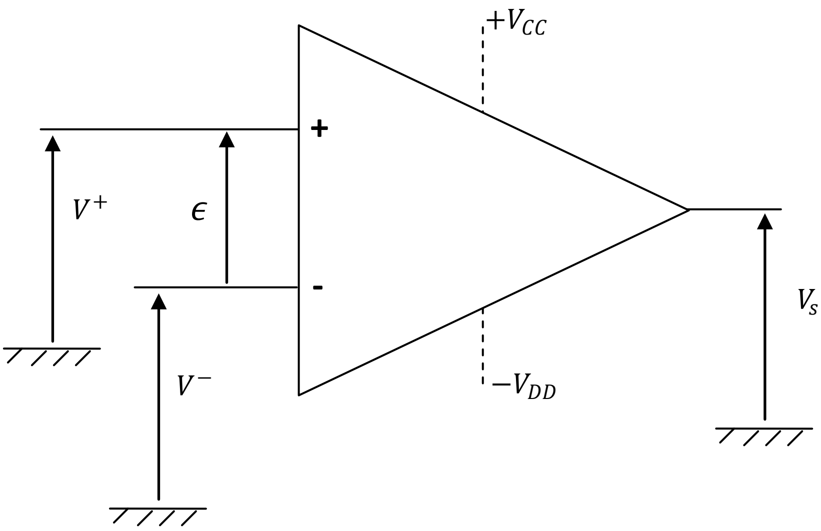
I. L'amplificateur Opérationnel idéal (AOP)

1. Introduction

L'amplificateur opérationnel est un circuit intégré à entrée symétrique. Ce sont les circuits intégrés analogiques les plus utilisés à cause de leur universalité, leur simplicité et leur performance.

L'amplificateur opérationnel (AOP) bénéficie aujourd'hui de performances telles que le composant réel est très proche de ses caractéristiques idéalisées. C'est la raison pour laquelle nous étudierons uniquement l'amplificateur opérationnel parfait pour lequel les "défauts" du composant sont ignorés.

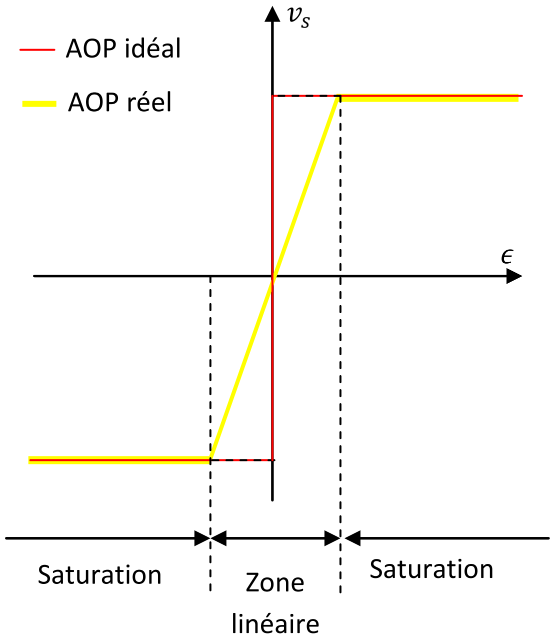
Symbole de l'AOP :



- Alimentation double $+V_{cc}$ / $-V_{dd}$ (de 3 à 50 V). Généralement, l'alimentation est symétrique ($V_{cc} = V_{dd}$)
- 2 entrées : une marquée +, influence non inverseuse
  l'autre marquée –, influence inverseuse
- Tension d'entrée différentielle : $\epsilon = V^+ - V^-$
- La sortie délivrant la tension V_s
- Coefficient d'amplification : A_d tel que $V_s = A_d.\epsilon$.

2. Caractéristiques de l'AOP parfait

a. Caractéristique de transfert : $v_s = f(v_e)$



On distingue 2 zones :

- Domaine linéaire : $v_s = A_d.\epsilon$. L'amplification différentielle, A_d est très grande (>105) donc tendant vers $+\infty$. Dans ce cas, L'AOP est dit « idéal ». ·
- Zones de saturation : $v_s = cste = \pm V_{sat}$ selon le signe de ϵ. (Les tensions de saturation sont très proches de la tension d'alimentation)

b. Impédance et courants d'entrée

Les impédances des deux entrées sont très élevées (∞) : les courants d'entrée sont donc nuls.

$$i^+ = i^- = 0$$

c. Impédance de sortie

L'impédance de sortie de l'AOP est nulle : la tension v_s est indépendante du courant extrait i_s.

II. Mise en œuvre de l'amplificateur opérationnel

1. Etude de la stabilité

a. Notion de rétroaction

Le rebouclage de la sortie sur une entrée est appelée rétroaction ou contre-réaction.

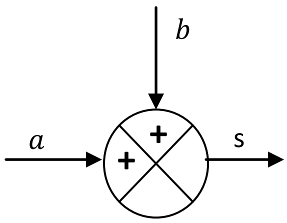
Il est en effet difficile de contrôler la tension de sortie car l'amplification A_d est très importante et une très faible valeur de la tension d'entrée suffit à saturer l'AOP. Pour y remédier, on prélève une fraction de la tension de sortie et l'ôter de la tension d'entrée dans le but d'obtenir une différence proche de 0. De cette manière, on pourra travailler dans le domaine linéaire.

b. Représentation fonctionnelle et étude de la stabilité

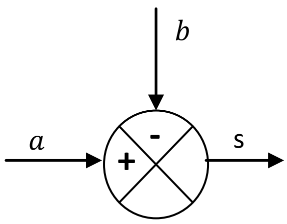
On peut schématiser les schémas par une représentation fonctionnelle à l'aide d'éléments graphiques : l'addition, la soustraction et la multiplication par une constante (Figure 5). On obtient alors le schéma fonctionnel, appelé aussi « schéma blocs.

Symboles graphiques utilisés pour une représentation fonctionnelle :

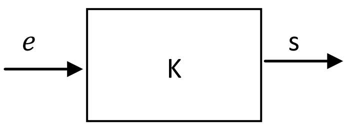
Liaison



Additionneur $s = a + b$



Soustracteur $s = a - b$



Opérateur $s = K.e$

$v_e = Cste$

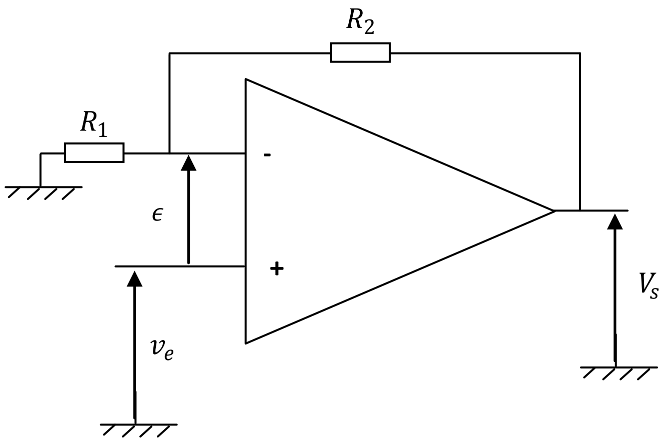
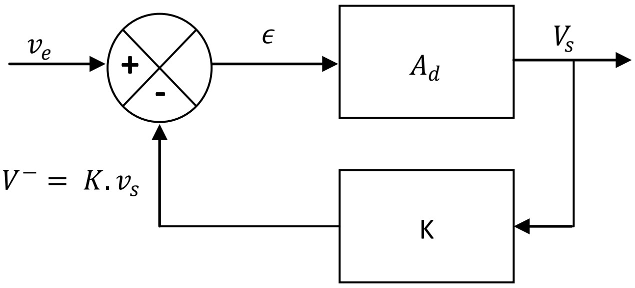


Schéma Fonctionnel



L'entrée v_e est maintenue constante,

- si $v_s \nearrow, V^- \nearrow, \epsilon \searrow$ donc $V_s \searrow$.

  ⇒Il y a compensation

- si $v_s \searrow, V^- \searrow, \epsilon \nearrow$ donc $V_s \nearrow$.

  ⇒Il y a compensation

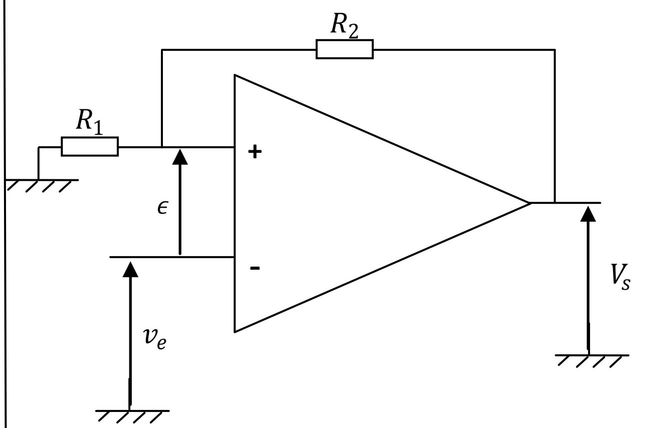
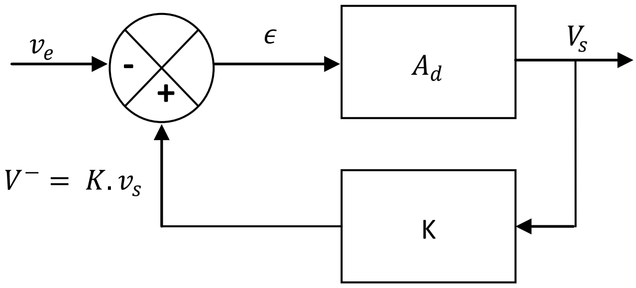


Schéma Fonctionnel



L'entrée v_e est maintenue constante,

- si $v_s \nearrow, V^+ \nearrow, \epsilon \nearrow$ donc $V_s \nearrow$.

  ⇒Il n'y a pas compensation

- si $v_s \searrow, V^+ \searrow, \epsilon \searrow$ donc $V_s \searrow$.

  ⇒Il n'y a pas compensation

2. Conclusion : Mode d'étude des circuits à AOP

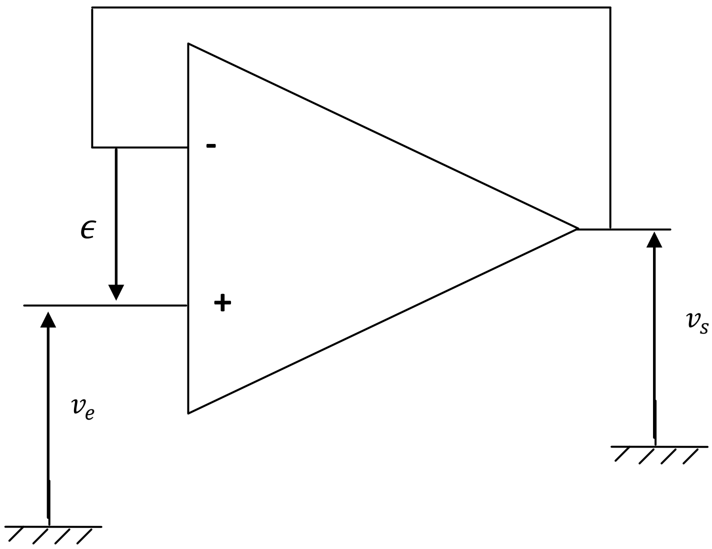
Pour savoir comment fonctionne l'AOP, il suffit d'observer le montage et de tenir compte de la rétroaction :

- Si la rétroaction se fait sur l'entrée inverseuse (rétroaction négative), l'AOP fonctionne de façon linéaire, donc $\epsilon = 0$.

- Si la rétroaction se fait sur l'entrée non inverseuse, (rétroaction positive) ou s'il n'y a pas de rétroaction, l'AOP sature et $v_s = \pm V_{sat}$ selon le signe de ϵ.

III. Applications linéaires des amplificateurs opérationnels parfaits

1. Montage Suiveur

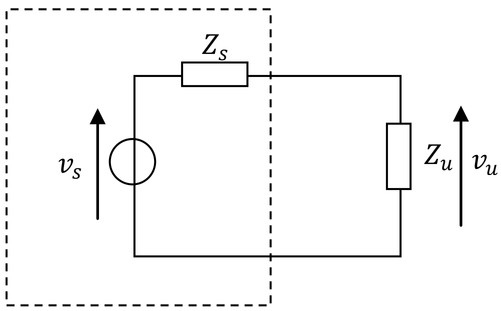


Le montage possède une rétroaction négative. L'AOP fonctionne donc en mode linéaire et on a $\epsilon = 0$, i.e. $v^+ = v^-$.

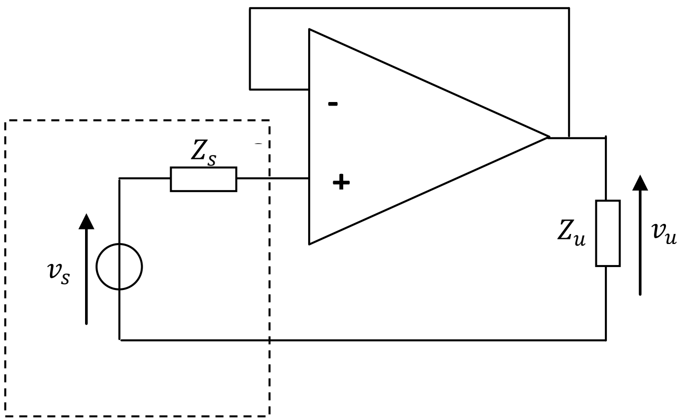
Or, ici, on a : $\begin{cases} v^+ = v_e \\ v^- = v_s \end{cases} \Rightarrow \boxed{v_s = v_e}$

Intérêt d'un tel montage :

Considérons les 2 montages ci-dessous :



Montage Amont



Montage Amont

Dans le montage de gauche (montage sans AOP), la formule du pont diviseur de tension nous donne :

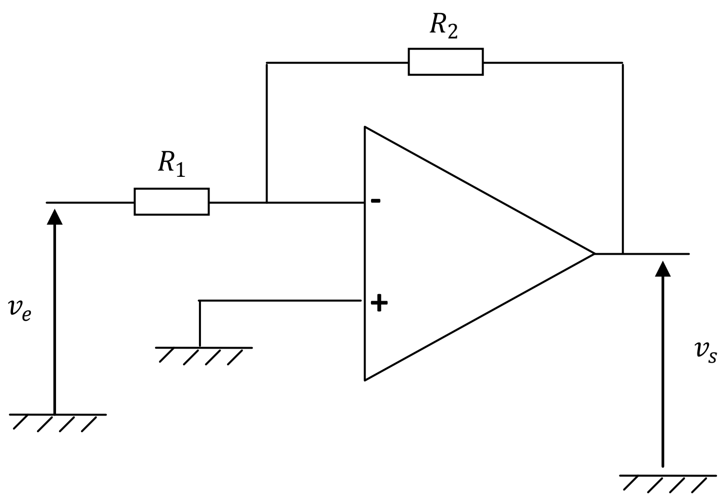
$$v_u = \frac{Z_u}{Z_s + Z_u} . v_s$$

On ne récupère donc qu'une fraction de la tension de sortie du montage amont.

En revanche, dans le montage de droite, où on a inséré un montage suiveur entre la sortie du montage amont et l'impédance de charge Z_u, on obtient :

$$v_u = v_s$$

2. Montage amplificateur

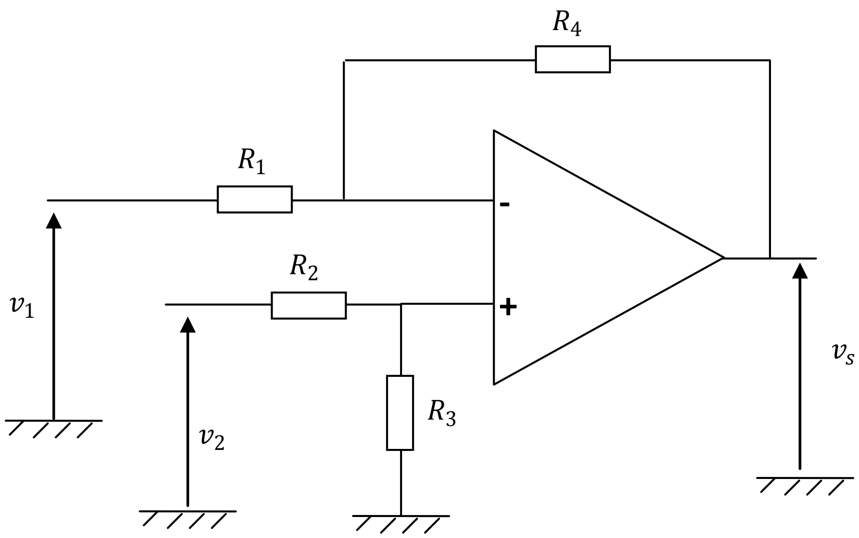


Le montage possède une rétroaction négative. L'AOP fonctionne donc en mode linéaire et on a $\epsilon = 0$, i.e. $v^+ = v^-$.

On a ici : $\begin{cases} v^+ = 0 \\ v^- = \dfrac{\frac{v_e}{R_1}+\frac{v_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} \end{cases}$ (théorème de Millman)

On obtient donc : $\boxed{v_s = -\frac{R_2}{R_1} . v_e}$

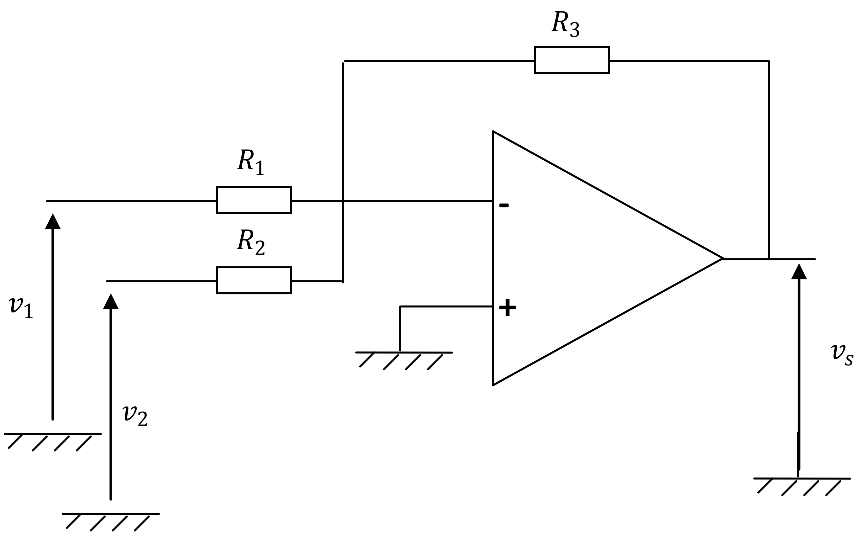
3. Amplificateur de différence (montage soustracteur)



On montre que : $\boxed{v_s = \frac{R_1+R_4}{R_2+R_3} \cdot \frac{R_3}{R_1} \cdot v_2 - \frac{R_4}{R_1} \cdot v_1}$

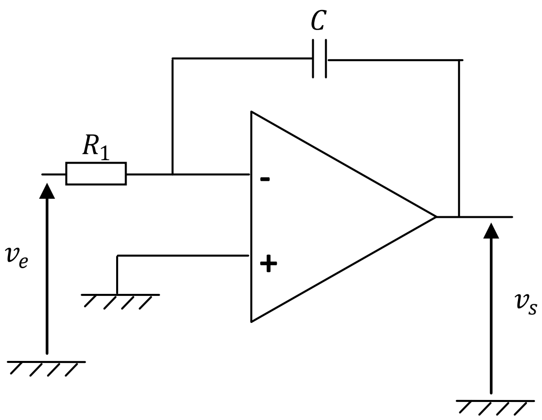
Rq : Si $R_1 = R_2$ et $R_3 = R_4$, on obtient : $\boxed{v_s = \frac{R_4}{R_1} \cdot (v_2 - v_1)}$

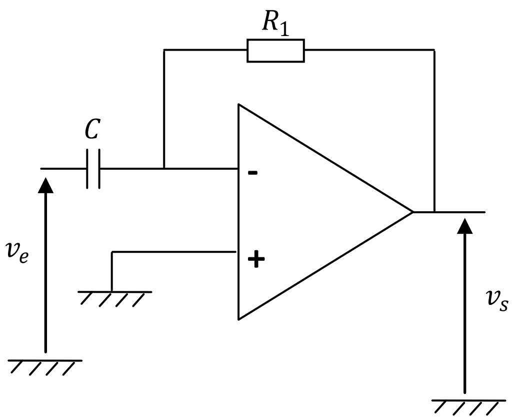
4. Montage Sommateur



On montre que : $\boxed{v_s = -R_3 \left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2}\right)}$

5. Montages intégrateur et dérivateur





Les montages possèdent une rétroaction négative. Les AOP fonctionnent donc en mode linéaire et on a $\epsilon = 0$, i.e. $v^+ = v^-$.

De plus, ils sont idéaux, on a $i^+ = i^- = 0$.

Le courant i dans C s'exprime de la façon suivante : $i = C.\frac{dv_C}{dt} = \frac{v_e}{R}$ et on a $v_C = -v_s$.

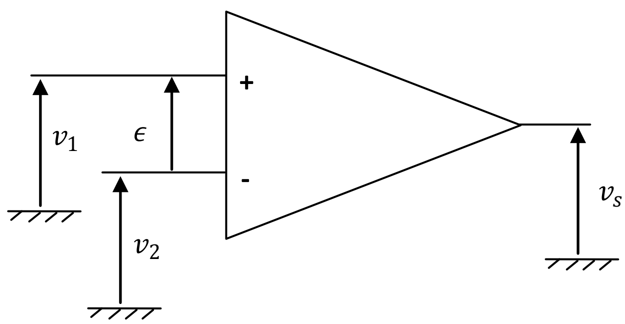
$$\boxed{\Rightarrow v_s(t) = -\frac{1}{RC}\int v_e\,(t)dt}$$

Le courant i dans C s'exprime de la façon suivante : $i = C.\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_s}{R}$ et on a $v_C = v_e$.

$$\boxed{\Rightarrow v_s(t) = -RC.\frac{dv_e}{dt}}$$

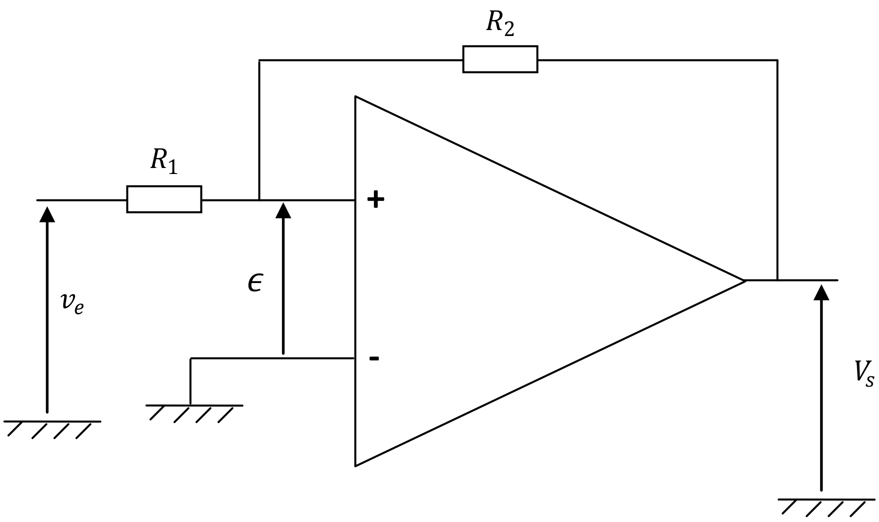
IV. Applications non linéaires des amplificateurs opérationnels parfaits

1. Comparateur de tensions



Ici, il n'y a pas de rétroaction. L'AOP fonctionne donc en mode saturé. On a donc $v_s = \pm V_{sat}$ selon le signe de ϵ. Ce qui nous donne alors : $\begin{cases} v_s = +V_{sat} \; si \; v_1 > v_2 \\ v_s = -V_{sat} \; si \; v_1 < v_2 \end{cases}$: c'est une **fonction de comparaison**.

2. Comparateur à deux seuils : Trigger de Schmitt

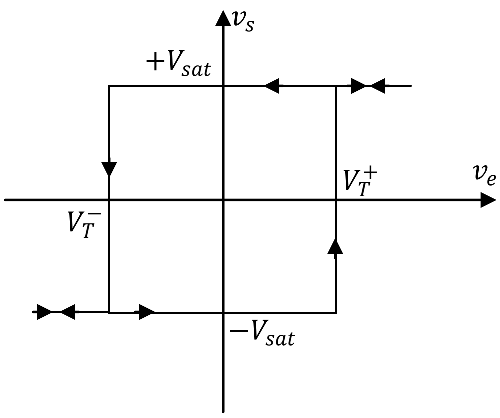


L'AOP fonctionne ici en mode saturé car il y a une rétroaction positive. L'application du théorème de Millman au niveau du nœud de l'entrée non-inverseuse donne :

$$\epsilon = v^+ - v^- = \frac{R_1.v_s + R_2.v_e}{R_1 + R_2} - 0$$

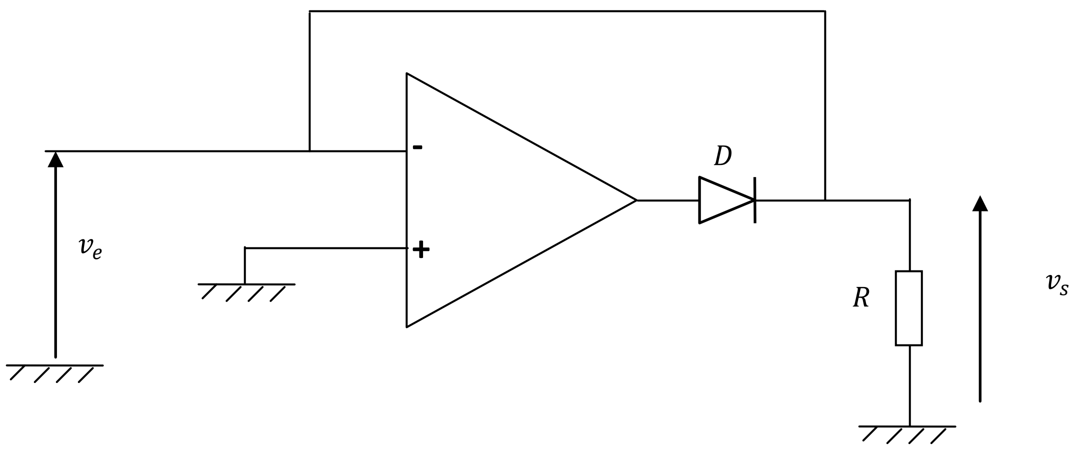
Il y aura basculement de la sortie (i.e. v_s passera de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$ et vice versa) quand $\epsilon = 0$, c'est-à-dire pour $v_e = -\frac{R_1}{R_2}.v_s$. Comme $v_s = \pm V_{sat}$, nous aurons deux seuils de basculement symétriques, à savoir : $\begin{cases} V_T^+ = +\frac{R_1}{R_2}.V_{sat} \\ V_T^- = -\frac{R_1}{R_2}.V_{sat} \end{cases}$.

On aura donc : $\begin{cases} v_s = +V_{sat} \; si \; v_e > V_T^- \\ v_s = -V_{sat} \; si \; v_e < V_T^+ \end{cases}$, ce qui permet de tracer la caractéristique $v_s = f(v_e)$ suivante :



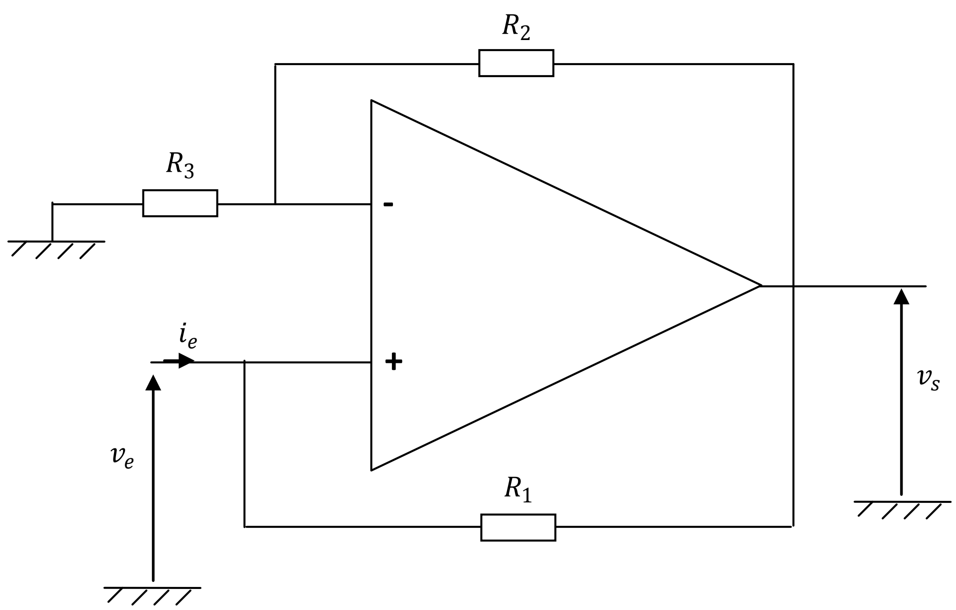
V. Autres montages : Exercices

1. Diode sans seuil



Tracer $v_s(t)$ si $v_e(t) = V_E \sin(\omega t)$.

2. Simulateur de résistance négative



Exprimer v_e en fonction de i_e.