Chapitre 5:
Amplificateur opérationnel

Justine Philippe

ISEN école d'ingénieurs

Sommaire

- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

ISEN école d'ingénieurs

Sommaire

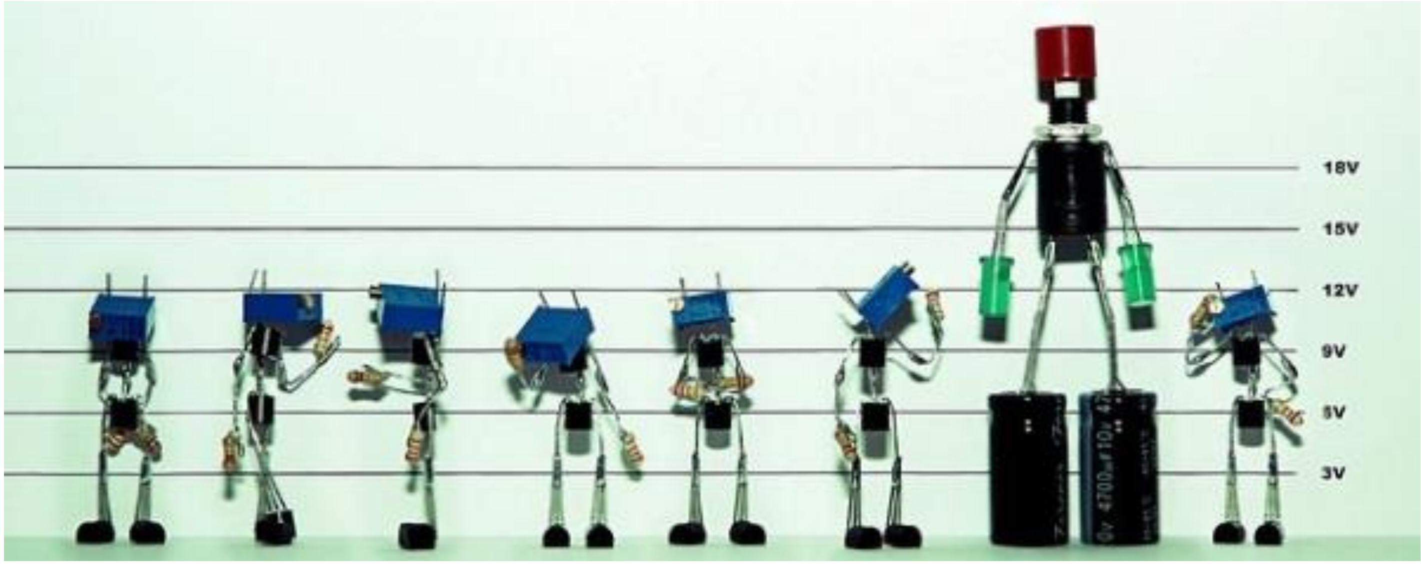
- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

ISEN école d'ingénieurs

Introduction

Les composants de base en électronique :

- Résistances, condensateurs, bobines (passifs)
- Diodes, transistors (actifs)
- Amplificateurs opérationnels (un circuit intégré de base)



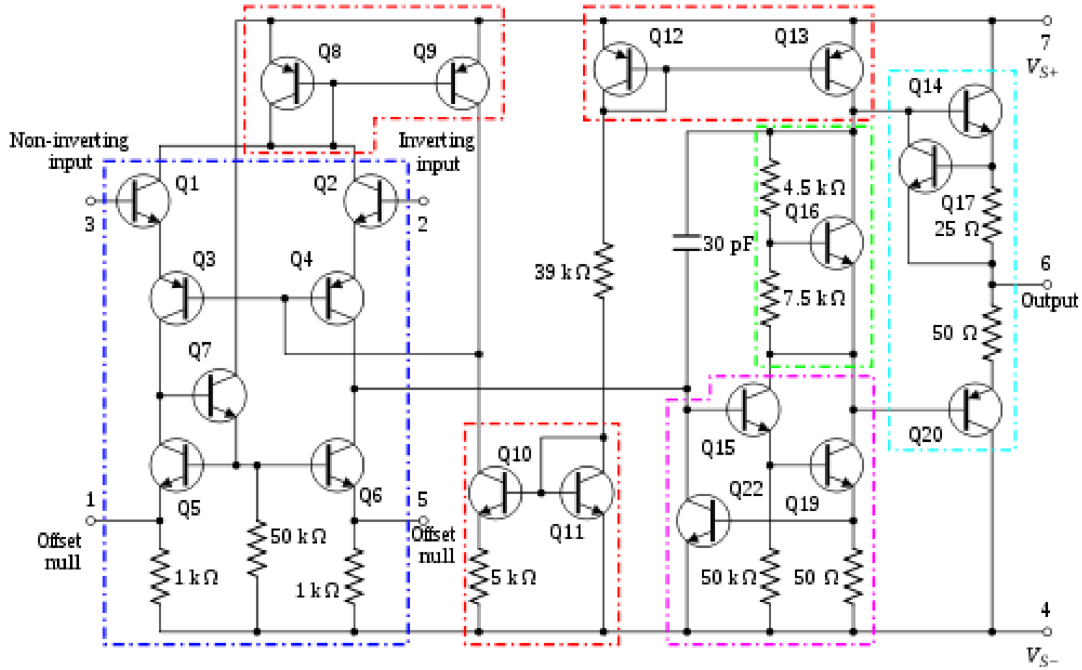
L'amplificateur opérationnel

Aussi dénommé : **Ampli op, AO, AOP**, ALI ou AIL

Historique : conçu initialement pour faire du calcul analogique
Maintenant : en circuit intégré avec performance excellente et bas coût

L'AO a toujours été un composant très important de l'électronique analogique, pour sa versatilité et sa grande facilité d'utilisation

L’amplificateur opérationnel



- un composant actif (alimentation nécessaire)
- Circuit intégré (composé surtout de transistors)
- Monolithique (= sur puce)
- Contenu dans un boîtier de circuit intégré

ISEN école d’ingénieurs

L'amplificateur opérationnel

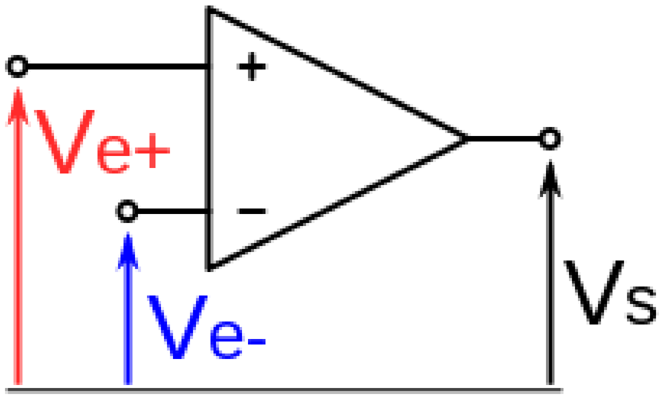
Quelques fonctions possibles :

- **amplification linéaire** (sortie est comme l'entrée, mais beaucoup plus grande)
- **Comparateur** (comparaison des tensions entre 2 entrées)
- **Décalage en tension**
- **Inversion de tension**
- **Conversion courant à tension** ou le contraire
- Fonction mathématiques : **intégration, dérivation**
- **Filtrage**

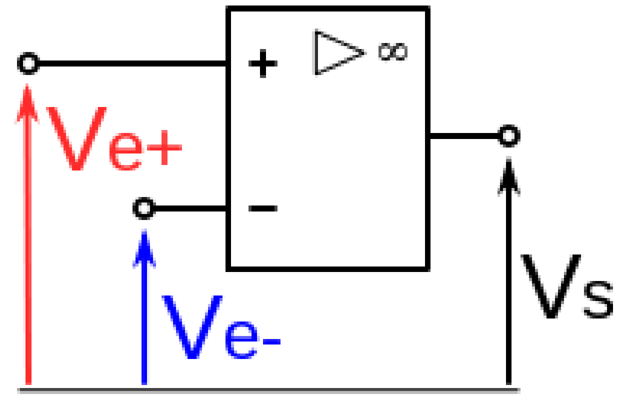
Fonctionne en courant continu ou alternatif

L'amplificateur opérationnel

Symboles

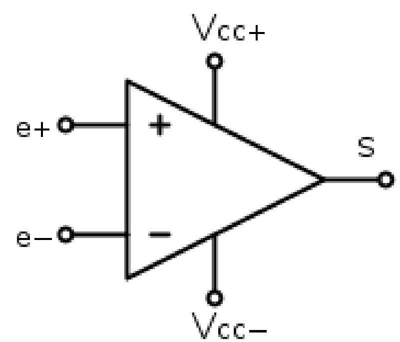


Notation américaine



Notation européenne

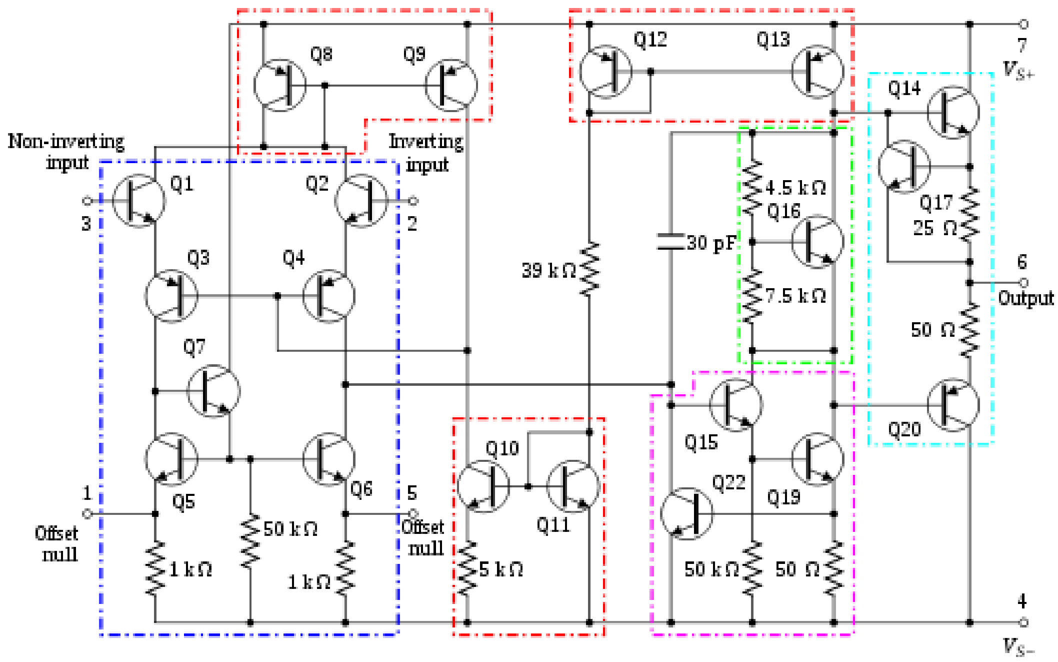
Parfois, deux pattes sont ajoutées, pour représenter les fils d'alimentation



Sommaire

- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

Modélisation : remarque préalable



AO composé de résistances, condensateur, transistor

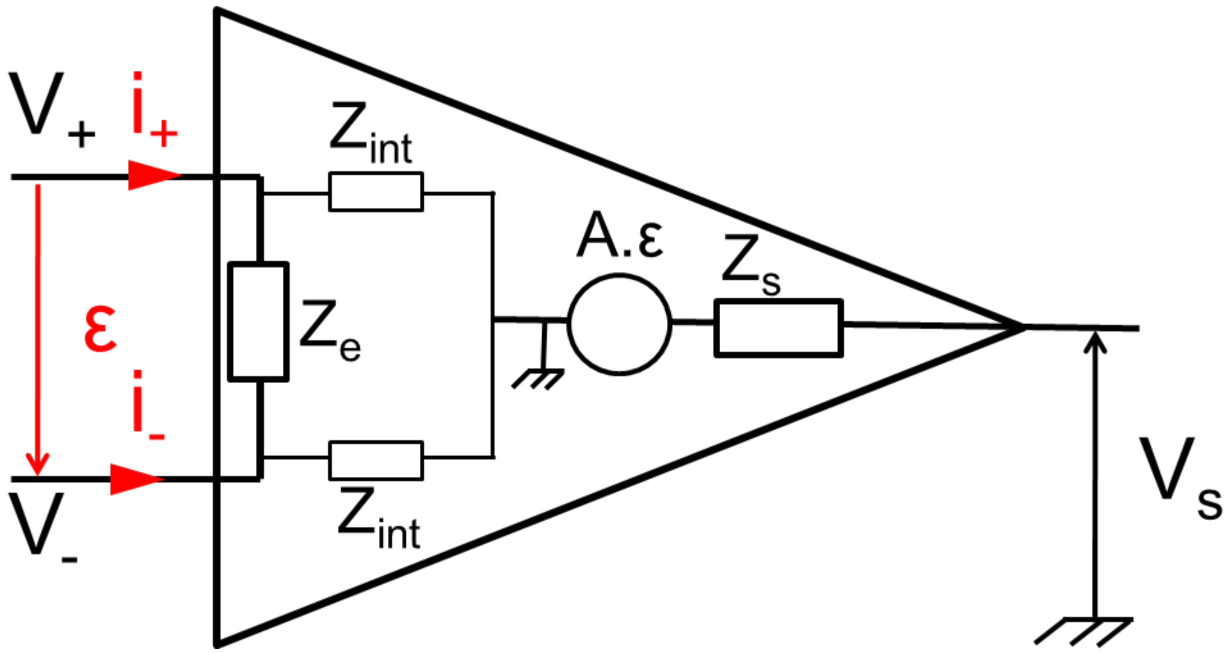
(Rmq. L'alimentation sert à polariser les transistors)

→ Modèle simplifié dans lequel l'AO est considéré comme une boîte noire avec certaines propriétés que l'on va voir maintenant

Modèle de l'amplificateur idéal

On suppose :

$Z_e \rightarrow \infty$
$Z_{int} \rightarrow \infty$
$A \rightarrow \infty$
$Z_s \rightarrow 0$
V_s valeur finie



1) $Z_s \rightarrow 0$ donc $A.\,\varepsilon = V_s$
donc $\varepsilon = V_s / A$
avec $A \rightarrow \infty$

donc $\boxed{\varepsilon \rightarrow 0}$

2) $Z_e \rightarrow \infty$ et $\varepsilon \rightarrow 0$

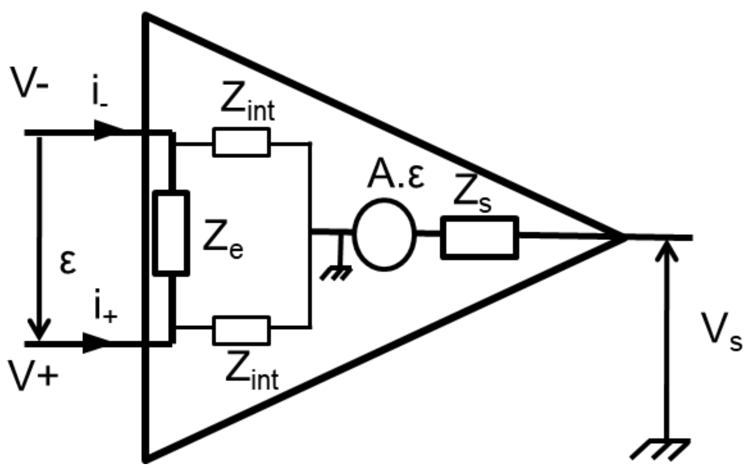
donc $\boxed{i_+ = i_- = 0}$

Modèle de l’amplificateur idéal

A retenir par cœur

AOP idéal

- ❑ $\varepsilon \rightarrow 0$ donc l’AOP tend à équilibrer les potentiels d’entrée : $V_+ = V_-$
- ❑ Les courants d’entrée tendent vers zéro : $i_+ = i_- = 0$

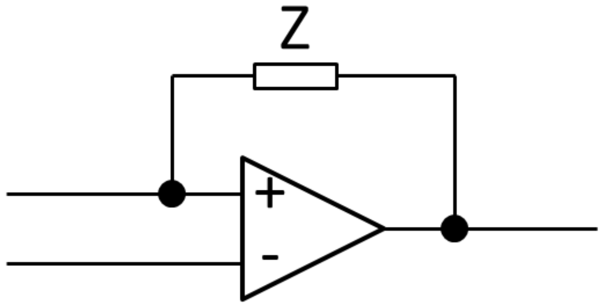


Sommaire

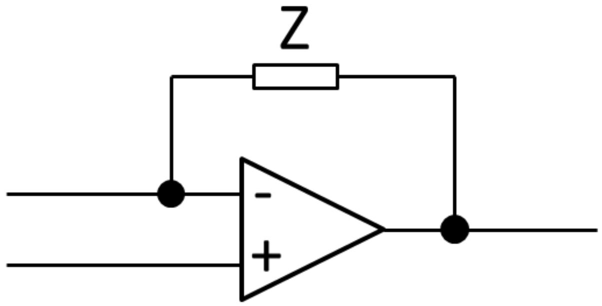
- Introduction
- Le modèle de l’amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

Définitions

On dit qu'il y a **réaction positive** quand la sortie est reliée à l'**entrée non inverseuse V+**.



On dit qu'il y a **contre-réaction** (ou réaction négative) quand la sortie est reliée à l'**entrée inverseuse V-**.



Conséquences importantes

On admet que :

- **Une contre-réaction assure un fonctionnement linéaire de l'AO : $\varepsilon \approx 0$ V**

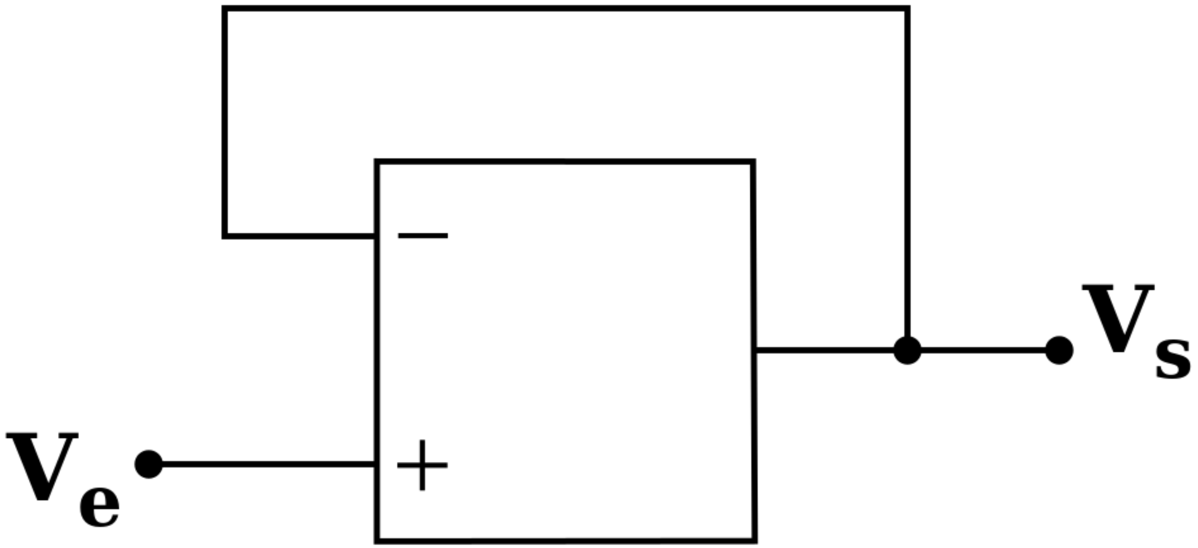
- **Une réaction positive provoque la saturation de l'AO**

Sommaire

- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

Suiveur

Souvent appelé étage tampon de tension (*Buffer* en anglais).



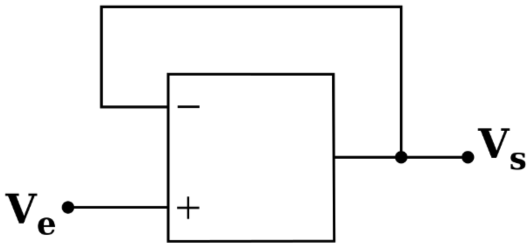
Que vaut V_S / V_e ? A quoi sert ce montage ?

Suiveur

Supposons que l'amplificateur opérationnel soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$
Il y a aussi une rétroaction négative (liaison physique entre sortie et entrée inverseuse), donc l'étude se fait en mode linéaire, ce qui engendre :

$$\varepsilon = V_+ - V_- = 0$$

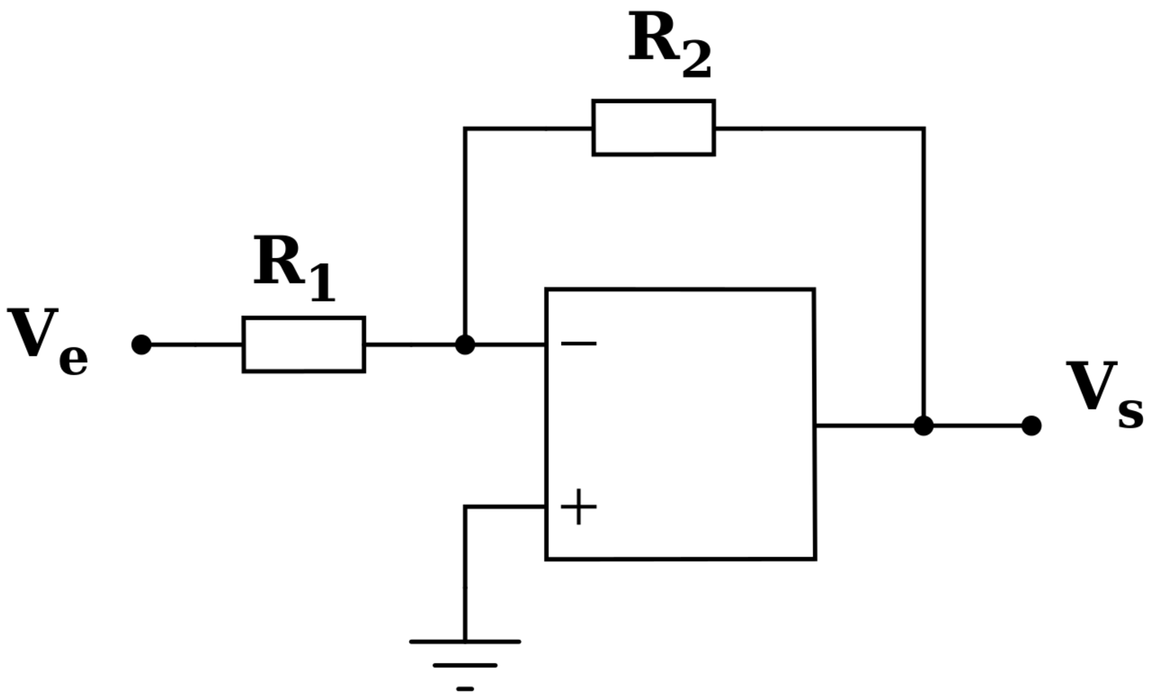
En effectuant une loi des mailles : $V_s = V_e + \varepsilon, or\ \varepsilon = 0\ donc\ V_s = V_e$



A quoi sert un suiveur ?

Grâce à son impédance d'entrée très importante et à sa faible impédance de sortie, il est destiné à permettre **l'adaptation d'impédance entre deux étages successifs d'un circuit**.
(Voir par exemple l'utilisation en filtrage, TD10 Ex2 Q1)

Amplificateur inverseur



En calculant Vs / Ve, montrer à quoi sert ce montage.

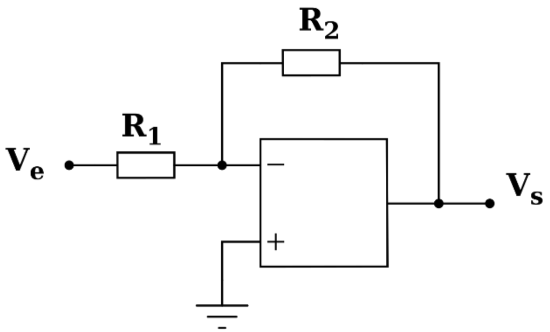
Amplificateur inverseur

Supposons que l'amplificateur opérationnel soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$
Il y a aussi une rétroaction négative (liaison physique entre sortie et entrée inverseuse), donc l'étude se fait en mode linéaire, ce qui engendre :

$$\varepsilon = V_+ - V_- = 0$$

Donc : $V_+ = 0$ et d'après le théorème de Millman : $V_- = \dfrac{\frac{V_e}{R_1}+\frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}}$

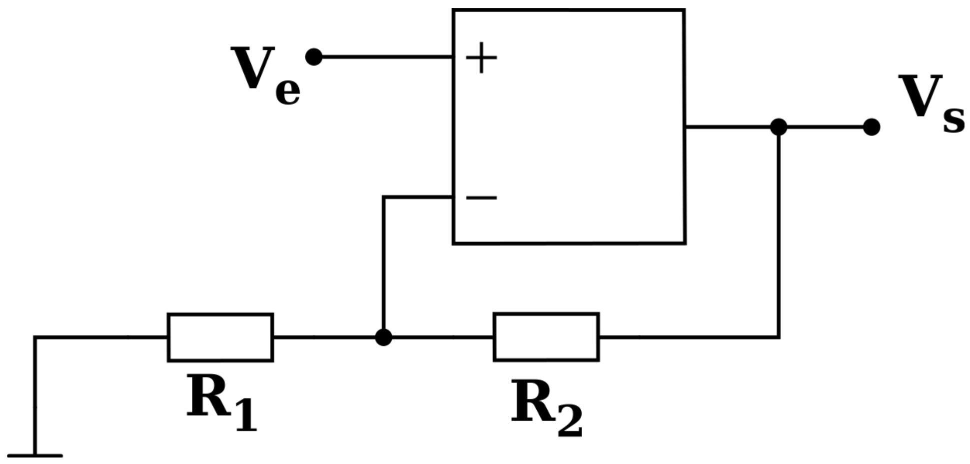
Or, comme $V_+ = V_-$ on a : $0 = \dfrac{V_e}{R_1} + \dfrac{V_s}{R_2}$



Donc $V_s = -V_e \dfrac{R_2}{R_1}$

Inversion du signal d'entrée et amplification par un facteur $\dfrac{R_2}{R_1}$

Amplificateur non inverseur



V_s / V_e ?

Contre réaction → Régime linéaire → $V_- = V_+$

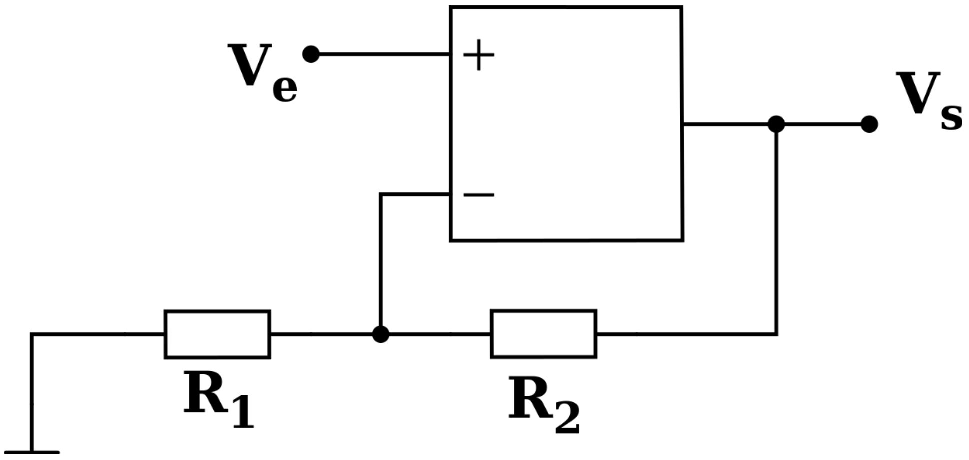
Le signal Ve qu'on veut amplifier est sur le + donc $V_+ = V_e$

Théorème du diviseur de tension : $V_- = V_S \frac{R_1}{R_1 + R_2}$

Amplificateur non inverseur

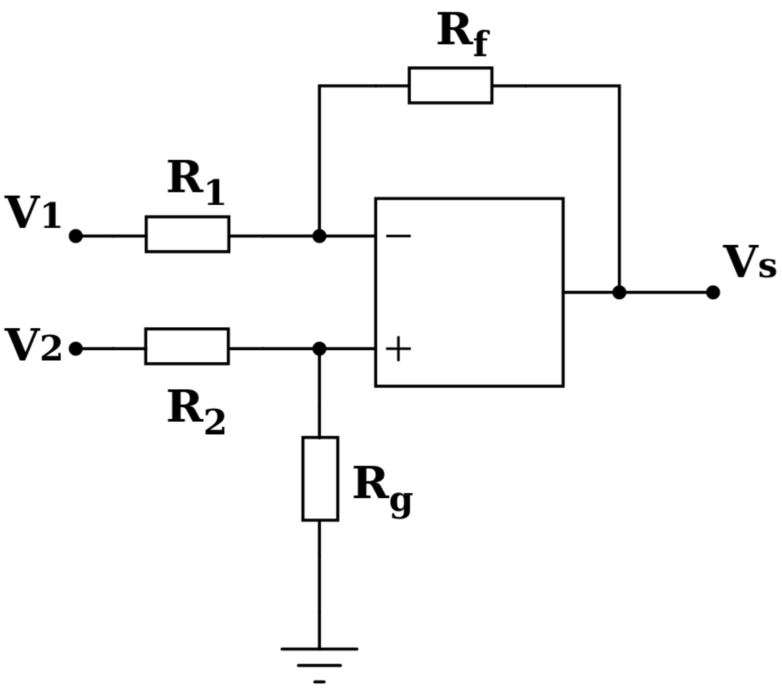
En combinant on obtient :

$$\frac{V_S}{V_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Ce dispositif permet donc bien d'amplifier la tension Vs par rapport à la tension Ve d'un facteur $1+R_2/R_1$

Amplificateur différentiel / soustracteur



On peut montrer que

$$V_s = \frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g}\frac{R_g}{R_1}V_2 - \frac{R_f}{R_1}V_1$$

- Quand $R_1 = R_2$ et $R_f = R_g$ => amplificateur de différence dont le gain est $\frac{R_f}{R_1}$
- Quand $R_1 = R_f$ et $R_2 = R_g$ => soustracteur

ISEN école d'ingénieurs

Amplificateur différentiel / soustracteur

Calcul des potentiels V_+ et V_- :

- V_+ est obtenu grâce au pont diviseur de tension à vide : $V_+ = \frac{R_g}{R_2+R_g} V_2$
- V_- est obtenu grâce au théorème de Millman :

$$V_- = \frac{\frac{V_s}{R_f} + \frac{V_1}{R_1}}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1}} = \frac{V_1 R_f + V_s R_1}{R_1 + R_f}$$

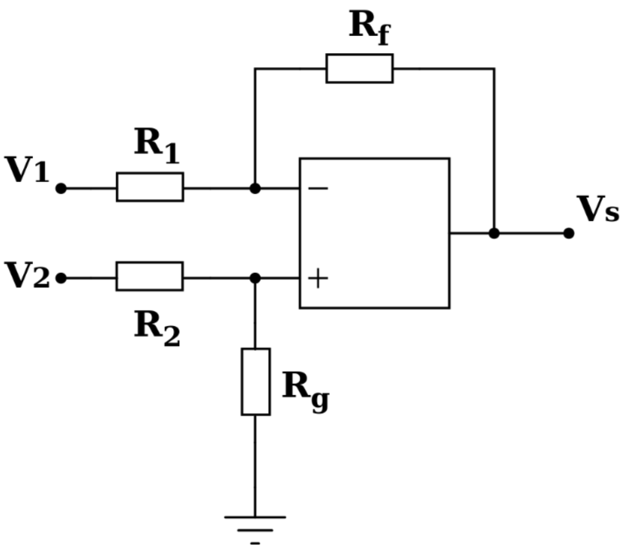
- Comme :

$$V_+ = V_-$$

$$\frac{R_g}{R_2 + R_g} V_2 = \frac{V_1 R_f + V_s R_1}{R_1 + R_f}$$

$$\frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g} R_g V_2 = V_1 R_f + V_s R_1$$

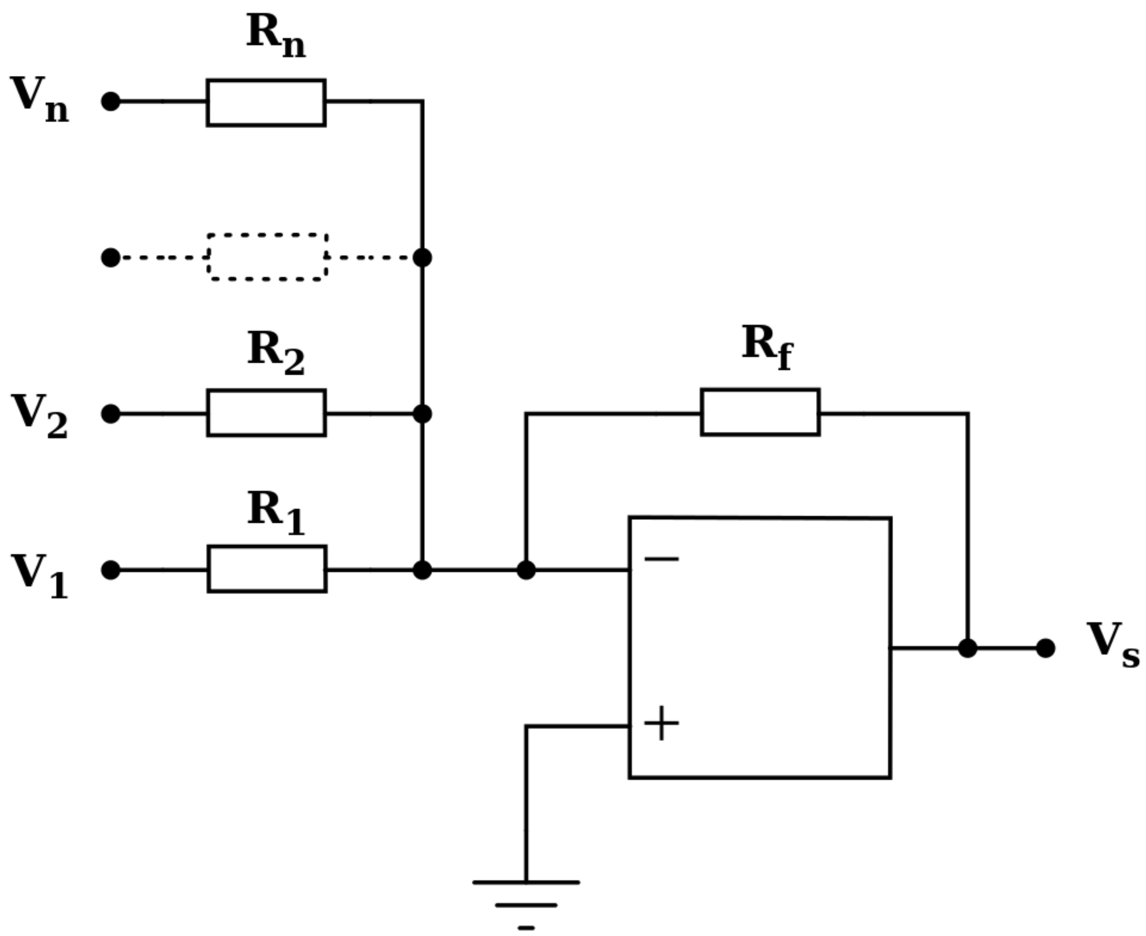
$$\frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g} \frac{R_g}{R_1} V_2 - V_1 R_f = V_s R_1$$



- On obtient le résultat escompté :

$$V_s = \frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g} \frac{R_g}{R_1} V_2 - \frac{R_f}{R_1} V_1$$

Sommateur inverseur



Sommateur inverseur

Application du théorème de Millman en V^-

$$V^- = \frac{\frac{V_s}{R_f} + \sum_{n\geqslant 1} \frac{V_n}{R_n}}{\frac{1}{R_f} + \sum_{n\geqslant 1} \frac{1}{R_n}}$$

Or :

$$V^+ = 0 = V^-$$

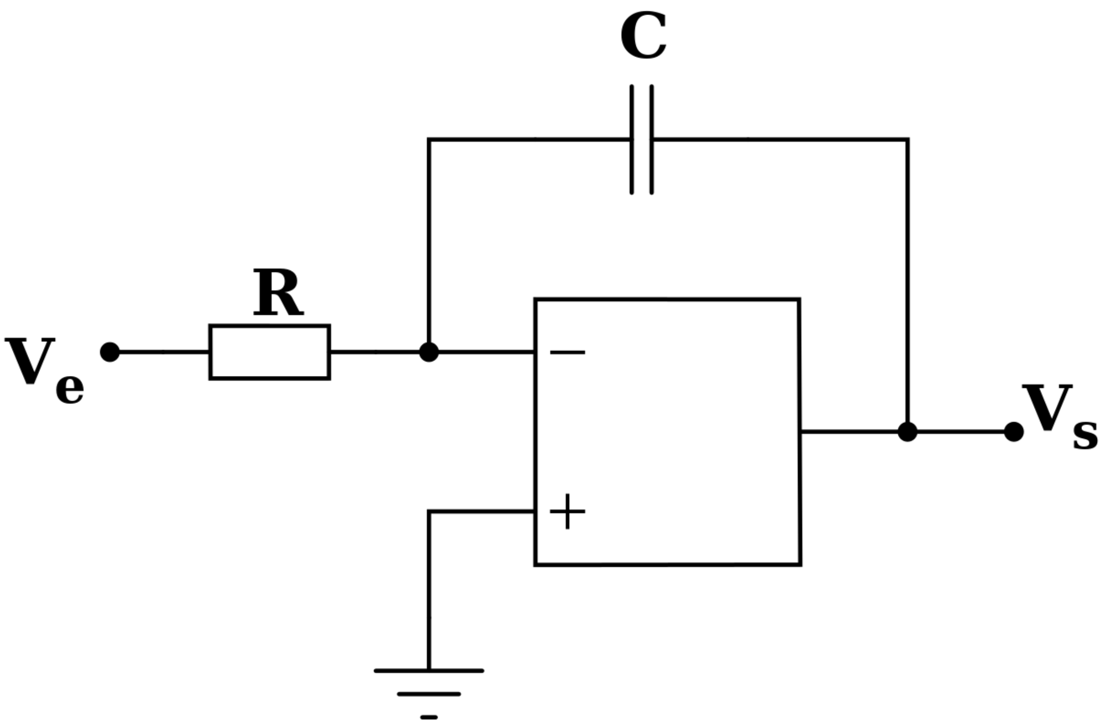
Ainsi :

$$V^- = \frac{V_s}{R_f} + \sum_{n\geqslant 1} \frac{V_n}{R_n} = 0$$
$$\frac{V_s}{R_f} = -\sum_{n\geqslant 1} \frac{V_n}{R_n}$$

On obtient le résultat escompté :

$$V_s = -R_f \sum_{n\geqslant 1} \frac{V_n}{R_n}$$

Intégrateur



Que vaut Vs = f(Ve), en notation réelle ?

Intégrateur

Supposons que l'amplificateur opérationnel soit parfait, alors $i^+ = i^- = 0$ et que $V^+ = V^- = 0$. Le courant I traversant R et C est donné par :

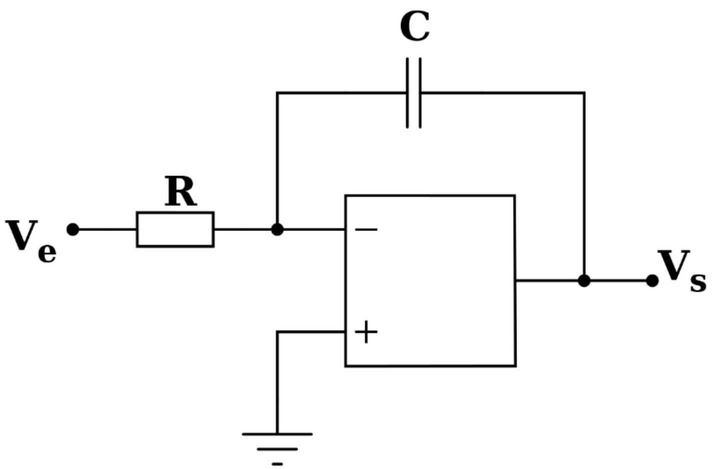
$$I(t) = \frac{V_e(t)}{R}$$

Il peut aussi être exprimé en fonction de la tension de sortie :

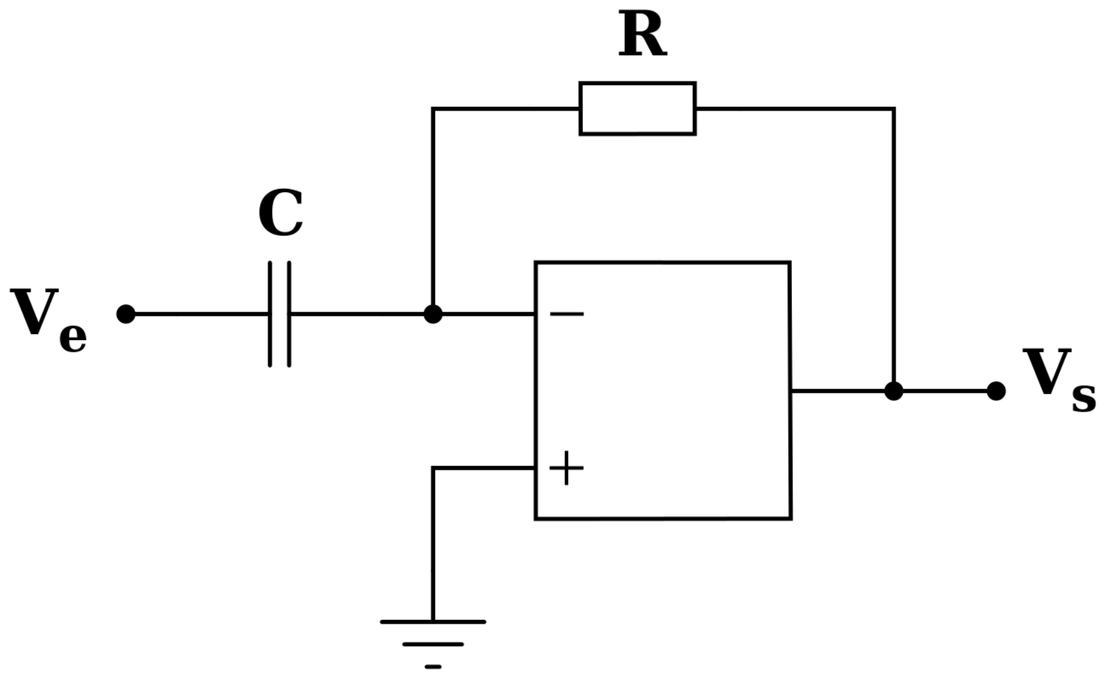
$$I(t) = -C\frac{dV_s(t)}{dt}$$

En utilisant les deux équations précédentes on obtient :

$$V_s(t) = -\left(\frac{1}{RC}\right)\int V_e(t)dt$$



Dérivateur



Que vaut Vs = f(Ve), en notation réelle ?

Dérivateur

Supposons que l'amplificateur opérationnel soit parfait, alors $i^+ = i^- = 0$ et que $V^+ = V^- = 0$. Le courant I traversant R et C est donné par :

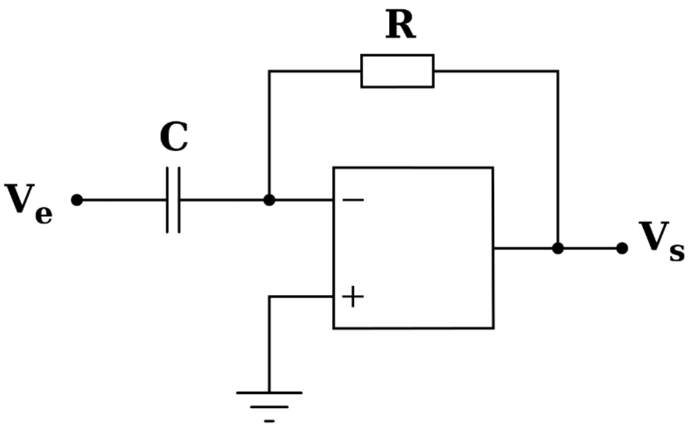
$$I(t) = -\frac{V_s(t)}{R}$$

Il peut aussi être exprimé en fonction de la tension d'entrée :

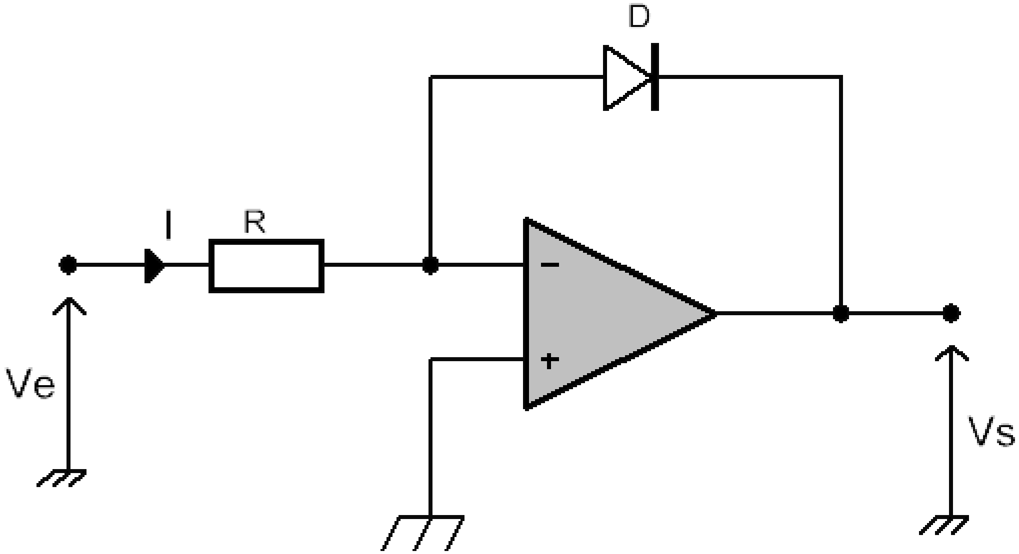
$$I(t) = C\frac{dV_e(t)}{dt}$$

En utilisant les deux équations précédentes on obtient :

$$V_s(t) = -RC\frac{dV_e(t)}{dt}$$



Amplificateur logarithmique



Le courant traversant une diode est : $i_D = I_S e^{\frac{qV_D}{kT}}$

On peut démontrer que : $V_s = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V_e}{I_S R}\right)$

Amplificateur logarithmique

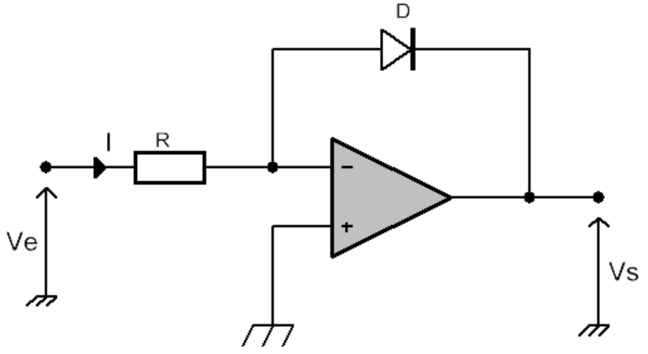
Supposons que l'AOP soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$ et $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$

La tension aux bornes de la diode est : $V_d = V_- - V_s = -V_s$

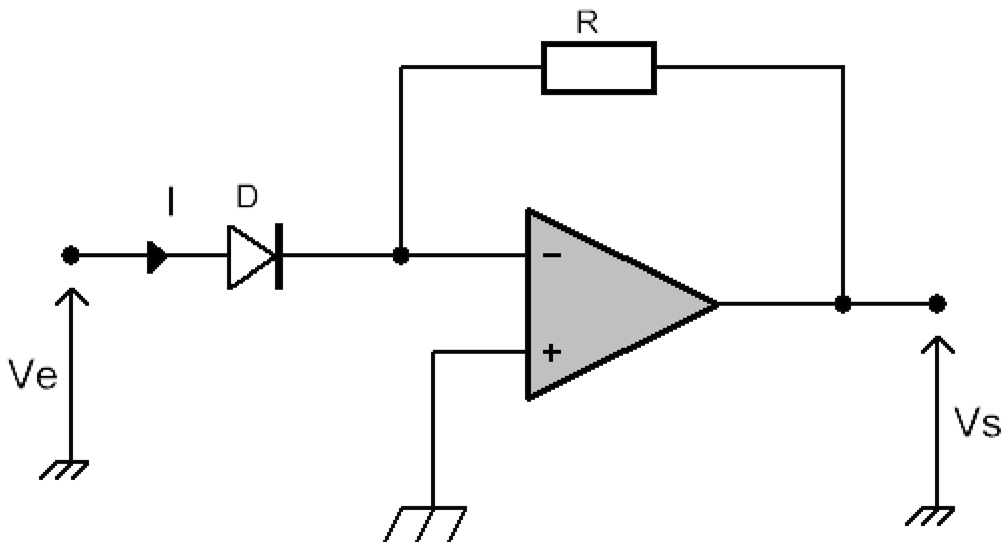
Or : $V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I}{I_S}\right)$

Et, d'après la loi d'Ohm, on a : $I = \frac{V_e}{R}$

On en déduit alors : $V_s = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V_e}{I_S R}\right)$



Amplificateur anti-logarithmique



Le courant traversant une diode est : $i_D = I_S e^{\frac{qV_D}{kT}}$

On peut démontrer que : $V_s = -RI_S e^{\frac{qV_D}{kT}}$

Amplificateur anti-logarithmique

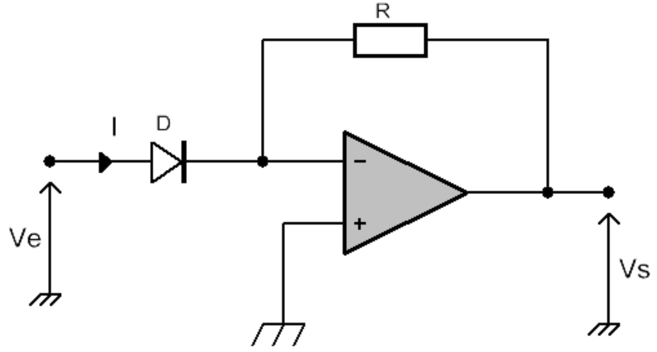
Supposons que l'AOP soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$ et $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$

La tension aux bornes de la diode est : $V_d = V_e - V_- = V_e$

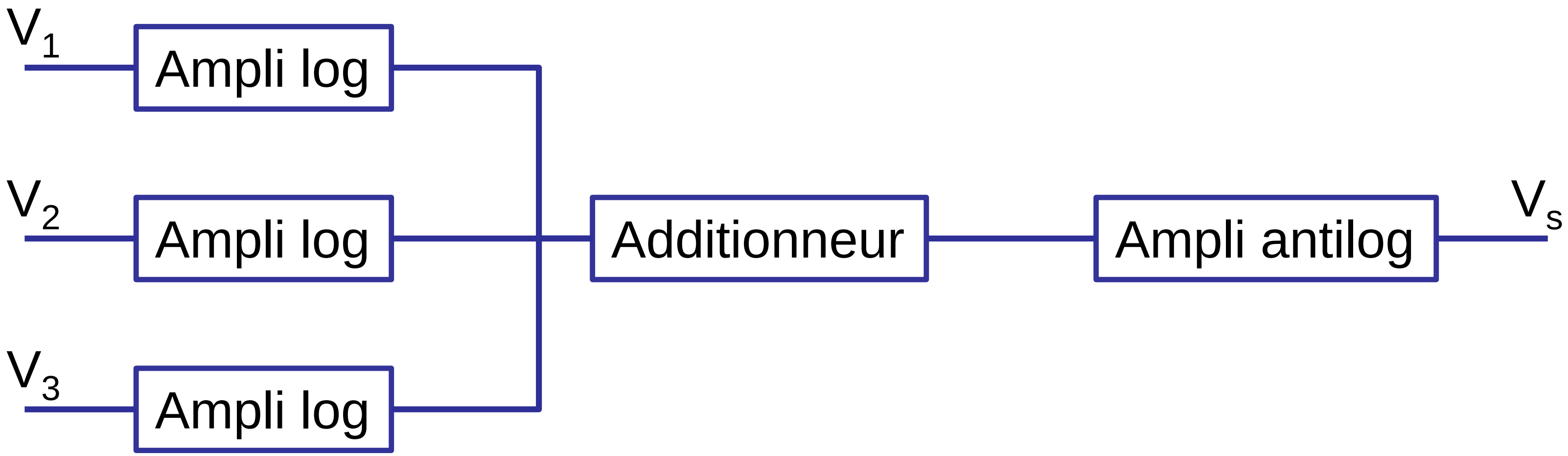
Or : $\mathrm{I} = I_S e^{\frac{qV_D}{kT}}$

Et, d'après la loi d'Ohm, on a : $I = \frac{-V_S}{R}$

On en déduit alors : $V_s = -RI_s e^{\frac{qV_D}{kT}}$



Multiplicateur analogique



On peut démontrer que : $V_s = KV_1V_2V_3$

Multiplicateur analogique

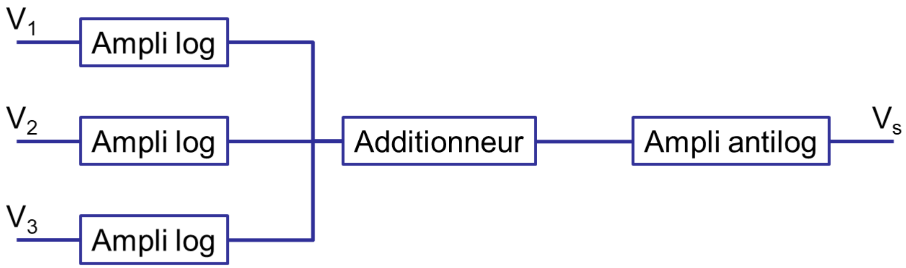
Supposons que les AOP soient parfaits

La tension de sortie d'un ampli log vaut : $V_{out,i} = -\frac{kT}{q}\ln\frac{V_i}{RI_S}\ avec\ i = \{1,2,3\}$

En supposant que les résistances soient identiques, la tension de sortie de l'additionneur vaut :

$$V_{add} = \frac{kT}{q}\sum_{i=1}^{3}\ln\frac{V_i}{RI_s} = \frac{kT}{q}\ln\frac{V_1V_2V_3}{(RI_s)^3}$$

La tension Vs vaut alors : $V_s = -RI_s e^{\frac{qV_{add}}{kT}} = -\frac{V_1V_2V_3}{(RI_s)^2} = KV_1V_2V_3$



Sommaire

- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
  - Fonctionnement en mode linéaire
  - Fonctionnement en mode non-linéaire

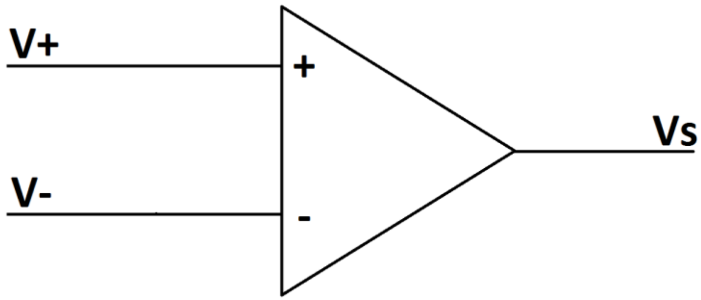
Principe

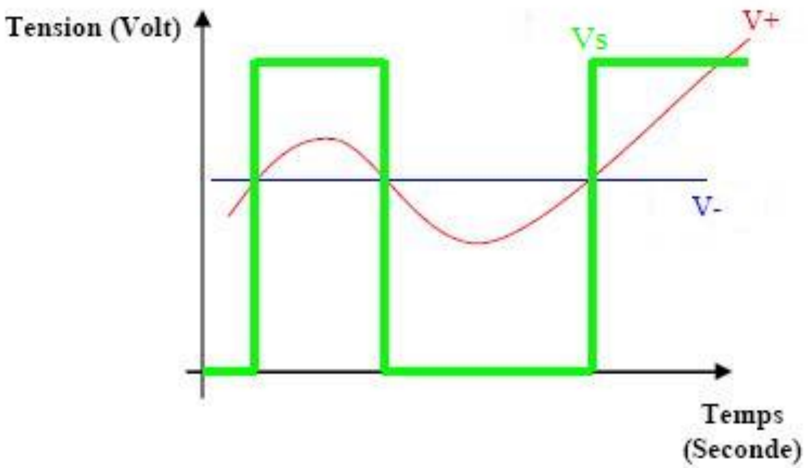
- Pas de circuit de contre-réaction

- Conséquences :
  - Si $\varepsilon > 0$ alors $V_s = +V_{cc}$
  - Si $\varepsilon < 0$ alors $V_s = -V_{cc}$

- Le fonctionnement n'est pas linéaire

Comparateur de tension

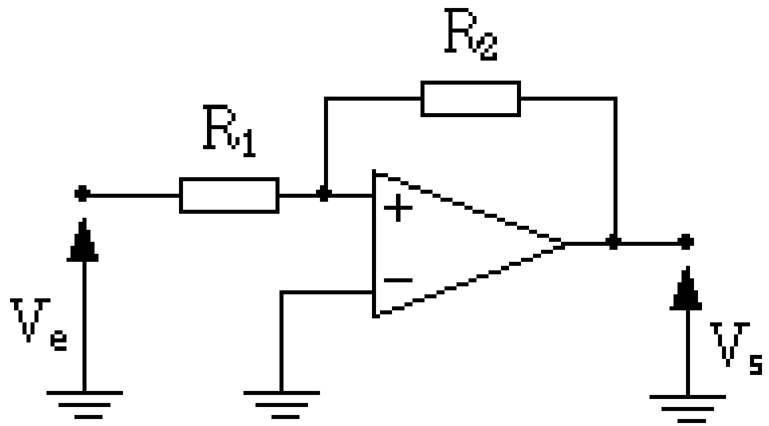




- Si V+ > V- alors Vs = Vcc
- Si V+ < V- alors Vs = -Vcc

Remarque : si V- vaut zéro alors nous obtenons un détecteur de signe.

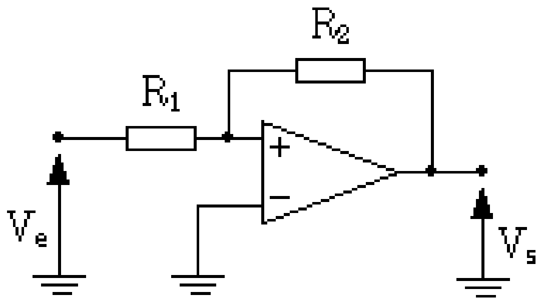
Comparateur à seuil à hystérésis



- Exprimer V_+
- Quelle est la relation entre Ve et Vs lorsque $V_+ = 0$?
- Quels sont les seuils de basculement V_T^+ (de $V_s = -V_{cc}$ à $V_s = +V_{cc}$) et V_T^- (de $V_s = +V_{cc}$ à $V_s = -V_{cc}$) ?

Comparateur à seuil à hystérésis

- D'après le théorème de Millman : $V_+ = \dfrac{\frac{V_e}{R_1}+\frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} = \dfrac{R_2V_1+R_1V_s}{R_1+R_2}$

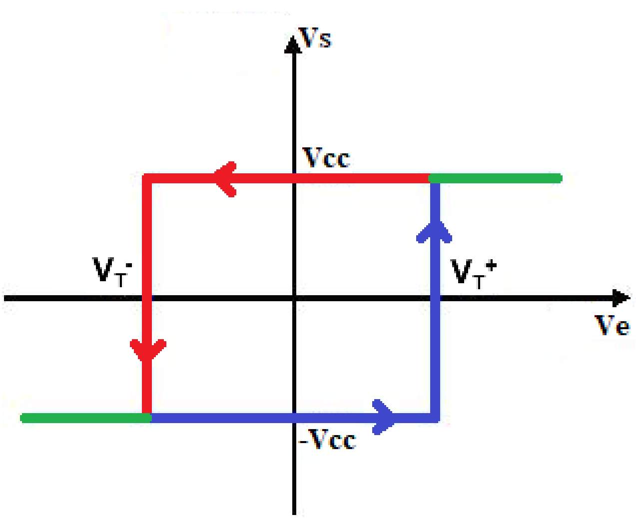


- Si $V_+ = 0$, alors : $V_e = -\dfrac{R_1}{R_2}V_s\ avec\ V_s = \pm V_{cc}$

- **Si $V_s = V_{cc}$**, alors : $V_+ = \dfrac{R_2V_1+R_1V_{cc}}{R_1+R_2}$

Or pour que V_s bascule en $-V_{cc}$, il faut : $V_+ < 0$

D'où : $V_e < -\dfrac{R_1}{R_2}V_{cc} \Longrightarrow V_T^- = -\dfrac{R_1}{R_2}V_{cc}$



- **Si $V_s = -V_{cc}$**, alors : $V_+ = \dfrac{R_2V_1-R_1V_{cc}}{R_1+R_2}$

Or pour que V_s bascule en $-V_{cc}$, il faut : $V_+ < 0$

D'où : $V_e > \dfrac{R_1}{R_2}V_{cc} \Longrightarrow V_T^+ = \dfrac{R_1}{R_2}V_{cc}$

Récapitulatif (A savoir)

- Modèle de l’AOP idéal et utilisation
- Utilisation de l’AOP dans le domaine linéaire : contre-réaction
- Principe de fonctionnement des comparateurs

Fin du chapitre 5