



Chapitre 5

Amplificateur opérationnel

Justine Philippe

JUNIA ISEN

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

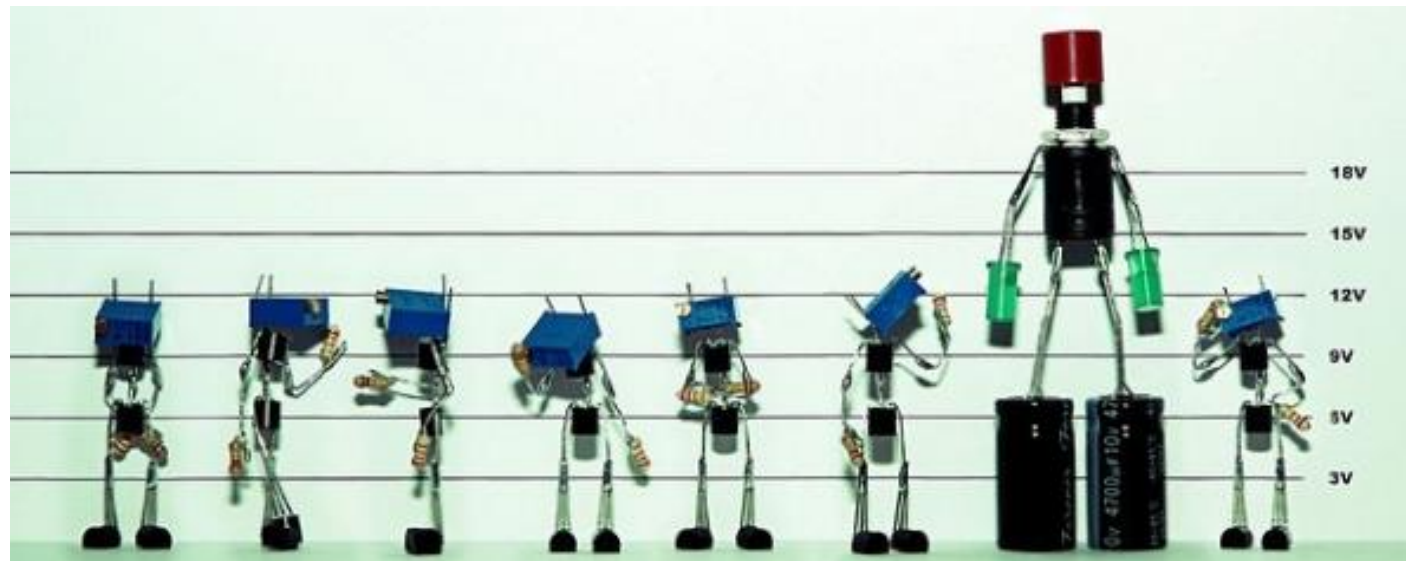
Sommaire

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

Introduction

Les composants de base en électronique :

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



L'amplificateur opérationnel

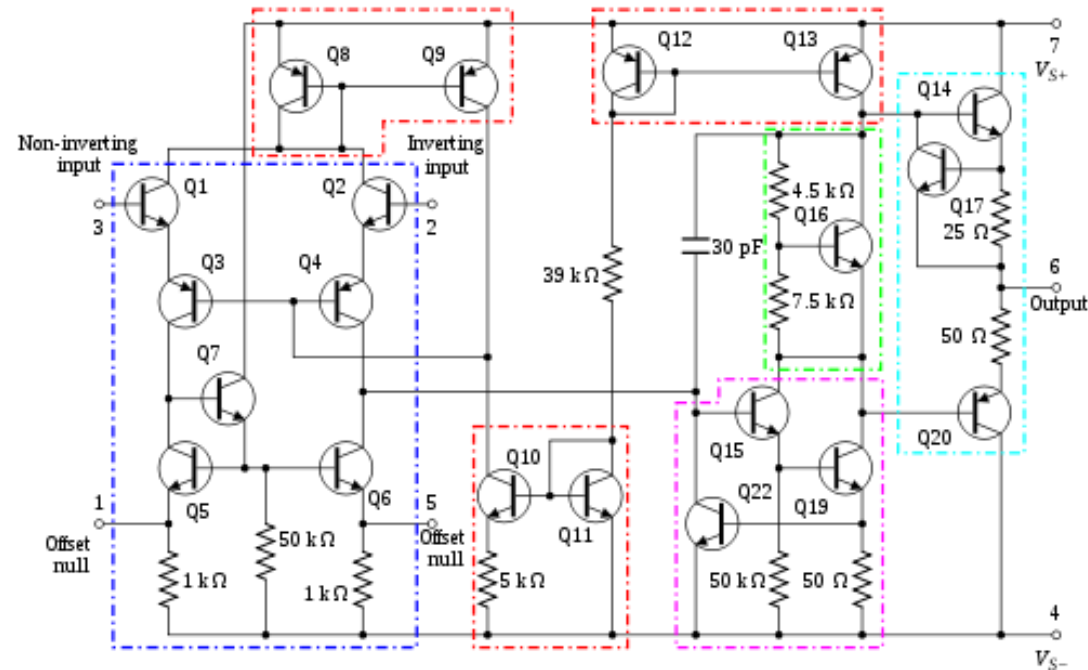
Aussi dénommé : **Ampli op**, **AO**, **AOP**, ALI ou AIL

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

L'amplificateur opérationnel

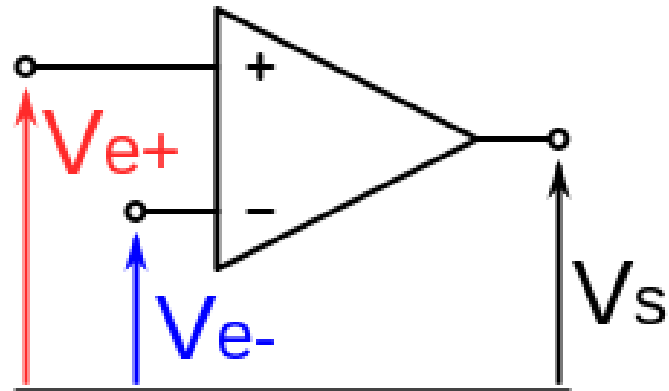
Quelques fonctions possibles :

- **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**

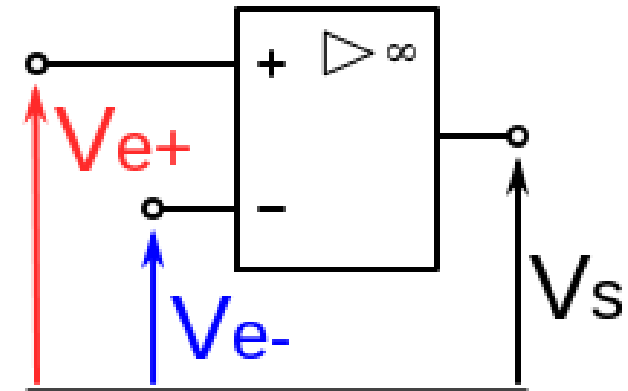
Fonctionne en courant continu ou alternatif

L'amplificateur opérationnel

Symboles

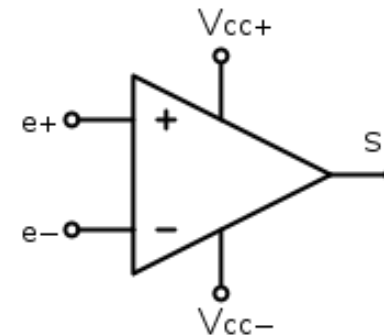


Notation américaine



Notation européenne

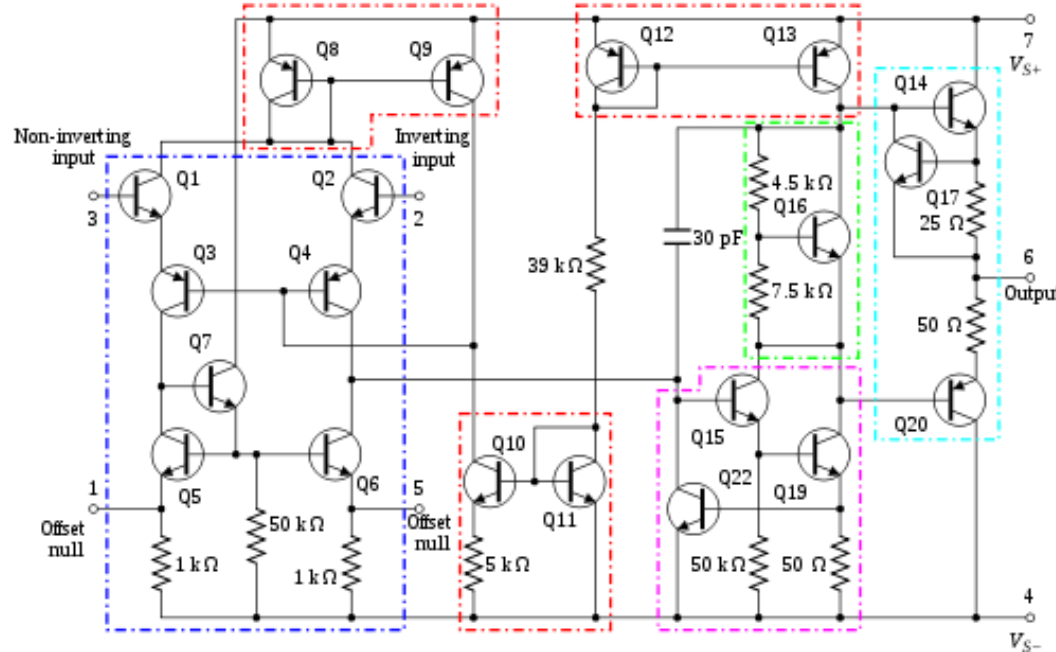
Parfois, deux pattes sont ajoutées,
pour représenter les fils d'alimentation



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 : remarques préalables



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 :

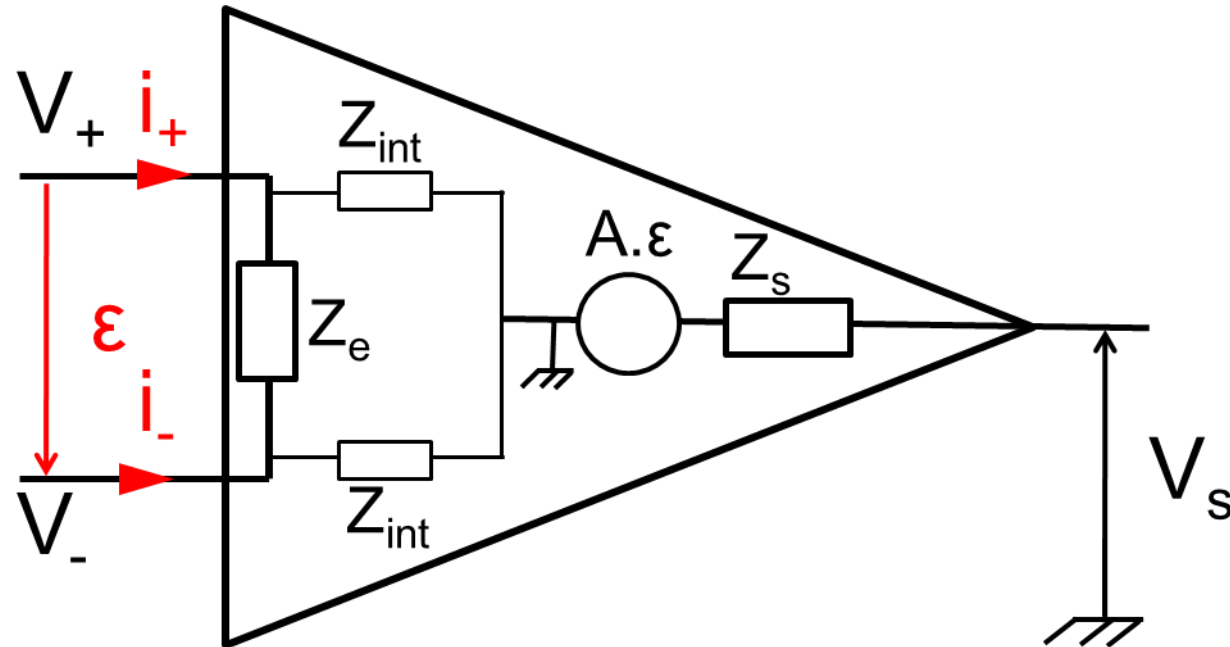
$$Z_e \rightarrow \infty$$

$$Z_{int} \rightarrow \infty$$

$$A \rightarrow \infty$$

$$Z_s \rightarrow 0$$

V_s valeur finie



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

donc $\varepsilon \rightarrow 0$

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

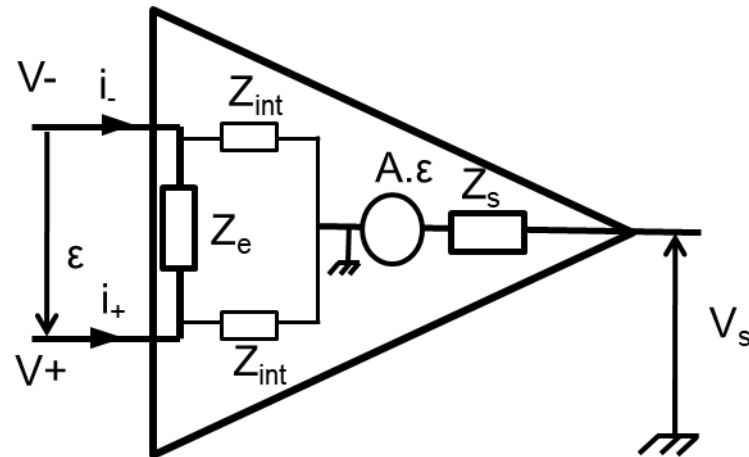
donc $i_+ = i_- = 0$

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 : $i_+ = i_- = 0$

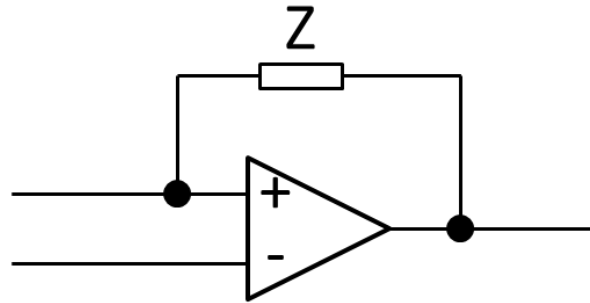


Sommaire

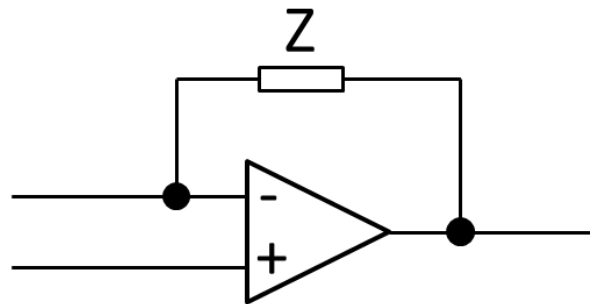
- Introduction
- Le modèle de l'amplificateur idéal
- Réaction positive et contre-réaction
- Montages de base
 - ✓ Fonctionnement en mode linéaire
 - ✓ Fonctionnement en mode non-linéaire

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_-** .



Définitions

On admet que :

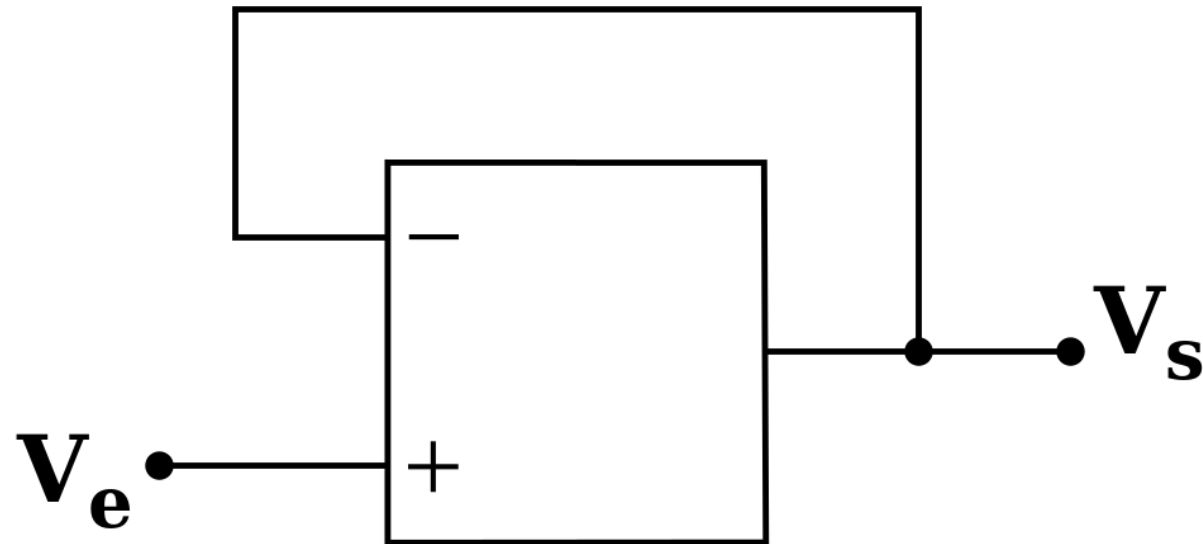
- **Une contre-réaction assure un fonctionnement linéaire de l'AO : $\varepsilon \approx 0 \text{ V}$**
- **Une réaction positive provoque la saturation de l'AO**

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 ?

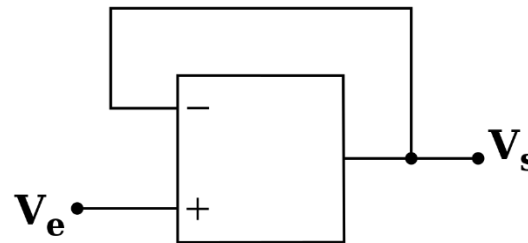
Suiveur

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 :

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

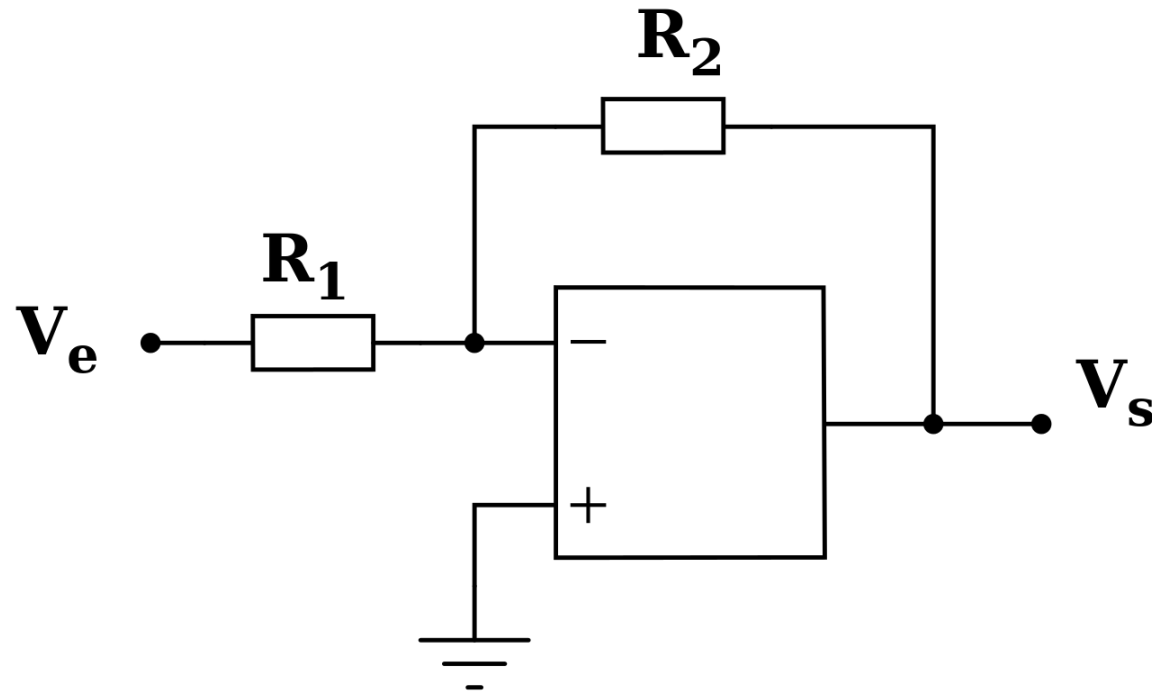
En effectuant une loi des mailles : $V_s = V_e + \varepsilon$, or $\varepsilon = 0$ donc $V_s = V_e$



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.**

Amplificateur inverseur



En calculant V_s / V_e , 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 :

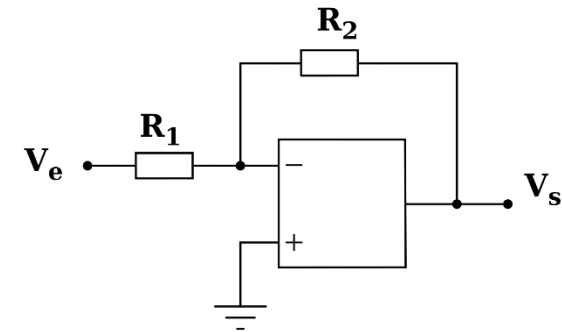
$$\varepsilon = V_+ - V_- = 0$$

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

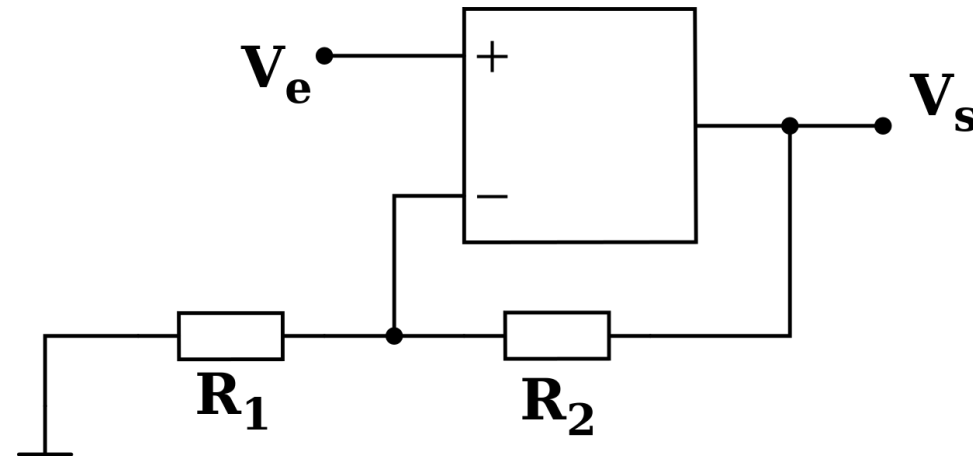
Or, comme $V_+ = V_-$ on a : $0 = \frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}$

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

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



Amplificateur non inverseur



$$V_s / V_e ?$$

Contre réaction \rightarrow Régime linéaire $\rightarrow V_- = V_+$

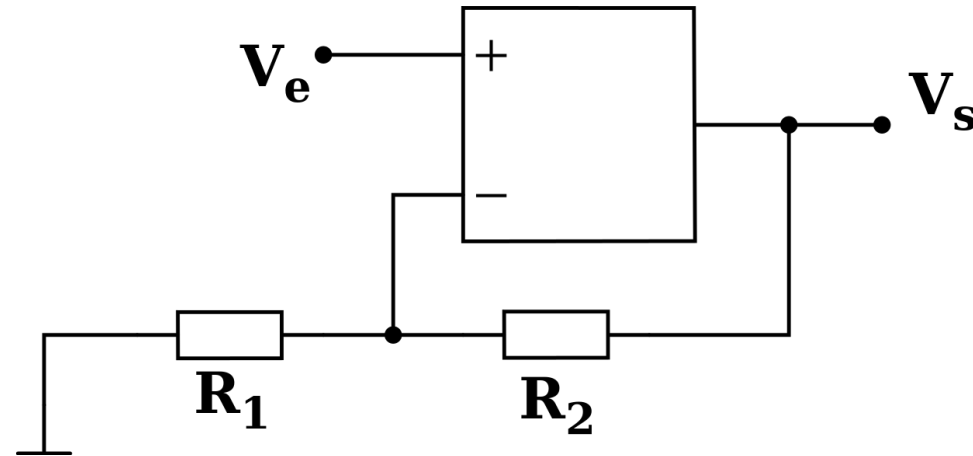
Le signal V_e qu'on veut amplifier est sur le + donc $V_+ = V_e$

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

Amplificateur non inverseur

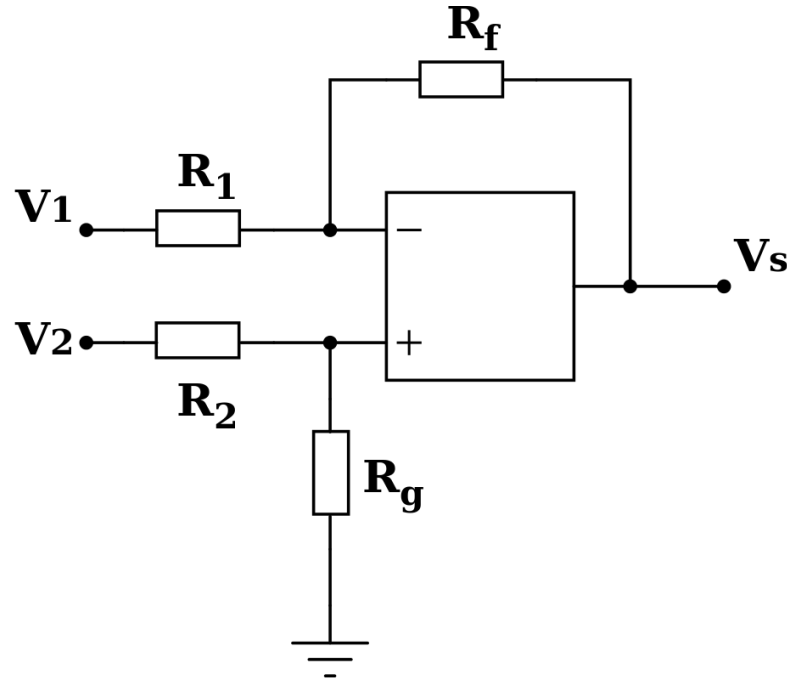
En combinant on obtient :

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



Ce dispositif permet donc bien d'amplifier la tension V_s par rapport à la tension V_e 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 $R_f = R_g \Rightarrow$ amplificateur de différence dont le gain est $\frac{R_f}{R_1}$
- Quand $R_1 = R_f$ et $R_2 = R_g \Rightarrow$ soustracteur

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 :

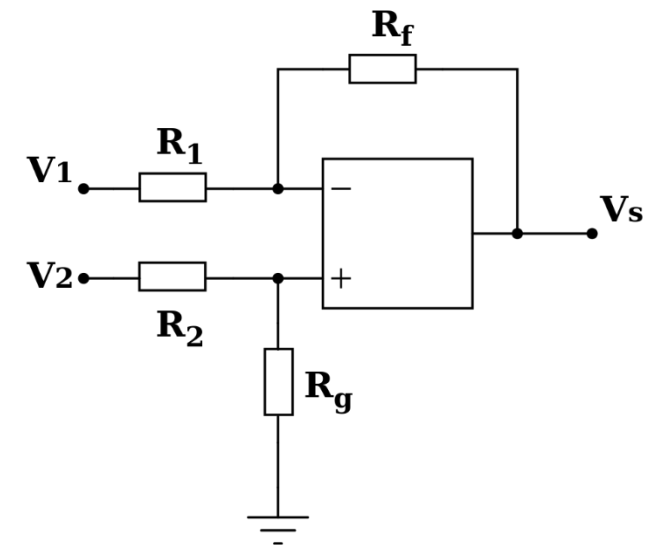
$$V_- = \frac{\frac{V_s}{R_f} + \frac{V_1}{R_1}}{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_1}} = \frac{V_1 R_f + V_s R_1}{R_1 + R_f}$$

- Comme :

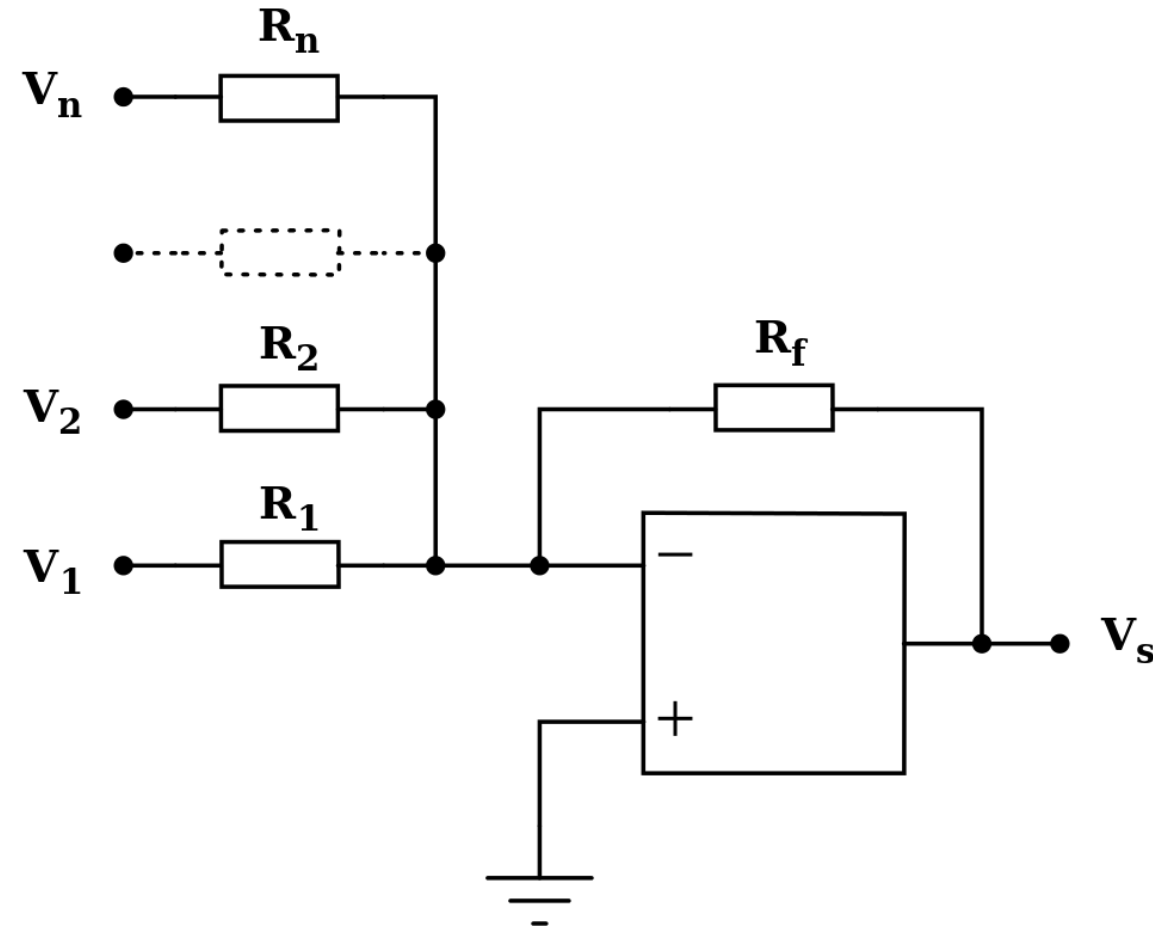
$$\begin{aligned} V_+ &= V_- \\ \frac{R_g}{R_2 + R_g} V_2 &= \frac{V_1 R_f + V_s R_1}{R_1 + R_f} \\ \frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g} R_g V_2 &= V_1 R_f + V_s R_1 \\ \frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_g} \frac{R_g}{R_1} V_2 - V_1 R_f &= V_s R_1 \end{aligned}$$

- On obtient le résultat escompté :

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



Sommeur inverseur



Sommeur inverseur

Application du théorème de Millman en V^-

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

Or :

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

Ainsi :

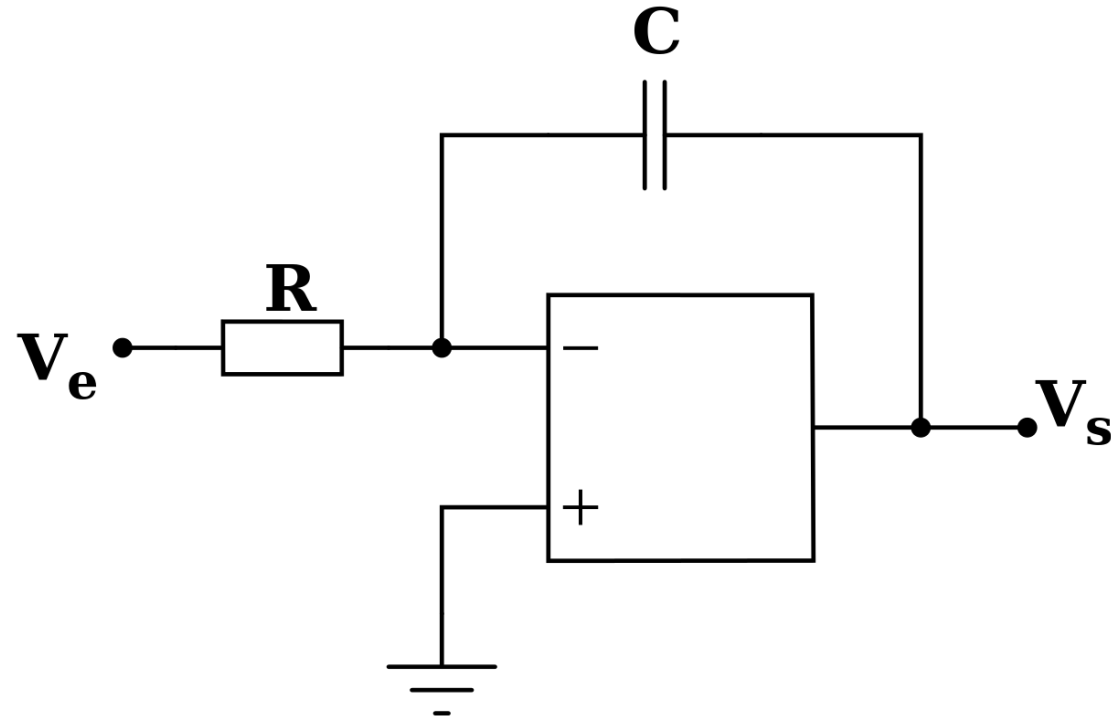
$$V^- = \frac{V_s}{R_f} + \sum_{n \geq 1} \frac{V_n}{R_n} = 0$$

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

On obtient le résultat escompté :

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

Intégrateur



Que vaut $V_s = f(V_e)$, 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 :

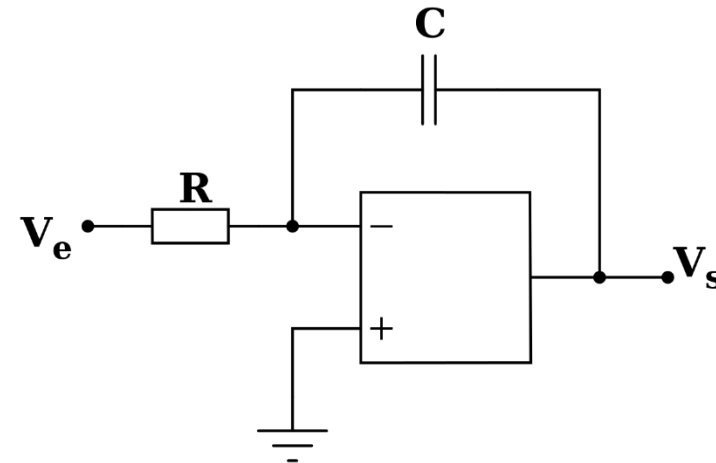
$$I(t) = \frac{V_e(t)}{R}$$

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

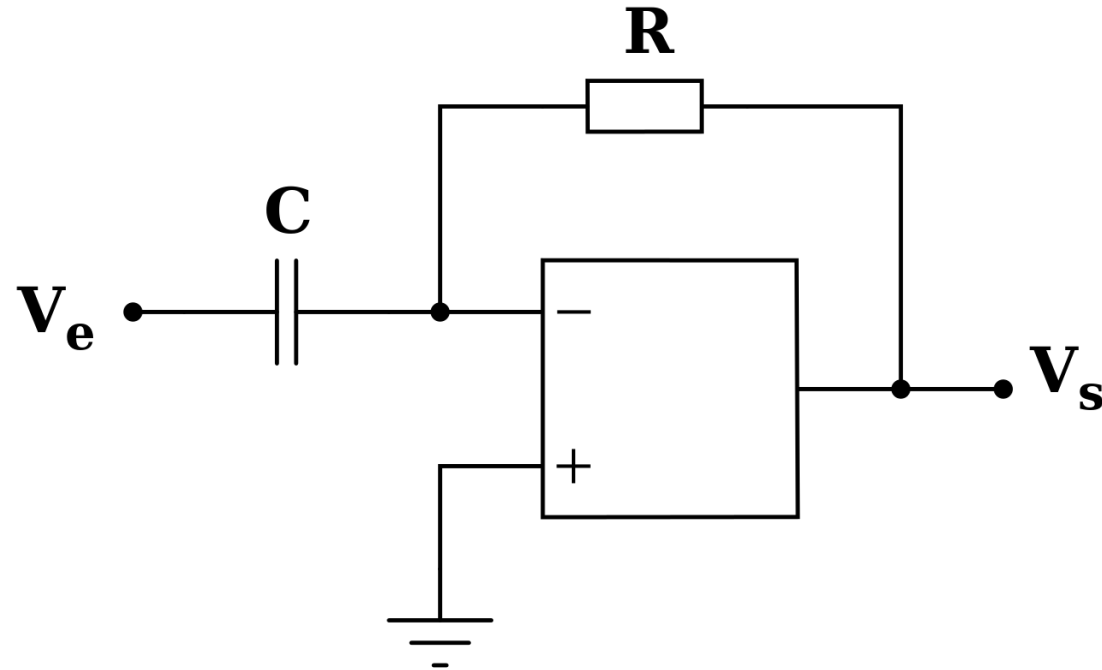
$$I(t) = -C \frac{dV_s(t)}{dt}$$

En utilisant les deux équations précédentes on obtient :

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



Dérivateur



Que vaut $V_s = f(V_e)$, 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 :

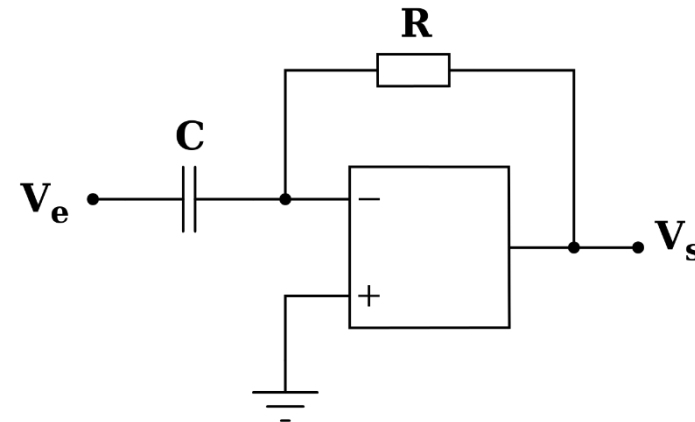
$$I(t) = -\frac{V_s(t)}{R}$$

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

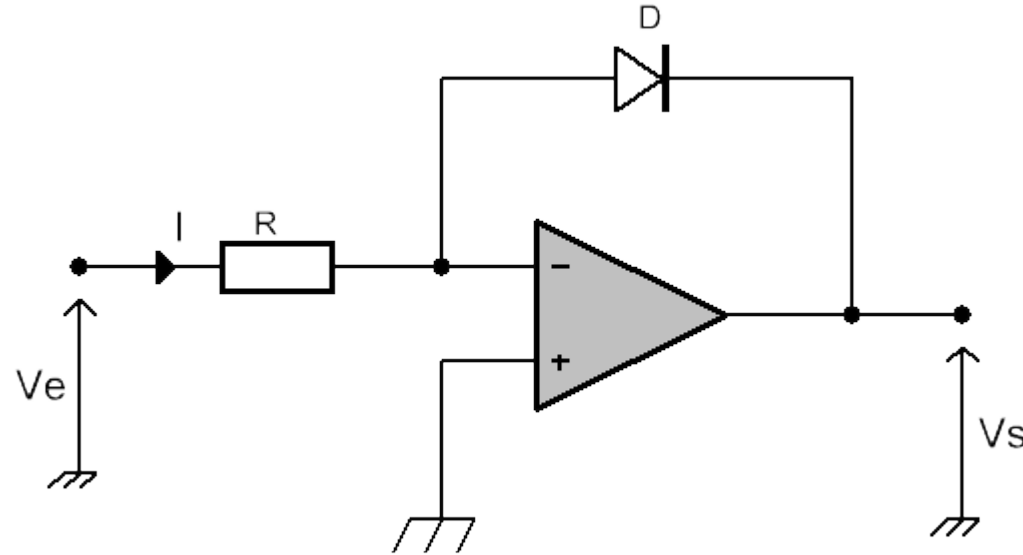
$$I(t) = C \frac{dV_e(t)}{dt}$$

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

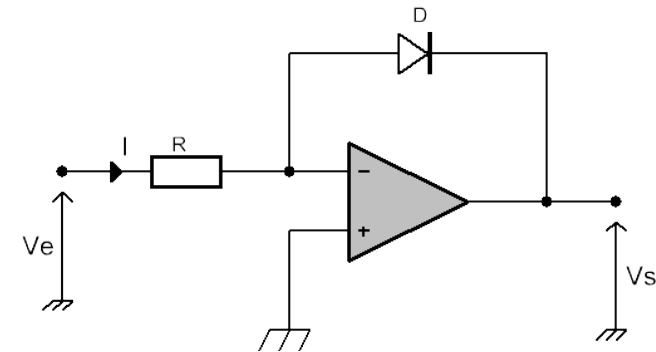
Supposons que l'AOP soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$ et $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$

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

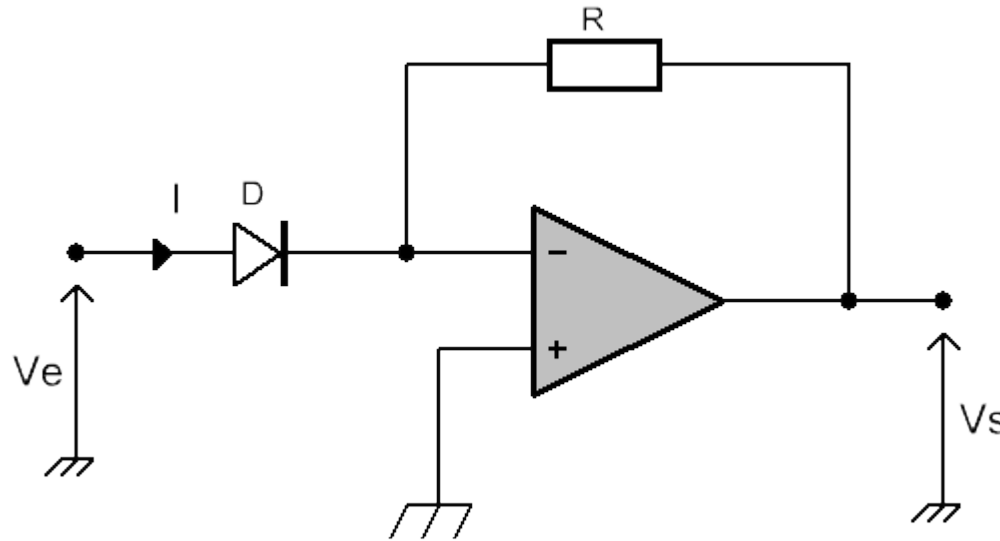
$$\text{Or : } V_D = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{I_s} \right)$$

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

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



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

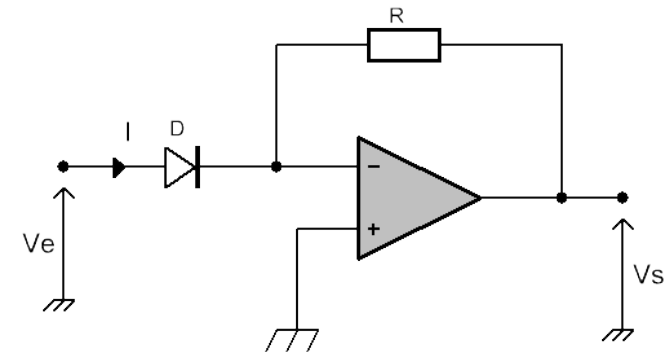
Supposons que l'AOP soit parfait, alors $i_+ = i_- = 0$ et $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$

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

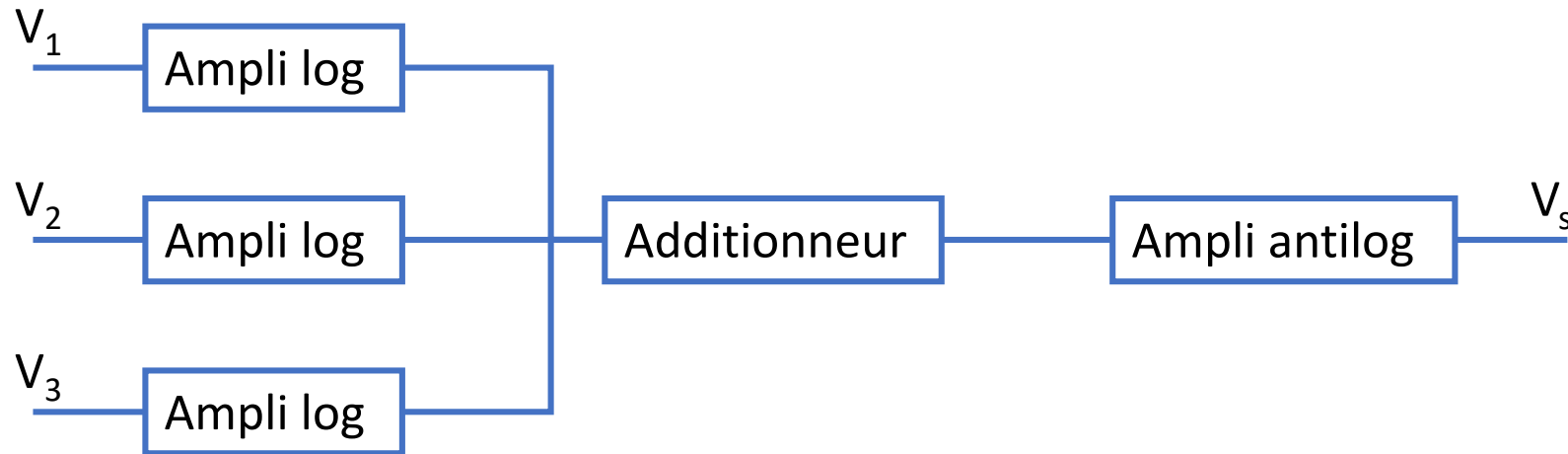
Or : $I = I_S e^{\frac{qV_D}{kT}}$

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

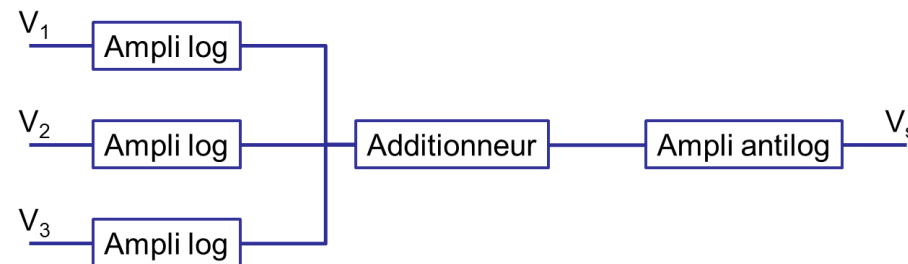
Supposons que les AOP soient parfaits

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 :

$$V_{add} = \frac{kT}{q} \sum_{i=1}^3 \ln \frac{V_i}{RI_S} = \frac{kT}{q} \ln \frac{V_1 V_2 V_3}{(RI_S)^3}$$

La tension V_s vaut alors : $V_s = -RI_S e^{\frac{qV_{add}}{kT}} = -\frac{V_1 V_2 V_3}{(RI_S)^2} = KV_1 V_2 V_3$



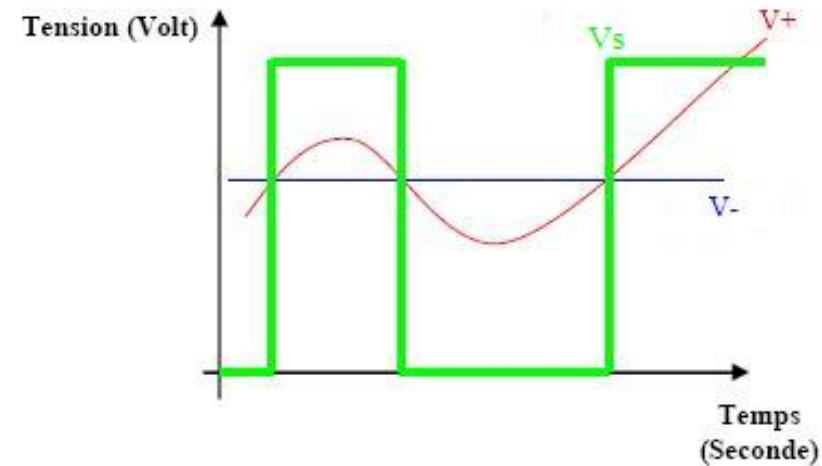
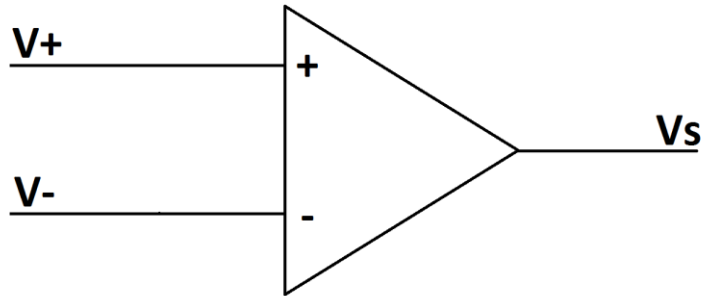
Sommaire

- 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

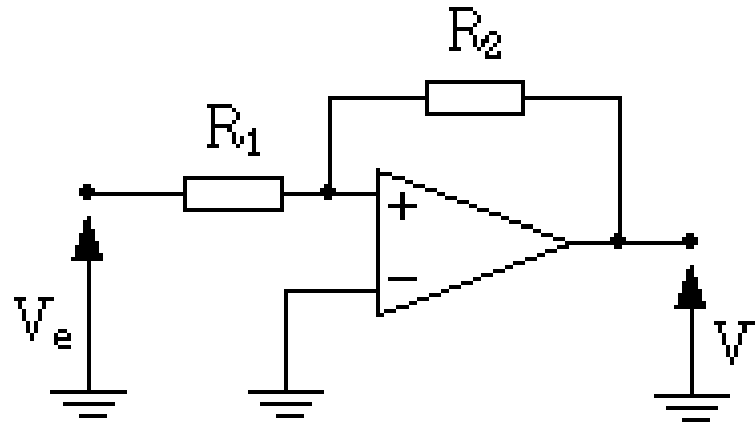
Comparateur de tension



- ☐ Si $V+ > V-$ alors $Vs = V_{cc}$
- ☐ Si $V+ < V-$ alors $Vs = -V_{cc}$

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

Comparateur à seuil à hystérésis



- Exprimer V_+
- Quelle est la relation entre V_e et V_s 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 : $V_+ = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 V_1 + R_1 V_s}{R_1 + R_2}$

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

- Si $V_s = V_{cc}$** , alors : $V_+ = \frac{R_2 V_1 + R_1 V_{cc}}{R_1 + R_2}$

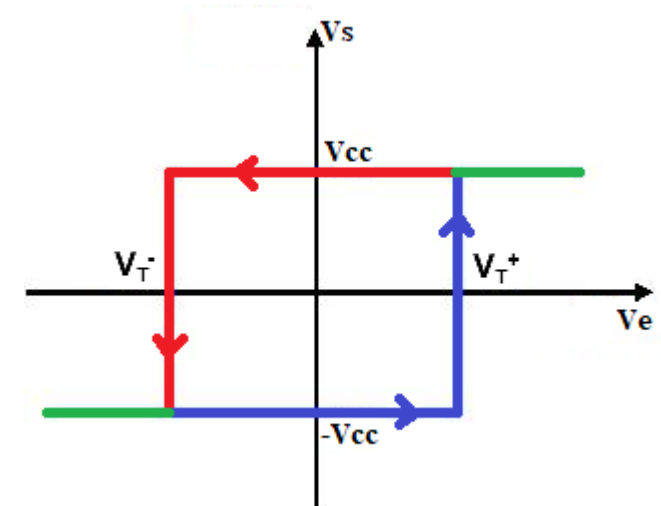
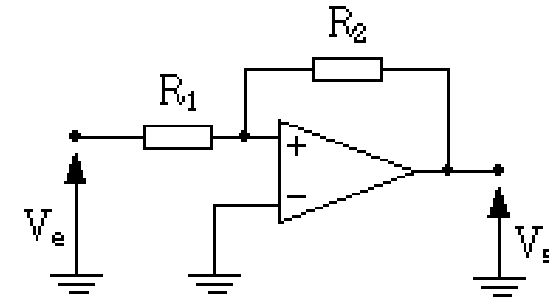
Or pour que V_s bascule en $-V_{cc}$, il faut : $V_+ < 0$

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

- Si $V_s = -V_{cc}$** , alors : $V_+ = \frac{R_2 V_1 - R_1 V_{cc}}{R_1 + R_2}$

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

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



Récapitulatif (à 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

JUNIA ISEN