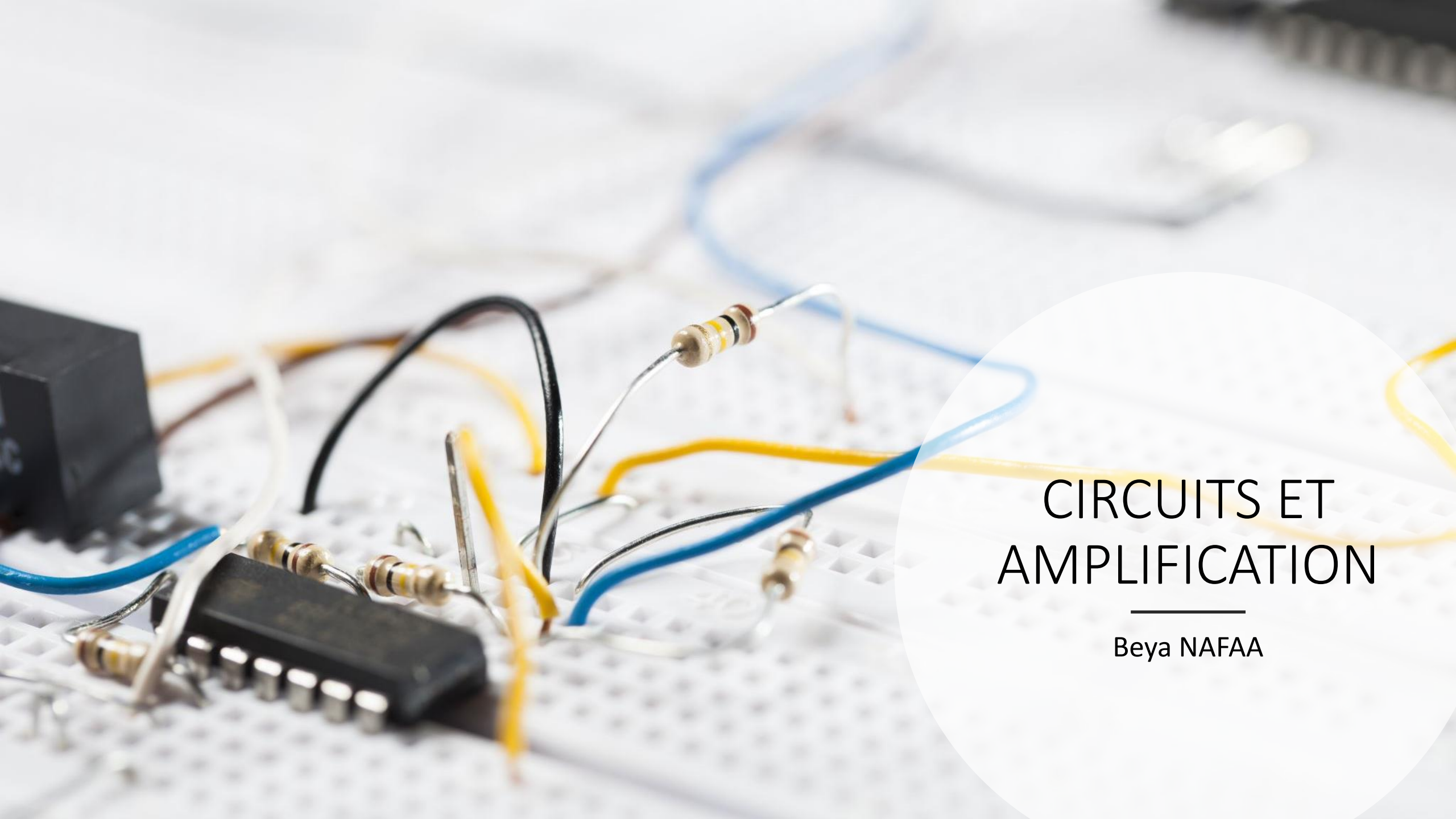


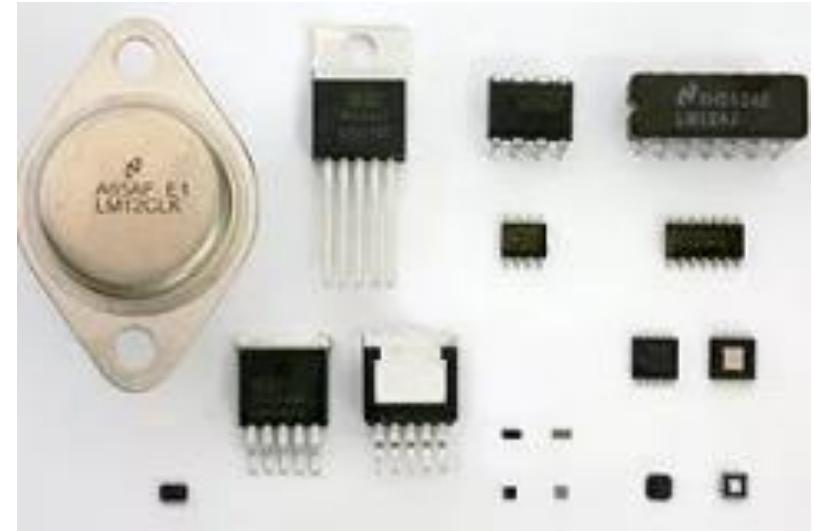


CIRCUITS ET AMPLIFICATION

Beya NAFAA

Introduction

- Amplificateur opérationnel : AOP, ampli OP, ALI
- dispositif électronique permettant d'amplifier une différence de tension présente à ses entrées
- se présente généralement sous la forme d'un circuit intégré
- Le premier AOP disponible en grande série fut le K2-W de la société GAP/R en janvier 1953.
- Les principaux fabricants : Analog Devices, Linear Technology, Maxim, National Semiconductor, STMicroelectronics et Texas Instruments.



AO à tubes
K2-W.

A quoi sert un AOP?

- les ampli op ne s'utilisent quasiment jamais seuls, en pratique. On leur associe à plusieurs composants (résistances, capacités ...)
- calculs mathématiques analogiques (donc des additions, soustractions, inversions, intégrations, dérivées, ...)
- filtrage de signaux analogiques (de type passe-haut, passe-bas, passe-bande, rejet de bande, ...)
- amplification des tensions, ou du courant (en faisant de l'amplification avec adaptation d'impédance, par exemple)

➔ **Un ampli op sert principalement à faire des calculs, du filtrage, et de l'amplification.**

Pratiquement :

- Du filtrage audio (lorsqu'on veut éliminer du bruit, ou bien des fréquences particulières)
- Du mixage audio, avec pré-amplification (montage « ampli additionneur », par exemple)
- De l'amplification de signaux (si l'on souhaite par exemple amplifier le son d'un micro)
- Du pilotage et de la régulation (asservissement) de moteur électrique ou autre
- Et bien d'autres choses encore !

Représentation

- L'entrée V_+ , non-inverseuse
- L'entrée V_- , inverseuse
- L'alimentation positive, noté $+V_{CC}$
- L'alimentation négative (ou nulle), noté $-V_{CC}$

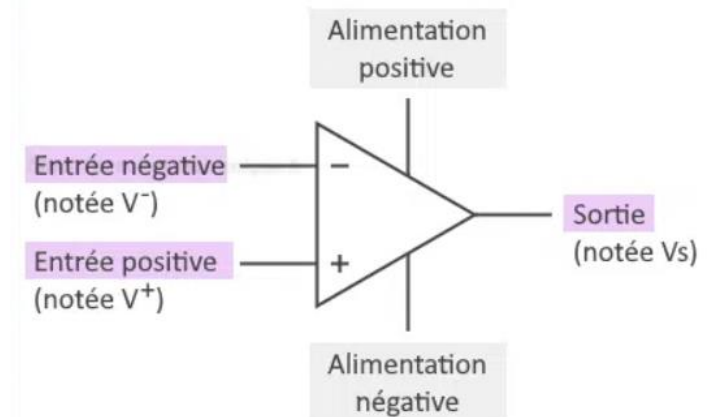
Remarque:

- Les bornes d'alimentation peuvent ne pas être présentées.
- **la tension d'alimentation d'un AOP délimite la plage de tension possible en sortie :**

si vous alimentez votre ampli op en -12V et +12V

$$\rightarrow -12V < V_s < +12V$$

Représentation symbolique

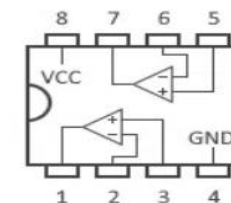


Présentation physique



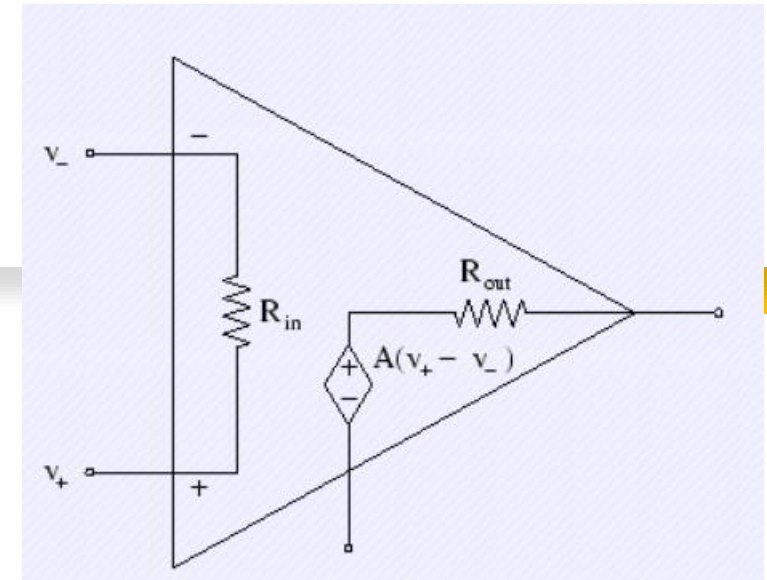
Exemple du LM358

(2 ampli. op. logés dans 1 seul circuit intégré)



Caractéristiques d'un AOP

- **Gain en tension A (gain différentiel):** Correspond au taux d'amplification en tension, généralement extrêmement élevé (plusieurs centaines de milliers), quand on fait travailler l'AOP en boucle ouverte (sortie complètement isolée des entrées).
- **impédance d'entrée R_{in} (ou Z_e) :** très élevée (de 10 MOhm ,100 MOhm) ➔ les entrées ne prélèvent quasiment aucun courant au circuit auquel elles sont raccordées et bien souvent on considère ce courant comme nul.
- **impédance de sortie R_{out} (ou Z_s) :** très basse, de quelques ohms à quelques dizaines d'ohms en général.



Modèle d'AOP

Caractéristiques d'un AOP

1) dans le cas d'un ampli op "réel", la formule est :

$$V_S = A * (V_{E+} - V_{E-}) + C * \left(\frac{V_{E+} + V_{E-}}{2} \right)$$

très grande valeur ← toute petite valeur ←

2) si on considère l'ampli op "parfait", alors la formule devient :

$$V_S = A * (V_{E+} - V_{E-}) \quad \text{« simplifié »}$$

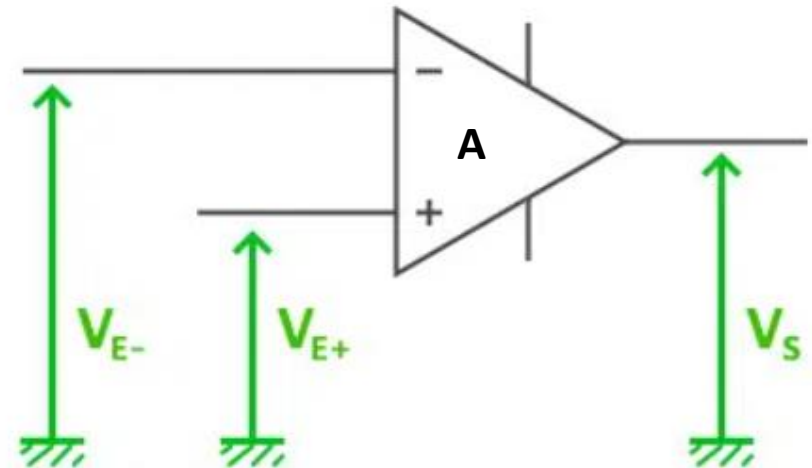
A : coeff. d'amplification "normal" ou gain différentiel de l'AOP

C : coeff. d'amplification "non voulu" gain du mode commun de l'AOP

Pour simplifier les choses : $A \gg C$



$$V_S = A \cdot (V_{E+} - V_{E-})$$



Régime LINÉAIRE et régime SATURÉ

- comme $A \gg 1 \rightarrow$ le moindre écart au niveau des entrées va représenter une grande tension en sortie.

Exemple :

- $V^+ = 1,756 \text{ V}$
- $V^- = 1,730 \text{ V} \rightarrow V_S = A \cdot (V^+ - V^-)$
- $V^+ - V^- = 26 \text{ mV}$
d'où $V_S = 100000 \cdot (1,756 - 1,730)$

$$\text{d'où } V_S = 2600 \text{ volts !}$$

un ampli op ne pourra pas sortir une telle tension en sortie !
Parce que **les AOP ont une limite en tension de sortie, imposée par leur tension d'alimentation !**

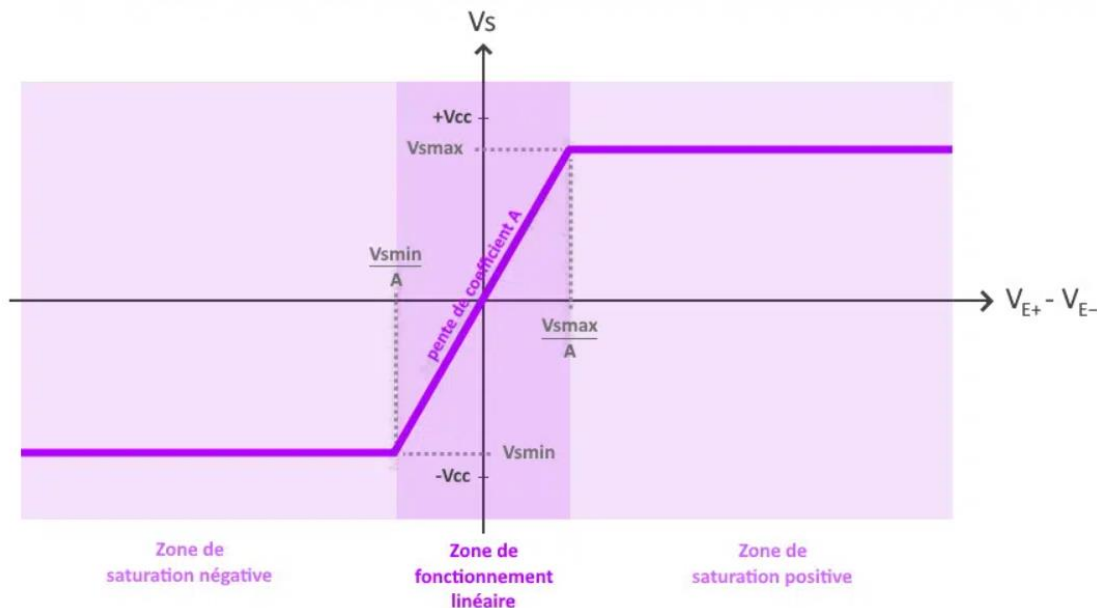
DONC l'amplificateur opérationnel aura 3 comportements possibles :

- Si V_S à générer est plus petite que ce que l'AOP peut fournir
 $\rightarrow$ l'AOP sera saturé négativement (V_S restera sur la valeur la plus basse que l'AOP peut sortir, sans pouvoir aller au-delà)
- Si V_S à générer est plus grande que ce que l'AOP peut fournir
 $\rightarrow$ l'AOP sera saturé positivement (V_S restera sur la valeur la plus haute que l'AOP peut sortir, sans pouvoir aller au-delà)
- Si V_S à générer est dans la plage de tension que l'AOP peut fournir
 $\rightarrow$ l'AOP fonctionnera en mode linéaire,
avec l'équation: $V_S = A \cdot (V_{E+} - V_{E-})$

Régime LINÉAIRE et régime SATURÉ

Au final, un ampli op peut fonctionner:

- en régime linéaire, zone dans laquelle l'équation $V_s = A * (V_{E+} - V_{E-})$ sera valable
- en régime saturé, zone dans laquelle la tension de sortie sera bloquée à une valeur maximale (ou minimale), au-delà de laquelle l'AOP ne pourra pas aller



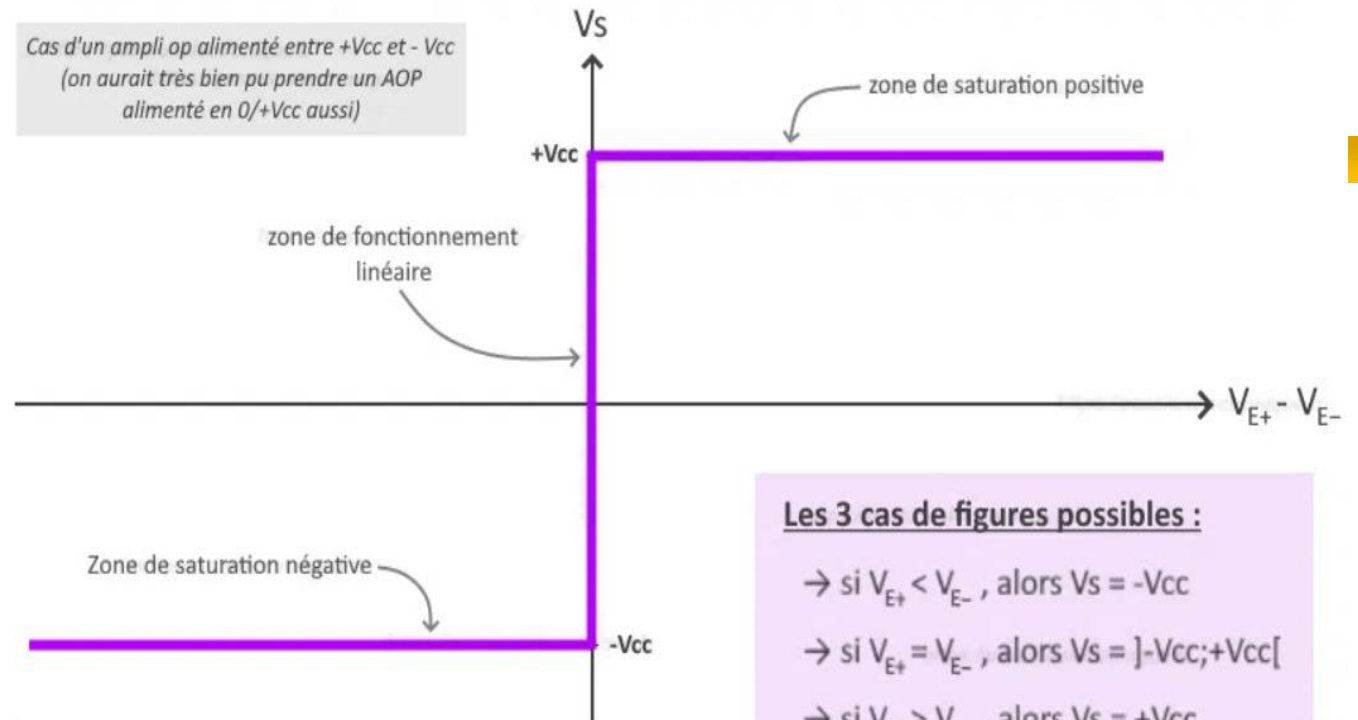
NB : Généralement l'AOP a du mal à rester en zone linéaire lorsqu'il est en « boucle ouverte » (sortie complètement isolée des entrées) → l'adjonction de composants autour de l'AOP afin que l'ensemble pourra se stabiliser en zone linéaire.

Ampli op idéal (parfait)

- Impédance d'entrée $Z_{in} = \infty$
- Impédance de sortie $Z_s = 0$
- Gain en tension $A = \infty$



$$\begin{aligned} V_+ &= V_- \\ i_+ &= i_- = 0 \end{aligned}$$

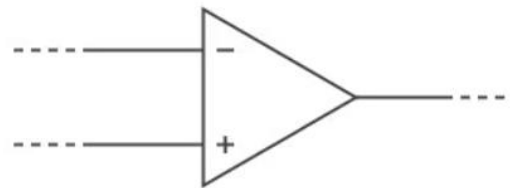


Contre réaction (négative, positive, ou bilatérale)

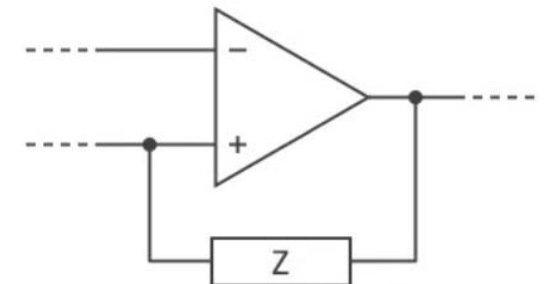
Liaison entre la sortie d'un AOP et au moins l'une de ses entrées à travers un ou plusieurs composants : **contre-réaction**

Z = composant, ou ensemble de composants quelconques (simple fil, résistance, condensateur, inductance, diode, ...)

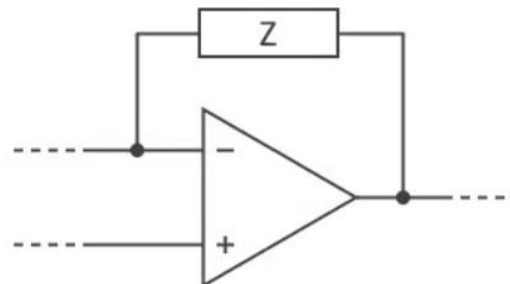
Boucle ouverte (sans contre-réaction)



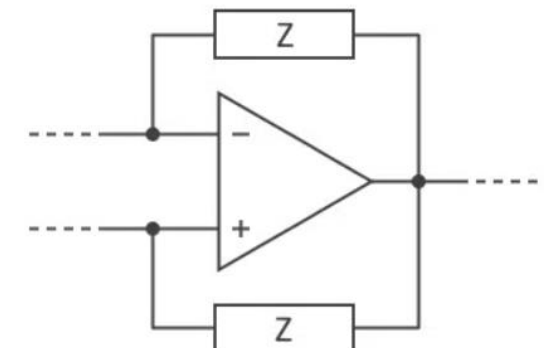
Contre-réaction positive



Contre-réaction négative

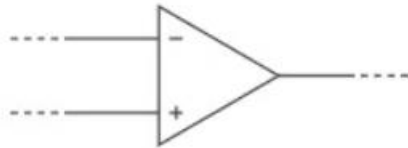


Contre-réaction bilatérale



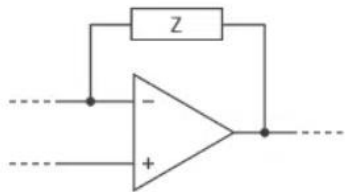
Contre réaction (négative, positive, ou bilatérale)

Boucle ouverte (sans contre-réaction)



→ un ampli op ne s'utilise généralement jamais comme ça

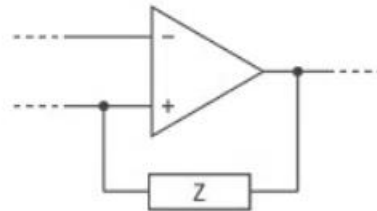
Contre-réaction négative



→ fonctionnement global en régime LINÉAIRE

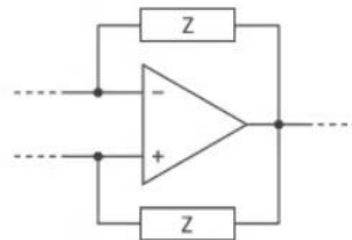
À noter qu'un ampli op fonctionnant en "mode linéaire" peut parfaitement arriver à saturation

Contre-réaction positive



→ fonctionnement global en régime SATURÉ

Contre-réaction bilatérale



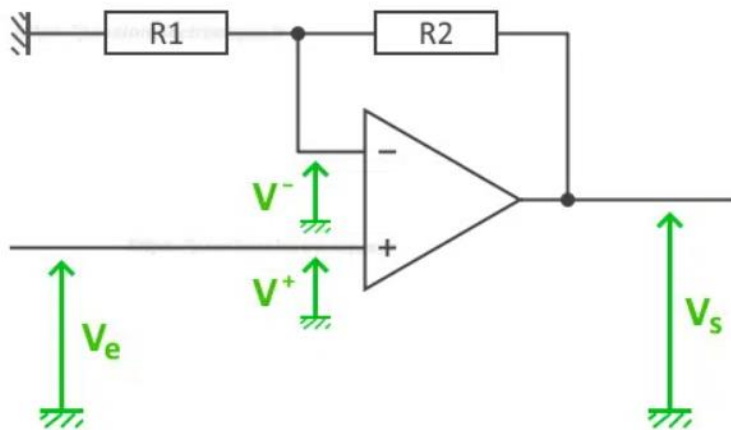
→ fonctionnement possible en mode LINÉAIRE ou SATURÉ

Ou en mode **comparateur**:

- Si $V^+ > V^-$ alors $V_s = +V_{sat}$
- Si $V^+ < V^-$ alors $V_s = -V_{sat}$

Conclusion : une contre-réaction **négative** est indispensable pour qu'un AOP puisse fonctionner en régime linéaire. Et là, on aura $V^+ = V^-$

Ampli non-inverseur

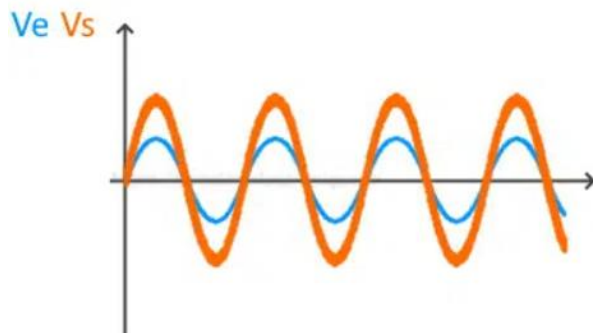


Équation de sortie :

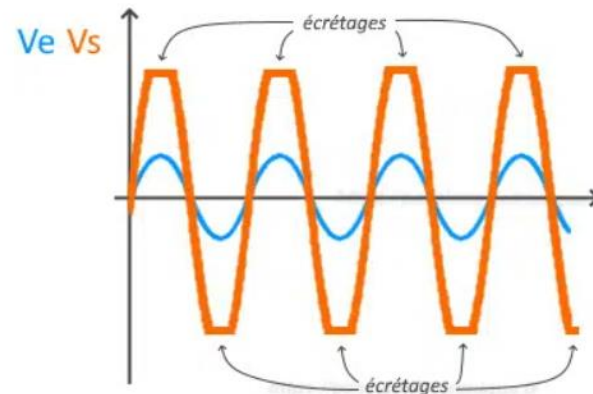
$$V_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times V_e$$

Amplification "normale"

(exemple avec signal sinusoïdal en entrée)



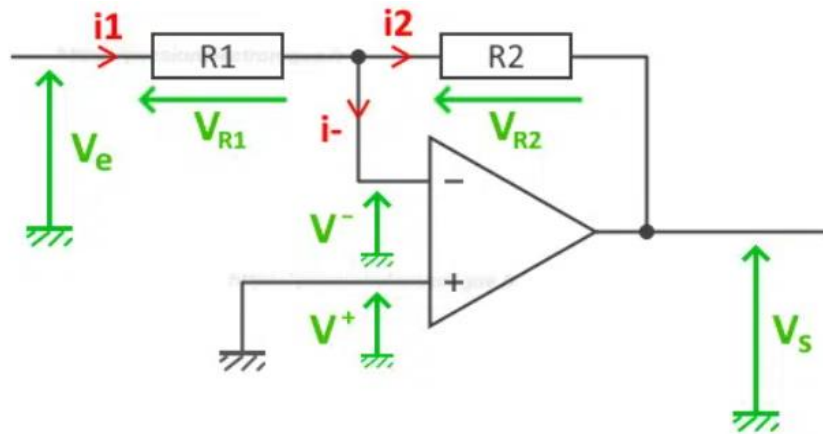
Amplification "saturante"



→ le signal V_e sera amplifié « positivement » d'un facteur égal à « $1 + R_2/R_1$ ».

Rq : Ceci ne reste valable que dans les limites de ce que peut sortir l'ampli op en sortie (conditionné par sa tension d'alimentation). Si V_s dépasse ces limites, le signal sera écrêté !

Ampli inverseur

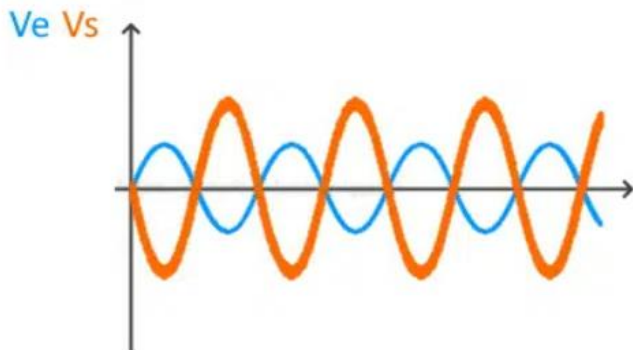


Équation de sortie :

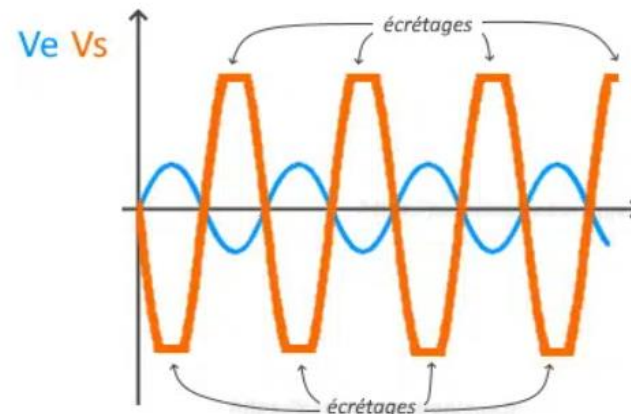
$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} \times V_e$$

Amplification "normale"

(exemple avec signal sinusoïdal en entrée)

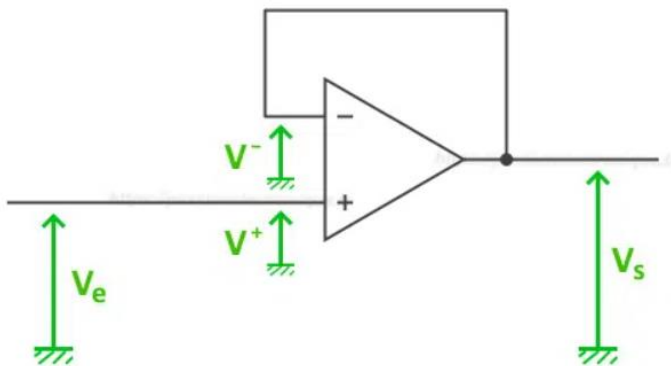


Amplification "saturante"



→ le signal V_e sera **inversé** (signe -) et **amplifié** d'un facteur égal à « R_2/R_1 ».

Ampli suiveur

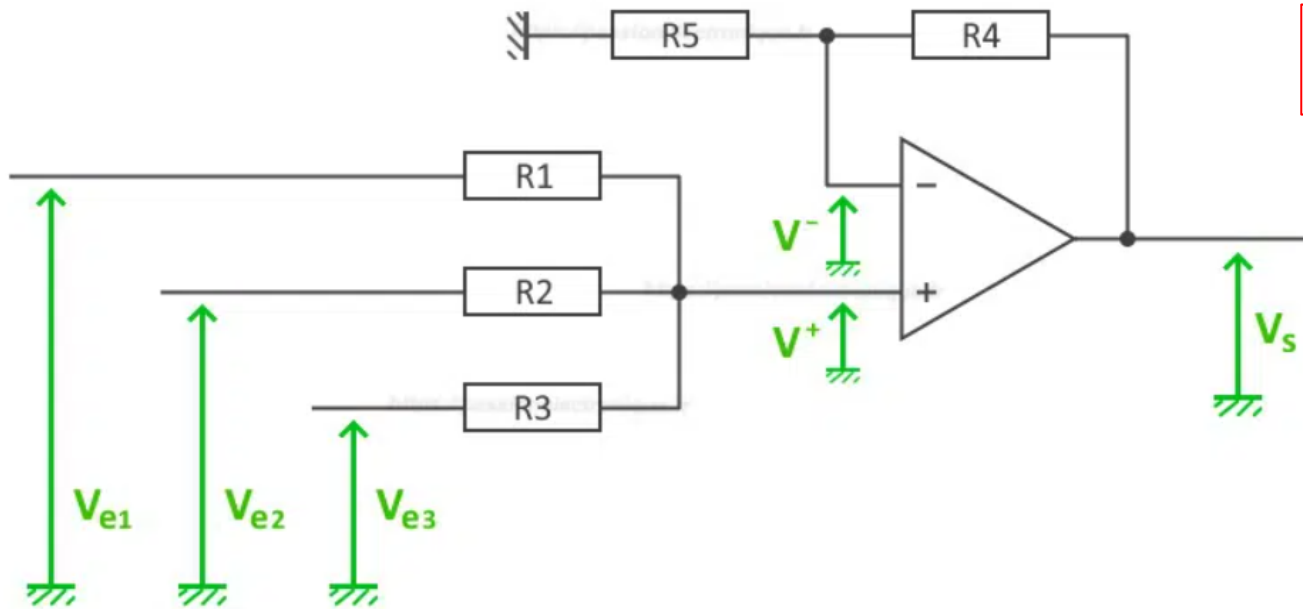


Équation de sortie :

$$V_s = V_e$$

- Gain = 1 (pas d'amplification, ni d'atténuation)
- Intérêt : adaptation d'impédance ($Z_{in} = \text{infini}$ et $Z_{out} = 0$)
- Exemple : interfacier un « capteur sensible à la charge », pour exploiter le signal fourni sans le perturber.

Ampli sommateur non inverseur



$$V_s = \frac{R_5 + R_4}{R_5 (R_3 R_2 + R_1 R_2 + R_1 R_3)} (R_3 R_2 V_{e1} + R_1 R_3 V_{e2} + R_1 R_2 V_{e3})$$

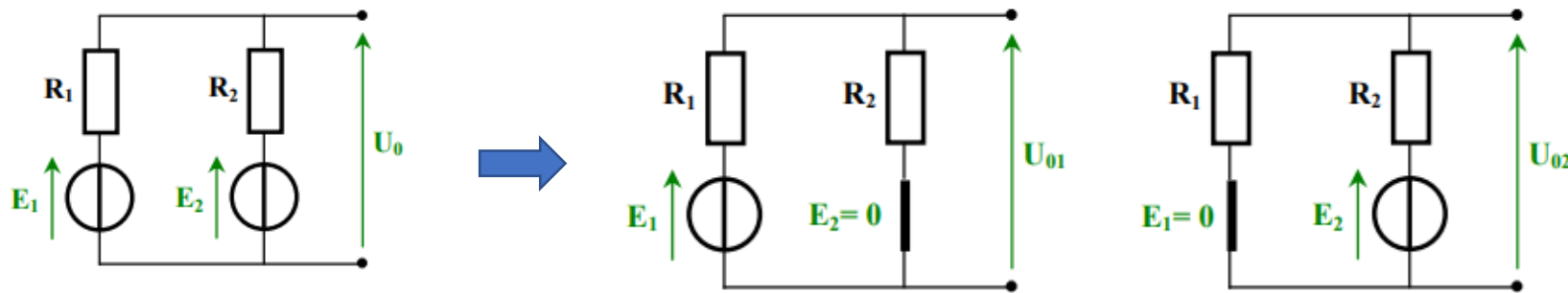
Si par exemple $R1 = R2 = R3$
et que $R4 = 2 \times R5$, alors

$$V_s = V_{e1} + V_{e2} + V_{e3}$$

Théorème de superposition

La tension (ou le courant) entre deux points d'un circuit électrique linéaire comportant plusieurs sources d'énergie est égale à la somme des tensions (ou des courants) obtenues entre ces deux points lorsque chaque source agit seule.

- Exemple:



La méthode consiste à ne faire agir qu'une seule source à la fois.

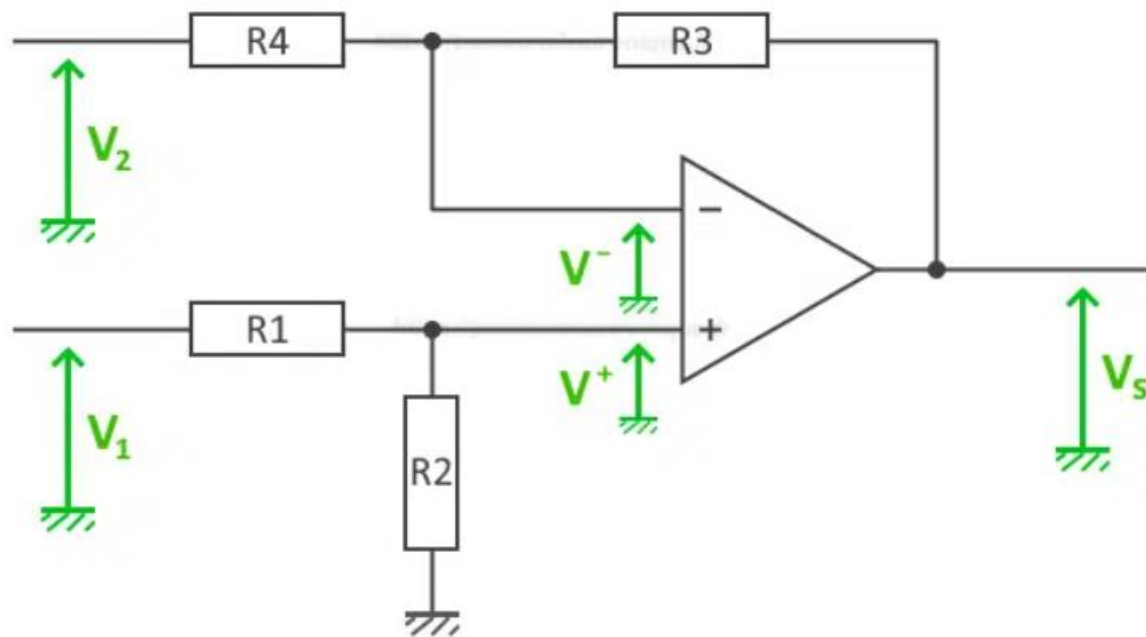
Dans un premier temps on prendra $E_2 = 0$ et on calculera U_{01} (source E_1 agissant seule).

Dans un deuxième temps on prendra $E_1 = 0$ et on calculera U_{02} (source E_2 agissant seule).

$$U_{01} = E_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ et } U_{02} = E_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_0 = U_{01} + U_{02}$$

Ampli soustracteur

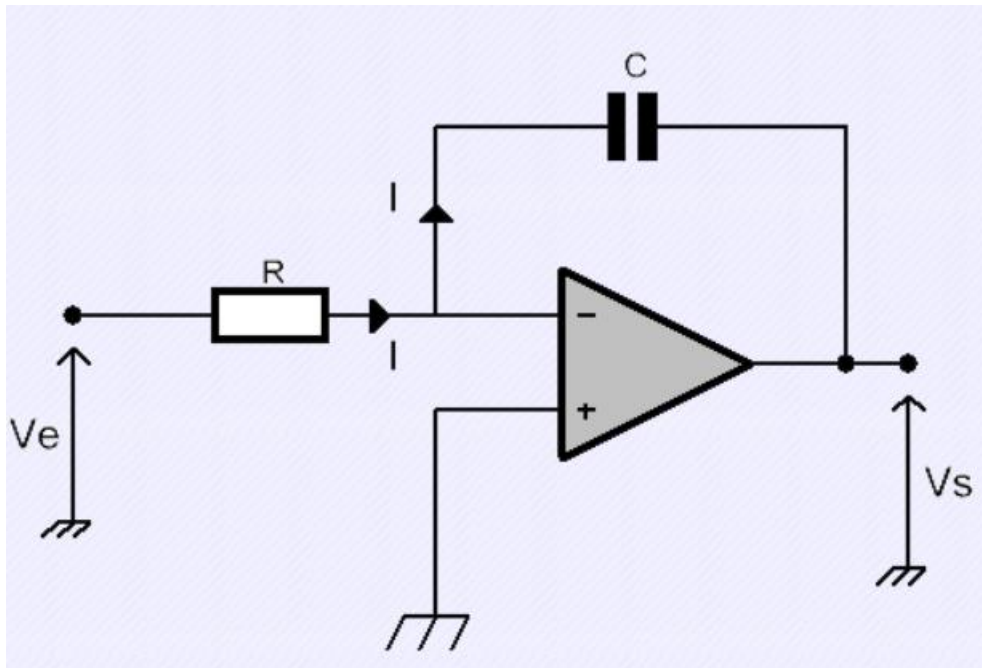


$$V_s = V_1 * \left(\frac{1 + \frac{R_3}{R_4}}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \right) - V_2 * \left(\frac{R_3}{R_4} \right)$$

À noter que si $R_1=R_2$
et que $R_3=R_4$, alors

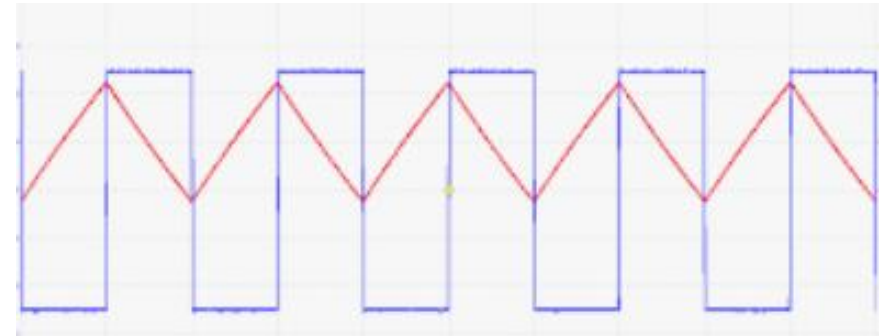
$$V_s = V_1 - V_2$$

Ampli intégrateur de tension



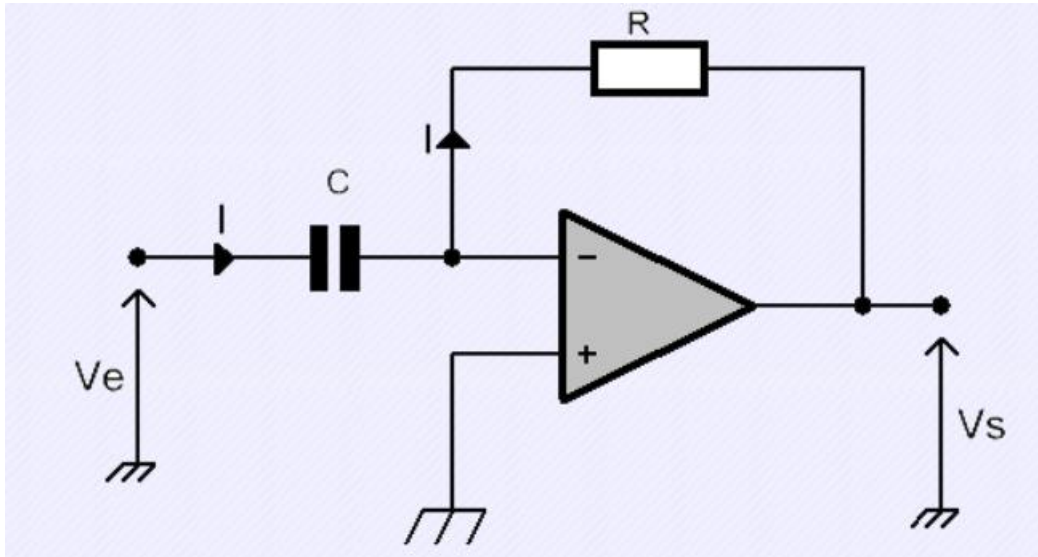
$$V_e = R.I \Rightarrow I = \frac{V_e}{R}$$

$$V_s = -\frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$



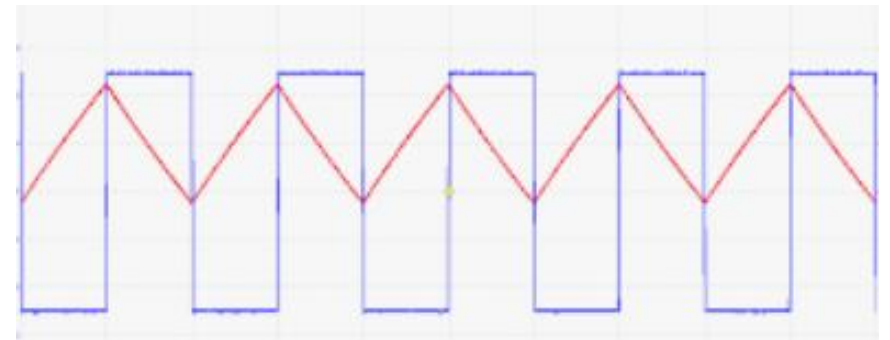
Le signal d'entrée carré V_e sera intégré et inversé (signe « - ») pour obtenir le signal triangulaire en sortie V_s

Ampli dérivateur de tension



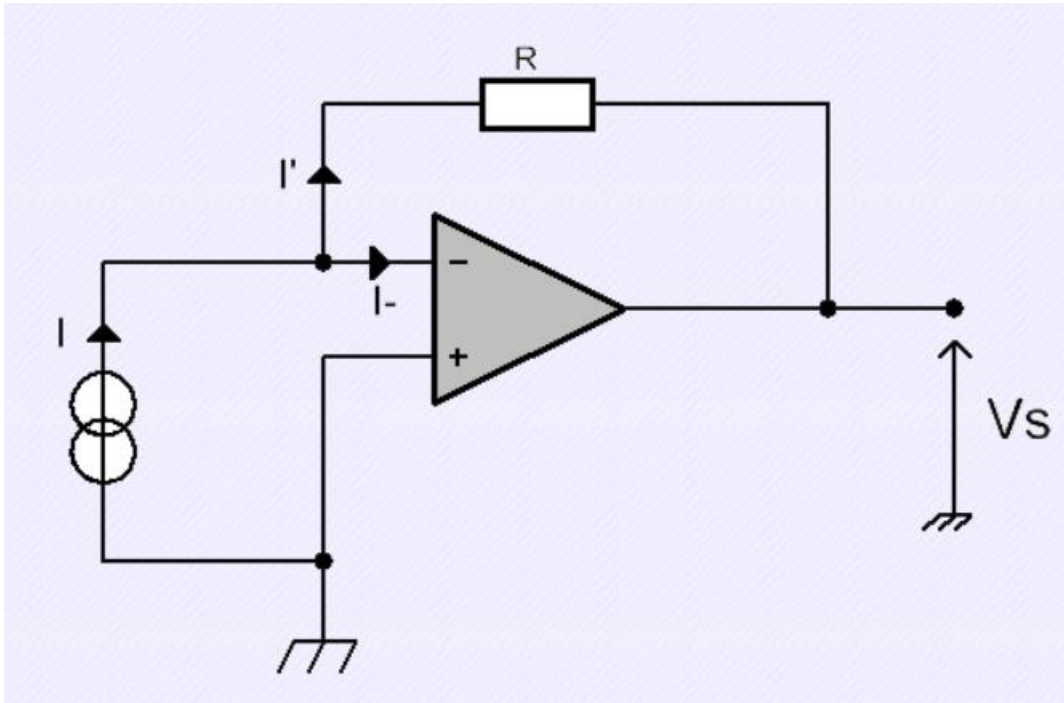
$$I = C \frac{dV_e}{dt}$$

$$V_s = -R.I = -RC \frac{dV_e}{dt}$$



Le signal triangulaire en entrée V_e sera dérivé et inversé pour obtenir le signal V_s

Ampli convertisseur courant-tension



$$V_s = -RI' = -RI$$

Remarque : ici le courant I est produit par un générateur de courant parfait, mais en réalité, il peut provenir d'un montage en amont.

Ampli op réel et ses limites

1. Slew rate (vitesse de balayage/ temps de montée) ($V/\mu s$) :

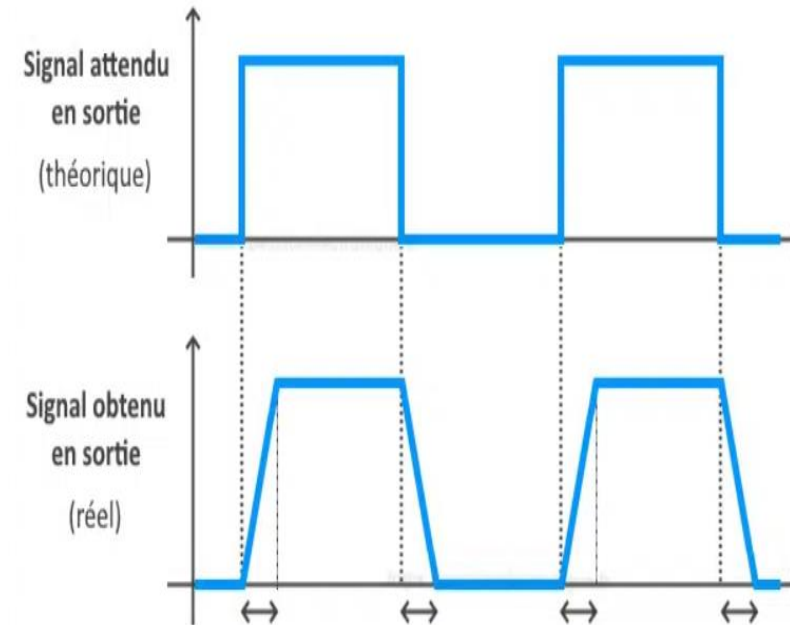
l'AOP fait varier sa sortie progressivement, jusqu'à atteindre la « bonne valeur » → la vitesse maximale à laquelle un AOP peut faire varier sa tension de sortie : **Slew rate**.

Au delà, la tension de sortie réelle ne sera pas celle qu'on attendrait, en théorie.

Exemple

AOP avec slew rate = $0,5 V / \mu s$ → sa sortie peut monter ou descendre de $0,5 V$, toutes les $1 \mu s$. Donc pour faire passer la sortie de 0 à $+15V$ l'AOP mettrait $15/0,5 \mu s$, soit $30 \mu s$! Ce temps peut paraître négligeable. Mais bien évidemment, il ne l'est absolument pas, dès lors qu'on commence à monter un peu haut en fréquence ! → plus on monte en fréquence et plus il est difficile d'atteindre la tension maximale possible en sortie de l'AOP.

(exemple de tentative de génération de signaux carrés en sortie d'un AOP)



La sortie d'un ampli op ne peut aller plus vite qu'un certain nombre de volts par micro-secondes ($V/\mu s$). C'est ce qu'on appelle le "slew rate".

Ici, du fait de la fréquence trop élevée en sortie, l'ampli op ne peut délivrer qu'un signal trapézoïdal, au lieu d'un signal carré.

Cette déformation, qui s'aggraverait si on montait encore plus en fréquence, est due aux limites mêmes de l'AOP

Remarque: c'est à cause du slew rate que les ampli op sont presque toujours de très mauvais candidats pour fonctionner en commutation (régime saturé). C'est pourquoi on préfère dans ce cas travailler avec de « vrais » comparateurs

Ampli op réel et ses limites

2. Offset (tension de décalage)

Si on relie les deux entrées V^+ et V^- ensemble, la tension V_s devrait être nulle, puisque la $V_s = A * (V^+ - V^-)$ et ici $V^+ = V^-$. Or, en pratique, on constate souvent la **présence d'une petite tension en sortie (quelques mV)**, qu'on appelle **offset**.

Elle est due aux imperfections internes de l'étage d'entrée de l'AOP.

Cette valeur d'offset n'est pas un problème en soi mais peut parfois gêner surtout quand on adopte un gain élevé. Certains AOP possèdent une ou plusieurs broches d'entrées pour annuler cette tension d'offset (avec ajout d'un potentiomètre), d'autres n'en possèdent pas.

Quand sa valeur est problématique (critique), on s'arrange pour choisir un AOP dont la tension d'offset est garantie de très basse valeur. Par exemple, le LTC6226 de Analog Device présente une tension d'offset de 95 μ V maximum.

Ampli op réel et ses limites

3. Taux de réjection en mode commun des AOP

- Si on considère l'AOP comme étant parfait, alors l'équation de sortie $V_S = A \cdot (V^+ - V^-)$
- Mais si on considère l'AOP avec ses défauts, alors l'équation de sortie est plutôt du type $V_S = A \cdot (V^+ - V^-) + C \cdot \left(\frac{V^+ + V^-}{2} \right)$

Avec :

- « C », le **coefficient d'amplification en mode commun**
- Et $\frac{V^+ + V^-}{2}$, qui donne tout simplement **la valeur moyenne entre V^+ et V^-**

➔ pour devenir parfait, un AOP doit tout simplement avoir un coefficient C qui tend vers zéro. Car on souhaite « rejeter cette tension moyenne amplifiée », d'où le nom de « **réjection du mode commun** »

➔ C'est pourquoi on a tendance à favoriser les amplificateurs opérationnels qui ont un taux de réjection le plus élevé possible.

Remarque: les fabricants spécifient ce rejet sous la forme d'un « **taux de réjection du mode commun** », exprimé en décibels (dB).

Ampli op réel et ses limites

4. Swing (Excursion de tension en sortie)

Les tensions extrêmes maximales que peut délivrer un AOP n'atteignent pas la valeur de ses tensions d'alimentation ($\pm V_{cc}$) .

Selon les modèles d'AOP, une différence de 2 V peut être observée (dans ce cas, avec une alimentation ± 15 V, la tension en sortie de l'AOP ne pas excéder ± 13 V). Si cela ne pose généralement pas de problème avec des tensions "élevées", il faut savoir que cela peut constituer une limitation gênante dans certaines applications.

➔ Les « ampli op rail-to-rail » sont conçus pour **permettre à l'AOP d'atteindre en sortie les limites correspondantes à son alimentation**

Remarque: lorsqu'un amplificateur opérationnel est rail-to-rail, ceci est mis en avant par le fabricant, dans son datasheet. Par contre, **lorsqu'un AOP n'est pas rail-to-rail, ce n'est généralement jamais spécifié !** Il faut donc considérer qu'un amplificateur opérationnel n'est pas rail to rail de base, sauf si c'est clairement indiqué.

Ampli op réel et ses limites

5. Produit « gain*bande passante » (GBW)

- Garder en tête que, pour un AOP donnée, **GBW = constant** → Plus on demande à un AOP un gain élevé et plus sa bande passante se réduit.

Exemple :

LM358 qui a GBW = 1 MHz (pour un gain unitaire). Alors :

- Pour un gain de 1 (pas d'amplification), la bande passante de l'ampli op sera de **1 MHz**
 - Pour un gain de 10, la bande passante de l'ampli op sera de **100 kHz** (10 fois moins, donc)
 - Pour un gain de 100, la bande passante de l'ampli op sera de **10 kHz** (soit 100 fois moins)
- l'impact conséquent qu'à le gain, sur la bande passante d'un AOP. Car passer une bande passante de 1 MHz à 10 kHz, peut très fortement limiter l'usage que vous pourrez avoir, d'un tel AOP.

Remarque: faites très attention aux limites qu'impose une amplification de signal au niveau d'un AOP, vis-à-vis de sa bande passante. Sinon, la sortie de votre ampli op pourrait être gravement altérée !