

Amplificateur opérationnel

I. Définition et caractéristiques d'un amplificateur opérationnel

Un amplificateur opérationnel (**AOP**) appelé aussi amplificateur linéaire Intégré (**ALI**) permet l'amplification de la différence entre les deux tensions d'entrées. Cette différence (V_d) est appelée "tension d'entrée différentielle"

Le mot opérationnel, indique aussi qu'un **AOP** permet de faire plusieurs opérations mathématiques autour de signaux analogiques comme:

- L'addition.
- La soustraction,
- L'intégration,
- La dérivation,
- La résolution d'équations différentielles etc....

L'AOP existe sous forme d'un circuit intégré, il peut fonctionner en deux modes :

- ✓ Régime linéaire (Amplification, filtrage...)
- ✓ Régime non linéaire (Comparateur, trigger, générateur de signaux carrés...)

II. Schéma et symbole d'un AOP

En électronique analogique, le triangle est le symbole générique pour représenter un AOP

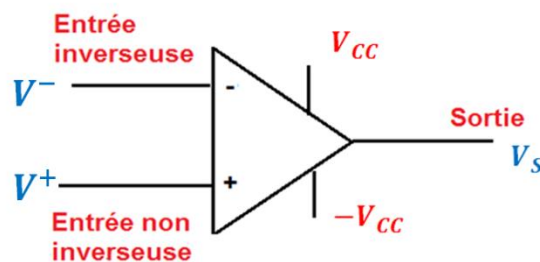
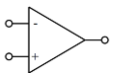


Figure 1. Symbole d'un AOP avec tensions d'entrées et tension de sortie.

V^+ Entrée non inverseuse.

V^- Entrée inverseuse.

$V_S = V_{OUT}$ Sortie.

$+V_{CC}$ et $-V_{CC}$ l'alimentation de l'AOP.

Chacune des entrées reçoit une de tension mesurée par rapport à la masse (V^+ , V^-).

La tension de sortie est souvent mesurée par rapport à la même masse $V_S = V_{OUT}$

L'AOP est donc fondamentalement un composant amplificateur d'une tension d'entrée différentielle très faible.

$$V_d = V^+ - V^- \quad (V_d = \varepsilon)$$

V_d est appliquée entre les deux bornes d'entrée (rappelez-vous qu'aucune des entrées n'est à la masse)

La tension de sortie est proportionnelle à la différence de potentiel qui existe entre les deux bornes d'entrée, ce qui s'exprime par la relation : $V_s = A_d (V^+ - V^-)$

A_d : Amplification différentielle (la valeur de ce coefficient multiplicatif est de plusieurs centaines de milliers).

En pratique, on prend l'une des entrées comme référence de potentiel.

- La sortie est en phase si V^- est prise comme référence.
- La sortie est en opposition de phase si V^+ est prise comme référence.
- Le signe négatif « - » qui peut affecter le gain indique une opposition de phase entre la sortie et l'entrée.

III. Schéma équivalent d'un AOP en petits signaux

Un AOP est équivalent à un quadripôle actif, caractérisé généralement par les paramètres qui permettent de définir les performances d'un amplificateur opérationnel, comme :

- ✓ Impédance d'entrée Z_e
- ✓ Impédance de sortie Z_s
- ✓ Gain en tension A_v

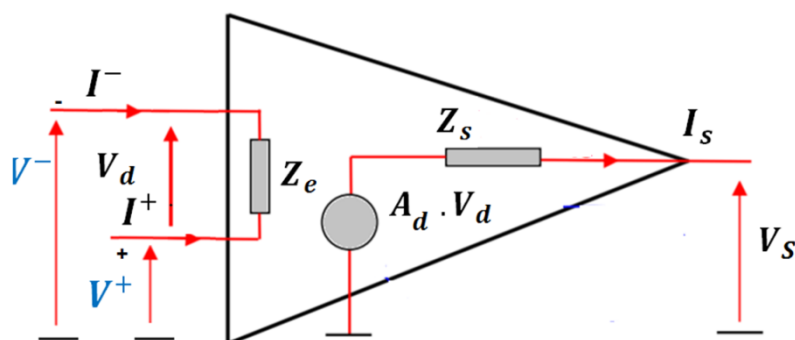


Figure 2. Schéma équivalent d'un AOP

L'étude des applications de l'AOP se fait généralement à partir d'un modèle parfait (idéalisé).

L'AOP est considéré comme amplificateur opérationnel parfait lorsqu'il est décrit par :

- ✓ Une amplification différentielle infinie, avec une différence de potentiel $V_d = \varepsilon = 0$, nous supposons que les tensions des deux entrées sont égales : $V^+ = V^-$.
- ✓ Une impédance d'entrée très élevée, ce qui implique que les courants d'entrée sont nuls ($I^+ = I^- = 0$)
- ✓ Une impédance de sortie presque nulle
- ✓ Une bande passante infinie
- ✓ Un gain de mode commun nul.

AOP Parfait :

- ✓ Impédance d'entrée $Z_e \approx \infty$

$$I^+ = I^- = 0$$

- ✓ Impédance de sortie $Z_s \approx 0$
- ✓ Amplification différentielle $A_d \approx \infty$

$$V_d = \varepsilon = 0 ; V^+ = V^-.$$

IV. Régimes de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel

L'AOP est un circuit intégré, qui peut être capsulé dans un boîtier à 8 broches ou à 14 broches, parmi les circuits les plus utilisés on cite : le μA 741, le LM 741 et le TL 081.

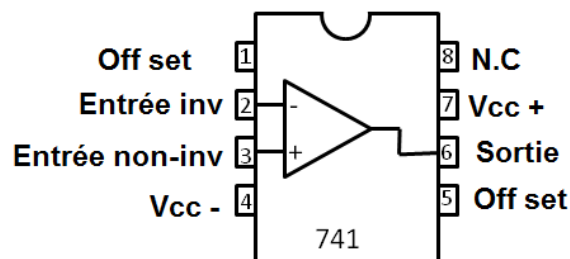


Figure 3. Brochage d'un AOP : μA 741

L'AOP est un composant actif qui nécessite d'être alimenté par deux tensions continues et symétriques pour qu'il fonctionne correctement, elles sont appelées les alimentations de

polarisation, avec ce composant, on peut réaliser de nombreux montages en fonction du régime de fonctionnement (modes linéaire ou non linéaire).

IV.1. Régime linéaire

En mode de fonctionnement linéaire, l'AOP peut être monté comme amplificateur, filtre, ou oscillateur sinusoïdal.

Le régime est dit linéaire quand l'AOP délivre une tension de sortie proportionnelle à la tension d'entrée (la tension différentielle $V_d = \varepsilon$)

$$V_S = A_d \cdot V_d$$

Pour cela il faut assurer que :

$$|V_d| \leq \frac{V_{Sat}}{A_d}$$

Avec cette condition l'AOP travaille comme amplificateur de tension, il effectue cette opération tant que la sortie ne dépasse pas la tension limite V_{Sat} (tension de saturation)

$$|V_S| \leq V_{Sat}$$

On dit que l'amplificateur fonctionne en régime linéaire

IV.2. Régime non linéaire

Le régime est dit non linéaire ou régime de saturation, on parle aussi d'un fonctionnement en commutation quand l'AOP délivre une tension de sortie égale à la valeur absolue de V_{Sat}

On dit que l'AOP est saturé, deux cas possibles peuvent se présenter :

$$V_d = \varepsilon > \frac{V_{Sat}}{A_d} \rightarrow V_S = +V_{sat}$$

$$V_d = \varepsilon < -\frac{V_{Sat}}{A_d} \rightarrow V_S = -V_{sat}$$

Lorsque l'AOP fonctionne en mode de saturation, la sortie V_S serait soit égale à la tension positive de saturation, soit qu'elle serait égale à la tension négative de saturation.

IV.3. Caractéristique de transfert

La caractéristique de transfert d'un AOP est présentée par la courbe $V_S = f(V_d)$

Sur cette courbe, on présente le mode de fonctionnement linéaire ainsi que le mode saturé.

- ✓ Le domaine linéaire est conditionné par :

$$V_S = A_d \cdot V_d$$

- ✓ Le domaine saturé (non linéaire) est conditionné par :

$$|V_S| = V_{Sat}$$

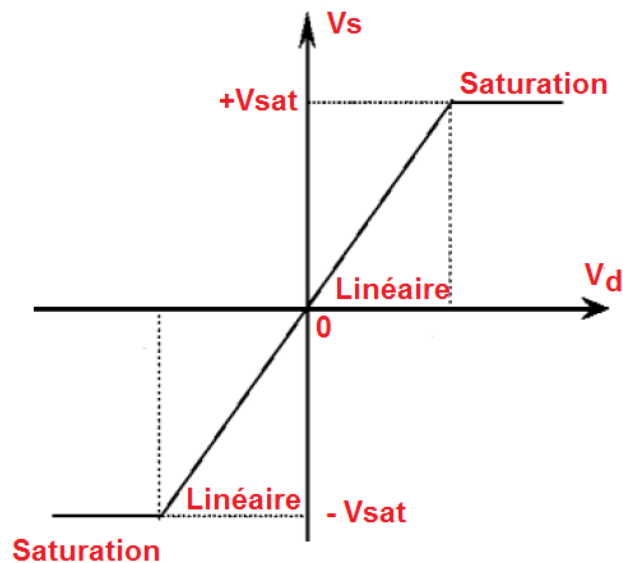


Figure 4. Caractéristique de transfert d'un AOP (cas réel)

La caractéristique de transfert montre que l'AOP peut fonctionner en amplificateur (zone linéaire) ou en comparateur (zone de saturation).

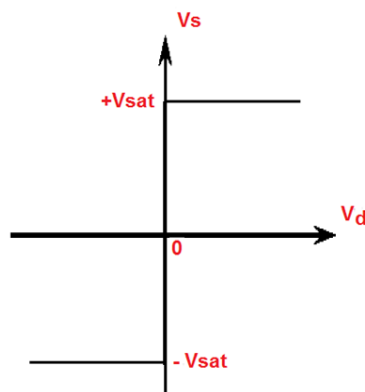


Figure 5. Caractéristique de transfert d'un AOP (cas idéal)

V. Applications de l'AOP dans le régime linéaire

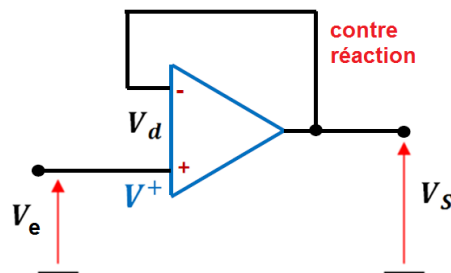
Pour un bon fonctionnement dans la zone linéaire, le montage de l'AOP doit être muni d'une réaction négative ou une contre réaction.

On parle de contre réaction si la sortie et l'entrée inverseuse (négative), sont reliées par le biais d'un composant électrique.

Dans la suite de ce chapitre nous n'utiliserons que des amplificateurs opérationnels idéaux

V.1. Amplificateur suiveur

Ce genre de montage est utilisé pour l'adaptation d'impédance.



On place un fil conducteur entre l'entrée inverseuse et la sortie (contre réaction).

Avec $V_d = \varepsilon = 0$; $V^+ = V^-$ (régime linéaire, AOP idéal)

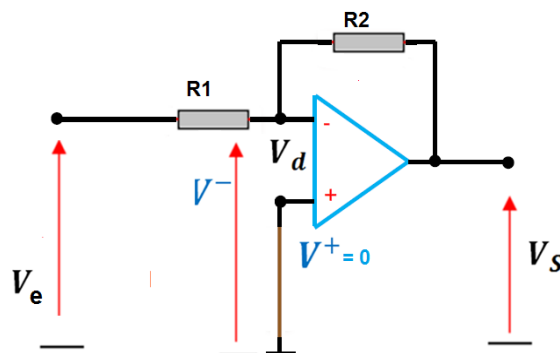
$$V^+ = V_e \text{ et } V^- = V_s \implies V_e = V_s$$

Gain en tension :

$$A_V = \frac{V_s}{V_e} = 1$$

Gain en tension est égal à l'unité, donc le montage suiveur est adéquat pour l'adaptation d'impédance.

V.2. Amplificateur inverseur



L'entrée non inverseuse est reliée à la masse ($V^+ = 0$) , V_e est appliquée à l'entrée inverseuse.

Comment procéder :

Généralement pour le calcul des tensions ou des courants d'un réseau électrique, on peut utiliser les lois fondamentales comme la loi d'Ohm, la loi des nœuds, la loi des mailles et le diviseur de tension. Mais pour les montages électriques comportant un AOP, on peut faire appel au théorème de **Millman**, qui est une forme particulière de la loi des nœuds exprimée en termes de potentiel.

Rappel sur le théorème de Millman

Dans un réseau électrique de branches en parallèle, la tension aux bornes des branches est égale à la somme des forces électromotrices (E_k) respectivement multipliées par la conductance de la branche, le tout divisé par la somme des conductances (G_k).

$$V_M = \frac{\sum_{k=1}^N E_k \cdot G_k}{\sum_{k=1}^N G_k}$$

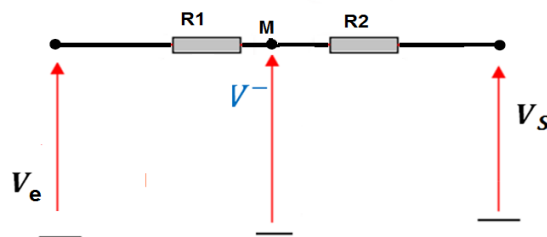
Avec :

$$\sum_{k=1}^N G_k = \sum_{k=1}^N \frac{1}{R_K}$$

On va opérer avec les deux méthodes :

1-Méthode par utilisation du théorème Millman

On enlève l'AOP et pour déterminer la tension V^- , on applique le théorème de Millman :



On aura : $V^- = V_M = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$

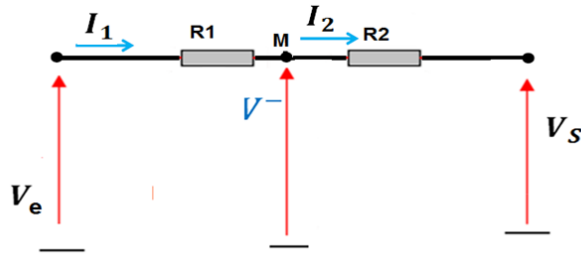
Avec l'hypothèse $V^+ = V^-$ (régime linéaire, AOP idéal) et $V^+ = 0$ donc $V^- = 0$

$$V^- = 0 = \frac{\frac{V_e}{R_1} + \frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} ; \quad \frac{V_e}{R_1} + \frac{V_S}{R_2} = 0 \text{ (numérateur nul)}$$

$\frac{V_S}{R_2} = - \frac{V_e}{R_1}$ et de cela on aura :

$$V_S = - \frac{R_2}{R_1} V_e$$

2-Méthode par utilisation des lois classiques



Selon le montage proposé, le potentiel V^+ étant nul ($V^+ = 0$) le potentiel V^- est également nul ($V^- = 0$) (avec l'hypothèse $V^+ = V^-$ (régime linéaire, AOP idéal).

Le potentiel V^- est pris comme masse virtuelle.

Le courant I_1 qui traverse la résistance R_1 est égal au courant I_2 qui traverse la résistance R_2

Puisque le courant I^- de l'entrée inverseuse de l'AOP est nul.

Il en résulte :

$$V_e = R_1 \cdot I_1 \text{ et } V_s = -R_2 \cdot I_2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_e}$$

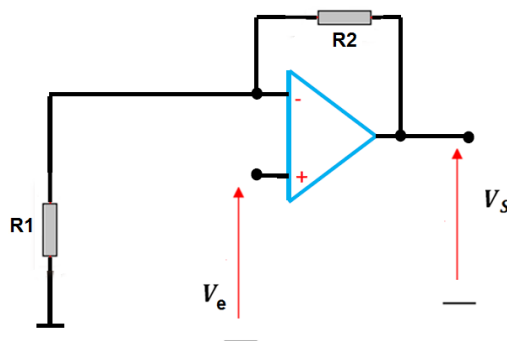
$$\boxed{A_v = -\frac{R_2}{R_1}}$$

Nous remarquons que l'amplification en tension est fixée par un rapport de deux résistances externes dans le cas d'un amplificateur opérationnel idéal.

Le signe « - » de la formule du gain indique une opposition de phase entre la tension de sortie et celle d'entrée d'où le nom donné à ce montage, amplificateur inverseur.

V.3. Amplificateur non inverseur

V_e est appliquée à l'entrée non inverseuse (AOP parfait en régime linéaire) $V^+ = V_e$



De la même manière que le montage précédant, on enlève l'AOP et on calcule V^- .

Nous appliquons le diviseur de tension sur l'entrée inverseuse « - » et nous avons directement

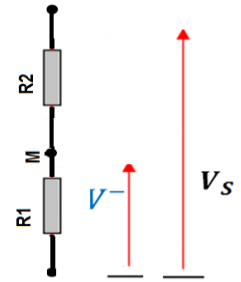
la tension V_e sur l'entrée non inverseuse « + »

$$V^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S$$

Avec $V^+ = V_e = V^-$

$$V_e = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S \rightarrow V_S = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e$$

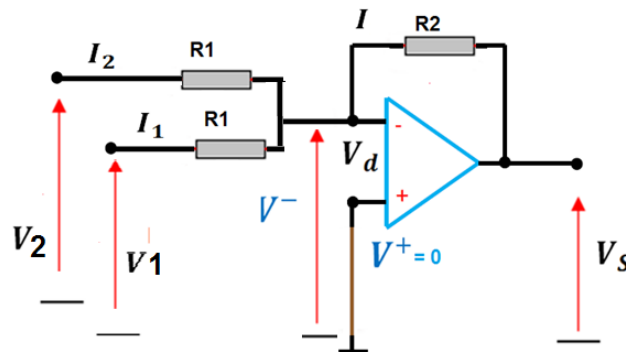
$$A_V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Nous remarquons que l'amplification en tension est fixée par l'addition d'un rapport de deux résistances externes à l'unité (un), ce qui montre que l'amplification est toujours supérieure à l'unité, donc le montage se comporte bien comme amplificateur.

Le signe positif « + » de la formule du gain indique que la tension de sortie et la tension d'entrée sont en phase.

V.4. Amplificateur sommateur inverseur



Avec l'hypothèse $V^+ = V^-$ (régime linéaire, AOP idéal)

$$V_1 = R_1 \cdot I_1 \Rightarrow I_1 = \frac{V_1}{R_1}$$

$$V_2 = R_1 \cdot I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{V_2}{R_1}$$

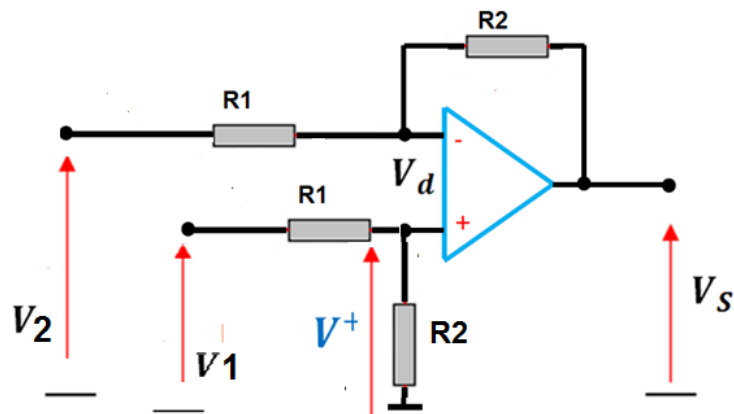
$$V_S = -R_2 \cdot I \text{ car } (V_S + V_{R2} + V_d = 0) \text{ avec } V_d = 0 \text{ et } I = I_1 + I_2$$

$$V_S = -R_2 \cdot (I_1 + I_2) = -R_2 \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_1}\right) = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (V_1 + V_2)$$

$$V_S = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (V_1 + V_2)$$

On prend toujours $R_2 > R_1$

V.5. Amplificateur soustracteur



La tension V_1 est appliquée à l'entrée non inverseuse, V_2 est appliquée à l'entrée inverseuse

Pour le calcul de la tension V^+ , on applique le diviseur de tension sur l'entrée « + »

$$V^+ = \frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Pour le calcul de la tension V^- , on applique le théorème de Millman sur l'entrée « - »

$$V^- = \frac{\frac{V_2}{R_1} + \frac{V_S}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}; \quad V^- = \frac{V_2 R_2 + V_S R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V^+ = V^-$$

$$\frac{V_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_2 R_2 + V_S R_1}{R_1 + R_2} \implies V_1 R_2 = V_2 R_2 + V_S R_1$$

$$V_S R_1 = R_2 (V_1 - V_2) \implies V_S = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

$$V_S = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

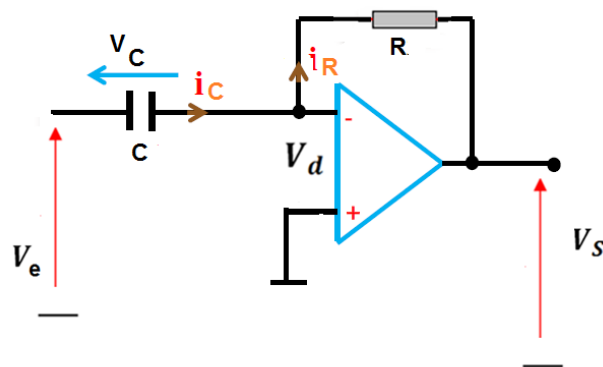
Nous remarquons que la tension de sortie V_S est résultante d'une différence des deux tensions d'entrées V_1 et V_2 , ce qui montre que le montage se comporte bien comme amplificateur de différence (soustracteur).

V.6. Amplificateur dérivateur

Le montage effectue la dérivation du signal à un facteur d'échelle $(-RC)$ en fonction du temps.

AOP parfait :

$$I^+ = I^- = 0 ; V^+ = V^-$$



Le potentiel V^- est pris comme masse virtuelle (M.V)

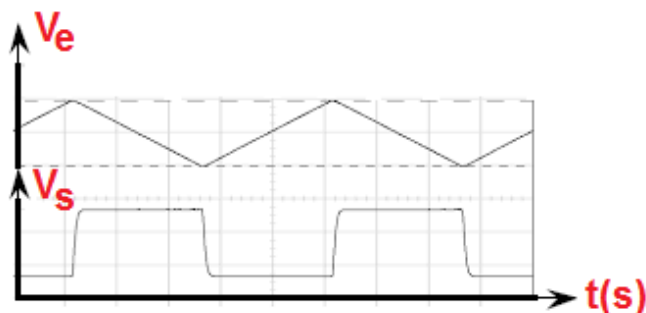
$$i_C = C \frac{dV_C}{dt} \quad (\text{avec } V_e = V_C) \implies i_C = C \frac{dV_e}{dt}$$

$$V_S = -R i_R = -R i_C \quad (\text{puisque } i_C = i_R)$$

$$V_S = -RC \frac{dV_e}{dt}$$

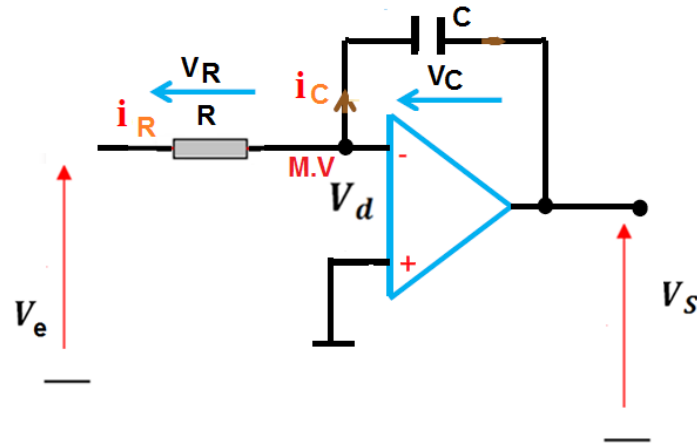
Application : Donner l'allure de $V_S(t)$ sachant que $V_e(t)$ est un signal triangulaire.

La dérivée du signal triangulaire pour la partie croissante ($y=ax+b$) donne une constante positive (Le coefficient directeur est positif) mais pour le coefficient $(-RC)$ on aura en sortie une constante négative et inversement.



V.7. Amplificateur intégrateur

Le montage effectue l'intégration du signal à un facteur d'échelle $(-1/RC)$ en fonction du temps



Le potentiel V^- est pris comme masse virtuelle (**M.V**)

$$V_e = Ri_R \quad (i_C = i_R)$$

$$i_C = \frac{dq}{dt} \quad (\text{avec } q = CV_C) \implies i_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt$$

$$V_S = -V_C = -\frac{1}{C} \int i_R(t) dt \quad (\text{puisque } i_C = i_R)$$

$$i_R = \frac{V_e}{R} \implies V_S = -\frac{1}{CR} \int V_e(t) dt$$

$$V_S = -\frac{1}{CR} \int V_e(t) dt$$

VI. Amplificateur opérationnel en régime de saturation

Pour le régime non linéaire ou régime de saturation, la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs $(+V_{sat}$ ou $-V_{sat})$ et la tension d'entrée V_d n'est plus négligeable.

$$V_d > \frac{V_{Sat}}{A_d} \rightarrow V_S = +V_{sat}$$

$$V_d < -\frac{V_{Sat}}{A_d} \rightarrow V_S = -V_{sat}$$

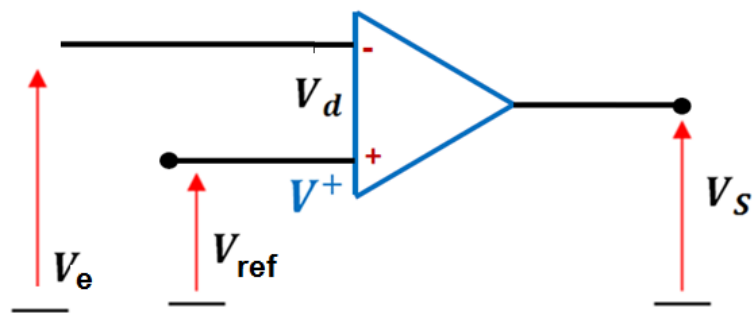
$$V_d = V^+ - V^- \neq 0$$

Dans un montage en régime non linéaire l'amplificateur est soit en boucle ouverte, soit en présence d'une réaction positive (pas de contre réaction).

VI.1. Fonctionnement

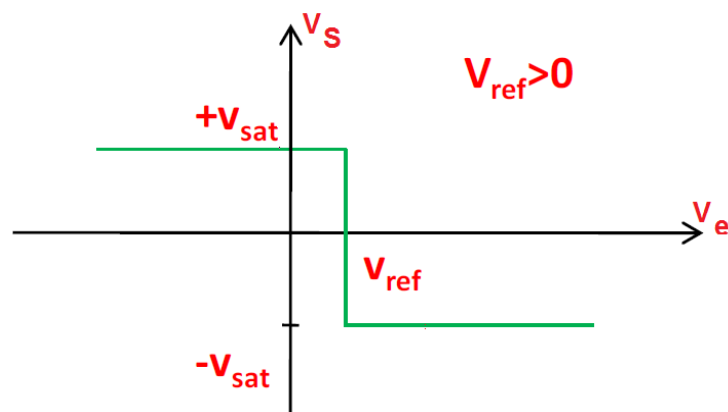
VI.1. 1. Sans réaction et avec entrée négative

La sortie bascule d'un régime de saturation à un autre



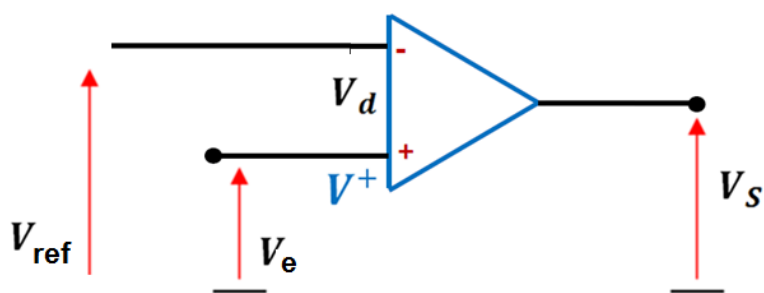
Si $V_d > 0 \implies V_e < V_{ref} \implies V_S = +V_{sat}$

Si $V_d < 0 \implies V_e > V_{ref} \implies V_S = -V_{sat}$



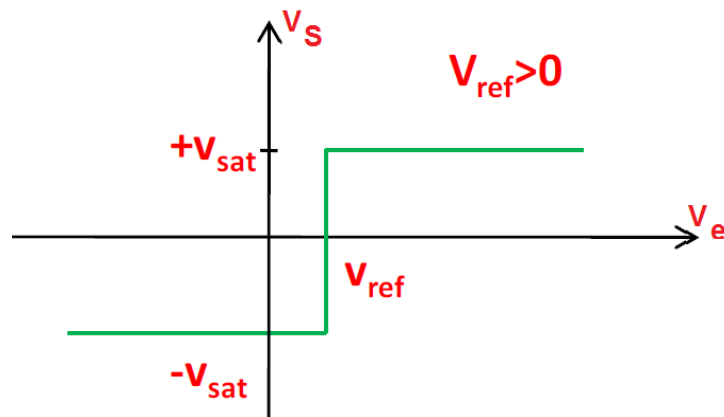
VI.1. 2. Sans réaction et avec entrée positive

On aura toujours à la sortie un basculement d'un régime de saturation à un autre



Si $V_d > 0 \implies V_e > V_{ref} \implies V_S = +V_{sat}$

Si $V_d < 0 \implies V_e < V_{ref} \implies V_S = -V_{sat}$



Basculement :

Quand la tension V_e dépasse la tension de référence V_{ref} , il y aura un basculement et le signe de la tension de sortie V_S changera

VI.1.3 Comparateur simple

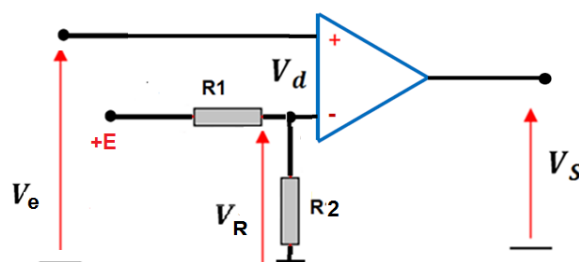
Le comparateur est un dispositif permettant de comparer une tension par rapport à une référence donnée. Le montage du comparateur se fait sans contre-réaction (boucle ouverte).

En général dans un comparateur, une tension de référence est mise en place sur la borne inverseuse et la borne non inverseuse mesure la tension à comparer (sur l'exemple qu'on va présenter on injecte V_e sur la borne non inverseuse).

La tension de référence peut être obtenue par exemple par un pont diviseur de tension où V_{ref} peut être variée par action sur les résistances du pont diviseur.

Exemple :

Soit le comparateur non inverseur présenté dans le montage suivant. L'amplificateur ne présente pas de contre réaction, il fonctionne en régime non linéaire (régime de saturation). On veut comparer une tension d'entrée V_e à une tension de référence V_R .



Pour la détermination de la tension de référence V_R , on applique le diviseur de tension aux bornes de la résistance R_2 .

$$V_R = \frac{ER_2}{R_1 + R_2}$$

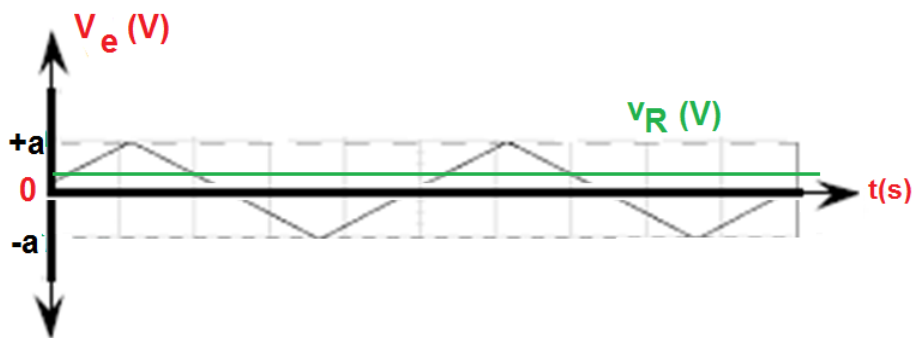
On remarque que la tension de référence, peut être ajustée par le biais des deux résistances.

L'AOP est en mode saturé :

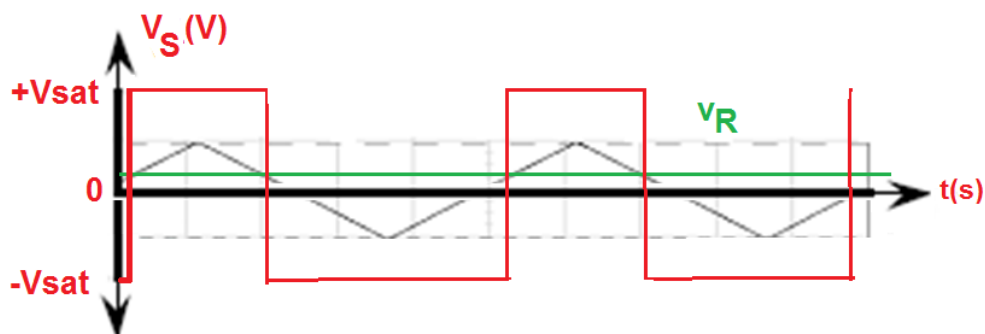
$$V_e > V_R \implies V_S = +V_{sat}$$

$$V_e < V_R \implies V_S = -V_{sat}$$

On veut tracer $V_S(t)$ sachant que le signal d'entrée $V_e(t)$ est un signal triangulaire.



Suite au basculement de la tension de sortie qui est imposé par le mode saturé, on aura l'allure de $V_S(t)$:



Le résultat montre bien que les maximums de la tension injectée (la tension d'entrée), coïncident avec les maximums de la tension de sortie (même chose pour les minimums : les minimums de la tension d'entrée coïncident avec les minimums de la tension de sortie). Donc c'est un comparateur non inverseur.

Pour réaliser un comparateur inverseur on inverse les entrées et on injecte la tension d'entrée sur la borne inverseuse de l'amplificateur opérationnel.