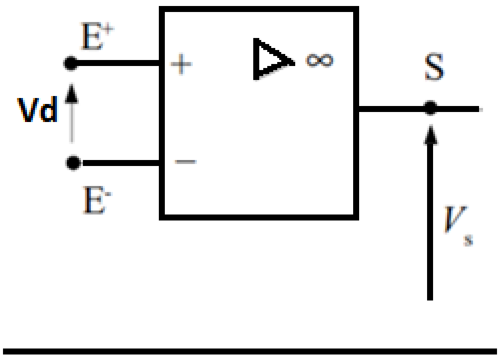
8. Les amplificateurs opérationnels

8.1. Définition

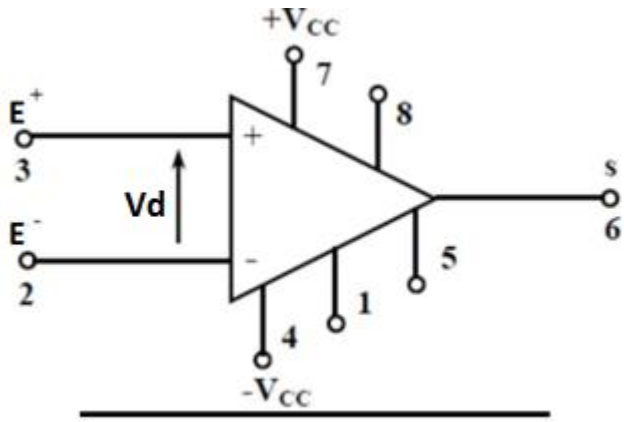
Un amplificateur opérationnel (AOP) est un ***circuit intégré*** constitué d'un assemblage de transistors et de résistances dont la fonction de base est l'amplification. Il est caractérisé par :

- Deux bornes d'entrées : non inverseuse E^+ (borne 3) et inverseuse E^- (borne2) ;
- Une borne de sortie S (borne 6) ;
- Deux bornes pour l'alimentation : positive $+V_{CC}$ (borne 7) et négative $-V_{CC}$ (borne 4) ;
- Les bornes 1 et 5 peuvent servir à la connexion des résistances et des capacités (pour le réglage d'offset et la correction en fréquence) ;
- La borne 8 est non utilisée ;
- Une tension d'entrée différentielle représentée par $V_d = E^+ - E^-$ liée à la tension de sortie par la relation : $V_S = A_d V_d$ avec A_d le gain différentiel.
- Un coefficient d'amplification.

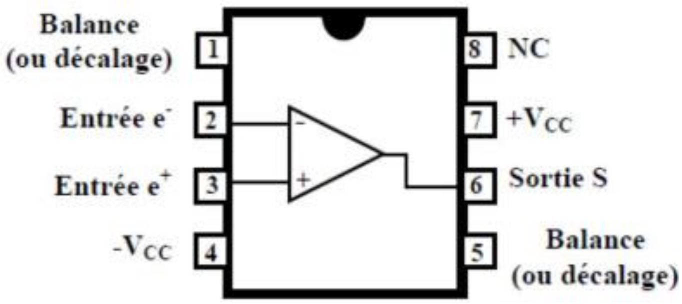
Les schémas ci-dessous donnent les symboles d'un AOP selon les normes européenne et américaine et un boitier standard du 741 ou TL081



Norme européenne



Norme américaine



8.1.1. Fonctionnement d'un AOP

- En amplificateur de signaux faibles selon un gain préalablement calculé ;
- Comparateur d'un signal par rapport à une référence donnée ;
- Trigger de schmidt ou comparateur à hystérésis;
- Générateur de signaux carré et triangulaire ;
- Additionneur, soustracteur etc… de divers signaux.

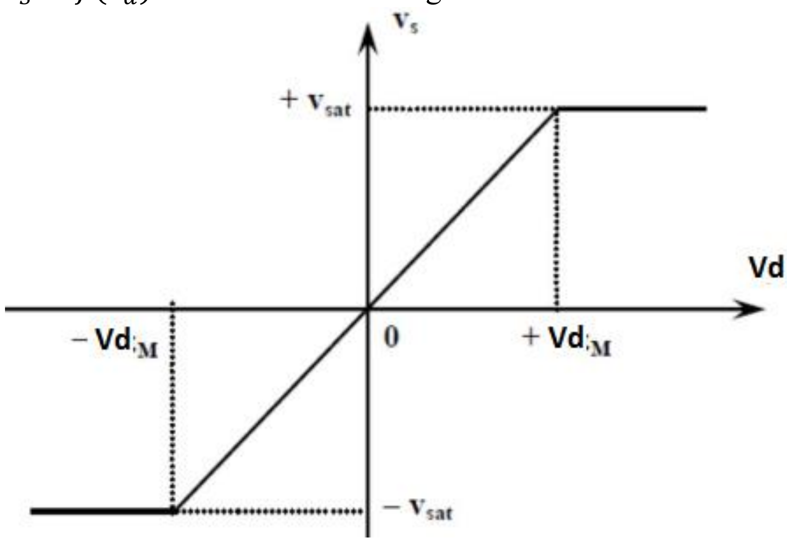
8.1.2. Caractéristiques de l'AOP idéal

Un amplificateur opérationnel est considérée idéal si :

- Son coefficient d'amplification ou l'amplification différentielle ou gain représenté par $A_d = \frac{V_S}{V_d}$ est infini ;
- La tension d'entrée V_d est nulle ;
- L'impédance d'entrée Z_e est infinie,
- L'impédance de sortie Z_s est nulle ;
- Les intensités des courants i^+ et i^- respectivement sur les entrées <+> et <-> sont nulles.

8.1.3. Régime de fonctionnement

On considère la caractéristique de transfert $V_S = f(V_d)$ d'un AOP. On distingue sur cette caractéristique deux zones différentes donnant deux régimes de fonctionnement : régime linéaire et régime non linéaire ou de saturation.



- ***Régime linéaire :***
  pour $-V_{dM} < V_d < +V_{dM}$, la tension de sortie est proportionnelle à la tension différentielle d'entrée V_d :

$$V_S = A_0 V_d \text{ et } A_0 = \frac{V_{Sat}}{V_d}$$

- ***Régime non linéaire ou de saturation*** : lorsque la tension V_S n'est pas dans l'intervalle $[-V_{dM} \quad +V_{dM}]$, l'AOP est en régime de saturation. La sortie V_S alors à $+V_{Sat}$ si $V_d > +V_{dM}$ ou à $-V_{Sat}$ si $V_d < -V_{dM}$

Comme la polarisation des éléments internes d'un AOP n'est due qu'à la source de tension continue $\pm V_{CC}$ la sortie V_S est nécessairement comprise entre $-V_{CC} < V_S < +V_{CC}$. Tenant compte des chutes de tensions internes, il y à un déchet ΔV de quelques mV est au plus égale à V_{CC} - ΔV ce qui correspond à la tension de saturation de l'AOP.

$$-V_{Sat} = -V_{CC} + \Delta V < V_S < V_{CC} - \Delta V = +V_{Sat}$$

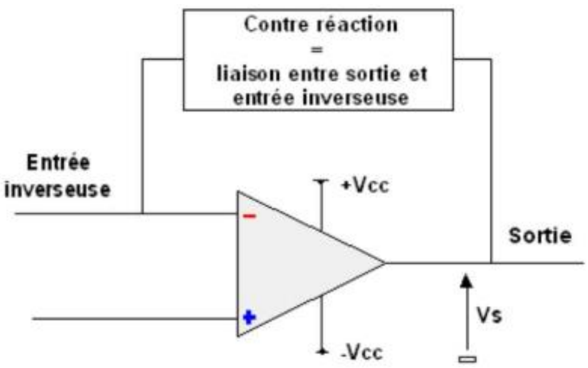
Lorsque l'AOP est utilisé en boucle ouverte (sans contre réaction), le fonctionnement linéaire est pratiquement impossible, du fait de la valeur très élevée du gain en tension $A_d \approx 10^4$, une légère tension différentielle V_d fait tendre la sortie V_S à $+V_{Sat}$ ou à $-V_{Sat}$ selon que $V_d > 0$ ou $V_d < 0$.

8.1.4. Applications des amplificateurs opérationnels

L'AOP trouve diverses applications dans le domaine de l'électronique, en effet, plusieurs montages sont possibles. Dans ce chapitre, on va traiter les applications les plus utilisées pour les deux régimes de fonctionnement, linéaire et non linéaire.

8.1.4.1. Fonctionnement en régime linéaire

Une partie de la sortie de sortie est réinjectée à l'entrée inverseuse, pour des raisons de stabilité. C'est la contre réaction ou réaction négative. En effet l'AOP est en boucle fermée et opère dans la zone linéaire de la caractéristique de transfert.



Contre réaction

Pour le montage en régime linéaire, on considérera l'AOP comme idéal (hypothèse simplificatrice). Ce qui se traduit par un gain différentiel A_d infinie et la tension de sortie comprise entre $-V_{CC} \approx -V_{Sat}$ et $+V_{CC} \approx +V_{Sat}$. On obtient ainsi une tension V_d nulle

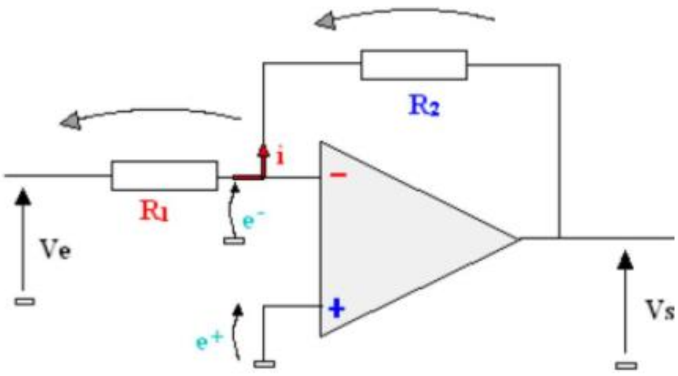
$V_d = \frac{V_S}{A_d}$ (En pratique quelques μV). Dans ces conditions on négligera V_d (V_d sera considérée comme identiquement nulle, les entrées + et – sont au même potentiel)

- Le gain différentiel sera considéré comme infini A_d tend vers l'infini ;
- Les impédances d'entrée sont infinies donc les courants d'entrée sont nuls : $i^+=i^-= 0$

Tous les montages étudiés dans cette partie fonctionnent en régime linéaire, ils seront tous caractérisés par une contre réaction, c'est-à-dire une liaison (fil, condensateur, etc.…)

8.1.4.1.1. Montage inverseur

C'est le montage à amplificateur opérationnel le plus utilisé.



Montage inverseur

L'entrée e^+ est reliée à la masse

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+= e^-$ AOP idéal → $i^+= i^-= 0$

Loi des mailles :

$V_e = U_{R1} + e^- = U_{R1}$

$$V_S = -U_{R2} + e^+ = -U_{R2}$$

Loi d'Ohm en régime quelconque : $U_{R1} = R_1 i$ et $U_{R2} = R_2 i$

$$\frac{V_S}{V_e} = \frac{-U_{R2}}{U_{R1}} = \frac{-R_2 i}{R_1 i}$$

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

8.1.4.1.2. Montage non inverseur

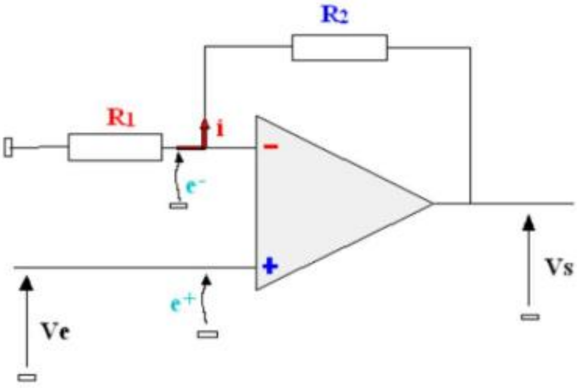
Cette fois l'entrée e^+ est reliée à la tension d'entrée.

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR)
→ $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

$$e^+ = V_e$$

La formule du pont diviseur donne :

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



Montage non-inverseur.

D'où :

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

Cette fois le gain est positif, il est toujours supérieur à 1. On ne peut pas donc utiliser ce montage comme atténuateur.

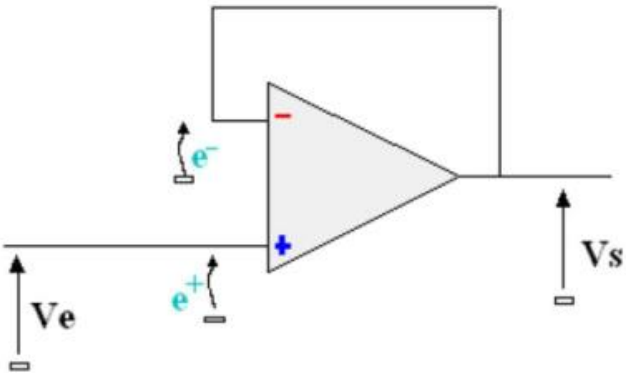
8.1.4.1.3. Montage suiveur

C'est un montage qui peut être utilisé comme adaptateur d'impédance.

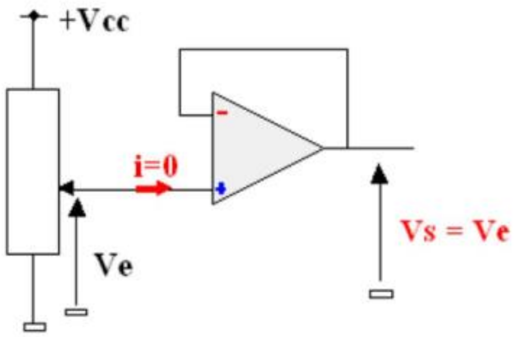
Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR)
→ $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

Loi des mailles : $e^+ = V_e$ et $e^- = V_S$

$e^- = e^+ \leftrightarrow V_e = V_S$



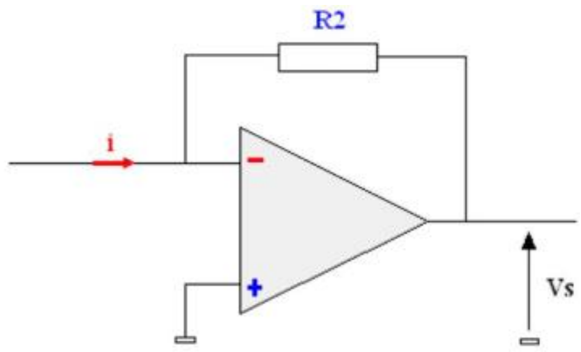
L'intérêt du montage suiveur est qu'il présente une impédance d'entrée théoriquement infinie (*i=0)* et une impédance de sortie faible. Dans l'exemple du montage suivant (capteur potentiométrique) son utilisation permet de se rapprocher des conditions idéales (le courant débité par le capteur potentiométrique est nul, la charge ne perturbe pas le fonctionnement du capteur). C'est un montage de gain unité dont la seule fonction est l'adaptation d'impédance.



Utilisation du montage suiveur

8.1.4.1.4. Convertisseur courant-tension

La grandeur d'entrée est le courant i, la grandeur de sortie est la tension V_S. On cherche à donc à établir une relation entre ces deux grandeurs.



Convertisseur courant-tension

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

Loi des mailles : $V_S = -U_{R2} + e^- = -U_{R2}$

Loi d'Ohm : $U_{R2} = R_2 i$ et $V_S = -R_2 i$

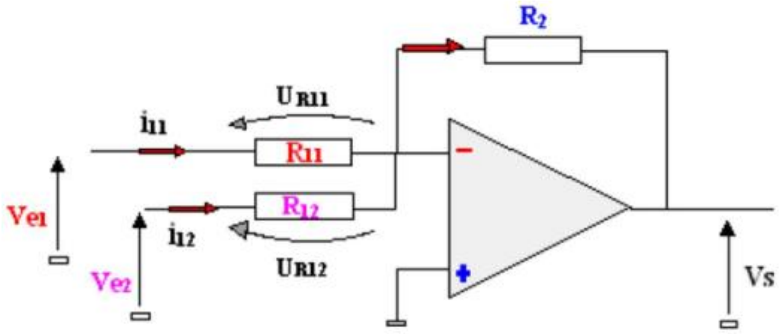
8.1.4.1.5. Montage sommateur inverseur

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

Loi des mailles :

$V_{e1} = U_{R11} + e^- = U_{R11}$

$V_{e2} = U_{R12} + e^- = U_{R12}$



Montage sommateur inverseur.

Loi d'Ohm : $U_{R11} = R_{11} i_1 \leftrightarrow i_1 = \frac{U_{R11}}{R_{11}}$

De même :

$$i_2 = \frac{U_{R12}}{R_{12}}$$

Loi des nœuds : $i = i_1 + i_2$

Loi des mailles : $V_S = -U_{R2} + e^- = -U_{R2}$

Loi d'Ohm : $U_{R2} = R_2 i$

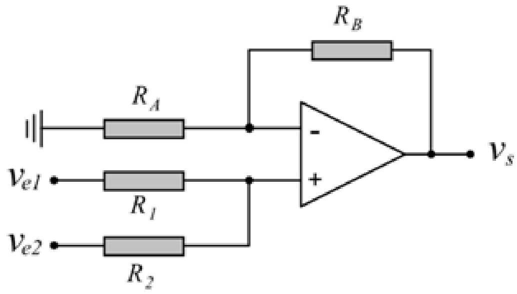
$V_S = -R_2(i_1 + i_2) \leftrightarrow$:

$$V_S = -R_2\left(\frac{V_{e1}}{R_{11}} + \frac{V_{e2}}{R_{12}}\right)$$

8.1.4.1.6. Montage sommateur non inverseur

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

$e^- = \frac{R_A}{R_A+R_B} V_S$



$$e^+ = \frac{R_2V_1 + R_1V_2}{R_1 + R_2}$$

$e^+ = e^- \rightarrow$:

$$V_S = \frac{R_A + R_B}{R_A(R_1 + R_2)}(R_2V_1 + R_1V_2)$$

Si $R_1 = R_2$ l'expression de V_S devient :

$$V_S = \frac{R_A + R_B}{2R_A}(V_1 + V_2)$$

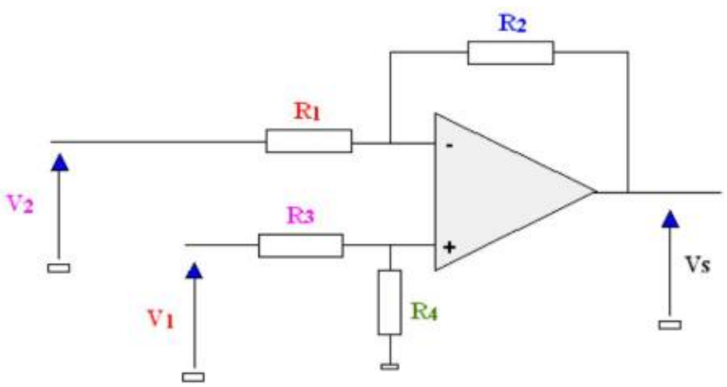
Si en plus $R_A = R_B$ on obtient :

$$V_S = V_1 + V_2$$

8.1.4.1.7. Amplificateur de différence

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

$$e^{+} = \frac{R_4}{R_3 + R_4}V_1$$



Théorème de superposition :

$$e^{-} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_S + \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_2$$

AOP idéal et CR → : $e^+ = e^- \leftrightarrow$:

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4}V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_S + \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_2$$

$$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_1}\left[\frac{R_4}{R_3 + R_4}V_1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}V_2\right]$$

Pour obtenir un amplificateur de différence les coefficients de V_1 et de V_2 doivent êtres identiques.

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Soit :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

On obtient alors :

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

8.1.4.1.8. Montage intégrateur

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

Courant i dans C :

$$i = C\frac{dv_c}{dt} = \frac{v_e}{R}$$

$$v_c = -v_S$$

Donc :

$$v_S(t) = -\frac{1}{RC}\int v_e(t)dt$$

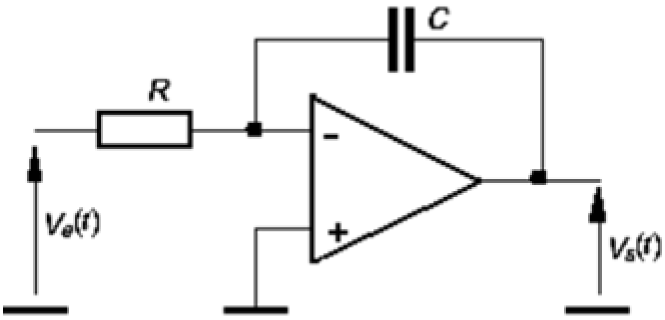


Figure 8: Intégrateur

8.1.4.1.9. Montage dérivateur

Hypothèse : AOP idéal et la contre réaction (CR) → $e^+ = e^-$ AOP idéal → $i^+ = i^- = 0$

Courant *i* dans *C* :

$$i = C\frac{dv_e}{dt} = -\frac{v_S}{R}$$

$$v_S(t) = -RC\frac{dv_e(t)}{dt}$$

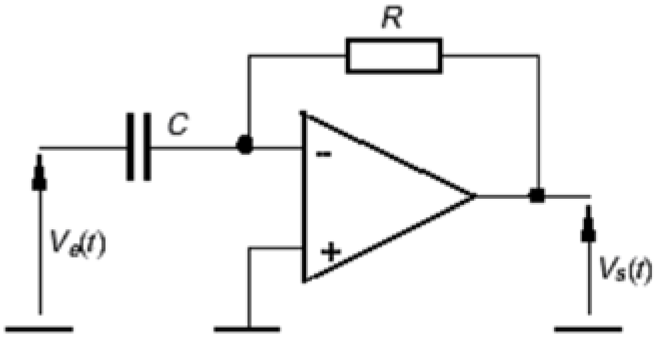


Figure 9: Dérivateur

8.1.4.2. Fonctionnement en régime non linéaire

Dans ce mode de fonctionnement, on fait intervenir la caractéristique non linéaire de l'AOP, qui fonctionne soit en boucle ouverte soit avec contre réaction positive. On peut utiliser également des composants non linéaires tels que les diodes et les transistors.

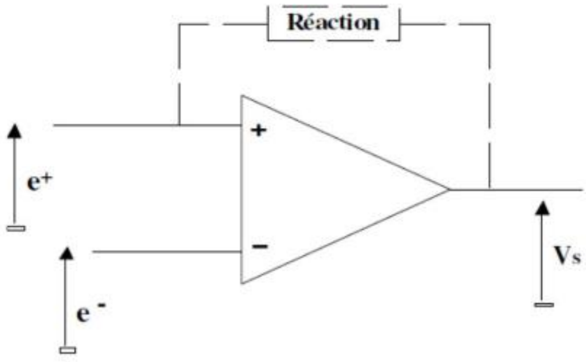
8.1.4.2.1. Comparateur

Le comparateur, comme son nom le suggère, est un composant qui compare deux tensions et qui indique laquelle la plus grande. Le signal de sortie du comparateur ne peut prendre que deux niveaux différents (niveau haut et niveau bas) en fonction de la différence des tensions présentes sur les entrées inverseuse et non inverseuse :

La suppression de la contre réaction entraine le basculement de la tension de sortie entre $+V_{Sat}$ et $-V_{Sat}$ où V_{Sat} est la tension de saturation de l'AOP, qui est légèrement inférieure à la tension d'alimentation.

La fonction comparateur peut être réalisée à l'aide d'un AOP ou d'un circuit plus spécialisé appelé comparateur. Dans tous les cas il n y a pas de contre réaction (c'est-à-dire une liaison entre la sortie et l'entrée inverseuse), il y a parfois une réaction, c'est-à-dire une liaison entre la sortie et l'entrée non inverseuse. Il s'agit des montages trigger. Dans ce cas, une hystérésis est obtenue grâce à la présence de la réaction.

- **Si $V_d = e^+ - e^- > 0$ c'est-à-dire $e^+ > e^-$ la sortie du comparateur est en butée haute $V_S = +V_{CC}$**
- **Si $V_d = e^+ - e^- < 0$ c'est-à-dire $e^+ < e^-$ la sortie du comparateur est en butée basse $V_S = -V_{CC}$**



Fonctionnement en régime non-linéaire

Dans ces montages les tensions présentes sur les entrées inverseuse et non inverseuse ne sont pas égales (la tension V_{ed} est différente de 0), ces tensions e^+ et e^- sont imposées par les circuits extérieurs.

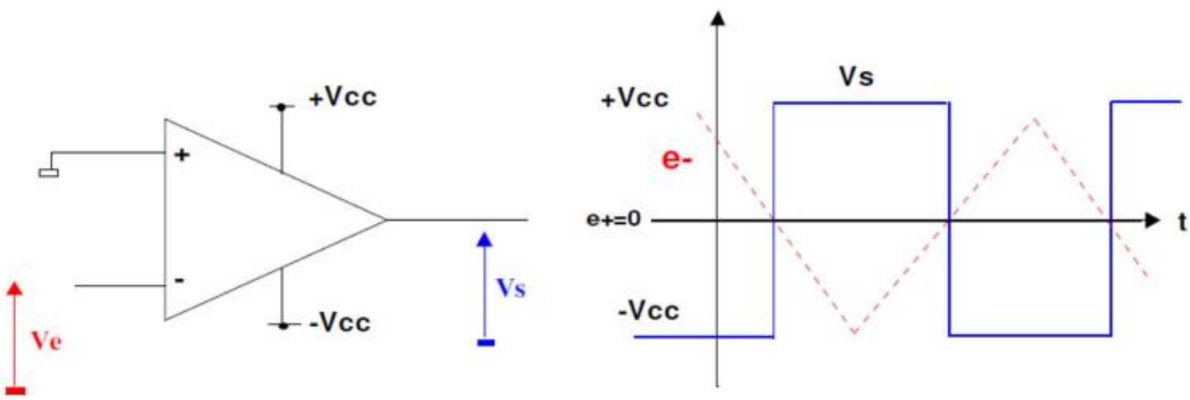
8.1.4.2.1.1. Montage comparateur inverseur

Le montage de la figure ci-dessous permet de comparer la tension V_e à la tension présente sur l'entrée non inverseuse du comparateur égale à zéro dans cet exemple.

La tension e^- est égale à a tension d'entrée V_e : $e^- = V_e$

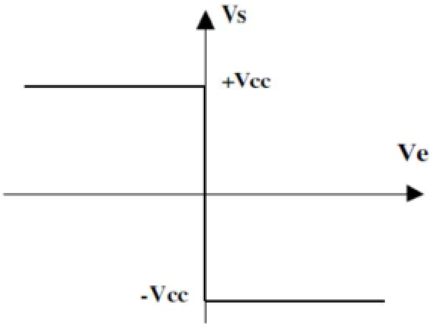
La tension e^+ est nulle : $e^+ = 0$

- Lorsque la tension d'entrée est positive ($e^+ - e^- < 0$ ou $V_e > 0$), la tension e^- (égale à V_e) est supérieure à la tension e^+ (égale à 0) ; le comparateur est en butée basse ($V_S = -V_{CC} \approx -V_{Sat}$) ;
- Lorsque la tension d'entrée est négative ($e^+ - e^- > 0$ ou $V_e < 0$), la tension e^+ (égale à 0) est supérieure à la tension e^- (égale à V_e négative) ; le comparateur est en butée haute ($V_S = +V_{CC} \approx +V_{Sat}$).



Montage inverseur

La figure ci après précise la caractéristique de transfert du montage, c'est-à-dire la relation liant la grandeur d'entrée (tension V_e) à la grandeur de sortie (tension V_S).



Caractéristique de transfert du comparateur inverseur

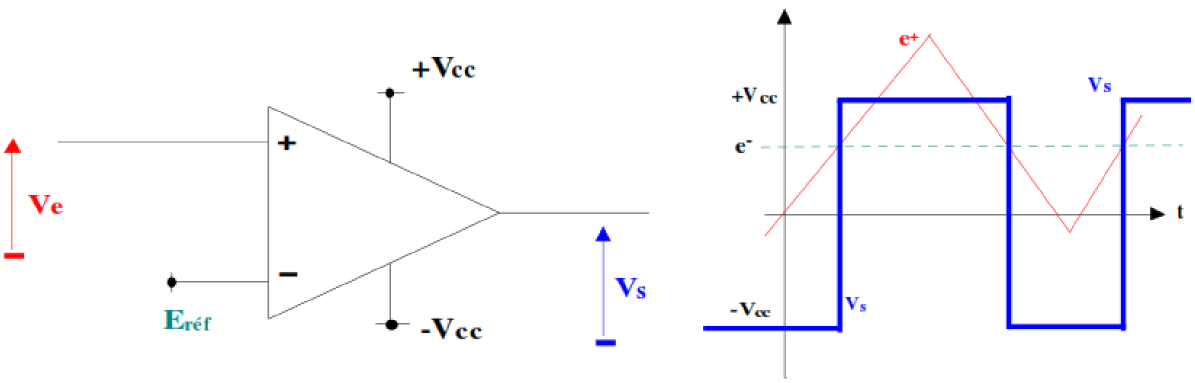
8.1.4.2.1.2. Montage comparateur non inverseur

La tension V_e est appliquée sur l'entrée non inverseuse tandis que sur l'autre entrée, on applique une tension constante égale à E_{ref}.

La tension e^- est égale à la tension de référence E_{ref} : $\boldsymbol{e^- = E_{ref}}$.

La tension e^+ est égale à la tension d'entrée : $\boldsymbol{e^+ = V_e}$

On compare ainsi une tension d'entrée à une tension de référence, la sortie du comparateur indiquera donc si tension d'entrée est supérieure ou inférieure à la tension de référence.

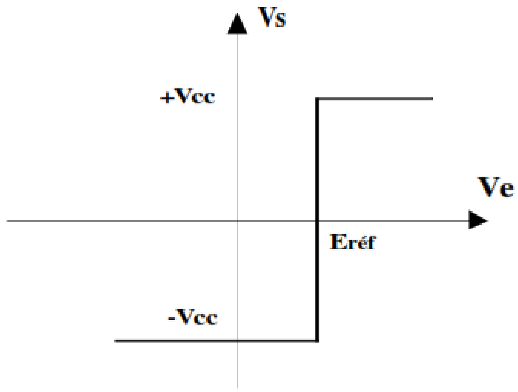


Comparateur non inverseur

Lorsque $V_e > E_{ref}$ $(e^+ > e^-)$ le comparateur est en butée haute ($V_S = +V_{CC}$)

Lorsque $V_e < E_{ref}$ $(e^+ < e^-)$ le comparateur est en butée basse ($V_S = -V_{CC}$)

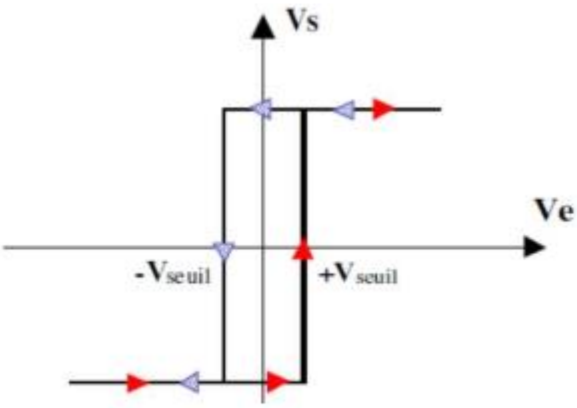
La figure ci-après précise la caractéristique de transfert, c'est-à-dire la relation liant la grandeur d'entrée (V_e) à la grandeur de sortie (V_S).



Caractéristique de transfert du comparateur non- inverseur

8.1.4.2.2. Comparateur à hystérésis ou trigger de schmidt (comparateur à deux seuils)

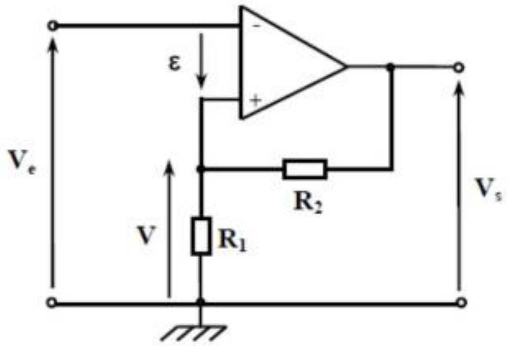
Un montage Trigger de Schmidt ou comparateur à hystérésis est un montage possédant deux seuils de basculement différents. Le basculement s'effectuant pour le seuil V_{seuil+} lors du passage de la butée basse vers la butée haute et pour le seuil V_{seuil-} pour le retour (passage de la butée haute vers la butée basse).



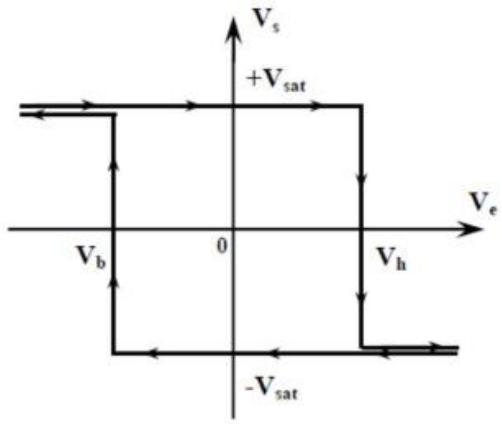
Caractéristique de transfert du comparateur à hystérésis

- **Montage Trigger inverseur**

Pour le montage Trigger inverseur de la figure ci-dessous, on observe une réaction (liaison assurée par la résistance R_2 entre la sortie et l'entrée non inverseur).



Comparateur inverseur



Caractéristique de transfert

En l'absence de R_2, on obtiendrait un comparateur inverseur (le signal est appliqué à l'entrée inverseuse), la tension d'entrée serait comparée à la tension de référence. La présence de cette résistance introduit deux seuils de basculement différents (symétrique par rapport à la tension de référence) suivant le sens de parcours (butée basse vers butée haute ou l'inverse).

A cause de la résistance R_2 la tension e^+ dépend également de la tension de sortie V_S qui est tantôt positive ($V_S = +V_{Sat}$) tantôt négative ($V_S = -V_{Sat}$).

$$V_d(t) = V(t) - V_e(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_S(t) - V_e(t)$$

Supposons au début $V_d > 0$ d'où $V_S = +V_{Sat} \rightarrow V_d(t) = +\frac{R_1}{R_1+R_2} V_{Sat} - V_e(t)$

Lorsqu'on augmente V_e jusqu'à l'instant t_1 où $V_d(t_1) = 0$. Si V_e continue à augmenter, V_d devient négative et par conséquent V_S bascule de $+V_{Sat}$ à $-V_{Sat}$. Alors t_1 est l'instant du premier basculement de V_S de $+V_{Sat}$ à $-V_{Sat}$ dans le sens ascendant (aller) de la tension V_e ce qui correspond à une valeur V_h telle que :

$V_d(t_1) = 0 \rightarrow V_e(t) = V_h = \frac{R_1}{R_1+R_2} V_{Sat}$

V_h est appelé seuil de basculement haut. V_S reste à la valeur $-V_{Sat}$ tant que V_e continue à augmenter, alors :

$$V_d(t) = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{Sat} - V_e(t)$$

Lorsqu'on diminue V_e jusqu'à l'instant t_2 ou $V_d(t_2) = 0$. Si V_e continue à diminuer V_d devient positive et par conséquent V_S bascule de $-V_{Sat}$ à $+V_{Sat}$. Alors t_2 est l'instant du deuxième basculement de V_S de $-V_{Sat}$ à $+V_{Sat}$ dans le sens descendant (retour) de la tension V_e ce qui correspond à une valeur V_b telle que :

$$V_d(t_2) = 0 \rightarrow V_e(t_2) = V_b = -\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{Sat} = -V_h$$

V_b est appelé seuil de basculement bas. V_S reste à la valeur $+V_{Sat}$ tant que V_e continue à diminuer, alors :

$$V_d(t) = +\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{Sat} - V_e(t)$$

On définit la **tension d'hystérésis** ΔV_h par :

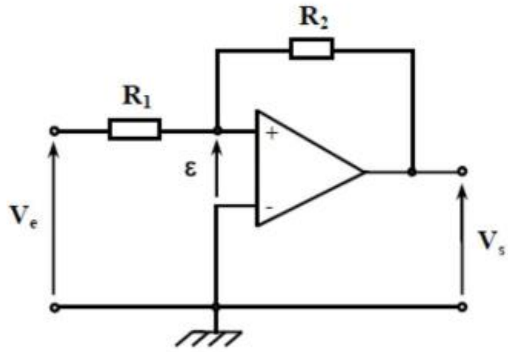
$$\Delta V_h = V_h - V_b = \frac{2R_1}{R_1+R_2}V_{Sat}$$

Le cycle d'hystérésis est dit symétrique.

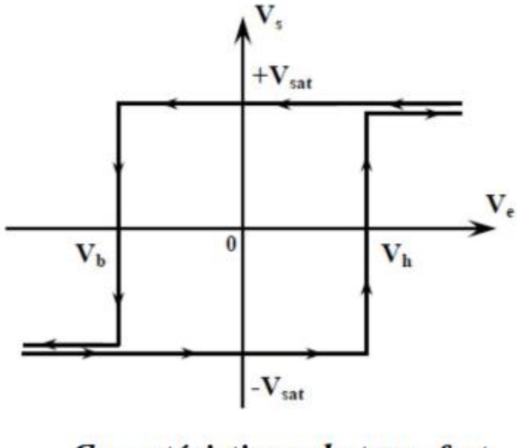
- **Montage Trigger non inverseur**

Pour le montage trigger non inverseur de la figure ci-dessous, on observe une réaction (liaison assurée par R_2 entre la sortie et l'entrée non inverseur). En l'absence de résistance R_2, on obtiendrait un comparateur non inverseur, la tension d'entrée étant comparée à 0, dans ce cas ($e^-=0$). La caractéristique de transfert fait apparaitre deux seuils de basculement.

$$V_d(t) = e^+(t) - e^-(t) = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_e(t) + \frac{R_1}{R_1+R_2}V_S(t)$$



Comparateur non inverseur



Caractéristique de transfert

Supposons au début $V_d < 0$ d'où $V_S = -V_{Sat} \rightarrow$:

$$V_d(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e(t) - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$$

Lorsqu'on augmente V_e jusqu'à l'instant t_1 où $V_d(t_1) = 0$. Si V_e continue à augmenter, V_d devient positive et par conséquent V_S bascule de $-V_{Sat}$ à $+V_{Sat}$. Alors t_1 est l'instant du premier basculement de $V_S(t)$ de $-V_{Sat}$ à $+V_{Sat}$ dans le sens ascendant (aller) de la tension $V_e(t)$ ce qui correspond à une tension V_h telle que :

$V_d(t) = 0 \rightarrow V_d(t_1) = V_h = +\frac{R_1}{R_2} V_{Sat}$

V_h est appelée seuil de basculement haut. V_S reste à la valeur $+V_{Sat}$ tant que V_e continue à augmenter, alors :

$$V_d(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e(t) + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{Sat}$$

Lorsqu'on diminue V_e jusqu'à l'instant t_2 où $V_d(t_2) = 0$. Si V_e continue à diminuer, V_d devient négative et par conséquent $V_S$bascule de $+V_{Sat}$ à $-V_{Sat}$. Alors t_2 est l'instant du deuxième basculement de $V_S(t)$ de $+V_{Sat}$ à $-V_{Sat}$ dans le sens descendant (retour) de la tension de $V_e(t)$ ce qui correspond à une valeur V_b telle que :

$V_d(t_2) = 0 \rightarrow V_e(t_2) = V_b = -\frac{R_1}{R_2} V_{Sat}$

V_b est appelée seuil de basculement bas. V_S reste à la valeur $-V_{Sat}$ tant que V_e continue à diminuer, alors :

$$V_d(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e(t) - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$$

On définit la **tension d'hystérésis** par :

$$\Delta V_h = V_h - V_b = 2\frac{R_1}{R_2} V_{Sat}$$