

Chapitre 8

Amplificateur opérationnel

1. Introduction

Un amplificateur opérationnel est à l'origine un amplificateur différentiel (annexe du cours). Ce dernier possède deux entrées isolées par rapport à la masse et une sortie. L'amplificateur différentiel était conçu au début pour amplifier la différence de potentiel entre deux points.

La naissance des amplificateurs opérationnels est apparue avec le développement des circuits intégrés monolithiques (formé dans un bloc uniforme et homogène) au début des années 60. Ces circuits sont construits sur une plaquette mince de silicium monocristallin ($\approx 100 \mu\text{m}$ d'épaisseur et 1mm^2 à 1cm^2 de surface) et peuvent contenir un très grand nombre de composants électroniques élémentaires (transistors, diodes, résistances, condensateurs). On les appelle "puces électroniques".

L'appellation "amplificateur opérationnel" provient du fait qu'en associant judicieusement ce dernier avec des éléments passifs, on obtient des circuits qui permettent d'effectuer des opérations de l'électronique (amplification, addition, soustraction, intégration, etc. ...).

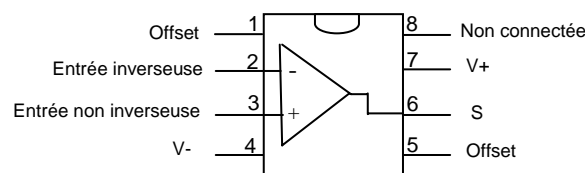
2. Amplificateur opérationnel

2.1 Présentation

L'amplificateur opérationnel est intégré sur un substrat unique (puce) dont la surface est de l'ordre de 1mm^2 : il contient une association convenable de transistors à effet de champ, des transistors bipolaires et des éléments passifs. Cette puce est placée dans un boîtier parallélépipédique ou cylindrique d'où sortent un certain nombre de connexions métalliques isolées (pattes).

Le type de circuit est inscrit sur le boîtier de l'amplificateur. On distingue souvent les connexions suivantes:

- ◆ deux bornes d'alimentations $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$ (généralement $+15\text{V}$ et -15V);
- ◆ une borne d'entrée dite "entrée non inverseuse" notée "+";
- ◆ une borne d'entrée dite "entrée inverseuse" notée "-";
- ◆ une borne de sortie S.



2.2 Branchement

Comme pour tout composant actif nécessitant des sources de polarisation, l'amplificateur opérationnel fonctionne avec deux alimentations de même valeurs ($+V_{cc}$ et $-V_{cc}$) qui possèdent une même masse commune (figure 1-a)..

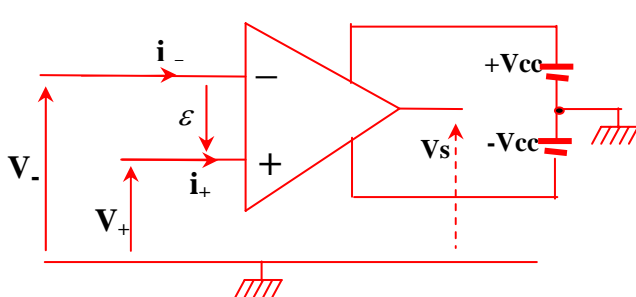


Figure 1-a

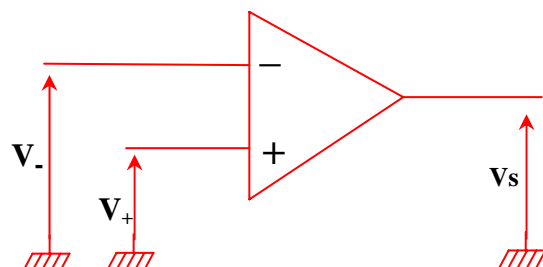


Figure 1-b

Par souci de simplification, on utilise souvent le schéma de la figure 1-b

2.3 Paramètres fondamentaux d'un amplificateur opérationnel

2.3.1 Gain différentiel en boucle ouverte

Dans sa zone de linéarité, l'amplificateur opérationnel fournit une tension de sortie V_s proportionnel à la différence des tensions d'entrée V_+ et V_- : On a $V_s = A_0 (V_+ - V_-) = A_0 \varepsilon$ (en fonctionnement linéaire).

A_0 est le gain différentiel en boucle ouverte. Sa valeur est très élevée ($A_0 > 10^4$ à 10^6).

2.3.2 Mode commun

Dans le cas d'un amplificateur réel, si on applique aux deux entrées une même tension V_{mc} dite tension en mode commun (figure 2), on obtient une tension de sortie V_s non nulle !! : $V_s = A_{mc} V_{mc}$. A_{mc} est le gain en mode commun.

Notons que cette tension apparaît à cause de la dissymétrie inévitable existante entre les entrées de l'amplificateur opérationnel (éventuels défauts de construction).

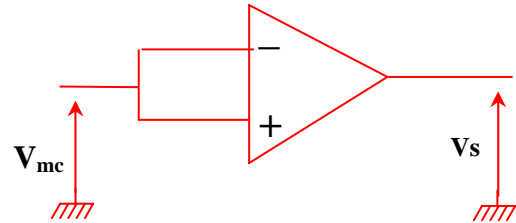


Figure 2

Si V_+ et V_- sont différents, on définit la tension en mode commun par $V_{mc} = \frac{V_+ + V_-}{2}$.

Ainsi la tension de sortie devient: $V_s = A_0 (V_+ - V_-) + A_{mc} \frac{V_+ + V_-}{2}$

Le terme dû au mode commun traduit l'imperfection de l'amplificateur opérationnel. On caractérise l'amplificateur opérationnel par le taux de réjection en mode commun exprimé en décibels par :

$T_{mc} = 20 \log \left| \frac{A_0}{A_{mc}} \right|$. Selon les amplificateurs opérationnels, T_{mc} est de l'ordre de 70 à 140 décibels.

Notons que le terme dû au mode commun est négligeable pour des tensions V_+ et V_- faibles (cas où V_+ et V_- sont de l'ordre du mV)

2.3.3 Caractéristique de transfert et schéma équivalent d'un amplificateur opérationnel

a) Amplificateur opérationnel réel

Caractéristique de transfert

Du fait de la dissymétrie inévitable entre les entrées de l'amplificateur opérationnel (tension de décalage ε_0), la caractéristique de transfert ne passe pas par l'origine

La caractéristique de transfert d'un amplificateur opérationnel réel est décrite par le schéma de la figure 3:

On distingue trois zones :

- ◆ Une zone d'amplification PQ: fonctionnement linéaire de l'amplificateur opérationnel $V_s = A_0 (\varepsilon - \varepsilon_0)$ où A_0 est appelé gain en continu (ou gain en boucle ouverte). $A_0 \approx 200\ 000$ pour un amplificateur opérationnel classique.

- ◆ Deux zones de saturation pour lesquelles $V_s = \pm V_{cc}$

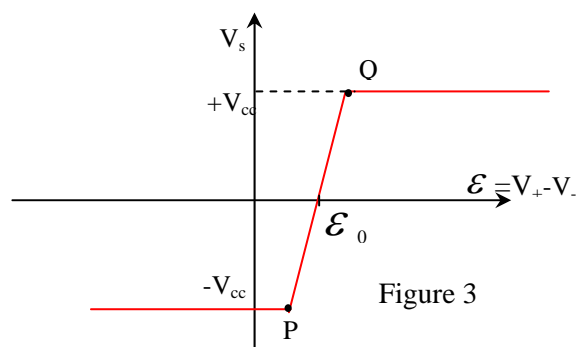


Figure 3

schéma équivalent:

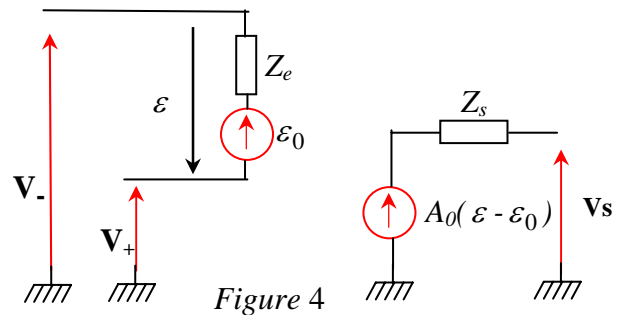
Il est souvent pratique d'utiliser le schéma équivalent d'un amplificateur opérationnel afin d'analyser les circuits électriques contenant ce composant.

En régime d'amplification, un amplificateur opérationnel réel est caractérisé par les paramètres suivants:

- ◆ Z_e : impédance d'entrée ($10^5 < Z_e < 10^{10} \Omega$) en série avec une source de tension ε_0 faible due à la dissymétrie inévitable entre les entrées de l'amplificateur opérationnel ;
- ◆ A_0 : gain en tension à vide en boucle ouverte très grand ($A_0 > 10^4$ à 10^6);

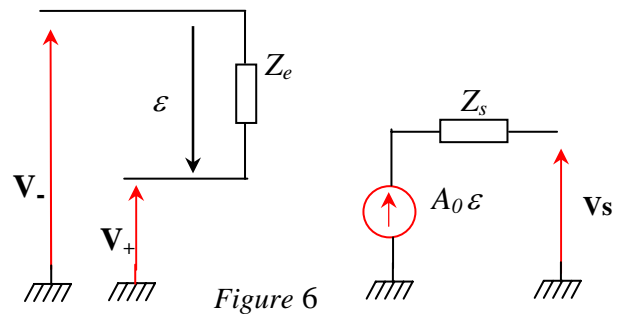
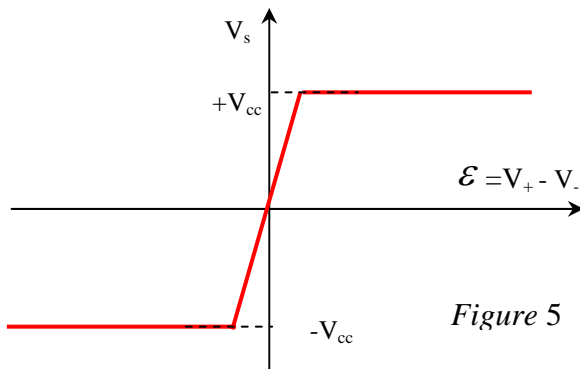
- ◆ Z_s : impédance de sortie faible ($Z_s \approx 100 \Omega$);
- ◆ i_{0+} et i_{0-} : courant de polarisation d'entrée ($\neq 0$ du fait de la dissymétrie entre les deux entrées de l'amplificateur opérationnel).

Ainsi, en régime d'amplification et pour des fréquences peu élevées l'amplificateur opérationnel, vu des bornes d'entrée, est assimilable à une impédance Z_e en série avec une source de tension parfaite ε_0 . Vu de la sortie, l'amplificateur est assimilable à une source de tension à vide $A_0(\varepsilon - \varepsilon_0)$ dont l'impédance interne est Z_s .(figure 4)



Remarque:

- ◆ Du fait que le gain de l'amplificateur opérationnel est très grand, la moindre tension ε recueillie à l'entrée entraîne la saturation de V_s . Ainsi, un amplificateur opérationnel ne pourra fonctionner qu'avec un circuit de contre réaction entre la sortie et l'entrée inverseuse(cf. annexe).
- ◆ A cause de la dissymétrie inévitable entre les entrées de l'amplificateur opérationnel (tension de décalage ε_0), on met une tension "d'offset" ε_0 en série avec l'une des entrées pour que la tension à la sortie soit nulle lorsqu'on applique la même tension aux entrées de l'amplificateur (figure 5)



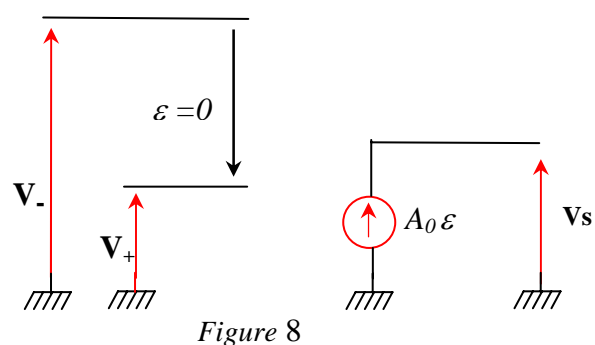
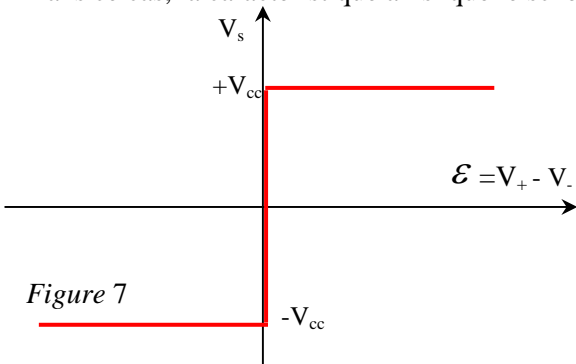
On omet souvent la dissymétrie entre les bornes d'entrées et on utilise souvent le schéma de la figure 6 pour analyser les circuits contenant l'amplificateur opérationnel.

b). Amplificateur opérationnel idéal

Un amplificateur opérationnel idéal présente les particularités suivantes:

- ◆ Un gain en tension en boucle ouverte infini ($A_0 \rightarrow \infty$);
- ◆ Une impédance d'entrée infinie ($Z_e \rightarrow \infty$);
- ◆ Une impédance de sortie nulle ($Z_s=0$);
- ◆ Des courants de polarisation d'entrée i_{0+} et i_{0-} nuls;
- ◆ Un courant d'entrée nul;
- ◆ Une bande passante infinie.

Dans ce cas, la caractéristique ainsi que le schéma équivalent deviennent (figures 7 et 8):



3. Montages fondamentaux utilisant l'amplificateur opérationnel

Rappelons que la nomination "amplificateur opérationnel" provient du fait qu'en associant judicieusement ce dernier avec des éléments passifs, on obtient des circuits qui permettent d'effectuer des opérations de l'électronique (amplification, addition, soustraction, intégration, etc. ...)

Pour tous les montages à suivre, nous supposons *l'amplificateur opérationnel idéal*.

3.1. Fonctionnement en régime linéaire

Dans le cas de montages linéaires, le signal d'entrée et le signal de sortie sont liés par une équation différentielle à coefficients constants.

Pour que l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire, il est impératif que la tension différentielle $V_+ - V_-$ tende vers zéro ($V_+ \approx V_-$). Ceci a pour conséquence une tension de sortie V_s qui est finie.

De ce fait, l'amplificateur opérationnel ne devra pas être utilisé en boucle ouverte (V_s , infinie). On l'utilise toujours avec une contre réaction (c'est à dire en boucle fermée): une fraction de la tension de sortie est injectée sur l'entrée inverseuse afin de contrebalancer la divergence de la tension de sortie (V_s reste toujours finie).

3.1.1. Amplificateur inverseur

C'est le montage de base à amplificateur opérationnel. L'entrée non inverseuse est reliée à la masse; le signal d'entrée est relié à l'entrée inverseuse par une résistance R_1 , et la sortie est reliée à cette entrée par une résistance R_2 (figure 9).

Aucun courant ne passe dans l'amplificateur opérationnel (l'impédance d'entrée étant infini). Le courant d'entrée passe dans R_1 et R_2 pour arriver à la sortie. D'autre part les potentiels des deux entrée inverseuse et non inverseuse sont identiques $V_+ = V_-$.

Comme V_+ est porté à la masse, V_- se retrouve alors au même potentiel. On dit que V_- est une masse virtuelle. L'utilisation de la loi d'ohm donne: $V_e = R_1 i$, $V_s = -R_2 i$ et $A_v = V_s / V_e = -R_2 / R_1$.

Le gain en tension est négatif et ne dépend que de R_1 et R_2 . La tension d'entrée et de sortie sont de signe opposé (en particulier en opposition de phase pour des signaux alternatifs) d'où l'appellation "amplificateur inverseur".

L'impédance d'entrée du circuit se calcule aisément $Z_e = V_e / i_e = R_1$. L'impédance de sortie est celle de l'amplificateur opérationnel $Z_s = 0$.

Limitations du montage inverseur:

- ◆ Comme $|V_s| < V_{sat}$ on a alors $V_e < V_{sat} / |A_v| = V_{sat} R_1 / R_2$. Or, une bonne amplification nécessite R_2 grand devant R_1 sans toutefois dépasser la limite seuil de $V_e = V_{sat} R_1 / R_2$. On est alors limité en tension.
- ◆ Pour obtenir un gain important, il faut augmenter R_2 et diminuer R_1 . Ceci constitue une imperfection du circuit amplificateur puisque l'impédance d'entrée va diminuer et dépendra automatiquement du gain choisi.

3.1.2. Amplificateur non inverseur

C'est le deuxième montage de base à amplificateur opérationnel. Le montage est le suivant (figure 10).

L'entrée non inverseuse est attaquée par un signal d'entrée V_e . On a alors $V_e = V_-$.

R_1 et R_2 forment un pont diviseur entre V_s et V_- d'où $V_e = V_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$. Le gain en tension vaut $A_v = 1 + R_2 / R_1$. On

notera que ce gain est positif (amplificateur non inverseur) et toujours supérieur à 1.

Le courant à l'entrée étant nul (car on attaque directement l'entrée +). L'impédance d'entrée est infinie et ne dépend pas du gain choisi. L'impédance de sortie est nulle : $Z_e = \infty$ et $Z_s = 0$

L'amplificateur non inverseur présente les caractéristiques d'un circuit amplificateur idéal.

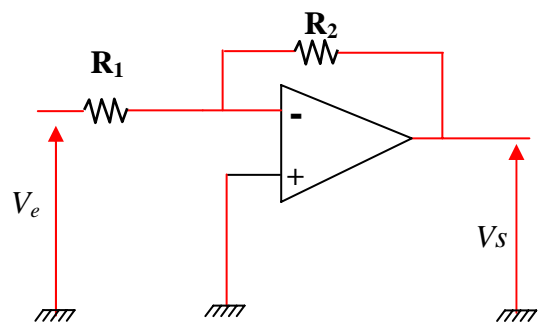


Figure 9

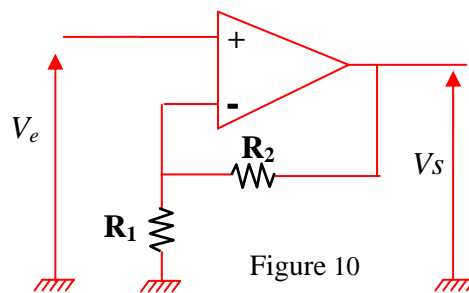


Figure 10

3.1.3. Amplificateur suiveur

C'est l'extrapolation du montage de la figure 11 avec $R_1 = \infty$ et $R_2 = 0$. Le gain devient $A_v = 1$. $Z_e = \infty$ et $Z_s = 0$.

Ce montage, de gain unité, assure la fonction d'adaptation d'impédance. On le placera en tampon entre deux portions de circuit de façon à les isoler l'une de l'autre pour prévenir toute interaction parasite.

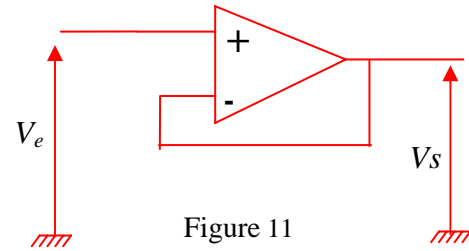


Figure 11

3.1.4 Sommateur de tension

Le circuit sommateur permet l'addition de plusieurs tensions envoyées simultanément sur la même entrée de l'amplificateur opérationnel. La sommation peut se faire avec inversion ou sans inversion.

Sommateur inverseur:

Ce montage (figure 12) se comporte à la base comme un amplificateur inverseur: l'entrée inverseuse est considérée comme une masse virtuelle (aucun courant ne traverse l'amplificateur opérationnel.) et aucune interaction n'a lieu entre les différentes entrées : $V_{e1} = R_1 i_1$, $V_{e2} = R_2 i_2$, $V_{e3} = R_3 i_3$.

La loi des nœuds en V_- donne : $i = i_1 + i_2 + i_3$. en sortie on a : $V_s = -Ri$.

$$\text{On obtient: } V_s = -R \left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_{e3}}{R_3} \right)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R$: $V_s = -(V_{e1} + V_{e2} + V_{e3})$ et l'amplificateur réalise donc la sommation des tensions d'entrées. La tension de sortie V_s est en opposition de phase (déphasage π) par rapport à la somme des tensions d'entrées. D'où la nomination "sommateur inverseur".

Remarque: Il est possible de réaliser le sommateur inverseur pour un certain nombre de tension en les appliquants directement à l'entrée inverseuse "-" de l'amplificateur opérationnel.

Sommateur non inverseur:

Les tensions V_{e1} , V_{e2} et V_{e3} sont appliquées à l'entrée "+":

$$V_{e1} = V_0 + R_1 i_1, \quad V_{e2} = V_0 + R_2 i_2, \quad V_{e3} = V_0 + R_3 i_3 \quad \text{et} \quad V_0 = \frac{R_0}{R_0 + R} V_s.$$

La loi des nœuds $i = i_1 + i_2 + i_3 = 0$ donne :

$$\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_{e3}}{R_3} = \frac{R_0}{R_0 + R} V_s \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$\text{Si } R_1 = R_2 = R_3 \text{ on a } V_s = \frac{R_0 + R}{3R_0} (V_{e1} + V_{e2} + V_{e3}).$$

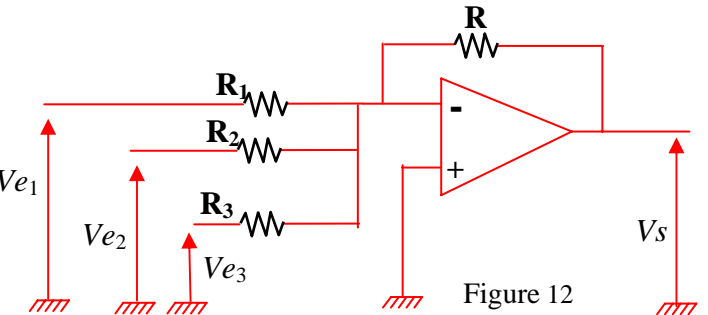


Figure 12

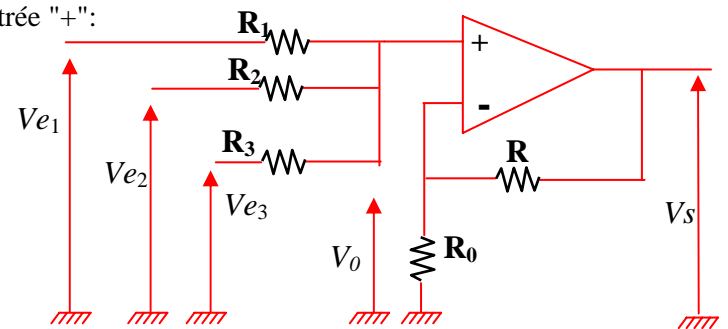


Figure 13

L'amplificateur réalise l'addition des tensions d'entrées. De plus la tension de sortie est en phase avec les tensions d'entrées (sommateur non inverseur).

Remarque: Il est possible de réaliser le sommateur non inverseur pour un certain nombre de tension en les appliquants directement à l'entrée non inverseuse "+" de l'amplificateur opérationnel

3.1.5. Montage soustracteur

Les lois des mailles nous permettent d'écrire:

$$V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{e1}, \quad V_{e2} = (R_3 + R_4) i + V_s, \quad V_+ = R_4 i + V_s$$

$$\text{et } V_s = \frac{1 + R_4 / R_3}{1 + R_1 / R_2} V_{e1} - V_{e2} \frac{R_4}{R_3}$$

Si $R_2/R_1 = R_4/R_3 = k$ on obtient: $V_s = k(V_{e1} - V_{e2})$

Avec un choix judicieux de la constante k , le montage permet d'amplifier la différence des deux signaux d'entrée.

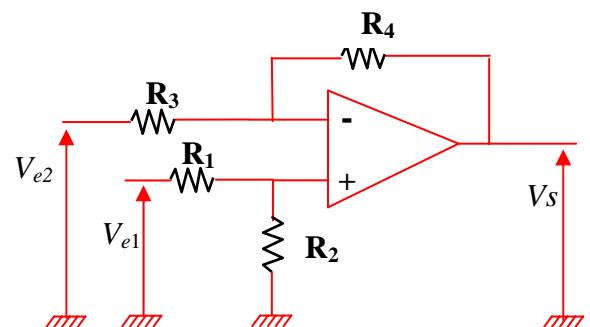


Figure 14

3.1.5. Montage dérivateur

La borne "-" est une masse virtuelle (amplificateur opérationnel idéal):

$$\begin{cases} V_e = V_c \\ V_s = -Ri = -RC \frac{dV_c}{dt} = -RC \frac{dV_e}{dt} \end{cases}$$

La tension de sortie est proportionnelle à la dérivée de la tension d'entrée.

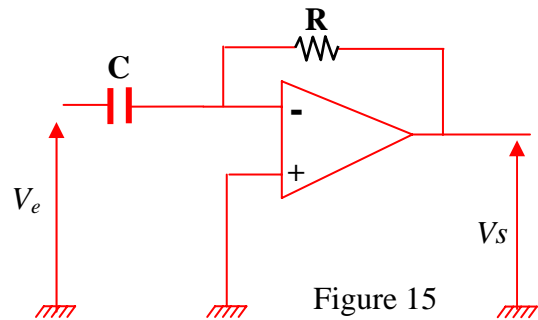


Figure 15

3.1.6. Montage intégrateur

La borne "-" est une masse virtuelle (amplificateur opérationnel idéal):

Le même courant traverse R et C.

$$V_e = Ri, V_c = -V_s \text{ et } V_c = \frac{1}{C} \int idt$$

On a:

$$d'où V_s = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$$

Le signal de sortie est donc proportionnel à la primitive du signal d'entrée.

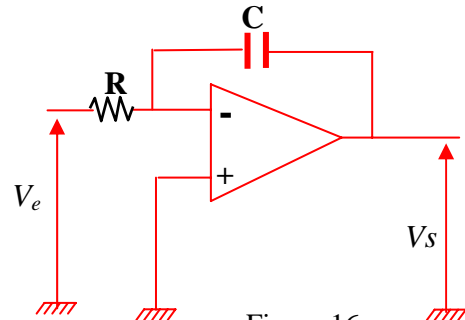


Figure 16

3.2. Fonctionnement en régime saturé

Nous présenterons dans la suite quelques montages dans lesquels l'amplificateur opérationnel ne fonctionne plus dans son régime linéaire ($V_+ = V_-$) mais plutôt en régime saturé. Pour cela, on va appliquer aux deux entrées "-" et "+" des tensions différentes ($V_+ \neq V_-$) afin de ramener la sortie de l'amplificateur à la saturation. Dans ce cas, $V_s = \pm V_{sat}$. Vu que l'amplificateur opérationnel ne peut prendre que les deux valeurs des tensions de sortie, ces montages sont appelés **montages en commutation** et peuvent ainsi servir d'interface avec des circuits logiques présentant deux états.

3.2.1. Comparateur de tension

Le principe du montage consiste à comparer un signal d'entrée à un signal de référence, et selon que la valeur du signal est supérieure ou inférieure à la référence, l'amplificateur opérationnel prendra l'une des deux valeurs $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$ en sortie.

Deux configurations sont envisageables: le comparateur non inverseur (signal d'attaque sur l'entrée +) et le comparateur inverseur (signal d'attaque sur l'entrée -). Dans le premier cas, si la référence est égale à zéro, la sortie vaut $+V_{sat}$ quand le signal est positif et $-V_{sat}$ sinon. Dans le deuxième cas, on a l'inverse.

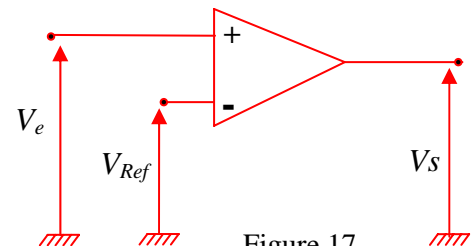


Figure 17

3.2.2. Trigger de Schmitt: comparateur à hystérésis

Ce montage est utilisé dans les systèmes de mesure où l'on doit détecter un seuil. Il existe plusieurs schémas possibles. Le montage suivant en est un exemple.

L'amplificateur opérationnel sort de sa zone de linéarité car une partie prélevée du signal de sortie est réinjectée à l'entrée +. Cette portion étant en phase avec l'entrée. On n'a plus une contre réaction (comme c'était le cas pour l'amplificateur inverseur) mais plus tôt une réaction positive ce qui entraîne la divergence de la tension de sortie vers une des valeurs $+V_{sat}$ ou $-V_{sat}$.

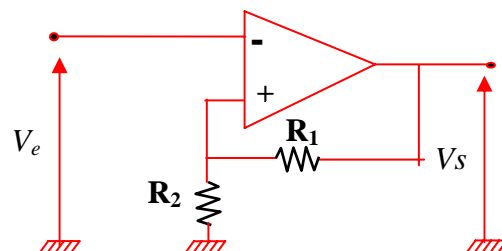


Figure 18

On a alors l'amplificateur qui fonctionne en comparateur : $V_+ > V_- \Rightarrow V_s = +V_{sat}$ ou $V_+ < V_- \Rightarrow V_s = -V_{sat}$

- Supposons que $V_+ > V_-$: $V_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sat}$ ceci implique que tant que $V_- < \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sat}$, V_s reste inchangée.
- si $V_- > \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sat}$: $V_+ < V_-$ et V_s prend la valeur $-V_{sat}$. tant que $V_- > -\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sat}$.
- si $V_- < -\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{sat}$: $V_+ > V_-$ et V_s prend la valeur $+V_{sat}$. L'entrée "+" prend le potentiel.

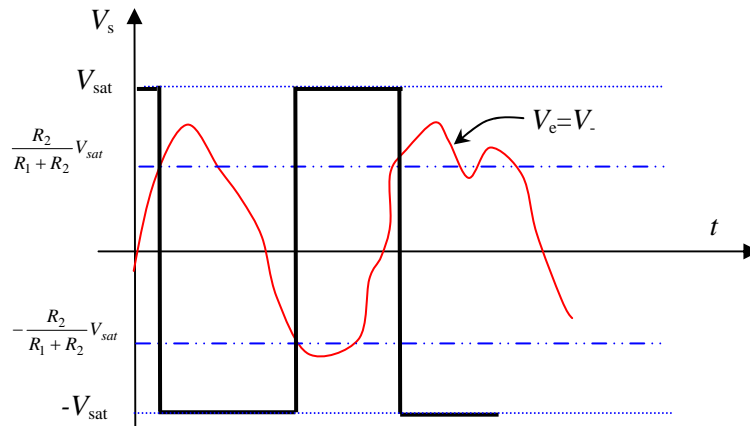


Figure 19

Le trigger de Schmitt est en fait un comparateur de tension à deux seuils de basculement liés aux états de la sortie. On obtient à la sortie un cycle d'hystérésis. Ce circuit permet de comparer V_- à V_{sat} et de régulariser un signal d'entrée irrégulier ou déformé par des parasites.

3.2.3. Multivibrateur astable

Ce montage permet d'obtenir un signal carré en sortie. Il constitue un générateur autonome.

Partant d'un état particulier de la sortie, $+V_{sat}$ par exemple, le condensateur va se charger à travers la résistance R jusqu'à ce que V_- devienne supérieure à $V_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$. La sortie basculera à $-V_{sat}$. Le condensateur va se décharger à travers la résistance R . La sortie basculera à nouveau lorsque V_- prendra la valeur $V_- = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}$.

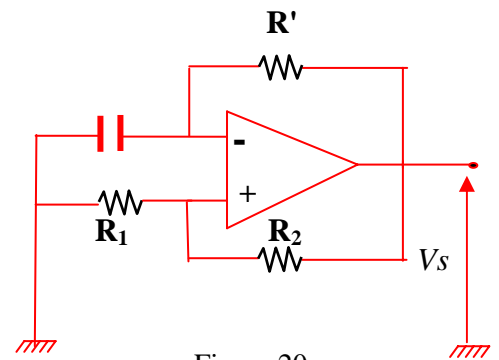


Figure 20