Chapitre III Les amplificateurs opérationnels 2

Chapitre III Les amplificateurs opérationnels

Introduction

Parmi les premiers circuits intégrés apparus sur le marché depuis la naissance de la technologie monolithique, les amplificateurs opérationnels ont connu un très grand succès. Ils ont pris une place importante grâce à leur large domaine d'application. L'amplificateur opérationnel avait été conçu primitivement, comme son nom l'indique, pour effectuer des opérations sur des grandeurs analogiques telles que sommation, multiplication, dérivation, intégration. etc. C'est ainsi qu'il est considéré comme la cellule de base dans les calculateurs analogiques.

Actuellement, le domaine d'application de ces circuits ne cesse de croître, on les trouve maintenant comme des éléments de base dans des circuits: multivibrateurs, comparateurs, amplificateur, filtres actifs, générateurs de signaux. etc.

De point de vue pratique l'amplificateur opérationnel peut être considéré comme un simple composant actif au même titre qu'un transistor. L'utilisateur de ce composant n'a pas besoin de connaître son architecture interne pour pouvoir l'utiliser. Il lui suffit de bien étudier les caractéristiques signalées sur une fiche technique, donnée par son constructeur, pour bien l'exploiter.

1.Caractéristiques D'un amplificateur opérationnel

En général un amplificateur opérationnel est symbolisé dans les schémas électroniques par un triangle suivant la représentation donnée sur la figure1 et sur la figure 2.

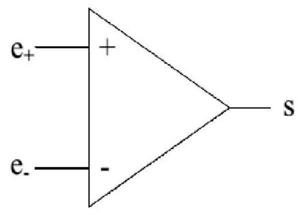
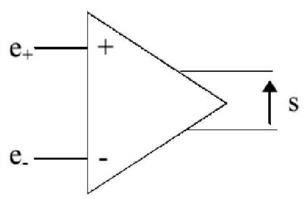


Figure.V.1. Sortie à référence commune



FigureIII.2. Sortie flottante

L'amplificateur symbolisé par la FigureIII.1 est dit à sortie à référence commune. Dans ce cas, les entrées et la sortie sont prises par rapport à la même référence. Par contre celui de la figureIII.2 est dit à sortie flottante où la référence de la sortie est autre que celle des entrées.

On donne les définitions des caractéristiques d'un amplificateur opérationnel pour permettre de le bien comprendre et surtout de pouvoir l'utiliser et d'analyser les circuits autour duquel sont construits. Il est d'une grande importance de bien différencier entre les caractéristiques de l'amplificateur opérationnel en tant que composant et de celles correspondantes au circuit dans lequel il se trouve.

1.1 Amplification en tension A_0

L'amplification en tension A_0, est exprimée par la relation qui donne la tension de sortie en fonction de celle d'entrée. Elle peut être donnée à partir de la relation:

$$\mathbf{s} = A_0(e_+ - e_-) \quad \text{(III.1)}$$

Avec **s** signal de sortie

De cette expression on peut remarquer que dans le cas où e_+ est appliquée seule la sortie sera en phase avec e_+, par contre si e_- est appliquée seule la sortie est en opposition de phase avec e_- C'est pour cette raison que les entrées d'un amplificateur opérationnel sont différenciées l'une de l'autre par un signe + et un signe -.

e_+ Entrée non inverseuse.

e_- Entrée inverseuse.

A cause de l'absence d'une symétrie idéale des étages d'entrée d'un amplificateur opérationnel, les deux entrées seront amplifiées avec des gains différents. Par conséquent, pour ce cas l'équation(III.2), donne la relation entre la sortie s de l'amplificateur et ses deux entrées (e_+ , $-e_-$).

$$\boldsymbol{s} = A_1 e_+ + A_2 e_- \quad \text{(III.2)}$$

Avec A_1 négatif et A_2 positif.

Dans le cas idéal l'équation (III.1) peut être déduite de l'équation (III.2) par simple remplacement de A_1et -A_2par A_0. Sachant que l'étage d'entrée d'un amplificateur opérationnel est constitué par un amplificateur différentiel, il serait alors intéressant de mettre en évidence le terme $(e_+ , -e_-)$ dans la relation donnée par l'équation (III.2).

Soit:

$$e_d = e_+ - e_- \text{L'entrée différentielle} \qquad \text{(III.3)}$$

$$e_c = \frac{e_+ + e_-}{2} \qquad \text{L'entrée en mode commun} \qquad \text{(III.4)}$$

De l'équation (4)

$$\Rightarrow 2e_c = e_+ + e_- \qquad \text{(III.5)}$$

(I.3) +(III.5) ⇒

$$e_+ = \frac{e_d + 2e_c}{2} = \frac{e_d}{2} + e_c$$

(I.5) -(III.3) ⇒

$$e_- = \frac{2e_c - e_d}{2} = e_c - \frac{e_d}{2}$$

Remplaçons e_+et e_-par leurs expressions dans l'équation (2)

$$s = A_1\left(\frac{e_d}{2} + e_c\right) + A_2\left(e_c - \frac{e_d}{2}\right) = \frac{A_1 - A_2}{2} e_d + (A_1 + A_2)e_c \qquad \text{(III.6)}$$

Finalement on peut déduire que dans le cas réel la sortie d'un amplificateur opérationnel s'exprime en fonction des entrées comme suit:

$$s = A_d e_d + A_c e_c \qquad \text{(III.7)}$$

Avec

$A_d = \frac{A_1 - A_2}{2}$ Amplification différentielle.

$A_c = (A_1 + A_2)$ Amplification en mode commun.

On peut ainsi voir que :

Si $\quad e_+ = e_-$

La sortie est loin d'être nulle tout dépend de la valeur de A_c. En pratique l'amplification A_cn'est pas donnée. Seul $A_d$exprimant l'amplification en boucle ouverte (A_0) de l'amplificateur opérationnel est donnée. Cette amplification en boucle ouverte, A_0, est généralement considérée, dans les analyses des circuits, comme étant infinie.

1.2 Impédance d'entrée différentielle Z_{ed}

L'impédance différentielle Z_{ed} d'un amplificateur opérationnel est définie comme l'impédance vue par un générateur d'attaque branché entre les deux entrées e_+ et e_-tel qu'il est montré dans la figureIII.3. C'est cette impédance d'entrée que donne le constructeur et dont la valeur peut être considérée dans certains cas comme infinie. L'impédance d'entrée différentielle constitue une caractéristique importante de la qualité de l'amplificateur opérationnel.

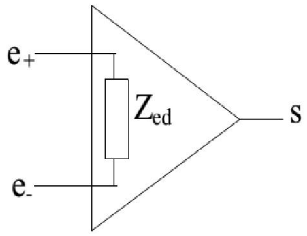


Figure.V.2. Impédance différentielle

1.3 Impédance d'entrée en mode commun Z_{ec}

L'impédance d'entrée en mode commun Z_{ec} représente l'impédance vue par un générateur d'attaque branché sur l'une des deux entrées (e_+ ou e_-) avec l'autre entrée reliée à la sortie.

Nous aurons dans ce cas deux impédances Z_A et Z_B respectivement l'impédance d'entrée en mode commun pour l'entrée inverseuse et l'impédance d'entrée en mode commun pour l'entrée non inverseuse. La figureIII.3 montre les circuits qui permettent la mesure ou le calcul de l'impédance d'entrée en mode commun Z_{ec}.

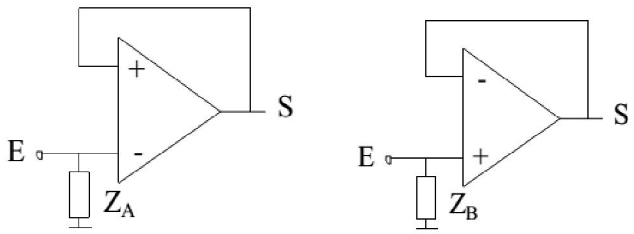


Figure.V.3. Impédance d'entrée en mode commun

En plus de ses paramètres réels, en réalité l'Amplificateur opérationnel présente des défauts? : courants d'offset et tension d'offset à l'entrée, TRMC (Taux de Réjection en Mode Commun), impédance de sortie, variation en fréquence du gain.

1.4 Impédance de sortie Z_{S0}

L'impédance de sortie Z_{S0}correspond à l'impédance vue par une charge branchée à la sortie de l'amplificateur opérationnel, tel qu'il est illustré par la FigureIII.5. Elle peut être aussi définie comme étant l'impédance interne du générateur de Thevenin, équivalent au circuit de l'amplificateur opérationnel, vu par la charge branchée à sa sortie. En pratique et pour une première approximation la valeur de Z_{S0} peut être considérée comme nulle.

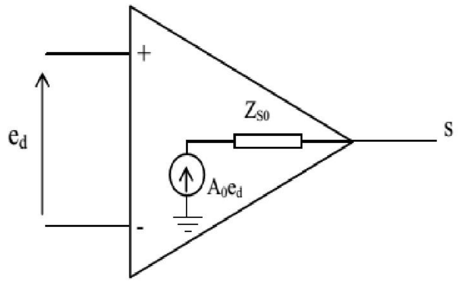
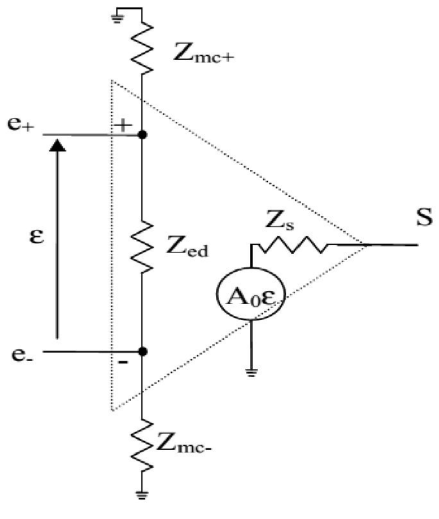


Figure.V.4. Impédance de sortie

En résumé, l'amplificateur opérationnel réel peut être représenté par son circuit équivalent donné sur la FigureIII.5.

Dans l'étude des circuits à base d'amplificateurs opérationnel on prend comme hypothèse un amplificateur opérationnel idéal avec comme caractéristique un gain continu infini, une impédance d'entrée infinie et une impédance de sortie nulle. En réalité, cette hypothèse cache beaucoup de défauts dont on cite la tension de décalage à l'entrée, un courant de décalage à l'entrée, l'influence de l'entrée en mode commun, la dépendance du gain en fonction de la variation de fréquence, le temps de montée qui lui aussi dépend de la tension d'alimentation du composant.



FigureIII.5. Modèle d'un amplificateur opérationnel réel

1.6 Taux de réjection en mode commun TRMC

Le taux de réjection en mode commun exprime l'ordre de grandeur de l'amplification en mode commun par rapport à l'amplification en mode différentiel.

L'équation(III.6) donnée par:

$$s = A_d e_d + A_c e_c$$

On tire

$$s = A_d e_d \left(1 + \frac{A_c e_c}{A_d e_d}\right)$$

On pose

$$r = \frac{A_c}{A_d}$$

r : Taux de Réjection en Mode Commun (TRMC).

Alors la tension de sortie s sera:

$$s = A_d e_d \left(1 + \frac{e_c}{r e_d}\right) \quad \text{(III.8)}$$

Dans le cas idéal le taux de réjection en mode commun r est pris comme infini. L'équation(III. 8) devient la même que celle donnée par l'équation (1):

$$s = A_d e_d \quad \text{(III.9)}$$

Dans le cas pratique l'approximation peut être faite suivant l'ordre de grandeur de r par rapport à e_c/e_d tel que:

$$1 \gg \frac{e_c}{r e_d} \Longrightarrow r \gg \frac{e_c}{e_d} \Longrightarrow s = A_d e_d$$

1.7 Tension de décalage d'entrée (Ou offset) V_D

La tension de décalage d'entrée est définie comme étant la tension continue qu'il faut appliquer à l'entrée d'un amplificateur opérationnel pour que la tension à sa sortie soit nulle. Certains amplificateurs opérationnels disposent de deux bornes qui servent à injecter une tension continue de réglage d'offset.

1.8Courant de décalage d'entrée I_D

Il correspond au courant continu qu'il faut injecter à l'entrée de l'amplificateur opérationnel pour avoir une tension nulle au niveau de sa sortie. Il est défini aussi comme l'association de deux courants de polarisation.

1.9 Courant de polarisation IP

Le courant de polarisation est défini comme étant le courant qu'il faut injecter à l'une des deux entrées avec, l'autre entrée à la masse, pour avoir une tension de sortie nulle. Ainsi on peut remarquer qu'il existe deux courants de polarisation:

I_{P+} Courant sur l'entrée non inverseuse avec l'entrée inverseuse à la masse.

I_{P-} Courant sur l'entrée inverseuse avec l'entrée non inverseuse à la masse.

Le courant de décalage peut être exprimé en fonction des courants de polarisation par la relation:

$$I_D = I_{P+} - I_{P+} \tag{III.10}$$

Les deux entrées données sur le schéma d'un amplificateur opérationnel définissent en réalité les entrées d'un amplificateur différentiel qui constitue son étage d'entrée. C'est ainsi que nous avons jugé utile de donner un aperçu général sur l'amplificateur différentiel.

2. Amplificateur différentiel

Le schéma de principe d'un amplificateur différentiel est donné par la Figure.V.6 où les deux transistors et les autres éléments qui leur sont associés doivent être les plus identiques possibles.

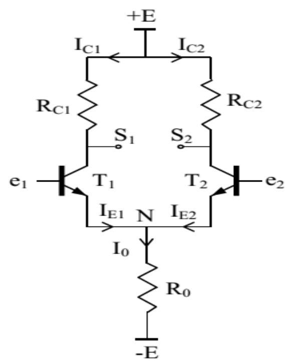


Figure.V.6. Schéma de principe d'un amplificateur différentiel

2.1 Etude statique

Le circuit est linéaire, donc on peut séparer l'étude statique de l'étude dynamique en se basant sur le théorème de superposition.

Etude statique ⇒E et $-E$ appliquées seules ($e_1 = e_2 = 0$)

$$I_0 = I_{E1} + I_{E2} \tag{III.11}$$

Avec l'approximation

$$I_{C1} = I_{E1} \text{ et } I_{C2} = I_{E2} \tag{I.12}$$

$$I_0 = I_{C1} + I_{C2} \tag{III.13}$$

$$I_0 = \frac{V_N - (-E)}{R_0} \Longrightarrow$$

$$I_0 = \frac{V_N + E}{R_0} \tag{III.14}$$

Nous avons

$$V_N = -V_{BE1} = -V_{BE1} = -0.6V$$

Dans le cas général

$$E \gg V_{BE} \Longrightarrow I_0 = \frac{E}{R_0}$$

Une très bonne symétrie est toujours recherchée dans la conception des amplificateurs différentiels. Pour le circuit étudié on doit avoir:

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C$$

Les deux transistors T_1 et T_2 sont identiques, dans ce cas on peut écrire

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{I_0}{2} = \frac{E}{2R_0} \quad \text{(III.15)}$$

Et

$$V_{CE1} = V_{CE2} = E - R_C I_C \quad \text{(III.16)}$$

$$V_{CE1} = V_{CE2} = E - \frac{R_C}{2R_0}E = E\left(1 - \frac{R_C}{2R_0}\right) \quad \text{(III.17)}$$

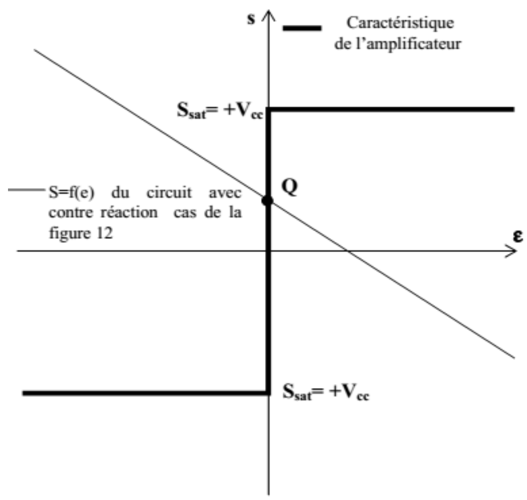
Du résultat obtenu au niveau de (III.17) nous constatons que le point de fonctionnement peut être déterminé par le choix du rapport des deux résistances R_C et R_0.

3. Circuits de base de l'amplificateur opérationnel

La fonction principale d'un amplificateur opérationnel est l'amplification. Cependant, le gain de ce composant est considéré comme très grand en mode réel et infini en mode idéal d'où sa caractéristique montrée sur la Figure III.7.

a-Cas d'une contre réaction

Il est connu qu'une contre réaction permet de stabiliser un circuit en diminuant son gain et élargir sa bande passante. Etudiant le circuit de la Figure III.8.



FigureIII.7. Caractéristique de sortie d'un amplificateur opérationnel.

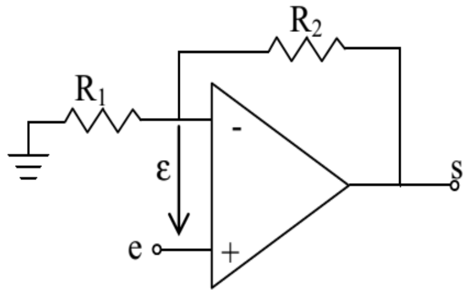


Figure III.8. Montage à amplificateur opérationnel avec une résistance de retour sur l'entrée inverseuse.

Dans le circuit de la figure, l'amplificateur opérationnel est considéré comme idéal. C'est ce qui nous permet de tirer les expressions (III.18 -III.20) à partir de l'hypothèse $i+= 0$ et $i-= 0$ (courant des entrées inverseuse et non inverseuse).

$$v_- = \frac{R_1}{R_1+R_2}s \tag{III.18}$$

$$\varepsilon = e - v_- = e - \frac{R_1}{R_1+R_2}s \tag{III.19}$$

$$s = \frac{R_1+R_2}{R_1}e - \frac{R_1+R_2}{R_1}\varepsilon \tag{III.20}$$

On voit très bien de l'expression (III.19) que la chaîne de retour a conduit à une relation entre ε et s ; qui n'est autre qu'une droite dont le tracé coupe la caractéristique de l'amplificateur en un seul point Q comme il est montré par la FigureIII.7. Le point Q est unique et correspond au régime linéaire ; son abscisse correspond à ε = 0 d'où la relation de s en fonction de e sera :

$$s = \frac{R_1+R_2}{R_1}e \tag{III.21}$$

Faisons une étude simple sur la stabilité de ce circuit. Prenons l'équation 28 exprimant ε en fonction de e et s. On constate que se si s augmente légèrement, elle entraînera une diminution de ε ce qui ramène s à sa précédente valeur. Le circuit est stable.

b-Cas d'une réaction

Faisons la même étude que dans le cas du contre réaction précédemment étudiée, mais cette fois ci pour le cas d'une réaction entre s et l'entrée non inverseuse tel qu'il est montré par la FigureIII.9.

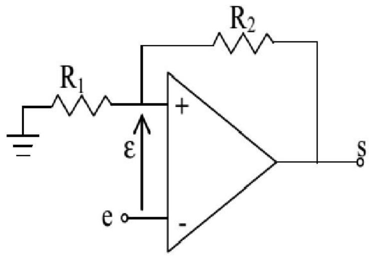


Figure.III.9. Montage à amplificateur opérationnel avec une résistance de retour sur l'entrée non inverseuse.

$$v_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2} s \tag{III.22}$$

$$\varepsilon = v_+ - e = \frac{R_1}{R_1+R_2} s - e \tag{III.23}$$

$$s = \frac{R_1+R_2}{R_1} e + \frac{R_1+R_2}{R_1} \varepsilon \tag{III.24}$$

Si on reprend le tracé de la caractéristique de l'amplificateur opérationnel et de s en fonction de ε on obtiendra la FigureIII.10.

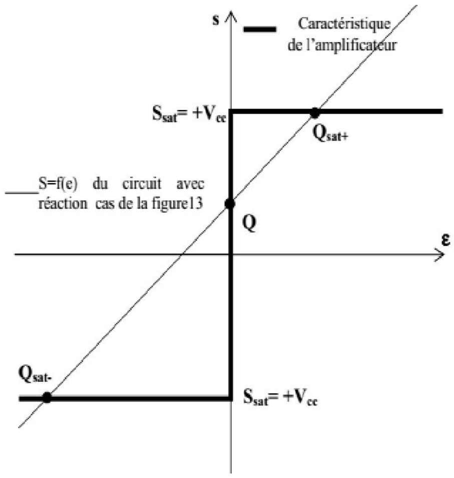


Figure.III.10. Caractéristique de sortie d'un amplificateur opérationnel.

Un raisonnement analogue au précédent montre que si on fixe le point de fonctionnement en Q (régime linéaire) alors une légère augmentation de s entraîne une augmentation de ε ce qui favorise d'avantage l'augmentation de s vers la saturation. Comme résultat on aboutit à la conclusion de non stabilité de Q pour ce cas de montage.

3.1 Amplificateur inverseur

L'amplificateur inverseur est le montage le plus utilisé, Figure III.11. Il est simple dans son montage et il constitue le circuit de base pour d'autres montages à base d'amplificateur opérationnel. Cet amplificateur présente l'inconvénient de son impédance d'entrée qui n'est pas grande et qui dépend des composants passifs ajoutés au circuit.

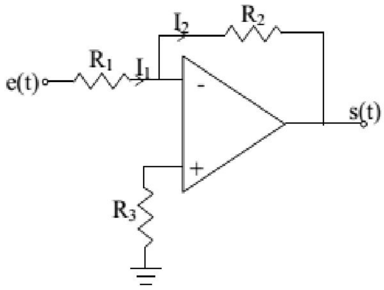


Figure III.11. Amplificateur inverseur

Le calcul de l'impédance d'entrée, vue par le générateur d'attaque dont la f.e.m. correspond à e(t), est donnée par l'expression.

$$Z_e = \frac{e(t)}{I_1} = R_1 \quad \text{(III.25)}$$

L'amplification en tension est exprimée par

$$A = \frac{e(t)}{s(t)} \quad \text{(III.26)}$$

$$I_1 = I_2 \Longrightarrow \frac{e(t)}{R_1} = -\frac{s(t)}{R_2} \Longrightarrow \frac{s(t)}{e(t)} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$A = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{(III.27)}$$

Le signe (-) indique que le signal d'entrée et le signal de sortie sont en opposition de phase. On constate qu'il y a amplification et inversion du signal d'entrée.

Remarque

La résistance R_3 sert à minimiser l'effet du courant de polarisation et surtout pour une stabilité en température. Sa valeur peut être calculée comme suit :

Soit le circuit de la FigureIII.12. où e(t) = 0. Au niveau des deux entrées de l'amplificateur opérationnel on trouve deux courant I_{P+}et I_{P-}qui sont respectivement le courant de polarisation de l'entrée non inverseuse et le courant de polarisation de l'entrée inverseuse tel que

$$I_P ? = I_{P+} - I_{P-} \quad \text{(III.28)}$$

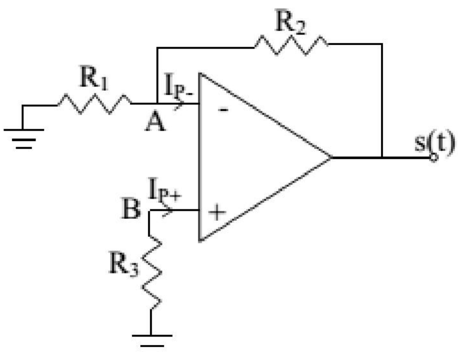


Figure.III.12. Schéma pour calcul de l'effet de R_3

Au nœud A on a:

$$\frac{0-V_A}{R_1}e + \frac{V_0-V_A}{R_2} = I_{P-} \quad \text{(III.29)}$$

$$\Rightarrow V_A = (\frac{V_0}{R_2} - I_{P-})\frac{R_1R_2}{R_2+R_1} \quad \text{(III.30)}$$

Et

$$V_B = -R_3I_{P+} \quad \text{(III.31)}$$

Et comme nous avons

$$V_0 = A(V_B - V_A) \quad \text{(III.32)}$$

Avec l'hypothèse de A est très grand nous aurons

$$V_A = V_B \Rightarrow -R_3I_{P+} = (\frac{V_0}{R_2} - I_{P-})\frac{R_1R_2}{R_2+R_1} \quad \text{(III.33)}$$

On aura

$$V_0 = -R_2I_{P-} - \frac{R_3}{R_1}(R_2 + R_1) - I_{P+} \quad \text{(III.34)}$$

Sachant que l'étage d'entrée d'un amplificateur opérationnel est un amplificateur différentiel dont les branches qui le constituent sont les plus symétriques possibles alors $I_{P+} \cong I_{P-}$d'où pour que la tension V_0 donnée par l'équation soit la plus petite possible il faut que:

$$R_3 = \frac{R_1R_2}{R_2+R_1} \quad \text{(III.35)}$$

Et ainsi

$$V_0 = -R_2(I_{P-} - I_{P+}) \quad \text{(III.36)}$$

3.2 Amplificateur non inverseur

L'amplificateur non inverseur est utilisé dans le cas où le signal de sortie doit être en phase avec celui d'entrée. Ce circuit peut être réalisé par l'association en cascade de deux amplificateurs inverseurs dans le cas où une très grande impédance d'entrée n'est pas recherchée. Dans le cas où une grande impédance d'entrée est exigée, nous faisons recours au circuit de la FigureIII.13.

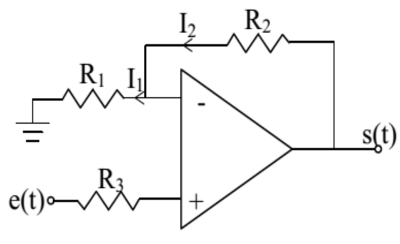


Figure III.13. Amplificateur non inverseur

Impédance d'entrée du montage

D'après le schéma de la Figure III.13, le générateur d'attaque voit l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel lui-même en série avec R. L'impédance d'entrée est alors très grande.

Amplification A du montage

Du fait que l'amplification et l'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel sont très grandes on a:

$$e(t) = e_{-} = e_{+} \tag{III.37}$$

$I_1 = I_2 \Rightarrow R_1$et R_2 sont en série

$\Rightarrow$ par application du diviseur du diviseur de tension $e_{+} = \frac{R_1}{R_1+R_2} s(t)$

Et comme

$$e(t) = e_{+} \Rightarrow A = \frac{s(t)}{e(t)} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{III.38}$$

L'amplification est positive donc s(t) est en phase avec e(t), et elle est au minimum égale à l'unité.

3.3 Amplificateur différentiel

Le circuit donné sur la Figure III.14 illustre le schéma d'un amplificateur différentiel. Chaque ligne d'entrée à son générateur d'attaque. Ce dernier voit une impédance de charge qui dépend des composants passifs associés au circuit.

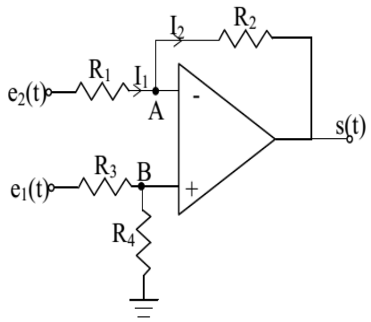


Figure III.14.Amplificateur différentiel

Le gain en boucle ouverte de l'amplificateur opérationnel fait que: $V_A = V_B$

$$V_B = \frac{R_4}{R_4+R_3} e_1(t) \tag{III.39}$$

$$I_1 = I_2 \Rightarrow \frac{e_1(t)-V_A}{R_1} = -\frac{s(t)-V_A}{R_2} \quad (III.40)$$

$$\frac{e_2(t)}{R_1} - V_A\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right) = -\frac{s(t)}{R_2} \quad (III.41)$$

Remplaçant l'expression de V_A par l'expression de V_B

$$\frac{e_2(t)}{R_1} - \frac{R_4}{R_4+R_3}\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}\right)e_1(t) = -\frac{s(t)}{R_2} \quad (III.42)$$

$$s(t) = -\frac{R_1}{R_2}e_2(t) - \frac{R_4}{R_4+R_3}\frac{R_1+R_2}{R_1R_2}e_1(t) \quad (III.43)$$

Avec $R_4 = R_2$ et $R_3 = R_1$ nous obtenons

$$s(t) = \frac{R_1}{R_2}(e_1(t) - e_2(t)) \quad (III.44)$$

3.4 Amplificateur logarithmique

Sur la FigureIII.15. le transistor T, monté dans la contre réaction, est utilisé comme diode. Le collecteur de ce transistor est court-circuité avec la base. Il peut être par conséquent remplacé par une simple diode.

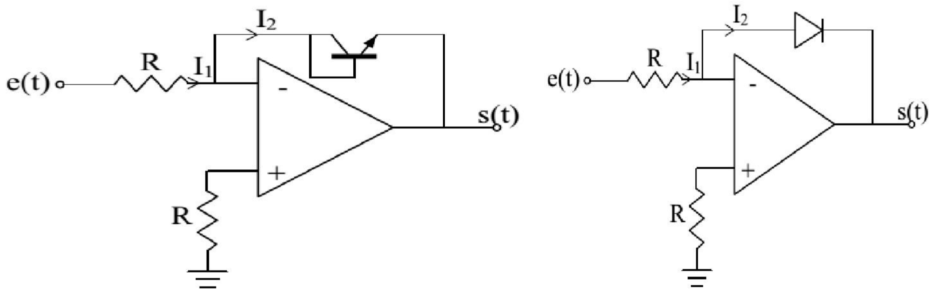


Figure.III.15. Amplificateur logarithmique

Le courant I_2 est le courant direct dans la diode et -s(t) la tension entre son anode et sa cathode. Nous pouvons alors exprimer ce courant en fonction de -s(t)

$$I_2 = I_0\, e^{-\frac{q}{KT}s(t)} \quad (III.45)$$

$$I_2 = I_1 \quad (III.46)$$

$$I_1 = \frac{e(t)}{R} \Rightarrow \frac{e(t)}{RI_0} = e^{\frac{q(-s(t))}{KT}} \quad (III.47)$$

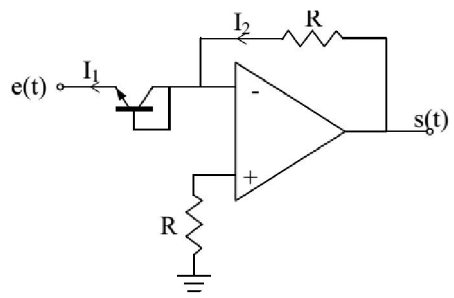
$$\mathrm{Log}\frac{e(t)}{RI_0} = -\frac{q}{KT}\, s(t) \quad (III.48)$$

$$s(t) = -\frac{q}{KT}\mathrm{Log}e(t) + \frac{q}{KT}\mathrm{Log}RI_0 \quad (III.49)$$

$$s(t) = -\frac{q}{KT}\mathrm{Log}e(t) + cte \quad (III.50)$$

3.5 Amplificateur exponentiel

Comme l'amplificateur logarithmique, l'amplificateur exponentiel et un amplificateur non linéaire, FigureIII.16. Ils sont utilisés surtout quand l'amplification doit dépendre de l'ordre de grandeur du signal à amplifier. Ils constituent aussi un élément de base dans les circuits de multiplication des grandeurs analogiques.



FigureIII.16. Amplificateur exponentiel

$$I_2 = I_0\, e^{-\frac{q}{KT}e(t)} \quad \text{(III.51)}$$

$$I_2 = I_1 \quad \text{(III.52)}$$

$$I_1 = \frac{S(t)}{R} \quad \text{(III.53)}$$

$$s(t) = RI_0\, e^{-\frac{q}{KT}e(t)} \quad \text{(III.54)}$$

3.6 Intégrateur

Le circuit intégrateur à base d'amplificateur opérationnel, Figure III.17, permet non seulement l'intégration d'un signal analogique mais aussi avec une atténuation ou une amplification contrôlée. Chose qui ne peut pas être obtenue par un simple intégrateur de type RC.

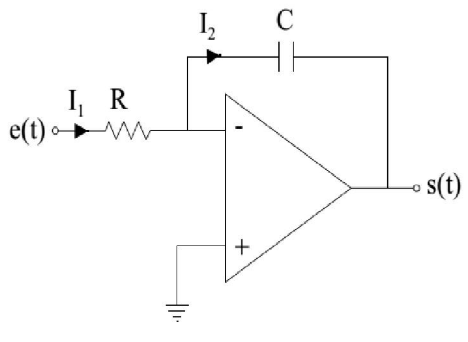


Figure III.17. Intégrateur inverseur

$$I_1 = \frac{e(t)}{R} \quad \text{(III.55)}$$

$$I_2 = -C\frac{ds(t)}{dt} \quad \text{(III.56)}$$

$$I_1 = I_2 \Rightarrow \frac{e(t)}{R} = -C\frac{ds(t)}{dt} \quad (III.57)$$

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\frac{e(t)}{CR} \quad (III.58)$$

$$s(t) = -\frac{1}{CR}\int e(t)\,dt \quad (III.59)$$

3.7 Dérivateur

Le dérivateur est un circuit qui permet d'obtenir la dérivée d'un signal analogique appliqué à l'entrée. Ces deux circuits, intégrateur et dérivateur, constituent en général les éléments de base des calculateurs analogiques. La FigureIII.18. présente le schéma électrique d'un dérivateur inverseur.

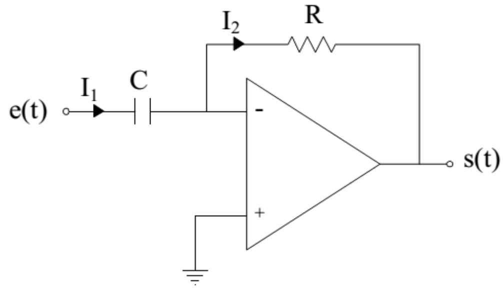


Figure.V.18. Dérivateur inverseur

$$I_1 = C\frac{de(t)}{dt} \quad (III.60)$$

$$I_2 = -\frac{s(t)}{R} \quad (III.61)$$

$$I_1 = I_2 \Rightarrow -\frac{s(t)}{R} = C\frac{de(t)}{dt} \quad (III.62)$$

$$\frac{ds(t)}{dt} = -\frac{e(t)}{CR} \quad (III.63)$$

$$s(t) = RC\frac{de(t)}{dt} \quad (III.64)$$

3.8Sommateur

Un amplificateur opérationnel dont les caractéristiques se rapprochent de celles des valeurs idéales comme:

$R_i = \infty$ Résistance d'entrée.

$A_0 = \infty$ Gain en boucle ouverte.

$R_s = 0$ Résistance de sortie.

Il peut être utilisé comme additionneur précis de signaux analogiques appliqués à son entrée. La Figure III.19. représente le montage utilisé pour la réalisation d'un additionneur. Le choix des résistances dépend des coefficients avec lesquels il faut multiplier les termes à ajouter.

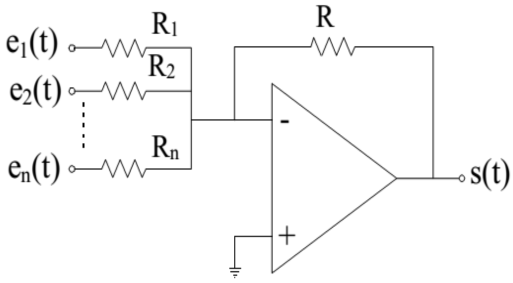


Figure III.19. Sommateur inverseur

$$I_1 + I_2 + \cdots + I_n = I \tag{III.65}$$

$$\left.\begin{array}{l} I_1 = \frac{e_1(t)}{R_1} \\ I_2 = \frac{e_2(t)}{R_2} \\ \vdots \\ I_n = \frac{e_n(t)}{R_n} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{e_1(t)}{R_1} + \frac{e_2(t)}{R_2} + \cdots + \frac{e_n(t)}{R_n} = -\frac{s(t)}{R} \tag{III.66}$$

D'où

$$s(t) = -\left(\frac{R}{R_1} e_1(t) + \frac{R}{R_2} e_2(t) + \cdots + \frac{R}{R_n} e_n(t)\right) \tag{III.67}$$

Si

$$R = R_1 = R_2 = \ldots = R_n \tag{III.68}$$

Alors

$$s(t) = -(e_1(t) + e_2(t) + \cdots + e_n(t)) \tag{III.69}$$

3.9 Comparateur

L'emploi d'un amplificateur opérationnel comme un comparateur est très sollicité, surtout dans les chaînes de contrôle. Dans les catalogues des circuits linéaires on trouve les amplificateurs opérationnels répartis sur des catégories suivant leurs fonctions principales telles que les amplificateurs, les comparateurs. etc.

Le schéma de principe d'un comparateur est illustré par la Figure.V.20. Sur ce schéma l'amplificateur exploite son gain maximale A_0 (gain en boucle ouverte).

La sortie s(t) est toujours donnée par :

$$s(t) = A_0(e(t) - V_{ref}) \tag{III.70}$$

Alors on peut constater deux cas :

$e(t) - V_{ref} > 0$ donne $s(t) = +Vcc$

$e(t) - V_{ref} < 0$ donne $s(t) = -Vcc$

Où +Vcc et –Vcc représentent les tensions de polarisation du comparateur.

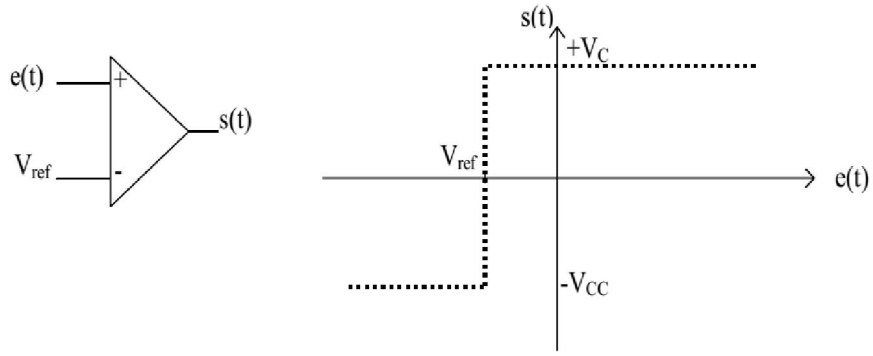


Figure.III.20. Comparateur sans hystérésis

3.10 Comparateur avec hystérésis

Dans ce type de comparateurs la référence est permutée elle aussi entre deux valeurs. Cette référence dépend du sens de variation du signal à comparer. Comme il peut être constaté sur la FigureIII.21, V_{ref} est liée au signal de sortie par la relation :

$$V_{ref} = \frac{R_1}{R_1+R_2} s(t) \qquad \text{(III.71)}$$

Ce circuit est aussi appelé Trigger de Schmitt.

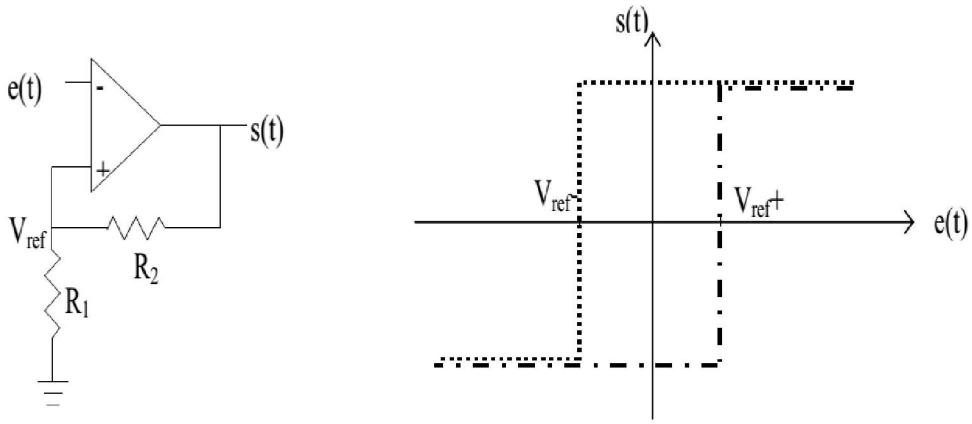


Figure.III.21. Comparateur avec hystérésis

Sur le chronogramme de la Figure III.21, représentant la réponse du comparateur, les valeurs que prend la référence V_{ref}sont exprimées par :

$$V_{ref}+= \frac{R_1}{R_1+R_2} (+V_{CC}) \qquad \text{(III.72)}$$

Et

$$V_{ref}- = \frac{R_1}{R_1+R_2} (-V_{CC}) \qquad \text{(III.73)}$$