

Amplificateur opérationnel

Sommaire

5.1	Introduction	112
5.2	Définition	112
5.3	Description de l'amplificateur opérationnel	112
5.4	Symbole	113
5.5	Caractéristique de transfert	114
5.6	Régimes de fonctionnement	115
5.6.1	Régime linéaire	115
5.6.2	Régime saturé	116
5.7	Applications linéaires des amplificateurs opérationnels	117
5.7.1	Montage inverseur	117
5.7.2	Montage non inverseur	118
5.7.3	Montage suiveur	119
5.7.4	Montage sommateur inverseur	120
5.7.5	Montage soustracteur	121
5.7.6	Montage intégrateur	122
5.7.7	Montage dérivateur	123
5.8	Conclusion	124

5.1 Introduction

L'amplificateur opérationnel (AmOp) est un circuit intégré complexe constitué d'une association de transistors à effet de champ, de transistors bipolaires et d'éléments passifs intégrés sur un substrat unique (puce) dont la surface est de l'ordre de 1mm^2 . Cette puce est intégrée dans un boîtier d'où sortent un certain nombre de connexions métalliques isolées (pattes). Il est appelé amplificateur opérationnel car ses premières applications ont été la réalisation des opérations mathématiques (addition, soustraction, multiplication, division, intégration et dérivation) pour le calcul analogique. Par la suite, les applications de l'amplificateur opérationnel se sont bien développées, il est utilisé pour la commande de moteurs, la régulation de tension ou encore les oscillateurs.

5.2 Définition

L'amplificateur opérationnel est un amplificateur différentiel qui a les caractéristiques suivantes :

- Son gain en boucle ouverte Ab_0 est très élevé, au moins 10^5 et couramment 10^6 .
- L'impédance d'entrée sur chacune de ses entrées est très élevée. Le plus souvent on la considère comme infinie, ce qui implique que les courants d'entrées sont nuls.
- L'impédance de sortie est quasiment nulle.

5.3 Description de l'amplificateur opérationnel

De l'extérieur, l'amplificateur opérationnel se présente sous la forme d'un circuit intégré (CI) à 8 broches.

- Deux broches d'entrées : entrée non inverseuse V^+ ($B3$) et entrée inverseuse V^- ($B2$).
- Une broche de sortie ($B6$).

- Deux broches pour l'alimentation positive $+E$ ($B7$) et négative $-E$ ($B4$), en général.
- Les deux broches ($B1$) et ($B5$) peuvent servir à la connexion des résistances et des capacités pour le réglage d'offset et la correction en fréquence.
- La broche ($B8$) est non utilisée.

La figure 5.1 représente le circuit intégré d'un amplificateur opérationnel.

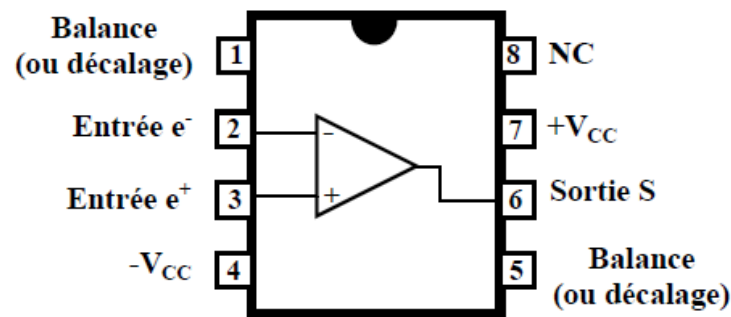


FIGURE 5.1: Boîtier standard d'un amplificateur opérationnel.

5.4 Symbole

Le symbole le plus utilisé pour la représentation de l'AmOp est donné par la figure suivante :

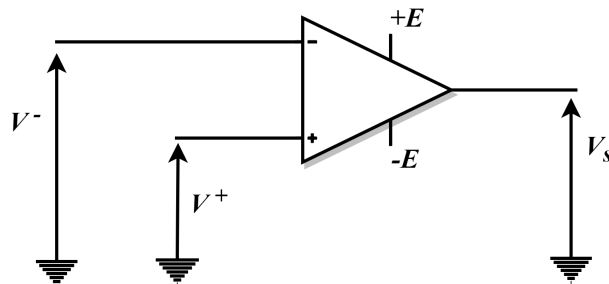


FIGURE 5.2: Représentation conventionnelle d'un amplificateur opérationnel.

L'amplificateur opérationnel est en général alimenté par une alimentation symétrique $(+E, -E)$.

5.5 Caractéristique de transfert

C'est la courbe qui représente la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée différentielle.

La figure 5.3 représente cette caractéristique.

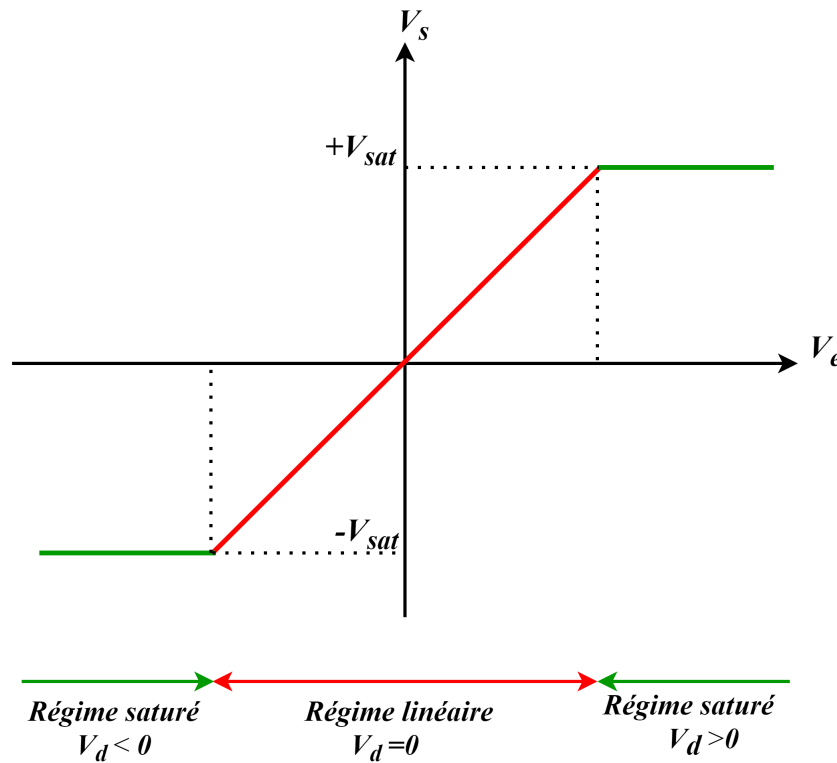


FIGURE 5.3: Caractéristique de transfert de l'amplificateur opérationnel.

Avec : V_{sat} : Tension de saturation ($V_{sat} \simeq E$).

La caractéristique de transfert comporte deux zones de fonctionnement distinctes :

— **Zone linéaire** : (zone d'amplification) pour laquelle on a :

$$V_{sat} \geq V_s \geq -V_{sat} \quad (5.1)$$

V_d : est la tension d'entrée différentielle.

— **Zone de saturation** : pour laquelle on a :

$$V_s = \pm V_{sat} \quad (5.2)$$

5.6 Régimes de fonctionnement

On distingue deux régimes de fonctionnement :

5.6.1 Régime linéaire

l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire s'il ya une liaison entre la sortie et l'entrée inverseuse (contre réaction négative).

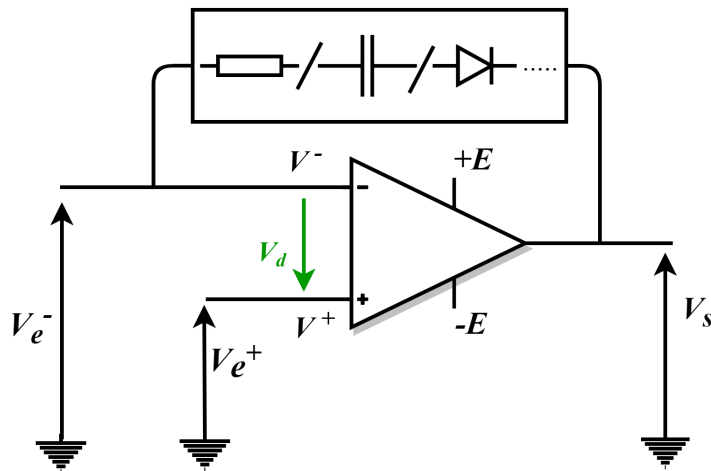


FIGURE 5.4: Amplificateur opérationnel avec contre réaction négative.

Dans ce régime de fonctionnement, on a :

$$V_s = f(V_e) \quad (5.3)$$

$$V_d = V^+ - V^- = 0 \quad (5.4)$$

5.6.2 Régime saturé

l'amplificateur opérationnel fonctionne en régime saturé en l'absence d'une liaison entre la sortie et l'entrée inverseuse.

Il peut être utilisé en :

-boucle ouverte

Aucune chaîne de réaction n'est placée entre la sortie et les deux entrées (comparateur simple seuil).

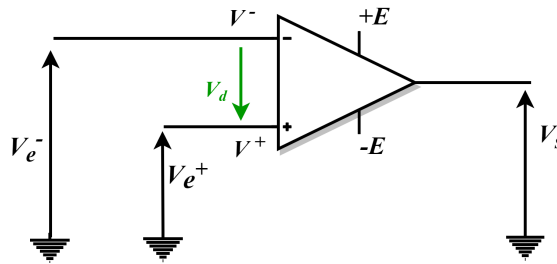


FIGURE 5.5: Amplificateur opérationnel en boucle ouverte.

-boucle fermée

Avec une chaîne de réaction positive placée entre la sortie et l'entrée non-inverseuse (comparateur double seuils)

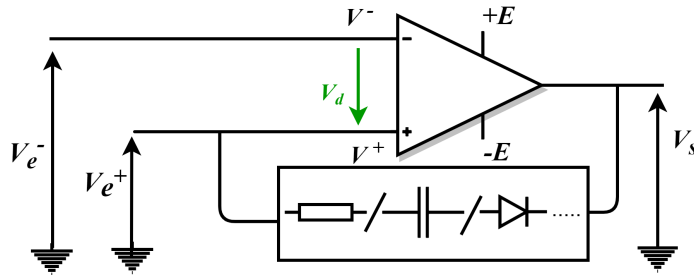


FIGURE 5.6: Amplificateur opérationnel avec contre réaction positive.

Dans ce régime de fonctionnement, on a :

$$\begin{cases} V_s = +V_{sat} & \text{pour } V^+ > V^- \\ V_s = -V_{sat} & \text{pour } V^+ < V^- \end{cases} \quad (5.5)$$

$$V_d = V^+ - V^- \quad (5.6)$$

5.7 Applications linéaires des amplificateurs opérationnels

On trouve plusieurs montages qui utilisent l'amplificateur opérationnel en régime linéaire (contre réaction négative), on peut citer :

5.7.1 Montage inverseur

C'est le montage à amplificateur opérationnel le plus utilisé. Le montage est celui de la figure 5.7.

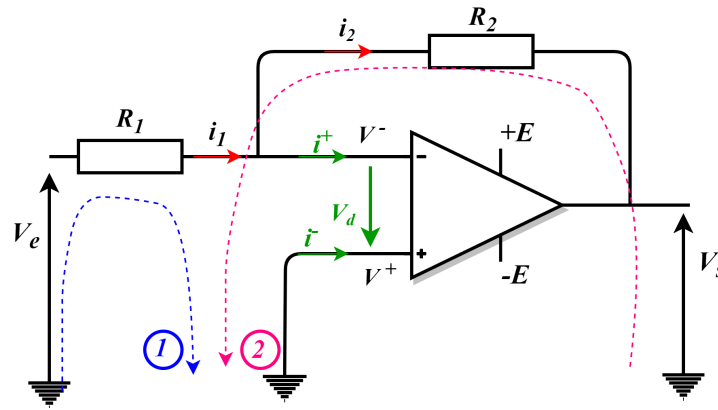


FIGURE 5.7: Montage inverseur.

L'amplificateur opérationnel fonctionne en régime linéaire, on a :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ i^+ = i^- = 0 \Rightarrow i_1 = i_2 \end{cases} \quad (5.7)$$

A partir de la maille 1, on obtient :

$$V_e - R_1 i_1 + V_d = 0 \Rightarrow i_1 = \frac{V_e}{R_1} \quad (5.8)$$

A partir de la maille 2, on obtient :

$$V_s + R_2 i_2 + V_d = 0 \Rightarrow i_2 = -\frac{V_s}{R_2} \quad (5.9)$$

A partir de l'équation 5.8 on peut écrire :

$$-\frac{V_s}{R_2} = \frac{V_e}{R_1} \quad (5.10)$$

Donc :

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (5.11)$$

Si $R_1 = R_2$, le gain en tension devient :

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} = -1 \quad (5.12)$$

L'amplificateur est dit « inverseur » car le gain en tension A_v est négatif et ne dépend que de R_1 et R_2 . Le signe $(-)$ implique que la tension d'entrée et de sortie sont opposées (en opposition de phase).

5.7.2 Montage non inverseur

Considérons maintenant le montage de la figure 5.8.

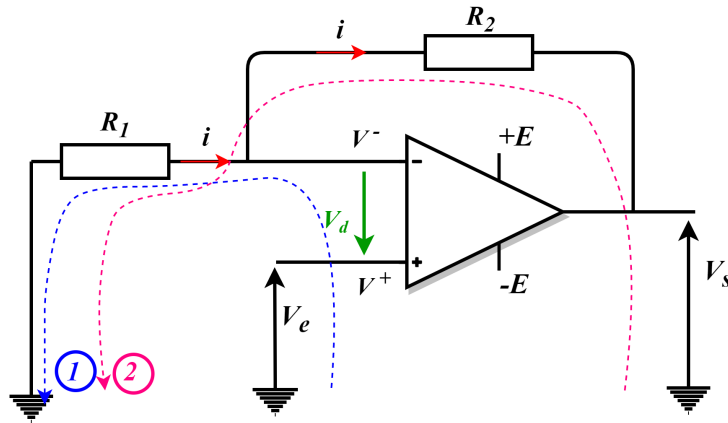


FIGURE 5.8: Montage non inverseur.

A partir de la maille (1), on obtient :

$$V_e - V_d + V_{R1} = 0 \quad (5.13)$$

$$V_e - V_d + R_1 i = 0 \Rightarrow i = -\frac{V_e}{R_1} \quad (5.14)$$

A partir de la maille (2), on obtient :

$$V_s + V_{R2} + V_{R1} = 0 \quad (5.15)$$

$$V_s + (R_1 + R_2)i = 0 \Rightarrow i = -\frac{V_s}{R_1 + R_2} \quad (5.16)$$

Il résulte que :

$$-\frac{V_s}{R_1 + R_2} = -\frac{V_e}{R_1} \quad (5.17)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (5.18)$$

$$A_v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (5.19)$$

Avec ce montage, le gain est toujours supérieur à l'unité et l'impédance d'entrée est infinie. Pour obtenir un gain inférieur à 1, il suffit de placer à l'entrée un pont atténuateur.

5.7.3 Montage suiveur

La figure 5.9 représente le montage suiveur. Il est utilisé pour l'adaptation de l'impédance.

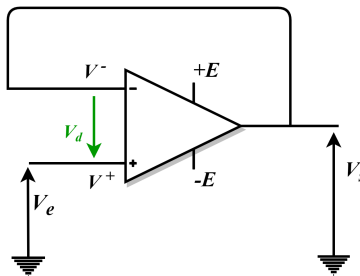


FIGURE 5.9: Montage suiveur.

Les tensions d'entrée négative et positive sont égales.

$$V_e = V_s \quad (5.20)$$

5.7.4 Montage sommateur inverseur

On dispose de deux tensions V_{e1} et V_{e2} et considérons le montage de la figure 5.10.

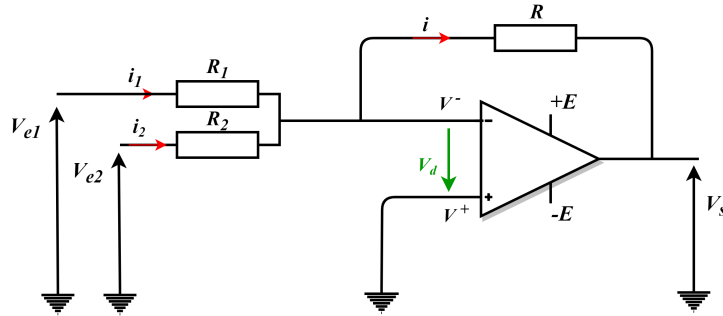


FIGURE 5.10: Montage sommateur inverseur.

Le théorème de Millman donne :

$$V^- = \frac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_s}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R}} \quad (5.21)$$

D'autre part, on a aussi :

$$V^+ = 0 \quad (5.22)$$

Il résulte que :

$$V_d = V^- = 0 \quad (5.23)$$

$$V^- = 0 \Rightarrow \frac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_s}{R}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R}} = 0 \quad (5.24)$$

Donc :

$$\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} + \frac{V_s}{R} = 0 \quad (5.25)$$

$$\Rightarrow V_s = -R \left(\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_{e2}}{R_2} \right) \quad (5.26)$$

Si $R_1 = R_2 = R$

$$V_s = -(V_{e1} + V_{e2}) \quad (5.27)$$

La tension de sortie V_s est en opposition de phase par rapport à la somme des tensions d'entrées. D'où la nomination sommateur inverseur.

5.7.5 Montage soustracteur

On considère le montage de la figure 5.11.

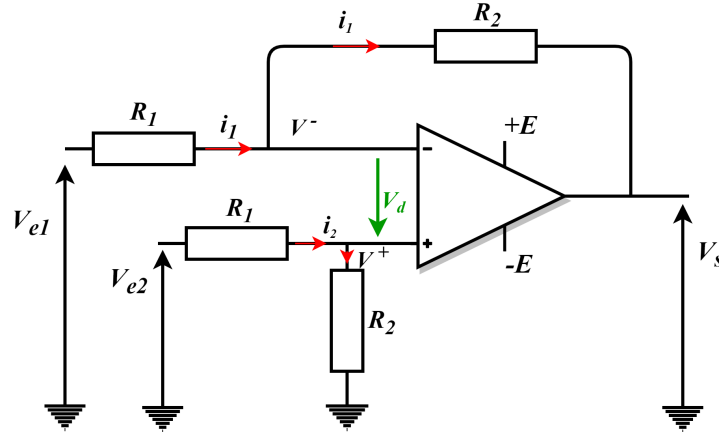


FIGURE 5.11: Montage soustracteur.

En appliquant le théorème de Millman, on obtient :

$$V^- = \frac{\frac{V_{e1}}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 V_{e1} + R_1 V_s}{R_1 + R_2} \quad (5.28)$$

$$V^+ = \frac{\frac{V_{e2}}{R_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 V_{e2}}{R_1 + R_2} \quad (5.29)$$

Si on considère $V^+ = V^-$

$$\frac{R_2 V_{e1} + R_1 V_s}{R_1 + R_2} = \frac{R_2 V_{e2}}{R_1 + R_2} \quad (5.30)$$

On obtient

$$V_s = \frac{R_2}{R_1}(V_{e2} - V_{e1}) \quad (5.31)$$

Si on choisit : $R_1 = R_2$, on obtient :

$$V_s = V_{e2} - V_{e1} \quad (5.32)$$

Le montage amplifie alors la différence de deux tensions d'entrée.

5.7.6 Montage intégrateur

Si on remplace la résistance R_2 par un condensateur dans le montage amplificateur inverseur, on obtient un montage appelé intégrateur.

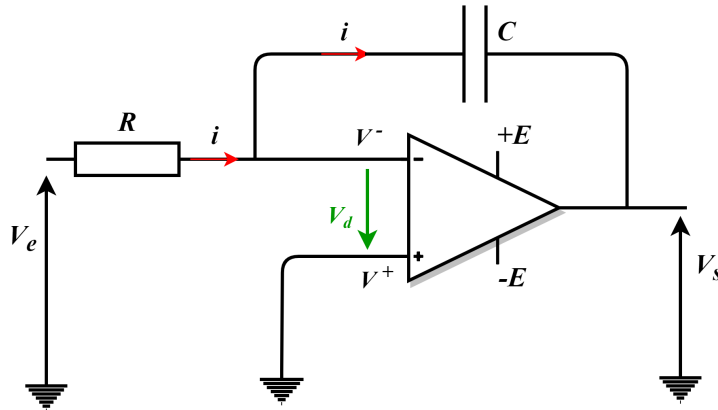


FIGURE 5.12: Montage intégrateur.

On a :

$$V_e(t) = Ri(t) \quad (5.33)$$

$$V_C(t) = -V_s(t) \quad (5.34)$$

Le courant dans le condensateur est donné par la relation suivante :

$$i_{ct} = C \frac{dV_C(t)}{dt} = -C \frac{dV_s(t)}{dt} \quad (5.35)$$

$$V_e(t) = -RC \frac{dV_s(t)}{dt} \quad (5.36)$$

Par intégration, on obtient :

$$V_s(t) = -\frac{1}{RC} \int V_e(t) dt \quad (5.37)$$

En pratique on ajoute une résistance en parallèle avec le condensateur pour obtenir une intégration satisfaisante.

5.7.7 Montage dérivateur

Le montage dérivateur est le même que le précédent sauf que l'emplacement de la résistance est inversé par rapport à celle du condensateur.

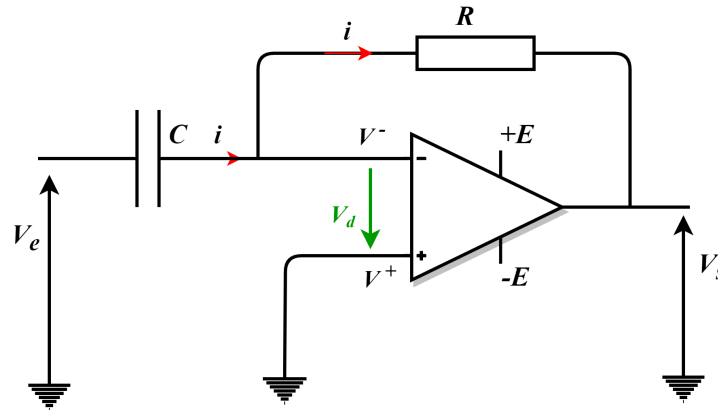


FIGURE 5.13: Montage dérivateur.

On a :

$$V_s(t) = -Ri(t) \quad (5.38)$$

$$V_C(t) = V_e(t) \quad (5.39)$$

Avec

$$i_c t = C \frac{dV_C(t)}{dt} = C \frac{dV_e(t)}{dt} \quad (5.40)$$

$$V_s(t) = -RC \frac{dV_e(t)}{dt} \quad (5.41)$$

En haute fréquence la sortie du montage ne sera pas stable, il y aura des oscillations. Pour résoudre ce problème, on ajoute une résistance en série avec le condensateur.

5.8 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux amplificateurs opérationnels. d'abord, nous avons présenté la définition de l'amplificateur opérationnel, sa description et ses caractéristiques. Ensuite, nous avons traité les régimes de fonctionnement. Enfin, les applications linéaires des amplificateurs opérationnels ont été abordées.