

CHAPITRE 4

Amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel (ou *ampli-op*) est un circuit très utilisé. Plusieurs circuits l'utilisent comme composante de base à cause de sa très grande souplesse : on peut fabriquer un amplificateur, un sommateur, un dérivateur, etc.

On ne verra pas comment fonctionne le circuit interne de l'ampli-op : on s'intéresse plutôt au comportement aux bornes. L'ampli-op sera donc défini comme une boîte noire qui amplifie les signaux à ses bornes.

4.1 Bornes : tensions et courants

L'ampli-op le plus commun fut développé en 1968 par Fairchild Semiconductor : le $\mu A741$. Cet ampli-op est disponible dans un boîtier à 8 pattes, comme montré à la figure 4.1. La figure 4.1 montre aussi un schéma des connexions internes de l'ampli-op. Le symbole triangulaire est le symbole typique d'un ampli-op.

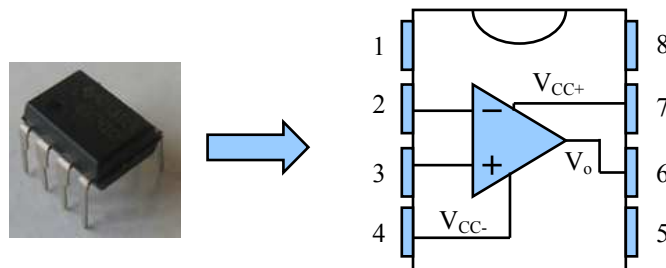


FIGURE 4.1 – Photo d'un ampli-op et son boîtier

L'ampli-op possède cinq bornes qui sont d'intérêt pour ce cours :

1. Entrée inversante v_n (l'entrée avec le -)
2. Entrée non-inversante v_p (l'entrée avec le +)
3. Sortie v_o
4. Alimentation positive V_{CC+}
5. Alimentation négative V_{CC-}

Pour faire fonctionner l'ampli-op, il faut appliquer deux alimentations : une positive et une négative. Ces deux alimentations n'ont pas besoin d'avoir la même valeur, mais c'est le plus commun ($V_{CC-} = -V_{CC+}$).

La figure 4.2 montre les bornes de l'ampli-op. Les tensions sont toutes définies par rapport à un noeud commun auquel l'ampli-op est branché. Les courants sont tous définis comme entrant dans les bornes.

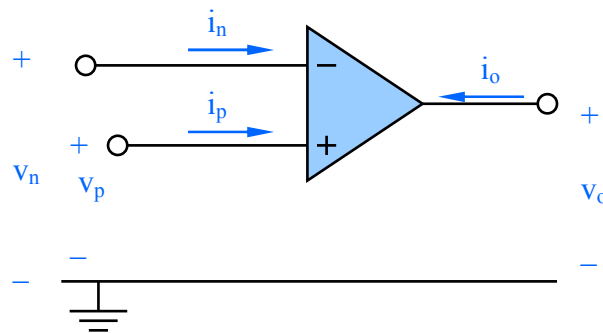


FIGURE 4.2 – Bornes : tensions et courants d'un ampli-op

Un point très important : la tension de sortie maximale ne peut pas être plus grande que la tension V_{CC+} , et la tension de sortie minimale ne peut pas être plus petite que la tension V_{CC-} :

$$V_{CC-} < v_o < V_{CC+} \quad (4.1)$$

L'ampli-op possède un gain très élevé, dans l'ordre de 200000 pour des amplificateurs pratiques. L'équation qui régit le fonctionnement de l'ampli-op est la suivante :

$$v_o = A(v_p - v_n) \quad (4.2)$$

où A est le gain de l'ampli-op.

L'ampli-op possède deux modes principaux de fonctionnement :

1. Mode amplificateur
2. Mode comparateur

Dans le mode amplificateur, il y a *toujours* un parcours entre la sortie et l'entrée - : c'est du feedback négatif. Sans ce parcours, l'ampli-op fonctionne en mode comparateur.

4.2 Ampli-op en mode amplificateur

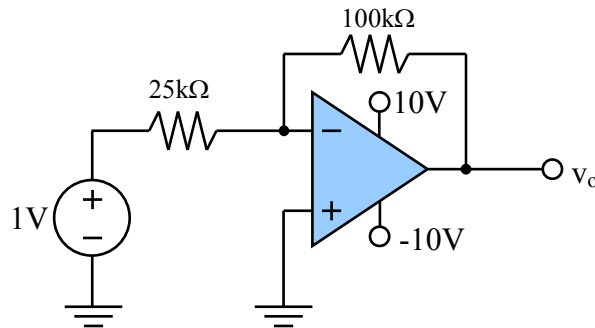
En mode amplificateur, on doit analyser le circuit avec deux suppositions importantes :

1. $v_p = v_n$
2. $i_p = i_n = 0$

Le reste de l'analyse se fait avec les techniques vues dans les chapitres précédents : lois de Kirchhoff, méthode des tensions de noeud, etc.

EXEMPLE 1

Calculer la tension de sortie v_o .



L'ampli-op est en mode amplificateur, puisqu'il y a un parcours entre la sortie et la borne $-$ (à travers la résistance de $100\text{k}\Omega$). On commence l'analyse en appliquant les suppositions. La tension $v_n = v_p = 0$, puisque le noeud v_n est mis à terre. Les courants $i_p = i_n = 0$.

Puisqu'aucun courant n'entre dans la borne $-$, le courant dans la résistance de $25\text{k}\Omega$ est égal au courant dans la résistance de $100\text{k}\Omega$. On a donc :

$$i_{25k} = i_{100k}$$

ce qui veut dire

$$\frac{v_{in} - v_n}{25000} = \frac{v_n - v_o}{100000}$$

et puisque $v_n = 0$,

$$\frac{1 - 0}{25000} = \frac{0 - v_o}{100000} \Rightarrow v_o = -4\text{V}$$

On verra dans les prochaines sections plusieurs circuits utilisés avec des ampli-ops. Ce sont tous des circuits où l'ampli-op fonctionne comme amplificateur. La technique d'analyse est la même dans tous les cas.

4.3 Amplificateur inversant

L'amplificateur inversant est une configuration de base de l'ampli-op, utilisé pour amplifier des signaux. On analyse cette configuration pour trouver une équation de v_o en fonction de v_i .

Le circuit de l'amplificateur inversant est montré à la figure 4.3. Les mêmes suppo-

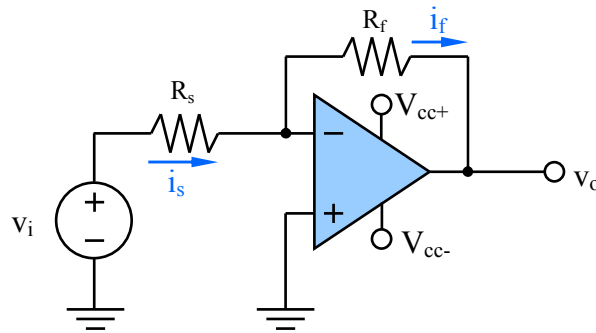


FIGURE 4.3 – Ampli-op en configuration amplificateur inversant

sitions s'appliquent puisque l'ampli-op possède du feedback sur sa borne $-$. La tension $v_n = v_p = 0$.

Les courants $i_p = i_n = 0$, et donc on peut dire que $i_s = i_f$. Le courant i_s est obtenu en appliquant la loi d'Ohm à la résistance R_s :

$$i_s = \frac{v_i - v_n}{R_s} = \frac{v_i}{R_s} \quad (4.3)$$

On applique le même raisonnement pour trouver le courant i_f :

$$i_f = \frac{v_n - v_o}{R_f} = -\frac{v_o}{R_f} \quad (4.4)$$

Avec ces deux équations, on obtient :

$$v_o = -\frac{R_f}{R_s} v_i \quad (4.5)$$

La tension de sortie sera une version amplifiée de la tension à l'entrée. Le signe négatif est la raison pour laquelle on appelle cette configuration *inversante*. À noter que l'équation 4.5 est seulement valide si la sortie est entre V_{CC-} et V_{CC+} .

4.4 Sommateur

Le sommateur, comme son nom l'indique, permet de faire la somme de différentes tensions. Le circuit est donné à la figure 4.4.

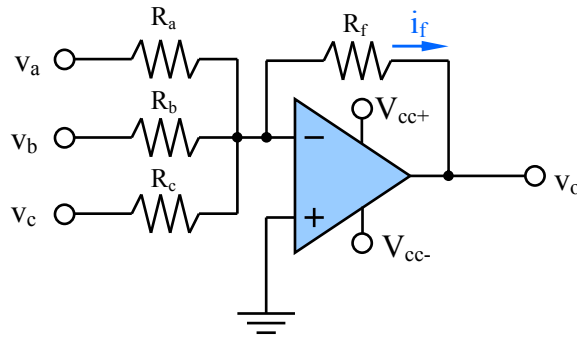


FIGURE 4.4 – Ampli-op en configuration sommateur

On peut calculer la relation entre les entrées v_a , v_b et v_c en faisant la somme des courants à la borne négative de l'ampli-op. On suppose que les courants des entrées sont dirigés vers le noeud.

$$\frac{v_a - v_n}{R_a} + \frac{v_b - v_n}{R_b} + \frac{v_c - v_n}{R_c} - \frac{v_n - v_o}{R_f} = 0 \quad (4.6)$$

et puisque $v_n = 0$ (parce que $v_p = 0$, et $v_n = v_p$), on obtient :

$$v_o = -\left(\frac{R_f}{R_a}v_a + \frac{R_f}{R_b}v_b + \frac{R_f}{R_c}v_c\right) \quad (4.7)$$

Si les trois résistances à l'entrée sont égales ($R_a = R_b = R_c = R_s$), on peut simplifier :

$$v_o = -\frac{R_f}{R_s}(v_a + v_b + v_c) \quad (4.8)$$

On voit bien que la sortie est la somme des trois entrées.

Le nombre d'entrées n'est pas limité à 3 : on peut additionner autant de signaux que l'on veut. Par exemple, on pourrait additionner les 16 canaux d'un signal audio.

4.5 Amplificateur non-inversant

La prochaine configuration est celle de l'amplificateur non inversant : c'est un amplificateur qui n'inverse pas la polarité de l'entrée. Le circuit est donné à la figure 4.5.

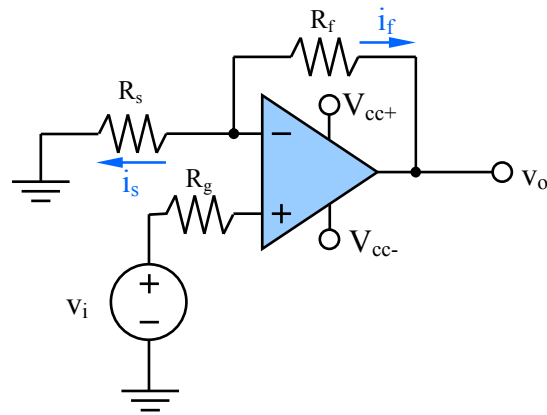


FIGURE 4.5 – Ampli-op en configuration amplificateur non inversant

Pour faire l'analyse, on applique les mêmes suppositions que d'habitude. La tension $v_p = v_i$, et donc $v_n = v_p = v_i$.

On fait la somme des courants à la borne négative de l'ampli-op :

$$\frac{v_i - 0}{R_s} - \frac{v_o - v_i}{R_f} = 0 \quad (4.9)$$

ce qui donne :

$$\frac{v_i}{R_s} + \frac{v_i}{R_f} = \frac{v_o}{R_f} \quad (4.10)$$

qu'on simplifie,

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) v_i \quad (4.11)$$

La sortie est donc une version amplifiée du signal d'entrée.

4.6 Amplificateur différentiel

L'amplificateur différentiel permet de soustraire deux tensions. Le circuit est donné à la figure 4.6.

Le but de l'analyse est le même que les autres configurations : trouver une relation entre v_o et v_i . On commence en premier en trouvant la tension v_p , que l'on obtient en appliquant un diviseur de tension (R_c et R_d forment un diviseur de tension, puisque $i_p = 0$).

$$v_p = \frac{R_d}{R_c + R_d} v_b \quad (4.12)$$

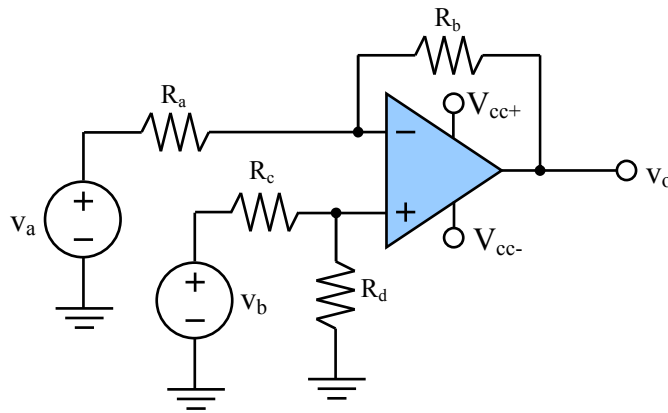


FIGURE 4.6 – Ampli-op en configuration amplificateur différentiel

On va ensuite faire la somme des courants à la borne négative de l'ampli-op (on suppose que le courant se dirige vers la sortie de l'ampli-op) :

$$\frac{v_a - v_n}{R_a} - \frac{v_n - v_o}{R_b} = 0 \quad (4.13)$$

qu'on peut simplifier :

$$\frac{R_b}{R_a} v_a - \left(1 + \frac{R_b}{R_a}\right) v_n = -v_o \quad (4.14)$$

On combine les équations 4.12 et 4.14 (puisque $v_n = v_p$), ce qui donne

$$\frac{R_b}{R_a} v_a - \left(\frac{R_a + R_b}{R_a}\right) \frac{R_d}{R_c + R_d} v_b = -v_o \quad (4.15)$$

et donc,

$$v_o = \left(\frac{R_d}{R_a} \frac{R_a + R_b}{R_c + R_d}\right) v_b - \frac{R_b}{R_a} v_a \quad (4.16)$$

Si on veut que les rapports de résistance soient égaux, il faut que :

$$\frac{R_d}{R_a} \frac{R_a + R_b}{R_c + R_d} = \frac{R_b}{R_a} \quad (4.17)$$

ou,

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{R_c}{R_d} \quad (4.18)$$

Dans ce cas-là, on obtient

$$v_o = \frac{R_b}{R_a} (v_b - v_a) \quad (4.19)$$

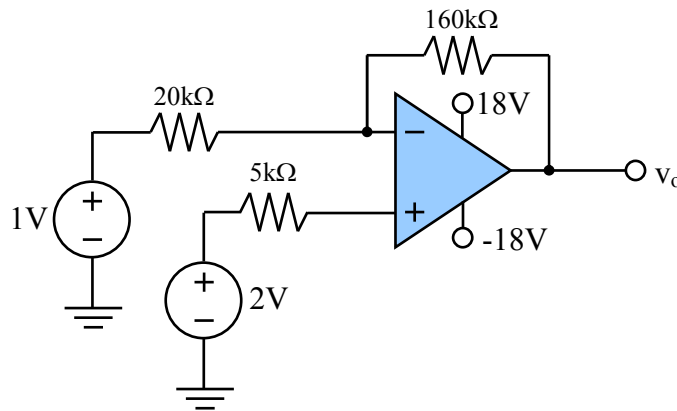
4.7 Procédure générale

La méthode générale à suivre lorsqu'on solutionne des problèmes d'un ampli-op en mode amplificateur est la suivante :

1. Calculer la tension à la borne positive, v_p . Il ne faut pas oublier que $i_p = 0$.
2. Faire la somme des courants à la borne négative, tout en n'oubliant pas que $i_n = 0$.
3. Appliquer le principe que $v_n = v_p$.
4. Solutionner pour v_o en fonction de v_i .
5. Vérifier que $V_{cc-} < v_o < V_{cc+}$.

EXEMPLE 2

Calculer la tension de sortie v_o pour le circuit suivant.



On applique la méthode vue plus haut. La tension $v_p = 2V$, puisque le courant $i_p = 0$; il n'y a pas de chute de tension dans la résistance de $5k\Omega$.

À la borne négative, on fait la somme des courants, en supposant que le sens est vers la sortie :

$$\frac{1 - v_n}{20k} = \frac{v_n - v_o}{160k}$$

et puisque $v_n = v_p = 2V$,

$$\frac{1 - 2}{20k} = \frac{2 - v_o}{160k}$$

qu'on peut simplifier pour obtenir :

$$v_o = 2 + \frac{160k}{20k} = 10V$$

La sortie est comprise entre $-18V$ et $18V$.

4.8 Saturation

L'ampli-op est dit *saturé* si la tension dépasse les bornes de V_{cc+} et V_{cc-} . Dans ce cas, la relation $v_n = v_p$ ne s'applique plus (mais $i_n = i_p = 0$ est encore vrai). Il faut recalculer les valeurs de courants calculés pour obtenir v_o .

EXEMPLE 3

On reprend le circuit de l'exemple 1, mais cette fois la source de tension à l'entrée est 3V.

On commence en appliquant $v_n = v_p = 0$. Puis on calcule les courants (avec $i_n = i_p = 0$) :

$$i_{25k} = i_{100k}$$

ce qui veut dire

$$\frac{v_{in} - v_n}{25000} = \frac{v_n - v_o}{100000}$$

et puisque $v_n = 0$,

$$i_{25k} = \frac{3 - 0}{25000} = \frac{0 - v_o}{100000} = 0.12 \text{ mA} \Rightarrow v_o = -12\text{V}$$

Puisque -12V dépasse les bornes de l'alimentation de l'ampli-op, la sortie est limitée à -10V . Il faut recalculer le courant (si on veut calculer la puissance à l'entrée, par exemple).

Le courant est :

$$i_s = \frac{v_s - v_o}{25 + 100} = 0.104 \text{ mA}$$

ce qui est différent de ce calculé plus haut.

On peut calculer la tension v_n :

$$v_n = v_s - v_{25k} = 3 - (25)(0.104) = 0.4 \text{ V}$$

La tension est près de 0V, mais pas exactement, parce qu'on a saturé l'ampli-op.

4.9 Le comparateur

Un ampli-op peut être utilisé pour comparer des tensions si on n'a pas de chemin de feedback entre la sortie et la borne négative. Le montage est donné à la figure 4.7.

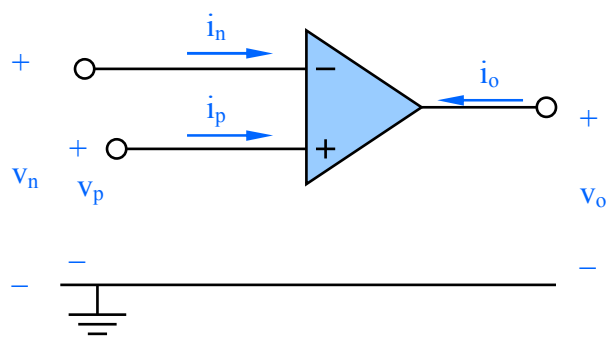


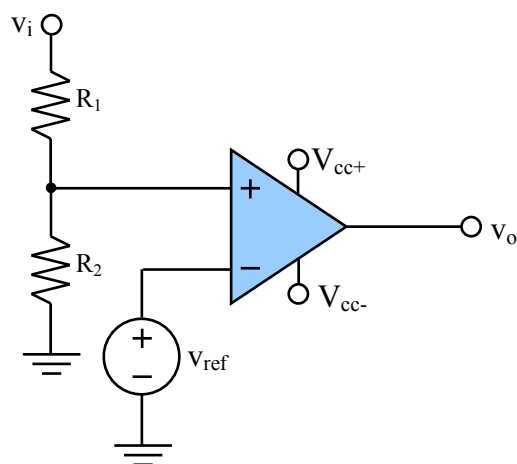
FIGURE 4.7 – Ampli-op en configuration comparateur

Le fonctionnement est assez simple :

- Si $v_p > v_n$, alors $v_o = V_{cc+}$
- Si $v_n > v_p$, alors $v_o = V_{cc-}$

EXEMPLE 4

Pour le circuit suivant, tracer la courbe de la sortie v_o vs l'entrée v_i si $v_{ref} = 5V$, $R_1 = 10k\Omega$ et $R_2 = 40k\Omega$



La tension v_p est obtenue en appliquant un diviseur de tension, puisque le courant $i_p = 0$.

$$v_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_i = \frac{40}{40 + 10} v_i = 0.8v_i$$

La sortie sera V_{cc+} lorsque $v_p > v_n$, ou $0.8v_i > v_{ref}$:

$$0.8v_i > v_{ref} \Rightarrow v_i > \frac{5}{0.8} = 6.25 \text{ V}$$

Le graphique est le suivant :

