



Fiche : Amplificateur Opérationnel

Table des matières

1	Introduction	1
2	Amplification d'un signal	2
2.1	Principe	2
2.2	Classification des amplificateurs	2
3	L'amplificateur opérationnel (AO)	3
3.1	Description	3
3.2	Principe de fonctionnement	3
3.3	Modèle de l'AO idéal	4
3.4	Régimes de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel	4
4	Electronique linéaire à base d'amplificateurs opérationnels	4
4.1	Petit encart sur la rétroaction	4
4.2	L'amplificateur non inverseur	5
4.3	Le suiveur de tension ou adaptateur d'impédance en tension	6
4.4	Amplificateur inverseur	7
5	Les filtres actifs	7
6	Conclusion	8

1 Introduction

Les amplificateurs opérationnel sont des systèmes électroniques actifs très répandus et utiles dans différents domaines de la physique. Bien que nous n'ayons jamais vraiment eu de cours dessus, c'est rentré dans les programmes en PCSI (voir Fig. 1) et même pour les montages, il peut être intéressant d'avoir quelques idées de comment fonctionne cet appareil.

L'objectif principal de la partie 1.5. « Filtrage linéaire » n'est pas de former les étudiants aux aspects techniques des calculs des fonctions de transfert et des tracés de diagrammes de Bode mais de mettre l'accent sur l'interprétation des propriétés du signal de sortie connaissant celles du signal d'entrée et d'appréhender le rôle central de la linéarité des systèmes utilisés. Cette partie se termine par l'introduction de l'amplificateur linéaire intégré (ALI) idéal et en régime linéaire ; celle-ci doit être perçue comme une découverte et ne pas donner lieu à des dérives calculatoires.

FIGURE 1 – Programme PCSI et mention de l'amplificateur opérationnel

Avant de rentrer dans le vif du sujet, faisons un petit point historique dessus. L'amplificateur opérationnel (AO à partir de maintenant) est introduit pour la première fois en 1947 et est fabriqué vraiment tel qu'on le connaît maintenant en 1963 par Widlar. L'objectif derrière cet appareil est de réaliser des opérations fonctionnelles. En

raison de son faible coût et de ses performances, c'est aujourd'hui un composant majeur des circuits électriques modernes dans tous les domaines où de l'électronique est engagée.

2 Amplification d'un signal

2.1 Principe

On s'intéresse ici à un quadripôle quelconque. Lorsque le quadripôle débite dans une charge, on introduit les facteurs d'amplification en courant et en puissance :

$$A_i = \left| \frac{i_s}{i_e} \right| \quad (1)$$

$$A_p = \frac{P_s}{P_e} \quad (2)$$

On peut les exprimer en décibel en prenant $20 \cdot \log$ des différents facteurs. Ce sont juste des conventions.

Amplificateur (ou ampli) : quadripôle dans lequel la puissance électrique à la sortie P_s associée à la tension u_s est supérieure à celle associée à l'entrée P_e . Un tel quadripôle est forcément actif (par conservation de la matière).

L'objectif est d'augmenter la puissance électrique d'un signal. C'est ce qu'il se passe par exemple dans le cas du microphone.

Exemple : la puissance en sortie d'un microphone (voir Fig. 2) est de l'ordre de 1 nW alors que la puissance pour faire vibrer la membrane est de l'ordre du W. Il est donc nécessaire d'avoir recours à une amplification.

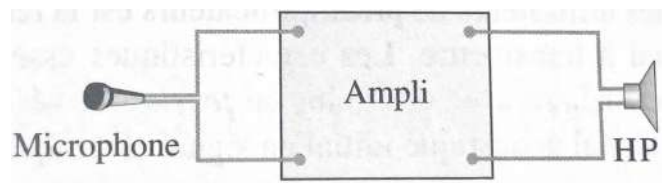


FIGURE 2 – Système associé au Microphone [1]

2.2 Classification des amplificateurs

Une chose à retenir sur l'amplification, c'est qu'elle est en générale assurée par une suite d'amplificateurs avec des fonctions qui peuvent différer, adaptation d'impédance, transmission de courant, de tension ou autre. C'est souvent une *cascade* qui se passe. Dans un cas simplifié, on peut considérer que le facteur d'amplification total est :

$$A_{tot} = \prod_i^n A_i \quad (3)$$

Il existe trois types d'amplificateurs différents que l'on va rapidement décrire :

amplificateurs en tension : l'objectif est la récupération dans les meilleures conditions de fidélité du signal à transmettre. Il faut que le gain en tension soit élevé. Ils sont placés juste après le microphone

Les amplificateurs en puissance : ce sont des amplificateurs placés en fin de chaîne. Souvent ils n'ont un comportement linéaire qu'au voisinage d'un point de fonctionnement autour duquel on travaille. On les placerait juste avant le haut-parleur.

Les amplificateurs différentiels : Ces amplificateurs fournissent à la sortie une tension proportionnelle à la différence des tensions d'entrée

$$u_s = A_0 \epsilon = A_0(u_+ - u_-) \quad (4)$$

C'est celui-là qui nous intéressera par la suite pour les amplificateurs opérationnels.

On peut également classer les amplificateurs en fonction de leurs fréquences de bande passante. Le lecteur intéressé pourra se référer à la page 202 de [1].

3 L'amplificateur opérationnel (AO)

3.1 Description

Amplificateur opérationnel : c'est essentiellement un amplificateur différentiel, c'est à dire fournir en sortie une tension directement liée à la différence de tensions d'entrée

Le schéma électrique de l'AO est présenté à la Fig. 3. Par convention, on ne représente pas les tensions d'alimentation, la connexion à la masse et les générateurs de tension d'entrée.

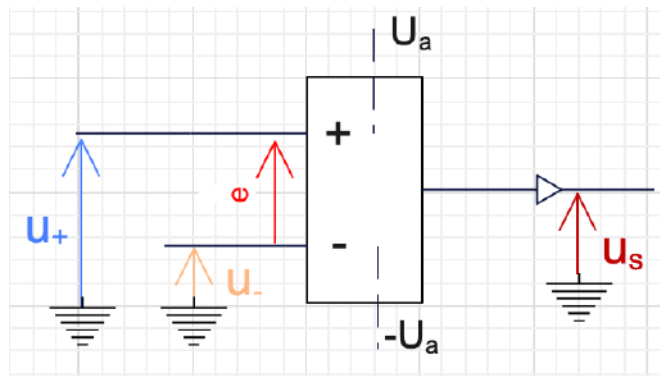


FIGURE 3 – Schéma électrique de l'amplificateur opérationnel

Il n'y a rien à savoir en soi sur comment ça marche à l'intérieur, on peut néanmoins retenir que les différentes composantes électroniques sont des semiconducteurs.

3.2 Principe de fonctionnement

En *boucle ouverte* (c'est à dire sans rétroaction comme dans le schéma) l'équation suivante permet de décrire le fonctionnement de l'AO :

$$\tau_c \frac{du_s}{dt} + u_s = A_0 \epsilon \quad (5)$$

Remarque qui a son importance, cette équation différentielle est également celle d'un filtre passe-bas donc on peut tracer la caractéristique de l'AO comme celle d'un filtre passe-bas. τ_c est la constante de temps de l'AO et est de l'ordre de la microseconde. Le facteur A_0 est le facteur d'amplification qui peut varier de 10^4 à 10^7 . C'est l'**amplification différentielle stationnaire**. L'équation devient :

$$u_s = A_0(u_+ - u_-) = A_0 \epsilon \quad (6)$$

A partir de cette équation, on peut commencer à comprendre le vocabulaire inverseur et non-inverseur. En effet, si on échange les branchements des bornes + et - de l'AO, on change le signe dans l'équation ci-dessus : on "inverse" le signal.

Précautions à prendre :

- Il faut ALIMENTER l'AO. Il faut que celui-ci soit polarisé. Attention à cause de cela, la tension de sortie est limitée à une tension de saturation (dépend de l'appareil).
- Il faut appliquer un courant inférieur au courant de saturation (dépend de l'appareil).

3.3 Modèle de l'AO idéal

On restera sur le modèle de l'AO idéal, il n'y a que ça au programme. Il est néanmoins important d'avoir les hypothèses mises en jeu autour de cela :

Modèle de l'AO idéal :

- Le facteur d'amplification A_0 est infini
- une impédance d'entrée infinie, ce qui suppose que les courants d'entrée sont **nuls**
- une fréquence de coupure infinie, c'est à dire τ_c nulle. Attention, cette hypothèse est difficilement justifiable.

Ce modèle quoi qu'il idéal marche relativement bien et est dans notre cas très largement suffisant.

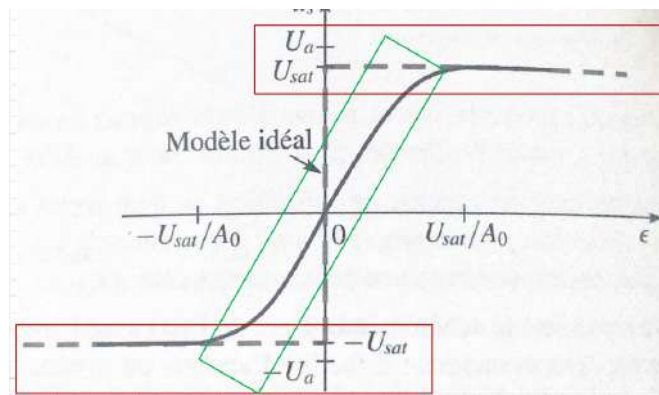
3.4 Régimes de fonctionnement de l'amplificateur opérationnel

FIGURE 4 – Les différents régimes de l'AO d'après [1]

Un AO peut fonctionner selon deux régimes différents, un régime linéaire (en vert sur la Fig. 4) et un régime dit saturé (en rouge sur la Fig. 4). On ne s'intéressera que peu ici au régime saturé, qui est néanmoins utile. En effet, c'est avec ce régime que l'on fait des comparateurs de courant par exemple. Ce qui nous intéresse ici c'est plus la partie linéaire. On comprend bien avec ce tracé l'hypothèse du facteur A_0 infini dans le cas de l'AO idéal.

4 Electronique linéaire à base d'amplificateurs opérationnels

On obtient un régime linéaire en réalisant une rétroaction *négative* de la tension de sortie. La rétroaction est absolument nécessaire : elle induit une diminution du facteur d'amplification, en effet comme celui-ci est grand, pour avoir une tension de sortie qui ne sature pas, cela implique d'avoir une tension d'entrée très faible de l'ordre de grandeur du bruit.

4.1 Petit encart sur la rétroaction

Si le signal de sortie est absolument indépendant du signal d'entrée ou de toute valeur, alors il peut prendre n'importe quelle valeur, ce qui peut ne pas être ce qui est attendu. Il faut alors que le signal de sortie soit soumis à certaines contraintes, il faut notamment qu'il soit relié d'une certaine façon au signal d'entrée. Pour réaliser cela, il faut un capteur pour déterminer la valeur et rajouter un actionneur qui peut influencer sur la valeur. On forme un système qui est bouclé.

Dans le cas de l'OA on a une rétroaction négative, ce qui fait qu'on diminue le signal d'entrée en fonction du signal de sortie. Le schéma de principe d'un tel système est présenté dans la Fig. 5. Pour une rétroaction négative, le signal

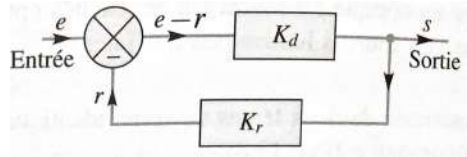


FIGURE 5 – Boucle de rétroaction négative, source : [1]

retour est soustrait au signal d'entrée (en gros ça change la fonction de transfert). La tension d'entrée est donc :

$$u_{r,n} = e - r \quad (7)$$

Dans le cas de l'AO le circuit bouclé est celui présenté dans la Fig. 6.

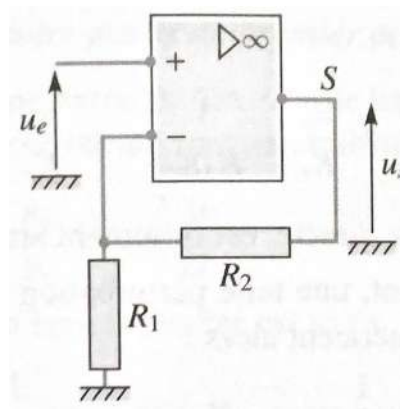


FIGURE 6 – Amplificateur opérationnel avec boucle de rétroaction négative, source : [1]

Pour ceux qui voudraient plus d'informations à ce sujet, il y a tout un chapitre dans [1] p.427.

4.2 L'amplificateur non inverseur

Le montage de l'amplificateur non inverseur est présenté à la Fig. 6. C'est un des circuits de base avec un AO. On suppose que l'AO est idéal et que $\epsilon = 0$. Dans ce cas, on déduit que la formule est :

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s$$

avec $u_+ = u_e$ et $u_+ = u_-$. On en déduit :

$$u_s : (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_e \quad (8)$$

Soit :

$$A_u = \frac{u_s}{u_e} = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \quad (9)$$

Comment trouve-t'on cela ? Pour la démonstration on s'appuie sur la Fig. 7

On a signifié toutes les tensions. On rappelle que $\epsilon = 0$ V. On applique la formule du diviseur de tension dans la maille notée 1.

$$u_e = u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_s \quad (10)$$

Soit en passant tout de l'autre côté :

$$u_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_e = (1 + \frac{R_2}{R_1}) u_e \quad (11)$$

L'ordre de grandeur pour les résistances est souvent de l'ordre du k Ω .

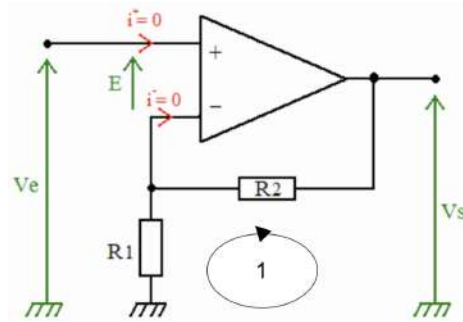


FIGURE 7 – Schéma commenté de l'AO non inverseur, source : <http://www.elektronique.fr/cours/AOP/aop-amplificateur-non-inverseur.php>

4.3 Le suiveur de tension ou adaptateur d'impédance en tension

C'est le plus simple des montages utilisant un AO. Il est représenté Fig. 8.

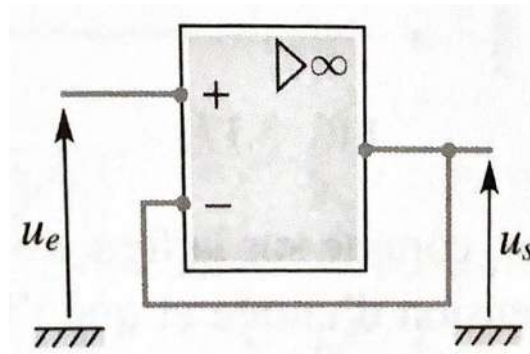


FIGURE 8 – Schéma d'un montage suiveur, source : [1]

On se place dans le cas de l'AO idéal donc $\epsilon = 0\text{ V}$ avec $u_+ = u_e$ et $u_- = u_s$.

On en déduit le facteur d'amplification du montage :

$$A_u = \frac{u_s}{u_e} = 1 \quad (12)$$

Soit un Gain en décibel nul.

Malgré son facteur d'amplification de 1, cela reste un des dispositifs les plus utilisés en effet : ici ce qu'il faut regarder ce sont les impédances. Ce montage permet en fait de faire de *l'adaptation d'impédance en tension*.

Regardons les impédances :

$$Z_e = \frac{u_e}{i_e} \quad (13)$$

Avec donc $i_e = 0$ donc $Z_e = \infty$. Également :

$$Z_s = \frac{u_s}{i_s} \quad (14)$$

avec $u_e = 0 = u_s$ d'où $Z_s = 0$

L'impédance d'entrée est considérée comme infiniment plus grande que celle des autres composants du système ($M\Omega$). Cela permet de connecter deux systèmes entre eux sans chute de tension. Les deux systèmes ne dépendent plus l'un de l'autre ce qui est très utile. La fonction de transfert globale est alors le produit des fonctions de transfert de chaque système. C'est très utile notamment pour les filtres actifs. Illustrations : <https://www.youtube.com/watch?v=TfLVhv2Z8Cc> + [1] p.274. + <https://www.youtube.com/watch?v=jEPm7Z4XMuM>

4.4 Amplificateur inverseur

L'objectif de cet exemple est de montrer l'effet de l'échange de deux bornes. Le schéma d'un tel montage est présenté dans la Fig. 9

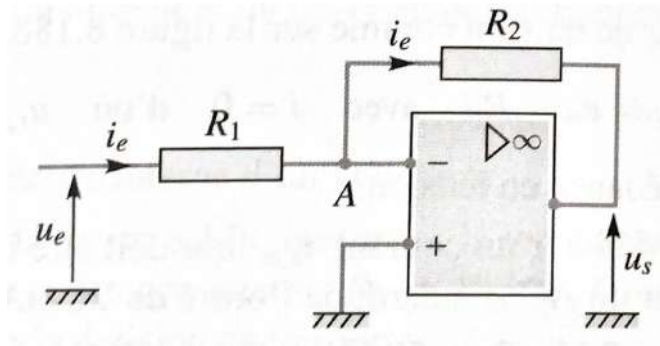


FIGURE 9 – Schéma du montage amplificateur inverseur, source : [1]

Dans le schéma de la Fig. 9, l'entrée + est connectée à la masse ce qui $u_+ = 0$ et comme $\epsilon = 0$, on a $u_- = 0$.

Comme le même courant parcourt les résistances (on rappelle que $i_+ = i_- = 0$) on a :

$$i_e = \frac{u_e}{R_1} = -\frac{u_s}{R_2} \quad (15)$$

D'où :

$$A_u = -\frac{R_2}{R_1} \quad (16)$$

Le facteur d'amplification en tension étant négatif, le signal de sortie est en opposition de phase d'où le nom du montage.

Peite remarque technique, pour réaliser l'adaptation d'impédance, il faut que R_1 soit grand. En effet R_1 correspond à l'impédance d'entrée du système qui doit être bien plus importante que l'impédance de sortie. On fixe une valeur de l'ordre de la dizaine de $k\Omega$.

5 Les filtres actifs

La vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=jEPm7Z4XMuM> explique très bien comment ça fonctionne et les calculs mathématiques. On ne mettra ici que les résultats principaux et les idées.

On part d'un filtre passe-bas classique auquel on rajoute une résistance notée R_c (voir Fig. 10).

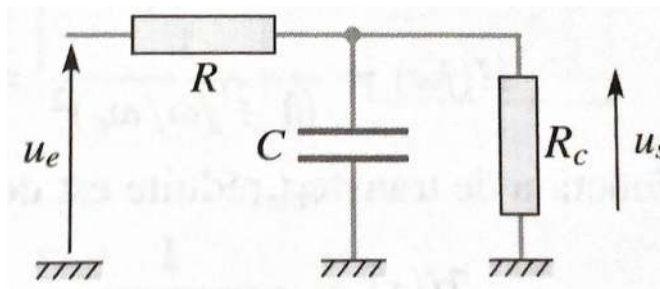


FIGURE 10 – Filtre passe-bas modifié avec une résistance R_c , source : [1]

Si on fait une étude de la fonction de transfert, on voit que celle-ci passe de :

$$H(x) = \frac{1}{1 + jx} \quad (17)$$

A :

$$H(j\omega) = \frac{R_c}{R + R_c} \left(\frac{1}{1 + j\left(\frac{RR_c}{R + R_c}\right)C\omega} \right) \quad (18)$$

Donc cette fonction de transfert dépend de R_c ce qui peut être problématique. Pour palier ce problème, on peut alors utiliser les propriétés de l'AO, notamment en montage suiveur comme présenté dans la Fig. 11. L'impédance d'entrée de l'AO étant très grande on se rapproche du cas où on n'avait pas la résistance et la fonction de transfert ne dépend plus de R_c . Attention cela à un coût : l'électricité à fournir à l'AO.

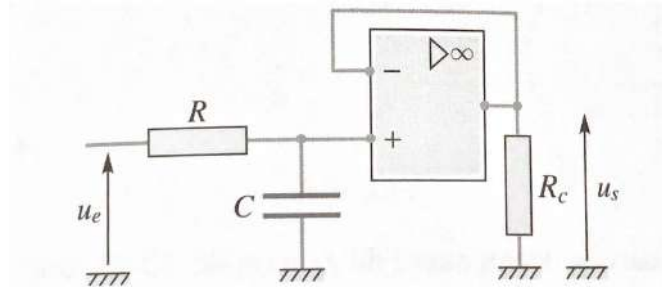


FIGURE 11 – Montage d'un filtre passe-bas actif, source : [1]

6 Conclusion

Nous avons vu différentes propriétés des AO et comment il était possible de les utiliser. Bien entendu, cette étude ne représente que la partie la plus basique de ce système qui est bien plus complexe et qui a une multitude d'applications possibles. On peut résumer en quelques points importants.

A retenir

- L'AO est un amplificateur différentiel qui fournit une tension de sortie u_s lorsqu'on applique ϵ à l'entrée. Par une rétroaction négative il fonctionne en régime linéaire.
- En régime saturé, la tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs. Cette propriété à des applications dans la fabrication de comparateurs.
- On se place toujours en première approximation dans le cas idéal.
- Avec la rétroaction négative, on contrôle parfaitement la tension de sortie. Les montages amplificateurs inverseur et non-inverseur permettent un gain négatif (resp. positif) déterminé par des résistances.
- Le montage suiveur est le montage le plus utilisé et permet de faire de l'adaptation d'impédance dans le but de connecter deux circuits sans que la connection ne change quoi que ce soit.

Références

- [1] José-Philippe Pérez, Christophe Lagoute, Jean-Yves Fourniols, and Stéphane Bouhours. *Électronique. Fondements et applications - 2e éd. : Avec 250 exercices et problèmes résolus*. Dunod, May 2012.