



Electrocinétique

Chapitre 2 : Amplificateur opérationnel

Sommaire

	Page
1 Impédances d'entrée et de sortie - Adaptation d'impédance	2
1.1 Quadripôle (Rappel)	2
1.2 Impédances d'entrée et de sortie	2
1.3 Adaptation d'impédance	3
2 L'amplificateur opérationnel (AO)	4
2.1 Présentation du composant A.O.	4
2.2 Amplificateur opérationnel réel	5
2.2.1 Caractéristique de transfert : comportement en régime continu	5
2.2.2 Comportement dynamique en régime sinusoïdal	5
2.3 Schéma équivalent et modèle de l'AO idéal	5
3 Effet de la rétroaction	6
3.1 Structure du système bouclé	6
3.2 Stabilité	7
3.3 Produit gain \times bande passante (cas $\beta \in R^+$)	7
3.4 Synthèse	8
4 Amplificateur opérationnel avec contre réaction sur l'entrée inverseuse (fonctionnement linéaire)	8
4.1 Montage amplificateur non inverseur	9
4.2 Montage amplificateur inverseur	9
4.3 Montage suiveur	9

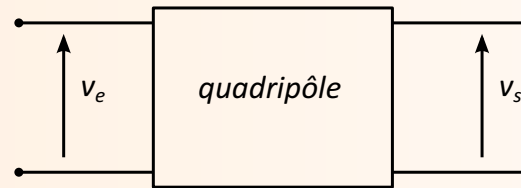
En plus du caractère passif des montages que l'on peut réaliser avec eux, les dipôles R , L et C (filtres par exemple) ont un inconvénient majeur : leur comportement dépend du circuit que l'on branche en aval, c'est-à-dire que leur fonction de transfert est modifiée lorsqu'ils sont utilisés. On se propose de déterminer les conditions nécessaires pour que le comportement d'un montage ne dépende pas des circuits placés autour de lui. On introduit pour cela les notions d'impédances d'entrée et de sortie.

1 Impédances d'entrée et de sortie - Adaptation d'impédance

1.1 Quadripôle (Rappel)

Quadripôle :

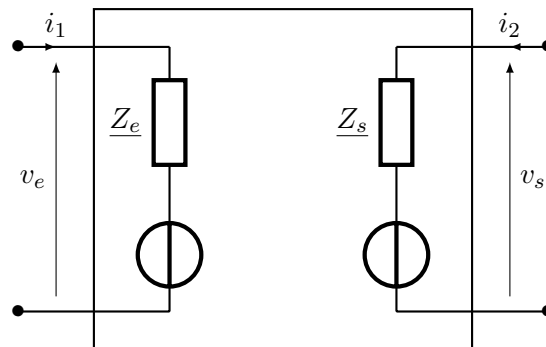
Un *quadripôle* est une portion de circuit comportant quatre bornes, deux d'entre elles permettant de lui appliquer une tension d'entrée v_e , les deux autres délivrant une tension de sortie v_s .



1.2 Impédances d'entrée et de sortie

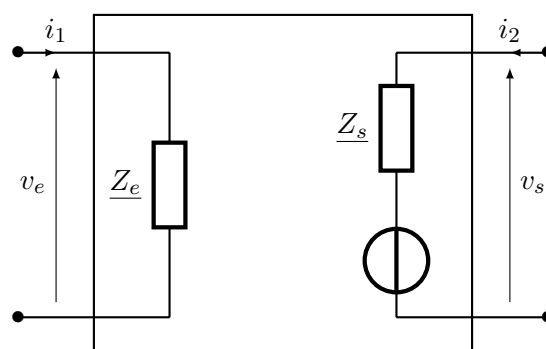
La notion d'impédance d'entrée / de sortie est à la marge du programme. Aucune connaissance générale n'est exigible, mais une introduction à cette notion est nécessaire pour comprendre ce qui va suivre. On s'intéresse par la suite aux circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé.

Le Théorème de Thévenin (hors programme) stipule qu'entre deux bornes d'un circuit linéaire, on peut toujours modéliser la portion de circuit située entre ces deux bornes par un générateur de Thévenin (source idéale de tension sinusoïdale et impédance en série). Un quadripôle admet donc le schéma équivalent suivant :



En général, cette modélisation ne dépend pas que du quadripôle, mais dépend des parties du circuit en amont et en aval du quadripôle. Sans plus de précisions, les composants du générateur d'entrée (res. de sortie) sont donnés lorsque la sortie (resp. l'entrée) est en circuit ouvert.

Dans les cas que l'on étudiera, la source idéale d'entrée est de tension nulle, et peut donc être remplacée par un fil :



Impédances d'entrée et de sortie :

Le quadripôle étant débranché du reste du circuit, on définit :

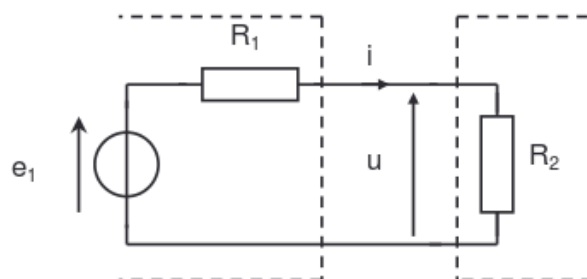
- l'impédance d'entrée \underline{Z}_e comme l'impédance du générateur de Thévenin équivalent situé en entrée ;
- l'impédance de sortie \underline{Z}_s comme l'impédance du générateur de Thévenin équivalent situé en sortie.

La partie réelle de l'impédance d'entrée (resp. de sortie) est qualifiée de résistance d'entrée (resp. de sortie). A notre niveau, on verra que l'on ne s'intéressera qu'au module des impédances d'entrée / sortie, laissant de côté leur argument. Si l'on parle abusivement de « grande impédance d'entrée », on parle en réalité d'« impédance d'entrée de grand module ».

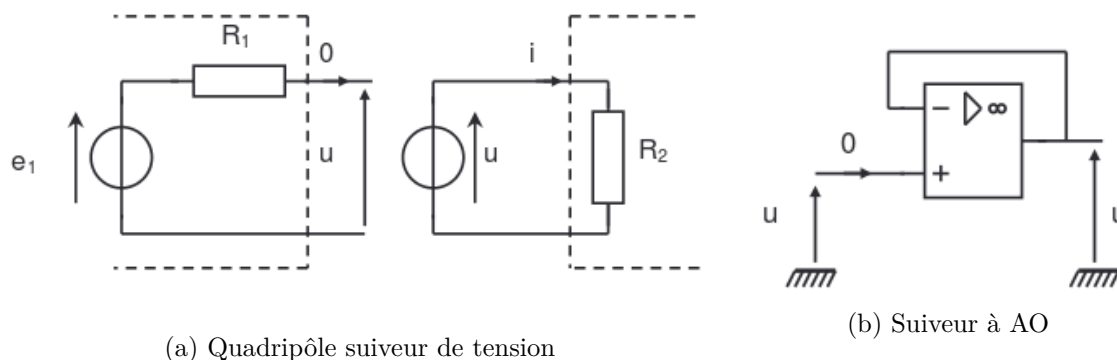
1.3 Adaptation d'impédance

Dans les chaînes de traitement analogique du signal, les différents blocs fonctionnels (filtrage, amplification, intégration, etc), s'enchaînent les uns après les autres (on parle de blocs en cascade). On souhaite que le comportement de chaque bloc ne soit pas influencé par les blocs voisins.

Exemple : On dispose d'un GBF délivrant une tension sinusoïdale e_1 . On souhaite alimenter une « résistance de charge » R_2 avec ce générateur en imposant $u \simeq e_1$, ce qui ne peut être réalisé que pour $i \simeq 0$:



Il faudrait vérifier $R_1 \ll R_2$ pour qu'il en soit ainsi. Si ça n'est pas le cas, on peut interposer un quadripôle adaptateur, nommé *suiveur de tension*, caractérisé par une impédance d'entrée infinie, une impédance de sortie nulle et une amplification de tension unitaire (fig. 1a). Comme nous le verrons dans la section suivante, il est possible de réaliser un suiveur très simplement à partir d'un AO (fig. 1b).



(a) Quadripôle suiveur de tension

(b) Suiveur à AO

FIGURE 1

Ainsi, le quadripôle amont fonctionne à vide et $u = e_1$; le quadripôle aval voit un générateur de tension

$$u = e_1.$$

Adaptation d'impédance :

D'une manière générale, deux blocs branchés l'un après l'autre sont indépendants si l'impédance de sortie $|Z_s|$ du bloc amont est négligeable devant l'impédance d'entrée $|Z_e|$ du bloc aval :

$$|Z_s| \ll |Z_e|$$

On parle d'*adaptation d'impédance*.

Remarque : En électronique de puissance, on préfère transférer le maximum de puissance d'un bloc à l'autre, quitte à ce que les comportements des blocs ne soient pas indépendants les uns des autres. On peut montrer que l'impédance de sortie Z_s du bloc amont est adaptée à l'impédance d'entrée Z_e du bloc aval lorsque $Z_e = Z_s$. Le critère « d'adaptation d'impédance » dépend de ce que l'on souhaite obtenir.

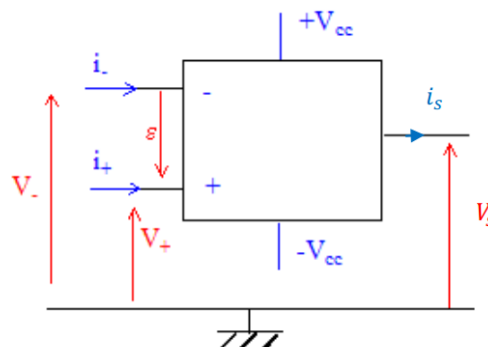
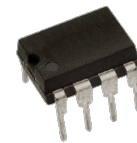
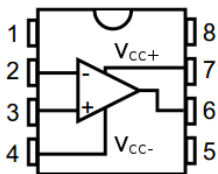
2 L'amplificateur opérationnel (AO)

2.1 Présentation du composant A.O.

Un amplificateur opérationnel se présente sous forme d'un boîtier plastique ou métallique muni de bornes de raccordement. C'est un circuit intégré (ou puce électronique), c'est-à-dire qu'il est formé d'une multitude de composants électroniques élémentaires (résistances, transistors, condensateurs, diodes, etc) formant un circuit complexe et intégrés dans un boîtier.

Le circuit d'un amplificateur opérationnel est connecté à l'extérieur par des bornes de raccordement :

- 2 bornes d'alimentation :
 - 4 : $-V_{cc}$;
 - 7 : $+V_{cc}$;
- 3 bornes fonctionnelles :
 - 2 : entrée dite non-inverseuse, de potentiel V_+ et de courant entrant i_+ ;
 - 3 : entrée dite inverseuse, de potentiel V_- et de courant entrant i_- ;
 - 6 : sortie, de potentiel V_s et de courant sortant i_s .



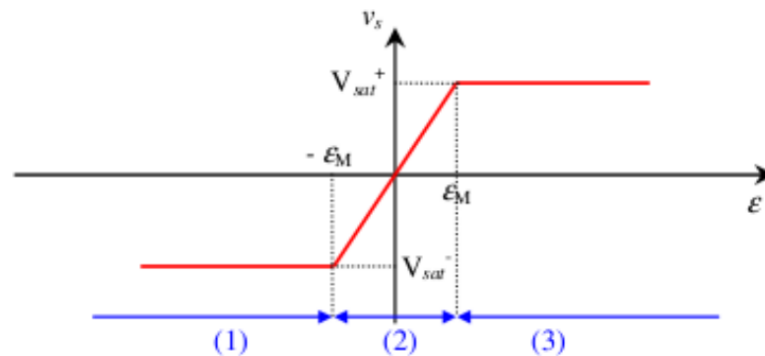
Pour fonctionner, ce composant doit être branché à une alimentation stabilisée par l'intermédiaire de deux fils, délivrant respectivement une tension de $+15\text{ V}$ par rapport à la masse et une tension de -15 V

par rapport à la masse ($\pm V_{cc}$ sur le schéma). L'AO est donc un composant actif, puisqu'il reçoit de l'énergie depuis une source de tension extérieure au circuit considéré.

2.2 Amplificateur opérationnel réel

2.2.1 Caractéristique de transfert : comportement en régime continu

En régime continu, le tracé de V_s en fonction de $\varepsilon = V^+ - V^-$ a l'allure suivante :



Ce graphique fait apparaître deux modes de fonctionnement : linéaire et saturé :

- Les zones (1) et (3) correspondent au mode saturé ; les tensions de saturation, telles que $V_{sat}^+ \simeq -V_{sat}^-$ seront notées $\pm V_{sat}$ avec $V_{sat} \simeq 14\text{ V}$ ($< V_{cc}$).
- La zone (2) correspond au mode (ou régime) linéaire où $v_s = \mu_0 \varepsilon$ où μ_0 est le gain en tension de l'A.O. en boucle ouverte en régime continu (appelé *gain statique*). Typiquement $\mu_0 \simeq 10^5$.
- Le régime est donc linéaire tant que :

$$|\varepsilon| \leq \frac{V_{sat}}{\mu_0}$$

soit $\varepsilon_m \simeq 0,14\text{ mV}$.

En boucle ouverte, le régime linéaire n'est donc possible que pour des valeurs très faibles de ε .

2.2.2 Comportement dynamique en régime sinusoïdal

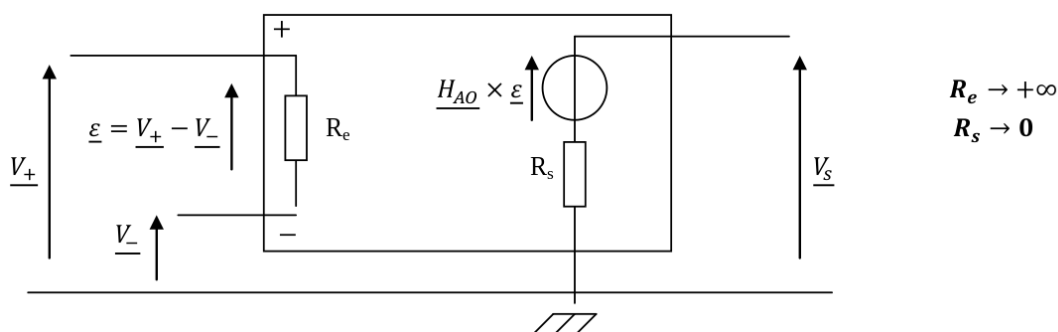
En régime sinusoïdal et en mode linéaire le comportement des A.O. est bien décrit par l'équation complexe :

$$\frac{v_s}{\varepsilon} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

L'A.O. est donc un filtre passe bas du premier ordre (ses caractéristiques s'écroulent à haute fréquence).

2.3 Schéma équivalent et modèle de l'AO idéal

Le schéma équivalent de l'AO est le suivant :



Modèle de l'AO idéal :

- résistance d'entrée infinie ($R_e \rightarrow \infty$) : les courants d'entrée i_+ et i_- sont nuls (de l'ordre du nA en réalité) ;
- résistance de sortie nulle ($R_s = 0$) : la tension V_s ne dépend pas de la charge, c'est-à-dire du circuit placé en aval ;
- existence d'un régime linéaire : la fonction de transfert \underline{H}_{AO} est un passe-bas du 1er ordre :

$$\underline{H}_{AO} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}} \quad (1)$$

- existence d'un régime saturé en tension : l'amplitude V_s ne peut dépasser une valeur notée V_{sat} ;
- existence d'une saturation en courant : l'amplitude I_s de l'intensité du courant de sortie ne peut dépasser une valeur notée I_{sat} .

Ainsi, les impédances d'entrée et de sortie de l'AO idéal montre son intérêt pour réaliser des associations de blocs en cascade indépendants les uns des autres, le suiveur à AO (1b) étant l'exemple type de cette fonction d'isolement.

Ordres de grandeur :

- V_{sat} est du même ordre de grandeur que la tension V_{cc} d'alimentation continue de l'AO ;
- $I_{\text{sat}} \sim 20 \text{ mA}$: l'AO ne convient pas à l'électronique de puissance, du fait des faibles courants délivrés ;
- $\mu_0 \sim 10^5$: gain statique très élevé ;
- $\omega_c \sim 100 \text{ s}^{-1}$: fréquence de coupure très basse.

Si l'on souhaite utiliser l'AO en régime linéaire, on n'utilise jamais l'AO seul, c'est-à-dire en prenant ε comme entrée et V_s comme sortie. Le gain statique étant trop élevé, la tension de sortie sature dès que l'entrée différentielle dépasse 0,1 mV. On va voir dans la prochaine section que c'est en réalisant un système bouclé par une rétroaction sur la borne inverseuse de l'AO que l'on peut faire fonctionner l'AO en régime linéaire. La bande passante sera ainsi élargie et son gain plus diminué.

3 Effet de la rétroaction

3.1 Structure du système bouclé

Un amplificateur opérationnel peut être considéré comme un amplificateur précédé d'un comparateur (voir figure 2). Le potentiel de sortie ε du comparateur est égal à la différence entre les potentiels de son entrée non inverseuse (entrée « + ») et de son entrée inverseuse (entrée « - »). Dans sa plage de fonctionnement linéaire, la partie amplificatrice a un comportement de filtre passe-bas d'ordre 1. On note ω_c sa pulsation de coupure à vide, $\tau = \frac{1}{\omega_c} \simeq 10^{-2} \text{ s}$ son temps de réponse et $\mu_0 \simeq 10^5$ son gain statique. Exprimons l'équation différentielle liant la sortie $s(t)$ et le potentiel de sortie du comparateur :

▷

Montrons que le comportement de l'AO est non linéaire sans contre réaction :

▷

Il faut donc utiliser l'AO avec une boucle de retour (fonction de transfert $\underline{\beta}$) :

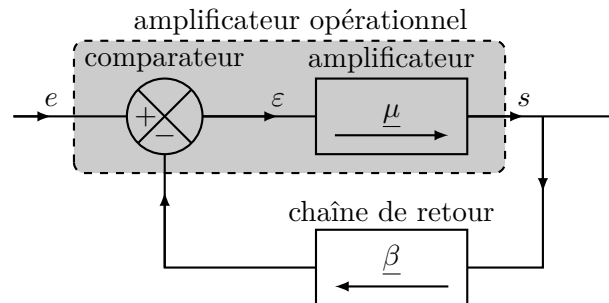


FIGURE 2

3.2 Stabilité

Considérons le cas où $\underline{\beta} \in R^+$. En établissant l'équation différentielle liant e et s , discutons de la stabilité du montage :

▷

3.3 Produit gain \times bande passante (cas $\beta \in R^+$)

Montrons que l'AO bouclé se comporte toujours comme un passe-bas d'ordre 1 :

▷

On se propose de retrouver ces résultats dans le domaine fréquentiel en étudiant le système bouclé à partir de sa fonction de transfert :

▷

Enfin, on peut remarquer que ce type de rétroaction ($\beta \in R^+$) est caractérisé par un produit « gain - bande passante » constant :

▷

3.4 Synthèse

Remarque : ces résultats simples, valables pour une boucle de rétroaction $\beta \in R^+$, ne sont pas transposables à des boucles de rétroaction $\underline{\beta} \in C$. En particulier, une boucle de rétroaction bien choisie peut être déstabilisante pour le montage.

AO et boucle de rétroaction négative :

- Un montage utilisant un AO avec une boucle de retour $\beta \in R^+$ sur l'entrée inverseuse (entrée « - ») est stable. Dans le cas général ($\underline{\beta} \in C$), on dit qu'une rétroaction négative est un indice de probable stabilité du régime linéaire.
- Le temps de réponse est diminué (rapidité améliorée).
- Le gain statique est diminué et ne dépend que de la boucle de rétroaction.

4 Amplificateur opérationnel avec contre réaction sur l'entrée inverseuse (fonctionnement linéaire)

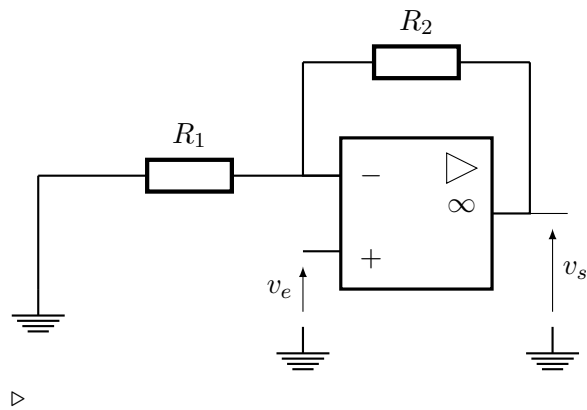
Méthode :

L'application de la loi des nœuds en terme de potentiel ou l'application directe de la formule du pont diviseur de tension permet de comprendre facilement le fonctionnement de la plupart des montages à amplificateur opérationnel.

4.1 Montage amplificateur non inverseur

Exercice d'application :

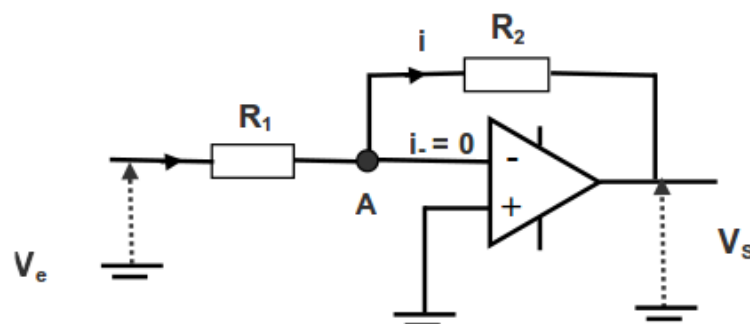
Exprimer la tension de sortie v_s en fonction de la tension d'entrée v_e .



4.2 Montage amplificateur inverseur

Exercice d'application :

Exprimer la tension de sortie v_s en fonction de la tension d'entrée v_e .



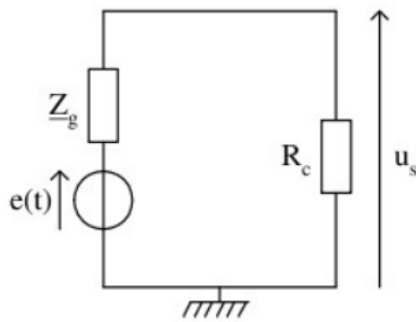
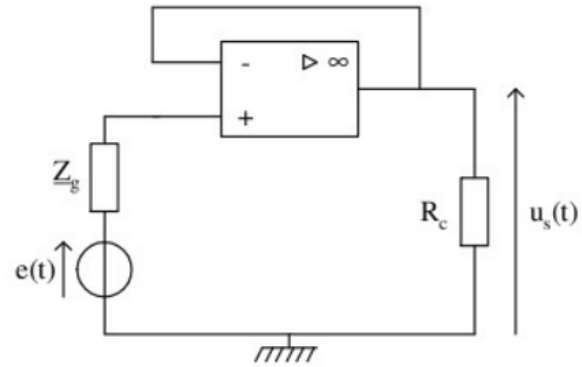
4.3 Montage suiveur

Le suiveur correspond au montage pour lequel la sortie est directement reliée à l'entrée inverseuse et pour lequel la tension d'entrée est imposée entre la masse et l'entrée non-inverseuse :

▷

Pour comprendre l'intérêt d'un tel montage, il faut prendre en compte l'impédance interne Z_g du générateur qui alimente le circuit, et le représenter sous sa forme de Thévenin. On voit alors qu'avec le 1er

montage ci-dessous, la tension aux bornes de la résistance d'utilisation (ou résistance de charge R_c) dépend de la valeur de l'impédance interne du générateur (à priori inconnue), tandis qu'avec le 2e montage il n'en dépend pas. Celui-ci est donc plus intéressant car on veut en général, lorsque l'on branche un appareil, connaître précisément la tension à ses bornes.

1^{er} montage : sans suiveur2^{ème} montage : avec suiveur ($i_+ = 0$)

▷

On a ainsi transformé le générateur réel en générateur idéal. On dit alors que le circuit suiveur réalise une adaptation d'impédances pour le transfert de tension.