

1. L'amplificateur opérationnel

- 1.1. Présentation du composant
- 1.2. Caractéristique entrée - sortie
- 1.3. Modèle de l'AO idéal

2. Quelques écarts au modèle idéal : AO réel

- 2.1. Saturation du courant de sortie
- 2.2. Vitesse de balayage (ou « slew rate »)
- 2.3. (Compléments) Dépendance du gain avec la fréquence
- 2.4. (Compléments) Tension de décalage (ou « offset ») et courants de polarisation

3. Quelques opérations réalisables avec l'AO idéal en régime linéaire

- 3.1. Montage suiveur (« adaptateur d'impédance »)
- 3.2. Montage amplificateur inverseur
- 3.3. Montage amplificateur non-inverseur
- 3.4. Montages intégrateur et dérivateur

4. Filtres actifs du 1^{er} et 2nd ordre

- 4.1. Exemple de filtre actif du 1^{er} ordre
- 4.2. Exemple de filtre actif du 2nd ordre

5. Comparateur : une opération réalisable avec l'AO idéal en régime saturé

- 5.1. Fonctionnement de l'AO en régime saturé
- 5.2. Comparateur simple
- 5.3. Comparateur à hystérésis

Intro :

L'amplificateur opérationnel (AO) est pour nous un nouveau composant, qui s'ajoute à ceux déjà connus : R, L, C et sources idéales. Il permet de réaliser de nombreuses opérations : amplification, intégration, dérivation, sommation, adaptation d'impédance, filtre actif, comparaison, etc....

On va considérer l'AO comme une « boîte noire », on ne s'intéressera pas à ce qui se passe à l'intérieur. On étudiera simplement le comportement de la sortie en fonction de l'entrée.

On présentera dans un premier temps le modèle idéal de l'AO, que l'on utilisera le plus souvent. On distinguera les deux régimes de fonctionnement de ce composant : régime linéaire et régime saturé. On donnera les quelques écarts à ce modèle idéal que l'on pourra observer en TP. On présentera enfin quelques opérations élémentaires réalisables à l'aide de ce composant, notamment la synthèse de filtre actif.

1. L'amplificateur opérationnel

1.1. Présentation du composant

Comme l'indique le schéma du composant, l'AO est un tripôle constitué :

- d'une *entrée dite non-inverseuse*, notée E_+ (potentiel V_+ , courant entrant i_+)
- d'une *entrée dite inverseuse*, notée E_- (potentiel V_- , courant entrant i_-)
- d'une *sortie*, notée S (potentiel V_s , 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 V par rapport à la masse et une tension de -15 V par rapport à la masse. **L'AO est donc un composant actif**, puisqu'il reçoit de l'énergie depuis une source de tension extérieure au circuit considéré.

On retiendra le schéma simplifié de l'AO, où l'on ne fait pas figurer les branchements à la source +15 / -15 V.

Attention : Si l'on ne représente pas l'alimentation stabilisée, on ne peut pas appliquer la loi des nœuds à l'AO !!

1.2. Caractéristique entrée - sortie

Pour étudier l'AO en le considérant comme une « boîte noire », il nous suffit de connaître le comportement de la sortie en fonction de l'entrée. L'entrée est définie par la tension $\varepsilon = V_+ - V_-$, et la sortie par la tension V_s entre la borne S et la masse.

On retiendra que la courbe $V_s(\varepsilon)$ se décompose en trois zones :

- une zone où la sortie est proportionnelle à l'entrée : fonctionnement en ***régime linéaire***
- deux zones où la sortie vaut $\pm V_{sat}$: fonctionnement en ***régime saturé***

On notera que V_{sat} est du même ordre de grandeur que la tension d'alimentation continue : ~ 15 V.

La pente de la courbe en régime linéaire donne le rapport entre la sortie et l'entrée, c'est-à-dire le *gain* de l'AO. Il est de l'ordre de 10^5 en régime continu. On admet que ces caractéristiques restent valables en régime variable. Cela n'est pas tout à fait exact, comme on le verra dans la partie 2.2 (dépendance du gain avec la fréquence).

L'AO ne fonctionne en régime linéaire que si l'entrée reste inférieure à environ 0,1 mV. Cela semble difficile à réaliser. Cependant, c'est bien en régime linéaire que l'on utilisera le plus souvent l'AO. Cela est rendu possible en « bouclant » le montage, c'est-à-dire en reliant d'une manière ou d'une autre la sortie à l'entrée.

On admettra la propriété suivante :

Le fonctionnement de l'AO en régime linéaire nécessite une rétroaction sur l'entrée inverseuse E_-

C'est une condition nécessaire mais pas suffisante, comme on le verra dans les paragraphes suivants.

1.3. Modèle de l'AO idéal

C'est le modèle simplifié de l'AO réel. *C'est celui que l'on utilisera le plus souvent.* Sur le schéma de l'AO, on ajoute parfois le symbole ∞ pour indiquer que l'AO est considéré idéal.

Les hypothèses simplificatrices de l'AO idéal sont les suivantes :

- le gain est infini
- les courants d'entrée sont nuls
- la sortie est une source idéale de tension

Conséquence en régime linéaire uniquement : la tension d'entrée de l'AO est nulle ($V_+ = V_-$)

Résumé :

	AO idéal	AO non-idéal
régime <i>linéaire</i>	$V_+ = V_-$ $i_+ = 0$ et $i_- = 0$	$V_s = G(V_+ - V_-)$
régime saturé	V_+ et V_- quelconques $i_+ = 0$ et $i_- = 0$ $V_s = \pm V_{sat}$	$V_s = \pm V_{sat}$

2. Quelques écarts au modèle idéal : AO réel

D'après le programme de PCSI, les quelques précisions qui suivent ne sont pas exigibles. On retiendra tout de même les trois premiers points, que l'on aura l'occasion d'étudier en TP.

2.1. Saturation du courant de sortie

Indépendamment de la tension de sortie, le courant de sortie ne peut pas dépasser une certaine valeur $i_{s,max}$. Cette valeur maximale dépend de la marque d'AO utilisé. Elle est de l'ordre de 20 mA.

2.2. Vitesse de balayage (ou « slew rate »)

Expérimentalement, on aura l'occasion d'observer que les variations de la tension de sortie de l'AO ne peuvent être arbitrairement rapides. Ce que l'on peut écrire de la manière suivante :

$$\left| \frac{dV_s}{dt} \right| < \left| \frac{dV_s}{dt} \right|_{\max}$$

où $\left| \frac{dV_s}{dt} \right|_{\max}$ est la « vitesse de balayage maximale ». La valeur numérique de cette vitesse de balayage dépend de la marque d'AO utilisé. Elle est de l'ordre de 1 à 10 V. μ s⁻¹.

2.3. (Compléments) Dépendance du gain avec la fréquence

En partie 1.2, on a admis que la courbe $V_s(\varepsilon)$ était valable en régime continu comme en régime variable. Ce n'est pas tout à fait exact. Si l'on se place en régime sinusoïdal, la forme de la courbe reste la même, mais dans la zone « régime linéaire de l'AO » la pente diffère selon la fréquence du régime sinusoïdal.

En d'autres termes, en régime linéaire le gain de l'AO dépend de la fréquence. En notation complexe, on peut modéliser l'AO par un filtre passe-bas du premier ordre. Le gain basse fréquence (gain maximum) est de l'ordre de 10⁵. La fréquence de coupure est de l'ordre de 10 - 20 Hz.

On verra en TD et en TP que grâce à la rétroaction sur la borne négative, la bande passante d'un montage à AO peut être considérablement augmentée (le gain maximum diminuant d'autant). C'est ce qui nous permettra généralement de considérer le gain du montage comme étant constant sur une large gamme de fréquence (en deçà de la fréquence de coupure).

2.4. (Compléments) Tension de décalage (ou « offset ») et courants de polarisation

Si l'on relie les deux bornes d'entrée de l'AO par un fil, on peut observer que la sortie n'est pas tout à fait nulle. Cela provient d'une tension résiduelle entre les deux bornes d'entrée (« à l'intérieur de l'AO »). Cette « tension de décalage » provient du fonctionnement interne de l'AO. Elle est de l'ordre de 10 mV , et pourra généralement être négligée en TP.

Les courants dans les branches d'entrée de l'AO ne sont pas complètement nuls. Ces courants résiduels sont appelés « courants de polarisation ». Ils proviennent eux aussi du fonctionnement interne de l'AO. Selon la marque d'AO utilisé, ils sont de l'ordre de 100 nA - 10 pA . Extrêmement faibles, ils pourront être généralement négligés en TP.

3. Quelques opérations réalisables avec l'AO idéal en régime linéaire

La loi des nœuds en terme de potentiels est *l'outil généralement le plus efficace* pour étudier un montage à AO. On n'oubliera pas d'utiliser, si besoin, notre outil préféré : le pont diviseur de tension.

Sauf précision contraire, *dans le cas d'une rétroaction sur la borne négative, on fera toujours l'hypothèse que l'AO fonctionne en régime linéaire*, tout en gardant à l'esprit que la sortie peut saturer en tension ou en courant.

3.1. Montage suiveur (« adaptateur d'impédance »)

- Schéma du montage : repérer l'entrée et la sortie du montage suiveur.
- Quelle opération effectue ce montage ?
- On considère une entrée sinusoïdale. Représenter l'allure du signal de sortie si l'amplitude du sinus est supérieure à V_{sat} .
- On considère une entrée en créneau. Représenter l'effet du slew-rate sur l'allure du signal de sortie. A quelle condition sur la fréquence du créneau l'effet du slew-rate reste-t-il invisible à l'oscilloscope ?
- On branche une résistance R_u en aval du montage suiveur, alimenté en entrée par une tension sinusoïdale, d'amplitude inférieure à V_{sat} . Pour quelle valeur de R_u observe-t-on une saturation en courant ?

Exemple d'utilisation du montage suiveur :

On considère un GBF branché sur une résistance R_u . On modélise le GBF par un générateur de Thévenin (E , R_g).

- Exprimer la tension délivrée par le GBF aux bornes de R_u en fonction de E , R_g et R_u .
- A l'aide du suiveur, proposer un montage permettant de délivrer une tension E aux bornes de R_u , quelque soit la valeur de R_u (saturation en courant mise à part).

*Le montage suiveur reproduit en sortie la tension d'entrée (si aucune des 2 saturations n'intervient).
Il permet de rendre indépendants l'amont et l'aval du circuit.*

3.2. Montage amplificateur inverseur

Ici, le mot « amplificateur » signifie « multiplication par un nombre ».

- A partir du schéma du montage, expliquer pourquoi on le nomme « amplificateur inverseur ».
- L'opération réalisée par ce montage dépend-elle du circuit en aval ?

3.3. Montage amplificateur non-inverseur

- A partir du schéma du montage, expliquer pourquoi on le nomme « amplificateur non-inverseur ».
- L'opération réalisée par ce montage dépend-elle du circuit en aval ?

3.4. Montages intégrateur et dérivateur

- A partir du schéma de chacun des montages, expliquer pourquoi on les nomme ainsi.
 - faire d'abord les calculs en notation réelle
 - puis refaire ces calculs en notation complexe

4. Filtres actifs du 1^{er} et 2nd ordre

Pour l'étude des filtres, on se place évidemment en régime sinusoïdal forcé, et on utilise la notation complexe.

4.1. Exemple de filtre actif du 1^{er} ordre

- A partir du schéma, et avant tout calcul, déterminer la nature du filtre.
- Etablir la fonction de transfert du filtre. Ordre du filtre ?
- A basse fréquence, quelle est la différence majeure avec les filtres passifs du 1^{er} ordre que l'on a étudié ?
- Le comportement du filtre dépend-il de « la charge » (i.e. du circuit en aval) ?

4.2. Exemple de filtre actif du 2nd ordre

- A partir du schéma, déterminer la nature de ce « filtre de Butterworth » avant tout calcul.
- Etablir la fonction de transfert de ce montage.
- Le comportement du filtre dépend-il de la charge ?

On retiendra les deux principales différences entre les filtres actifs et passifs :

*Le comportement d'un filtre actif à AO est généralement indépendant de « la charge ».
Dans sa bande passante, un filtre actif permet éventuellement d'amplifier le signal.*

5. Comparateur : une opération réalisable avec l'AO idéal en régime saturé

5.1. Fonctionnement de l'AO en régime saturé

On retiendra que l'AO fonctionne *nécessairement en régime saturé* dans les deux cas suivants :

- *absence de rétroaction de la sortie sur l'entrée*
- *rétroaction sur la borne positive uniquement*

Dans le cas d'une double rétroaction sur les deux bornes d'entrée, on ne peut pas connaître avant calcul le régime de fonctionnement de l'AO.

Les conditions de basculement de la tension de sortie sont les suivantes :

- état de départ $V_s = +V_{sat}$: la sortie **bascule à $-V_{sat}$ lorsque $\varepsilon < 0$**
- état de départ $V_s = -V_{sat}$: la sortie **bascule à $+V_{sat}$ lorsque $\varepsilon > 0$**

5.2. Comparateur simple

L'idée d'un comparateur est de *comparer une tension d'entrée à une tension de référence (ou tension seuil)*. La valeur de la tension de sortie donne alors le résultat de la comparaison : la tension d'entrée est supérieure ou inférieure à la tension seuil.

A la question « l'entrée est-elle supérieure à la valeur seuil ? », le résultat doit être « oui ou non ». L'idée est donc d'utiliser l'AO en régime saturé, les deux valeurs possibles de la sortie $-V_{sat}$ ou $+V_{sat}$ correspondant aux deux réponses possibles.

- A partir du schéma du montage, établir l'état de la sortie en fonction de l'entrée.
- Représenter la courbe $s(e)$ de la sortie en fonction de l'entrée. Expliquer le nom donné au montage « comparateur inverseur ».

En pratique, ce montage présente un inconvénient majeur. *Il est très sensible aux parasites*. Une solution à ce problème est donnée par le montage suivant, dit « comparateur à hystérésis ».

5.3. Comparateur à hystérésis

Le montage semble tout à fait similaire à celui de l'amplificateur non-inverseur, excepté le fait que la rétroaction se fait sur la borne positive ! On fera attention de ne pas confondre ces deux montages, qui réalisent des opérations radicalement différentes.

L'idée majeure de ce montage est la suivante : *le seuil que doit franchir l'entrée, et qui provoquent un basculement de la sortie, dépend de l'état de la sortie*. Il existe donc deux seuils différents selon que la sortie est à $-V_{sat}$ ou $+V_{sat}$.

- A partir du schéma du montage, déterminer la condition de basculement de la sortie de la valeur $+V_{sat}$ à la valeur $-V_{sat}$.
- Faire de même pour le basculement de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$.
- On considère une entrée triangulaire. Représenter $e(t)$ en faisant apparaître les deux seuils du comparateur
- En déduire la courbe $s(t)$ et la superposer au graphe précédent.
- Représenter la courbe $s(e)$ de la sortie en fonction de l'entrée, *en indiquant le sens dans lequel est parcourue cette courbe* lors du fonctionnement du comparateur.

On l'appelle comparateur « à hystérésis », du grec « être en retard ». Cela signifie que le basculement de la sortie ne se fait qu'après avoir atteint le deuxième seuil, et non le premier (c.f. la courbe).

Notions clefs

Savoirs :

- Caractéristiques de l'AO idéal, en régime linéaire, et en régime saturé
- Rôle de la rétroaction de la sortie sur l'entrée pour fixer le régime de fonctionnement
- Principaux écarts au modèle idéal : saturation en courant, gain avec la fréquence, vitesse de balayage
- Schéma et opération réalisée par les montages: suiveur, amplificateur non-inverseur et intégrateur
- Avantages des filtres actifs comparés aux filtres passifs
- Conditions de basculement de la sortie de l'AO en régime saturé

Savoirs faire :

- Repérer a priori le régime de fonctionnement de l'AO, selon le type de rétroaction
- Relier la sortie à l'entrée par le calcul, pour déterminer la fonction réalisée par un montage à AO