

Chap.4 – Effets d'une rétroaction sur l'exemple de l'ALI

1. Structure d'un système bouclé (rappels)

2. Effets d'une rétroaction sur un montage bouclé à ALI

- 2.1. Identification des éléments du schéma bloc
- 2.2. Amplificateur non-inverseur : stabilité + conservation du produit « gain – bande passante »
- 2.3. Comparateur à hystérésis : instabilité du montage
- 2.4. Généralisation : critère pour « deviner » le régime de fonctionnement d'un montage à ALI

3. Modèle de l'ALI idéal

4. Loi des nœuds en terme de potentiels : Théorème de Millman

5. Quelques opérations réalisables avec l'AO de gain infini en régime linéaire

- 5.1. Montage suiveur (« adaptateur d'impédance »)
- 5.2. Montage amplificateur inverseur
- 5.3. Montage amplificateur non-inverseur
- 5.4. Montages intégrateur et dérivateur
- 5.5. Exemple de filtre actif du 1^{er} ordre (utilisé comme pseudo-intégrateur)

6. Comparer, une opération réalisable avec l'AO de gain infini en régime saturé

- 6.1. Fonctionnement de l'AO en régime saturé
- 6.2. Comparateur simple
- 6.3. Comparateur à hystérésis

Intro : On étudie dans un premier temps la stabilité de deux montages à AO. On montre qu'une rétroaction sur la borne négative tend à stabiliser le régime linéaire du montage, tandis qu'une rétroaction sur la borne positive donne un régime linéaire instable. Dans le premier cas, le bouclage du système du 1^{er} ordre permet d'augmenter sa bande passante tout en gardant le « produit gain \times bande passante » constant.

On introduit ensuite le modèle de l'ALI idéal de gain infini. En régime linéaire, on donne ses propriétés générales, et l'on présente plusieurs montages classiques à connaître par cœur. Le régime saturé permet quant à lui de réaliser des comparateurs, simple ou à hystérésis.

1. Structure d'un système bouclé (rappels)

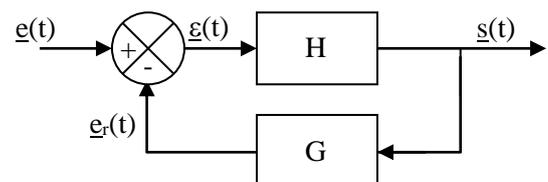
On se place en régime sinusoïdal forcé, donc en formalisme complexe.

$\underline{e}(t)$ est le **signal d'entrée**, appelé **consigne**

$\underline{\varepsilon}(t)$ est le **signal d'erreur** (ou erreur)

$\underline{s}(t)$ est le **signal de sortie** ;

$\underline{e}_r(t)$ est le **signal de retour**.



Le système linéaire fournissant $\underline{s}(t)$ à partir de $\underline{\varepsilon}(t)$ est la **chaîne directe** de fonction de transfert \underline{H} .

Le système linéaire fournissant $\underline{e}_r(t)$ à partir de $\underline{s}(t)$ est appelée **chaîne de retour** de FT \underline{G} .

Le **comparateur** réalise $\underline{\varepsilon}(t) = \underline{e}(t) - \underline{e}_r(t)$.

Remarque : $\underline{\varepsilon}(t)$, $\underline{e}(t)$ et $\underline{e}_r(t)$ sont des grandeurs de même nature.

2. Effets d'une rétroaction sur un montage bouclé à ALI

Nous allons étudier les effets d'une rétroaction sur la stabilité de deux montages à AO : « l'amplificateur non inverseur » et le « comparateur à hystérésis ». Le premier fonctionne en régime linéaire stable ; il peut occasionnellement saturer si la tension ou le courant de sortie deviennent trop grands. Le second fonctionne en régime saturé nécessairement, car le régime linéaire est instable, divergent.

2.1. Identification des éléments du schéma bloc

- ❖ Identifier le schéma bloc correspondant au montage « amplificateur non-inverseur »
- ❖ Identifier le schéma bloc correspondant au montage « comparateur à hystérésis »

2.2. Amplificateur non-inverseur : stabilité + conservation du produit « gain \times bande passante »

- ❖ A l'aide du schéma bloc, établir la FTBF du montage
- ⊗ Pour s'entraîner, retrouver la FTBF du montage, mais sans se référer au schéma bloc
- ❖ Montrer que le produit « gain maximal \times largeur de la bande passante » est le même après bouclage
- ❖ Illustrer cela graphiquement sur le diagramme de Bode en gain.
- ❖ Le montage est-il stable ?

NB : Par abus de langage on parle souvent de « produit gain \times bande passante », sans plus de précisions.

2.3. Comparateur à hystérésis : instabilité du montage

Le comparateur à hystérésis ressemble au montage non-inverseur. Il suffit d'invertir les bornes + et - de l'AO.

- ❖ La FTBF du montage non-inverseur étant connue, en déduire simplement celle du comparateur
- ❖ A partir de la FTBF, retrouver l'équation différentielle vérifiée par la sortie du montage. Quelle est la forme du régime transitoire (solution ESSM) ? Le montage est-il stable ?
- ❖ Quelles sont les valeurs possibles de la sortie du comparateur à hystérésis ?

2.4. Généralisation : critère pour « deviner » le régime de fonctionnement d'un montage à ALI

D'après l'étude des deux montages précédents, on comprend que :

- ***une rétroaction sur la borne négative*** de l'AO est nécessaire pour assurer la stabilité du montage. Si le montage est stable, il est *possible* que la tension de sortie n'atteigne pas la saturation pendant le fonctionnement. Un fonctionnement en ***régime linéaire est possible***.
- ***une rétroaction sur la borne positive*** de l'AO rend le montage instable. Après un court moment passé en régime linéaire, la tension de sortie diverge et atteint la saturation. Un fonctionnement en ***régime purement linéaire n'est pas possible***.

Le fonctionnement de l'AO en ***régime linéaire*** nécessite une ***rétroaction sur l'entrée inverseuse E₋***

- ❖ Quand est-on sûr que l'AO fonctionne en régime saturé ?

C'est une condition nécessaire mais pas suffisante. Sur l'exemple du montage non-inverseur, si la tension d'entrée est trop grande, alors la tension de sortie dépasse la tension de saturation : le régime de fonctionnement est le régime saturé. On peut penser aussi à la possibilité d'une saturation en courant, si la résistance de charge (modélisation simple du circuit placé en aval du montage) est trop petite.

NB : Si un montage présente les deux rétroactions en même temps, on pourra faire l'hypothèse d'un fonctionnement en régime linéaire (cf. critère encadré ci-dessus).

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 (i.e. résistance d'entrée infinie)
- la sortie est une source idéale de tension (i.e. résistance de sortie nulle)

On voit que notre modèle d'AO du chapitre précédent contenait déjà certaines hypothèses du modèle idéal. On ajoute ici celle de gain infini. La définition du caractère « idéal » est assez floue dans le programme : on choisit par la suite de confondre « idéal » et « de gain infini ».

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

	AO de gain infini (idéal)	AO de gain fini (non-idéal)
régime linéaire	$\varepsilon = 0$ $ V_s < V_{sat}$	$V_s = H_{AO}\varepsilon$
régime saturé	Si $\varepsilon > 0$, alors $V_s = +V_{sat}$ Si $\varepsilon < 0$, alors $V_s = -V_{sat}$	Hors programme

- ❖ Tracer la caractéristique entrée-sortie $V_s(\varepsilon)$ de l'AO dans le modèle idéal (en régime continu, ou en régime sinusoïdal à pulsation fixée)

4. Loi des nœuds en terme de potentiels : Théorème de Millman

La loi des nœuds donne une relation entre les courants convergents vers le nœud. Dans les montages à AO, on préférera déterminer des relations entre tensions. On montre ici que la loi des nœuds peut s'exprimer en terme de potentiels électriques (donc quasiment des tensions).

Il existe une formule toute faite, nommée Théorème de Millman, valable avec des résistances en régime continu et avec des impédances en régime sinusoïdal, qui donne le potentiel du nœud considéré V_{noeud} en fonction des « potentiels environnants » V_i :

$$V_{noeud} = \frac{\sum_i \frac{V_i}{Z_i}}{\sum_j \frac{1}{Z_j}}$$

Ce théorème est inutilisable s'il n'est pas accompagné d'un schéma expliquant les notations.

Remarque : Ce théorème est HORS PROGRAMME, il est donc possible qu'à l'oral on vous demande de repartir de la loi des nœuds. A l'écrit on ne pourra pas vous en vouloir de l'utiliser.

5. Quelques opérations réalisables avec l'AO de gain infini 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.

En présence de 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.

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

- ❖ Schéma du montage : repérer l'entrée et la sortie du montage suiveur.
- ❖ Quelle opération effectuée ce montage ?
- ❖ Déterminer l'impédance d'entrée de ce montage.

- ❖ On considère une entrée sinusoïdale. Représenter l'allure du signal de sortie si l'amplitude du sinus est supérieure à V_{sat} .

Manip de cours :

On associe en série un GBF, un suiveur et une résistance de charge R_{ch} . Le GBF délivre une tension sinusoïdale de 1V d'amplitude, de 1 kHz.

- On fait varier R_{ch} entre 1 M Ω et 100 Ω . Qu'observe-t-on ? Quel est l'intérêt du suiveur dans ce montage ?
- On diminue encore R_{ch} . Qu'observe-t-on ? Quel est l'effet mis en évidence ?

On retire R_{ch} (sortie en circuit ouvert). Le GBF délivre un créneau d'amplitude 10 V, et on augmente progressivement sa fréquence.

- Qu'observe-t-on à haute fréquence ?
- Expliciter mathématiquement la condition que doivent vérifier fréquence et amplitude du créneau pour que l'effet du slew-rate reste invisible à l'oscilloscope.

Autre exemple d'utilisation du montage suiveur :

- ❖ Indiquer comment introduire le montage suiveur pour rendre le fonctionnement d'un filtre RC indépendant de la résistance R_{ch} branchée en aval

*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 : il réalise une **adaptation d'impédance**.*

5.2. 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 ?
- ❖ Déterminer son impédance d'entrée

5.3. 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 ?
- ❖ Déterminer son impédance d'entrée

5.4. Montages intégrateur et dérivateur

- ❖ A partir du schéma de chacun des montages, établir la relation entrée-sortie et expliquer pourquoi on les nomme ainsi (on pourra utiliser les cpx, puis revenir en notation réelle)
- ❖ Déterminer l'impédance d'entrée du montage intégrateur

5.5. Exemple de filtre actif du 1^{er} ordre (utilisé comme pseudo-intégrateur)

- ❖ A partir du schéma, et avant tout calcul, déterminer la nature du filtre (opération à HF ?)
- ❖ Établir la fonction de transfert du filtre. Ordre du filtre ?
- ❖ Le comportement du filtre dépend-il de « la charge » (i.e. du circuit en aval) ?

6. Comparer, une opération réalisable avec l'AO de gain infini en régime saturé

6.1. Fonctionnement de l'AO en régime saturé

En l'absence de rétroaction sur la borne négative, on supposera toujours que l'AO fonctionne en régime saturé

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

6.2. 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.
- ❖ Représenter la sortie $s(t)$ si l'entrée $e(t)$ est sinusoïdale. Comment pourrait-on prouver expérimentalement que le montage réalise une opération non-linéaire ?

En pratique, ce montage présente un inconvénient. *Il est très sensible aux parasites*, car celles-ci peuvent entraîner de rapides commutations non souhaitées. Une solution à ce problème est donnée par le montage suivant, dit « comparateur à hystérésis ».

6.3. 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 que doit remplir $e(t)$ pour faire basculer 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 rencontré, et non le premier (cf. la courbe).

Le bloc 2 illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'identification de certains montages à des systèmes bouclés permet de faire le lien avec le cours d'automatique de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est uniquement évoquée en TP afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2. Rétroaction	
Modèle de l'ALI défini par une résistance d'entrée infinie, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie, une saturation de l'intensité de sortie.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse.
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Représenter les relations entre les tensions d'entrée et de sortie par un schéma fonctionnel associant un soustracteur, un passe-bas du premier ordre et un opérateur proportionnel. Analyser la stabilité du régime linéaire.
Compromis gain/bande passante d'un système bouclé du premier ordre.	Établir la conservation du produit gain-bande passante du montage non inverseur.
Limite en fréquence du fonctionnement linéaire.	Identifier la manifestation de la vitesse limite de balayage d'un ALI dans un montage.
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de probable stabilité du régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Exprimer les impédances d'entrée de ces montages. Expliquer l'intérêt d'une forte impédance d'entrée et d'une faible impédance de sortie pour une association en cascade.
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime saturé.	Identifier l'absence de rétroaction ou la présence d'une unique rétroaction sur la borne non inverseuse comme l'indice d'un probable comportement en saturation. Établir la relation entrée-sortie d'un comparateur simple. Pour une entrée sinusoïdale, faire le lien entre la non linéarité du système et la génération d'harmoniques en sortie.
	Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis. Décrire le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de fonction mémoire.

Notions clefs

Savoirs :

- Structure d'un système bouclé, vocabulaire associé
- Schéma par cœur : non-inverseur, inverseur, intégrateur, suiveur, comparateur, comparateur à hystérésis
- Rétroaction sur la borne (-) est nécessaire pour fonctionner en régime linéaire
- Conservation du produit gain \times bande passante dans le cas du non-inverseur
- Propriétés du modèle d'AO idéal (i.e. de gain infini)

Savoirs faire :

- Identifier le schéma bloc du montage non-inverseur + déterminer sa FTBF
- Démontrer la conservation du produit gain \times bande passante
- Identifier l'effet du slew rate sur la sortie d'un montage à AO (triangularisation)
- Etablir la relation entrée-sortie de tous les montages vus (comparateur à hystérésis notamment)
- Expliquer l'intérêt d'une forte impédance d'entrée et d'une faible impédance de sortie

Animations + manip :

- *Mise en évidence de la saturation en courant de l'AO (montage suiveur)*
- *Illustration de l'intérêt d'une bonne adaptation d'impédance pour une association de blocs en cascade*
- *Nouvelle mise en évidence du slew-rate (montage suiveur)*
- *Illustration fonctionnement comparateur à hystérésis + cycle*