



ALI et rétroaction

Plan du cours

I	Amplificateur linéaire intégré	3
I.1	Le composant	3
I.2	Régimes linéaire et de saturation.	4
I.3	Vitesse de balayage	5
I.4	Modèle de l'ALI idéal de gain infini	5
II	Rétroaction	6
II.1	Approche qualitative.	6
II.2	Effet stabilisant d'une rétroaction négative : amplificateur non inverseur	8
II.3	Effet déstabilisant d'une rétroaction positive : comparateur à hystérésis	8
III	Exemples de montages à ALI en régime linéaire	9
III.1	Suiveur	9
III.2	Amplificateur non inverseur	9
III.3	Amplificateur inverseur	9
III.4	Intégrateur	10
IV	Exemples de montages à ALI en régime de saturation	10
IV.1	Comparateur simple	10
IV.2	Comparateur à hystérésis non-inverseur.	10
V	Synthèse : quelle méthode pour quel montage ?	11
V.1	Régime linéaire vs. régime de saturation	11
V.2	Loi des nœuds en potentiel ou pont diviseur de tension ?	11

Au programme

Extrait du programme officiel : partie 2 « Électronique », bloc 2 « Rétroaction ».

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. 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 du système étudié.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle de l'ALI défini par des courants de polarisation nuls, 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. Modéliser un ALI fonctionnant en régime linéaire à l'aide d'un schéma bloc.
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Analyser la stabilité du régime linéaire.
Vitesse de balayage.	Identifier la manifestation de la vitesse limite de balayage d'un ALI.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime linéaire.	<p>Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de fonctionnement en régime linéaire.</p> <p>Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Exprimer les impédances d'entrée de ces montages.</p> <p>Expliquer l'intérêt d'une forte impédance d'entrée pour une association en cascade d'étages à faible impédance de sortie.</p>
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime saturé.	<p>Établir la relation entrée-sortie du comparateur simple.</p> <p>Pour une entrée sinusoïdale, faire le lien entre la non linéarité du système et la génération d'harmoniques en sortie.</p> <p>Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.</p> <p>Définir le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de mémoire.</p>

En **gras**, les points devant faire l'objet d'une approche expérimentale.

Ces cinq dernières années au concours

- ▷ Écrit : épreuve A 2016, 2017, 2018, 2019 ... autant dire tous les ans ou presque!
- ▷ Oral : souvent.

Double objectif de ce chapitre :

- ▷ introduire un nouveau composant qui va permettre de réaliser des circuits électriques beaucoup plus riches qu'avec les seuls dipôles connus jusqu'à présent ;
- ▷ analyser sur des exemples l'influence de la rétroaction sur la stabilité d'un montage, en lien avec le cours d'automatique de SI.

I - Amplificateur linéaire intégré

I.1 - Le composant

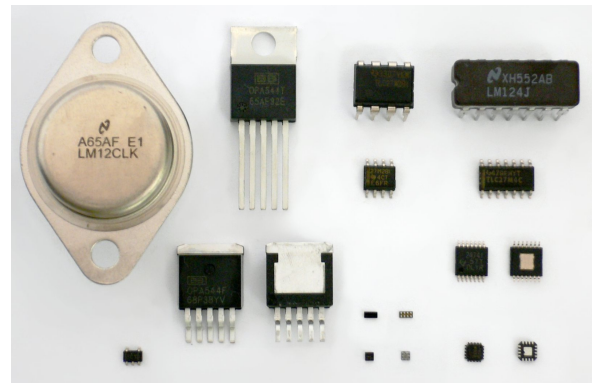
Un ALI est un amplificateur différentiel : il amplifie la différence de potentiel entre ses deux entrées appelées **entrée non inverseuse** \oplus et **entrée inverseuse** \ominus . C'est un quadripôle qui ne fonctionne que s'il est alimenté par une source de tension symétrique ± 15 V.

Autres noms usuels : amplificateur opérationnel, « ampli op », AO, AOp, etc.

Remarque culturelle : Les ALI ont été développés dans les années 1940-1950 pour réaliser des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : addition, intégration, etc. Certains exemples seront présentés dans ce chapitre. Le coût unitaire s'élevait à l'époque à une vingtaine de dollars, il n'est aujourd'hui que de quelques centimes.

a) Description

• Un ALI vu de l'extérieur



• Un ALI vu de l'intérieur

Un ALI est un **circuit intégré**, c'est-à-dire qu'il contient d'autres composants « élémentaires » (résistances, condensateurs, transistors). Le circuit intégré est donné dans la fiche technique (« datasheet ») du composant (cf. TP).

b) Représentation conventionnelle

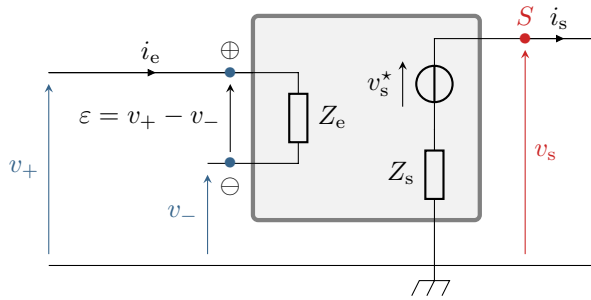
Seules trois bornes sont représentées : les deux entrées et la sortie. L'alimentation continue n'est jamais représentée ... mais il ne faut pas l'oublier lorsque l'on branche un ALI!

Faire les deux schémas en carré et en triangle. Définir ε .

Espace 1

⚠ ⚠ ⚠ **Attention !** Il faut absolument distinguer les deux bornes d'entrée qui jouent des rôles très différents.

c) Approche fonctionnelle



On adopte une approche de type bloc fonctionnel (autrement dit de boîte noire!) : le but n'est pas d'entrer dans les détails du circuit intégré. Un bloc fonctionnel est décrit par

- ▷ une relation entrée-sortie, c'est-à-dire ici entre v_s^* et ε ;
- ▷ son impédance (résistance) d'entrée Z_e ;
- ▷ son impédance (résistance) de sortie Z_s .

Les différentes valeurs sont mentionnées dans la fiche technique du composant.

✂ Pour un ALI usuel :

▷ Résistance d'entrée : $Z_e \sim 10^{12} \Omega$

↪ conséquence :

$i_e = \varepsilon / Z_e$ est quasiment nul pour des tensions de l'ordre de quelques volts.

▷ Résistance de sortie : nulle par construction.

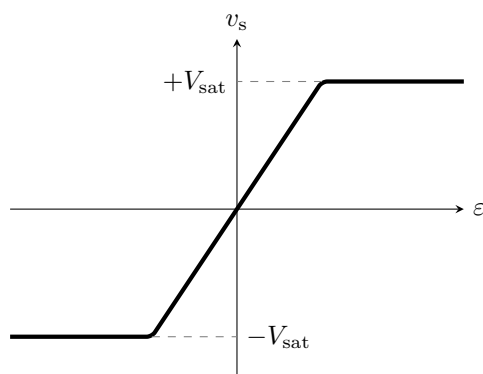
Espace 2

1.2 - Régimes linéaire et de saturation

La relation entrée-sortie est un peu plus compliquée qu'une simple fonction de transfert de filtre.

• Saturation en tension

On représente ci-dessous la **caractéristique statique** de l'ALI. La caractéristique statique représente v_s en fonction de ε en régime permanent continu, c'est-à-dire à fréquence nulle.



La tension de sortie de l'ALI ne peut pas sortir d'un intervalle $[-V_{sat}; +V_{sat}]$ où V_{sat} est généralement légèrement inférieur à la tension d'alimentation.

Espace 3

On peut donc distinguer deux régimes de fonctionnement :

▷ si $-V_{sat} < v_s < +V_{sat}$:
régime linéaire, $v_s \propto \varepsilon$ en statique

▷ si $v_s = \pm V_{sat}$:

régime de saturation (en tension), la tension de sortie ne peut plus évoluer même si ε évolue, la relation entrée-sortie n'est donc plus linéaire.

Espace 5

• Saturation en courant

L'intensité de sortie de l'ALI est également limitée : elle ne peut pas sortir d'un intervalle $[-i_{sat}; +i_{sat}]$

▷ si $-i_{sat} < i_s < +i_{sat}$, l'ALI peut fonctionner en régime linéaire sous réserve que la tension le permette ;

▷ si $i_s = \pm i_{sat}$, l'ALI est **saturé en courant** et la relation entrée-sortie n'est plus linéaire ... mais v_s est a priori quelconque.

Remarque : En pratique, dans les montages usuels, la saturation en courant est moins contraignante que la saturation en tension.

✂ Pour un ALI usuel : $i_{sat} = 40 \text{ mA}$.

• Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire

Dans sa zone de fonctionnement linéaire et pour des fréquences inférieures à quelques MHz, l'ALI est bien décrit par une fonction de transfert passe-bas du premier ordre

$$\frac{H_{\text{ALI}}}{\varepsilon} = \frac{v_s}{\varepsilon} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

où μ_0 est le **gain statique** et f_c la **fréquence de coupure** de l'ALI (en boucle ouverte).

⚠ ⚠ ⚠ **Attention !** Une telle fonction de transfert n'est valable que dans la zone de fonctionnement linéaire.

Sens physique du gain statique :

rapport v_s/ε à fréquence nulle en régime linéaire

Espace 6

✂ Pour un ALI usuel :

▷ Gain statique : $\mu_0 = 2 \cdot 10^5$;

▷ Fréquence de coupure : fréquence de coupure $f_c \sim 20$ Hz, temps caractéristique $\tau_c = 1/f_c \sim 50$ ms.

1.3 - Vitesse de balayage

Le comportement dynamique de l'ALI n'est pas seulement caractérisé par sa fréquence de coupure en boucle ouverte f_c , mais les variations de la tension de sortie sont également contraintes par une limitation non-linéaire appelée **vitesse de balayage** ou **slew rate** dans la dénomination anglaise.

✂ Pour un ALI usuel : $16 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$.

Sens physique du slew rate :

la tension de sortie varie au plus de 16 V en 1 μs .

Espace 7

1.4 - Modèle de l'ALI idéal de gain infini

Largeur du domaine linéaire :

$v_s = \mu_0 \varepsilon$, donc l'ALI sature dès que $\varepsilon = V_{\text{sat}}/\mu_0 \sim 10^{-4}$ V

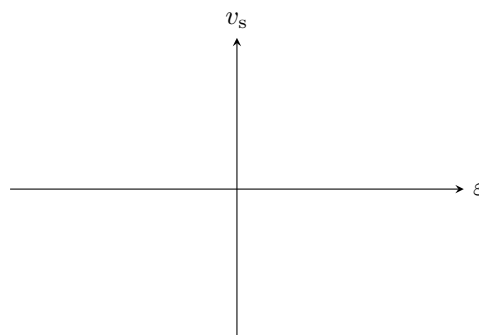
Espace 8

Ordre de grandeur du bruit électronique : qq mV

↪ le régime linéaire n'est pas accessible en boucle ouverte, et en pratique il ne l'est que si on impose $\varepsilon = 0$ par une rétroaction adaptée.

↪ tout se passe comme si $\mu_0 = \infty$: **modèle de l'ALI de gain infini**.

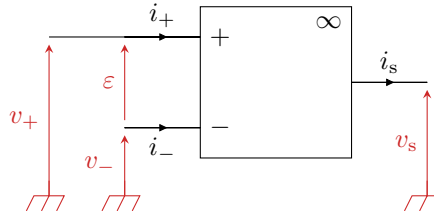
Caractéristique statique dans le modèle de gain infini :



Modèle de l'ALI idéal de gain infini :

- ▷ sa résistance d'entrée est infinie, et donc les courants de polarisation i_+ et i_- sont nuls ;
- ▷ sa résistance de sortie est nulle, et donc le courant de sortie i_s indépendant de la tension de sortie v_s ;
- ▷ sa tension de sortie est limitée à $|v_s| \leq V_{sat} \approx 15\text{ V}$ et saturation au delà ;
- ▷ son courant de sortie est limité à $|i_s| \leq i_{sat} \approx 40\text{ mA}$ et saturation au delà ;
- ▷ son slew rate est infini, et donc sa réponse est instantanée ;
- ▷ relation entrée-sortie en régime linéaire :

$$\varepsilon = 0 \quad \text{tant que} \quad -V_{sat} < v_s < V_{sat}.$$



Attention ! Ne pas confondre le modèle de l'ALI idéal avec le fonctionnement linéaire : un ALI idéal peut fonctionner en régime de saturation, de même qu'un ALI « réel » peut fonctionner en régime linéaire.

Sauf mention contraire dans un exercice, c'est le modèle d'ALI idéal de gain infini qui est implicitement utilisé.

Remarque : Le modèle d'ALI idéal de gain infini contient d'autres hypothèses, qui ne sont pas abordées dans le cours de PT. En revanche, nous rencontrerons certaines de ces limitations en TP, en particulier la tension d'offset : en régime linéaire $\varepsilon = V_{offset} \neq 0$, très faible mais non nulle.

II - Rétroaction

II.1 - Approche qualitative

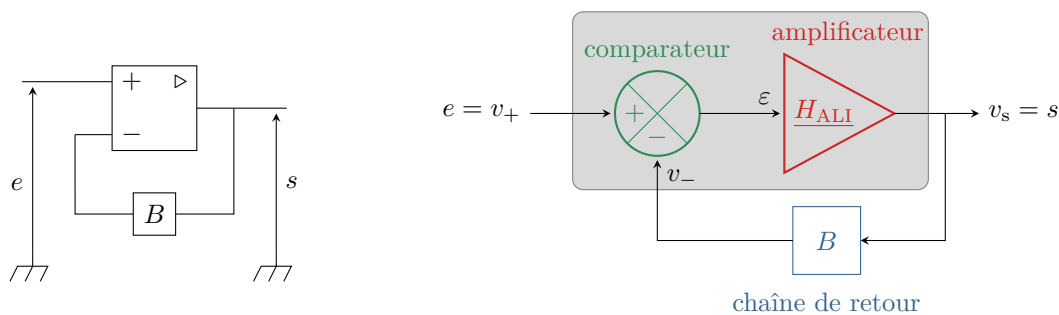
a) Définition

On appelle **boucle de rétroaction** ou **chaîne de retour** un dispositif par lequel le signal de sortie d'un système affecte le signal d'entrée. Le système est alors dit **bouclé**.

Remarque : La notion de rétroaction se voit naturellement en électronique, mais est en fait beaucoup plus générale. Par exemple, le système climatique terrestre est soumis à de nombreuses rétroactions.

Ici, cela consiste à relier la borne de sortie de l'ALI par un dipôle ou une association de dipôles à l'une ou l'autre des bornes d'entrée. La rétroaction est dite **négative** si elle se fait sur l'entrée \ominus (c'est le cas sur le schéma ci-dessous) et **positive** si elle a lieu sur l'entrée \oplus . Selon la borne choisie, les effets de la rétroaction sont très différents !

En termes de schéma bloc, un ALI bouclé se décrit comme un comparateur et un amplificateur qui modélisent l'ALI lui-même, et une chaîne de retour de fonction de transfert B .



b) Effet qualitatif de la rétroaction

Dans le cas où B est réel positif (et uniquement dans ce cas!) on peut comprendre la différence entre les deux rétroactions de manière qualitative et simple. Raisonnons à entrée e fixée : la valeur de la sortie s est donc normalement fixée également. Imaginons que s augmente sous l'effet d'une perturbation à l'intérieur du système (bruit électronique, etc.). Comment le système va-t-il réagir ?

• Cas d'une rétroaction négative

Si v_s augmente, alors $v_- = Bv_s$ augmente également, et donc ε décroît. Le gain positif de l'amplificateur implique alors une diminution de v_s : le système réagit de façon à atténuer l'effet de la perturbation.

Espace 9



De façon générale, une rétroaction sur la borne \ominus a un effet stabilisant : tous ALI fonctionnant en régime linéaire ont une rétroaction négative.

Remarque : La réciproque est souvent vraie mais pas toujours, à cause de la saturation en sortie : si v_s atteint V_{sat} alors l'ALI passe forcément en régime de saturation quelle que soit la rétroaction.

• Cas d'une rétroaction positive

Si v_s augmente, alors $v_+ = e + Bv_s$ augmente également, et donc ε augmente lui aussi. Le gain positif de l'amplificateur implique alors une augmentation de v_s : le système réagit de façon à amplifier l'effet de la perturbation.

Espace 10



De façon générale, une rétroaction sur la borne \oplus a un effet déstabilisant : tous les ALI qui n'ont qu'une rétroaction positive fonctionnent en régime de saturation.

• Absence de rétroaction

La plage de fonctionnement linéaire est tellement étroite qu'en pratique un ALI sans rétroaction fonctionne en régime de saturation.

• Cas d'une double rétroaction

Certains montages possèdent deux boucles de rétroaction sur les deux bornes \oplus et \ominus : on dit alors qu'il y a **compétition de rétroaction**, et on ne peut pas prévoir simplement le régime de fonctionnement de l'ALI.

c) Rappel des critères de stabilité

Pour confirmer cette approche qualitative, nous allons étudier analytiquement la stabilité de deux montages identiques ... à la rétroaction près.

Rappelons que dans un cas (presque) général, l'équation différentielle et la fonction de transfert harmonique d'un SLCI s'écrivent

$$\sum_{n=0}^N a_n \frac{d^n s}{dt^n} = \sum_{k=0}^K b_k \frac{d^k e}{dt^k} \quad \longleftrightarrow \quad H(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^K b_k (j\omega)^k}{\sum_{n=0}^N a_n (j\omega)^n}.$$

Le membre de gauche « sortie » de l'équation différentielle donne le dénominateur de la fonction de transfert, et le membre de droite « entrée » en donne le numérateur.

Rappelons le résultat suivant, établi dans le cours sur les systèmes linéaires :

Critère de stabilité d'un système linéaire d'ordre 1 ou 2 :

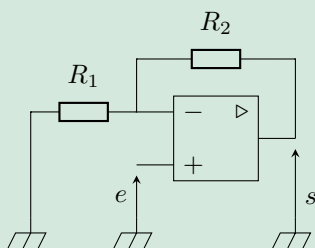
Tous les coeff du membre « entrée » de l'équation différentielle, c'est-à-dire tous les coeff du dénominateur de sa fonction de transfert, sont de même signe.

Espace 11

Si ce n'est pas le cas, le système est instable et il ne peut fonctionner en régime linéaire.

II.2 - Effet stabilisant d'une rétroaction négative : amplificateur non inverseur

Exercice C1 : Stabilité du régime linéaire en présence d'une rétroaction négative



On étudie la stabilité du régime linéaire dans le montage ci-contre, appelé amplificateur non inverseur. L'ALI est supposé idéal, et décrit par une fonction de transfert du premier ordre.

1 - Exprimer successivement v_- , v_+ puis écrire ε sous la forme

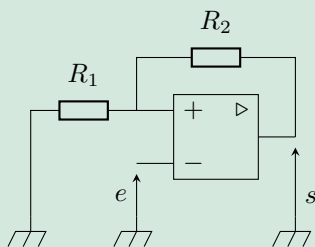
$$\varepsilon = e - Bs$$

en identifiant le gain B de la chaîne de retour.

2 - On suppose le régime linéaire, et on cherche à vérifier sa stabilité. Exprimer la fonction de transfert $H = \underline{S}/\underline{E}$ du montage complet. Conclure.

II.3 - Effet déstabilisant d'une rétroaction positive : comparateur à hystérésis

Exercice C2 : (In)stabilité du régime linéaire en présence d'une rétroaction positive



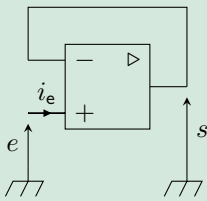
On étudie la stabilité du régime linéaire dans le montage ci-contre, appelé comparateur à hystérésis. L'ALI est supposé idéal, et décrit par une fonction de transfert du premier ordre.

- 1 - Quelle différence y a-t-il entre ce montage et celui de l'exercice précédent ?
- 2 - Identifier le gain B de la chaîne de retour.
- 3 - Étudier la stabilité du montage.

III - Exemples de montages à ALI en régime linéaire

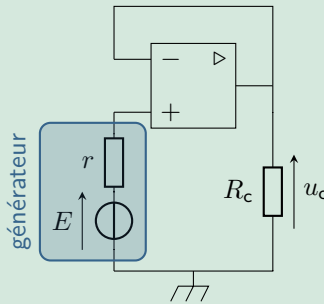
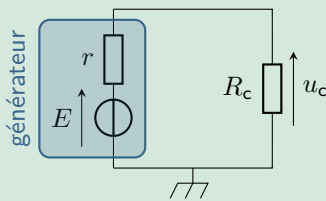
III.1 - Suiveur

Exercice C3 : Suiveur



Le montage suiveur est représenté ci-contre.

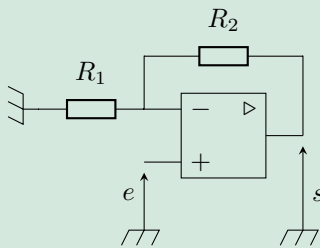
- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Exprimer la relation entrée-sortie du montage. Commenter.
- 3 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.



- 4 - Pour comprendre l'intérêt du suiveur, considérons la situation ci-dessous où l'on cherche à alimenter une résistance de charge R_c avec un générateur de fém E et de résistance interne r . Exprimer la tension u_c aux bornes de la charge avec et sans suiveur. Conclure sur l'intérêt du montage et la signification de l'impédance d'entrée.

III.2 - Amplificateur non inverseur

Exercice C4 : Amplificateur non-inverseur

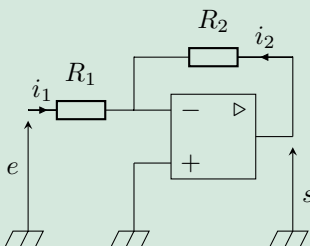


On étudie le montage amplificateur non-inverseur ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Établir la relation entrée-sortie du montage.
- 3 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.

III.3 - Amplificateur inverseur

Exercice C5 : Amplificateur inverseur

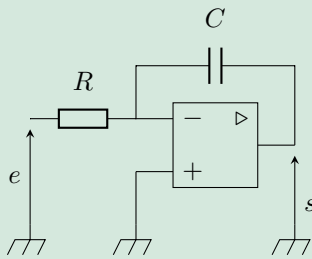


On étudie le montage amplificateur inverseur ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Établir la relation entrée-sortie du montage par application de la loi des nœuds en termes de potentiel.
- 3 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage. Commenter.

III.4 - Intégrateur

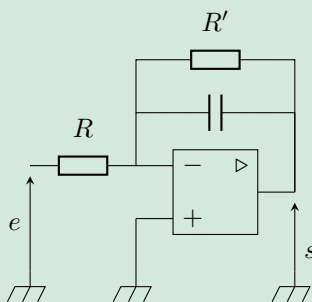
Exercice C6 : Intégrateur parfait



On étudie le montage intégrateur ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Est-il plus efficace d'utiliser un pont diviseur ou la loi des nœuds en termes de potentiel ? Est-il plus efficace d'utiliser une représentation temporelle ou fréquentielle des signaux ?
- 3 - Établir la relation entrée-sortie du montage dans les représentations fréquentielle et temporelle.
- 4 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.

Exercice C7 : Pseudo-intégrateur



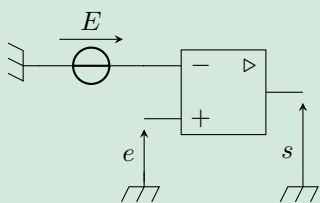
Le montage pseudo-intégrateur est une adaptation du montage intégrateur où une résistance R' est montée en parallèle du condensateur C .

- 1 - Établir la fonction de transfert du montage.
- 2 - Montrer que la fonction de transfert ne diverge plus à basse fréquence.
- 3 - Montrer que ce montage se comporte en intégrateur pour les signaux de haute fréquence.
- 4 - Dans quelle gamme de fréquence ce montage est-il utilisable en lieu et place du précédent ? Comment choisir la valeur de R' ?

IV - Exemples de montages à ALI en régime de saturation

IV.1 - Comparateur simple

Exercice C8 : Comparateur simple

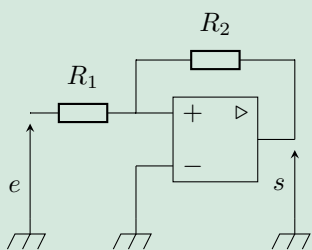


On étudie le montage comparateur simple ci-contre. La tension E , supposée constante pour simplifier, est imposée par un générateur extérieur.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - On suppose l'ALI en saturation haute. Établir la condition de bascule. Reprendre la question en supposant l'ALI en saturation basse. Conclure sur la relation entrée-sortie du montage.
- 3 - Représenter la relation entrée-sortie sur un diagramme s en fonction de e .
- 4 - On prend $E = 10\text{ V}$ et e un signal harmonique d'amplitude 20 V . Représenter graphiquement $e(t)$ et construire $s(t)$. Comparer le spectre des signaux d'entrée et de sortie.

IV.2 - Comparateur à hystérésis non-inverseur

Exercice C9 : Comparateur à hystérésis non-inverseur



On étudie le montage comparateur à hystérésis ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Exprimer ε en fonction de s et e sans préjuger de l'état de saturation de l'ALI.
- 3 - On suppose l'ALI en saturation haute. Établir la condition de bascule. Reprendre la question en supposant l'ALI en saturation basse.
- 4 - Représenter la relation entrée-sortie sur un diagramme entrée-sortie en indiquant le sens de parcours du cycle.
- 5 - On prend $R_1 = 2\text{ k}\Omega$, $R_2 = 3\text{ k}\Omega$ et e un signal harmonique d'amplitude 20 V . Représenter graphiquement $e(t)$ et construire $s(t)$. Commenter.

V - Synthèse : quelle méthode pour quel montage ?

V.1 - Régime linéaire vs. régime de saturation

	Régime linéaire	Régime de saturation
Sur le montage	Une unique rétroaction négative	Aucune rétroaction Une unique rétroaction positive
Ce que l'on sait	$\varepsilon = 0$	$v_s = \pm V_{sat}$
Ce que l'on calcule	Expression de s en fonction de e	Expression de ε en fonction de v_s et e
Ce que l'on en déduit	Relation entrée-sortie sous forme d'une relation différentielle ou d'une fonction de transfert	Conditions sur la tension d'entrée pour lesquelles l'ALI bascule Disjonction de cas entre saturation haute et basse : « si l'ALI est en saturation ... alors il y reste tant que ... »
Outils d'étude	Représentation complexe ou temporelle	Représentation temporelle uniquement

Remarques diverses :

- ▷ dans le cas de montages à deux rétroactions, l'une positive et l'autre négative, on ne peut pas connaître a priori le régime de fonctionnement de l'ALI mais il est la plupart du temps donné par l'énoncé ;
- ▷ même avec une unique rétroaction négative, l'ALI peut fonctionner en régime de saturation si les signaux sont d'amplitude trop élevée : on a toujours $-V_{sat} \leq v_s \leq +V_{sat}$;
- ▷ lorsque c'est possible, il est généralement plus simple d'utiliser les représentations complexes que les représentations temporelles.

V.2 - Loi des nœuds en potentiel ou pont diviseur de tension ?

Lorsqu'elles sont écrites sans erreur (...), les deux méthodes de LNP et de pont diviseur sont équivalentes et conduisent au résultat. En revanche, la complexité du calcul peut parfois (mais pas toujours) fortement différer. Le choix de la méthode est guidé par la structure du montage. Illustrons-le sur deux exemples.



Dans les deux montages, l'ALI fonctionne en régime linéaire, donc $v_- = v_+$.

• Amplificateur non-inverseur

Les différentes positions de la masse dans le montage permettent de représenter s et e « sur une même ligne ». La structure du pont diviseur apparaît clairement, d'où

$$\frac{e}{s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{d'où} \quad s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} e = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e.$$

Le même montage étudié par la loi des nœuds en potentiel appliquée à l'entrée \ominus de l'ALI donne

$$\frac{0 - e}{R_1} + \frac{s - e}{R_2} = 0 \quad \text{donc} \quad \frac{s}{R_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) e = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} e \quad \text{d'où} \quad s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e.$$

Ici, passer par un pont diviseur est un peu plus rapide et sans doute un peu moins risqué que la loi des nœuds en potentiel, mais elle demeure tout à fait efficace.

Plus généralement, « on voit bien que » le pont diviseur est efficace car la tension de sortie s est prise entre les deux extrémités du montage (sortie de l'ALI et masse) et la tension d'entrée e entre le centre du montage et une extrémité.

- **Amplificateur inverseur**

En représentant de même les tensions « sur une même ligne », on voit qu'il n'apparaît pas de structure de type pont diviseur mais que e et s sont directement des tensions aux bornes des résistances, qu'il est immédiat de relier aux intensités ... d'où l'intérêt de la loi des nœuds. Ainsi, le calcul par LNP s'écrit

$$\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} = 0 \quad \text{d'où} \quad s = -\frac{R_2}{R_1}e.$$

Le même montage étudié par un pont diviseur donnerait

$$\frac{-e}{s-e} = \frac{R_1}{R_1+R_2} \quad \text{soit} \quad -(R_1+R_2)e = R_1(s-e) \quad \text{et} \quad -R_1e - R_2e = R_1s - R_1e \quad \text{d'où} \quad s = -\frac{R_2}{R_1}e$$

Ici, opter pour la LNP est nettement plus rapide et plus simple que de passer par un pont diviseur.

Plus généralement, « on voit bien que » la LNP est plus efficace car les tensions de sortie s et e sont prises aux deux extrémités du montage alors que la tension au centre est connue.

- **Et si on n'est pas sûr ?**

Mieux vaut alors passer par la LNP, mais en faisant très attention à exprimer de façon cohérente les tensions et les impédances des dipôles.