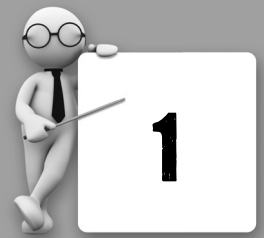
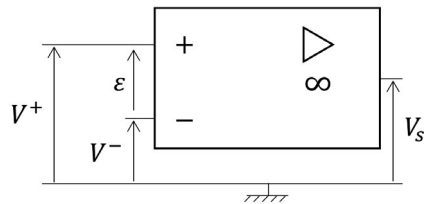


Identifier le fonctionnement linéaire ou saturé d'un ALI (rétroactions et défauts)



Quand on ne sait pas !

- L'amplificateur linéaire intégré (ALI) est un composant actif (il doit disposer d'une alimentation pour fonctionner), qui comporte trois bornes : deux bornes d'entrée, de potentiels V^- (entrée inverseuse) et V^+ (entrée non-inverseuse), et une borne de sortie, de potentiel V_s .



- L'ALI est un **amplificateur différentiel** : il réalise l'amplification de la tension d'entrée différentielle $\varepsilon = V^+ - V^-$ par un facteur μ :

$$V_s = \mu \times \varepsilon$$

- Cependant, si la valeur théorique de V_s dépasse les limitations en amplitude du potentiel de sortie de l'ALI, on dit qu'il sature en tension, et sa sortie vaut alors $+V_{\text{sat}}$ ou $-V_{\text{sat}}$, potentiels qui correspondent aux tensions d'alimentation de l'ALI (on considère généralement que $V_{\text{sat}} = 15 \text{ V}$).
- Le gain μ étant très grand (de l'ordre de 10^5 sur un composant réel, infini dans le modèle de l'ALI idéal), le fonctionnement en régime linéaire est impossible pour un ALI seul.

On peut montrer que la présence d'une **rétroaction négative** (rebouclage de la sortie V_s sur l'entrée inverseuse V^-) est une condition nécessaire au fonctionnement en régime linéaire de l'ALI.

Pour s'assurer qu'elle est suffisante, on doit vérifier que les conditions d'utilisation de l'ALI ne font pas apparaître de défaut non-linéaire.

- **Les défauts de l'ALI** sont ainsi de deux types : linéaire et non-linéaire.
 - ▶ Le **gain fini de l'ALI est son principal défaut linéaire** : le comportement de son gain en haute fréquence est bien modélisé par un filtre passe-bas du premier ordre, de fréquence de coupure de l'ordre du MHz. Une telle modélisation entraîne la conservation du produit "Gain \times Bande passante".

- ▶ Les **défauts non-linéaires** se repèrent par le fait qu'ils engendrent un enrichissement du spectre du signal de sortie par rapport à un signal d'entrée purement sinusoïdal. Les principaux défauts non-linéaires de l'ALI réel par rapport à son modèle idéal sont :
 - **la limitation en courant** (afin de protéger l'ALI des surchauffes, il ne peut pas débiter un courant trop important)
 - **la limitation en tension** (le potentiel de sortie V_s de l'ALI est limité par les tensions de son alimentation)
 - **la limitation en vitesse de balayage**, aussi appelée *slew rate* (le changement de potentiel en sortie de l'ALI est limité en vitesse)

Que faire !

- Pour identifier le fonctionnement linéaire de l'ALI :
 - ▶ observer l'habillage de l'ALI, c'est-à-dire les liaisons entre les entrées et la sortie :
 - si l'ALI ne présente ni de rétroaction positive, ni de rétroaction négative, alors il fonctionne en régime saturé
 - si l'ALI présente uniquement une rétroaction positive, il fonctionne aussi en régime saturé
 - si enfin l'ALI présente une rétroaction négative, un fonctionnement en régime linéaire est envisageable
 - ▶ s'il existe une rétroaction négative :
 - effectuer les calculs en supposant que le fonctionnement est linéaire
 - vérifier ensuite qu'aucune des non-linéarités de l'ALI n'est atteinte, en s'assurant notamment que les tensions et courants de sortie théoriques demeurent dans le domaine de fonctionnement linéaire, et que la vitesse de changement imposée au potentiel de sortie V_s de l'ALI est inférieure à sa vitesse de balayage maximale (*slew rate*)

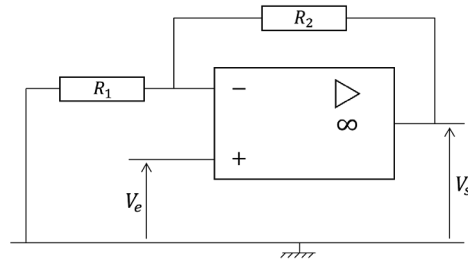
Conseils

- Supposer qu'un ALI est idéal n'a aucun lien avec le fait qu'il fonctionne en régime linéaire.
- La rétroaction linéaire est seulement une condition nécessaire au fonctionnement en régime linéaire d'un ALI.
- La principale difficulté de ce chapitre est d'identifier l'apparition de défauts non-linéaires lors du fonctionnement d'un ALI réel : il est donc indispensable de bien connaître les limitations non-linéaires d'un ALI pour pouvoir vérifier que le fonctionnement en régime linéaire est effectivement possible : limitations en courant, en tension, et en vitesse de balayage (*slew rate*).

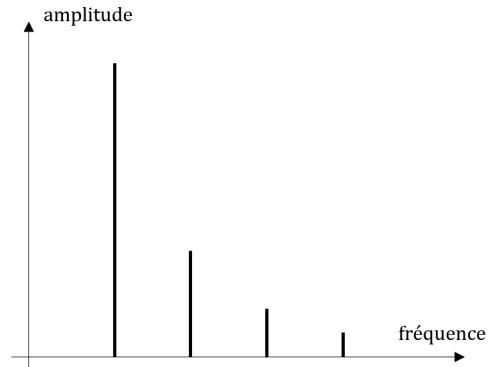
Exemple traité

Montage amplificateur non-inverseur

Considérons dans cet exercice le montage à ALI ci-contre. La tension d'entrée $V_e(t)$ est supposée sinusoïdale de pulsation ω : $V_e(t) = V_0 \sin(\omega t)$. Les deux résistances sont de même valeur $R_1 = R_2 = 47\text{k}\Omega$, et la fréquence du signal d'entrée est de l'ordre de quelques kHz.



- 1 Justifier la possibilité d'un fonctionnement de ce montage en régime linéaire.
- 2 On donne la relation entrée-sortie de ce montage $V_s(t) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_e(t)$. Cette loi de fonctionnement est-elle linéaire ?
- 3 Lors d'un montage expérimental, on fixe V_0 à 10 V. On observe alors le spectre de la tension de sortie :
 - a. Le fonctionnement de ce montage est-il linéaire ? Justifier.
 - b. Quel défaut non-linéaire de l'ALI est ici la cause de ce comportement ?



► SOLUTION

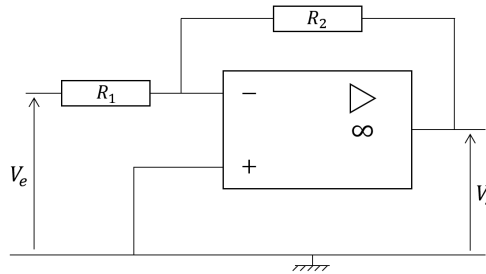
- 1 Il existe une rétroaction négative, donc le fonctionnement linéaire est possible.
- 2 La relation entrée-sortie proposée est effectivement linéaire.
- 3 a. Alors que l'on impose une tension sinusoïdale en entrée, on observe que le signal de sortie est composé de plusieurs fréquences. Cet enrichissement du spectre est le signe que le montage ne fonctionne pas en régime linéaire.
- b. Les deux résistances sont de même valeur, donc la loi entrée-sortie du montage est en fait $V_s(t) = 2V_e(t)$. L'amplitude crête-à-crête de la tension d'entrée étant de 20 V, l'amplitude crête-à-crête de la tension de sortie devrait être de 40 V. Or, l'ALI est limité en amplitude de sa tension de sortie par la valeur de ses alimentations, qui sont de $-V_{\text{sat}} = -15\text{ V}$ et de $+V_{\text{sat}} = +15\text{ V}$, soit une amplitude maximale atteignable pour $V_s(t)$ de 30 V. Le signal est ainsi écrêté, et n'est donc plus sinusoïdal, ce qui explique l'enrichissement du spectre observé, preuve du fonctionnement non-linéaire de l'ALI.

Cet exemple illustre bien que toute la difficulté de ce chapitre n'est pas d'identifier le type de rétroaction, mais bien de savoir si aucun défaut non-linéaire de l'ALI ne vient perturber le fonctionnement linéaire.

Exercices

EXERCICE 1.1 Montage inverseur en haute fréquence

On se propose à présent d'étudier le comportement d'un montage inverseur en haute fréquence. Le schéma du montage amplificateur inverseur est rappelé ci-contre. On prendra $R_2 = 1,2R_1$. La tension d'entrée est sinusoïdale, de fréquence f : $V_e(t) = V_0 \sin(2\pi ft)$.

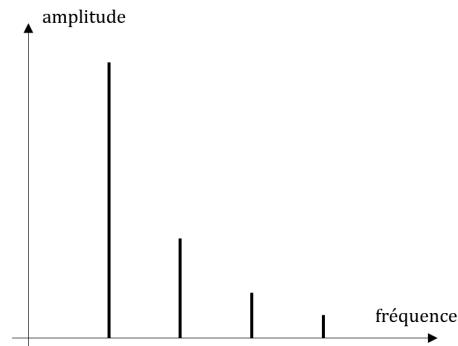


- 1 Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI dans ce montage ?

On donne la loi entrée-sortie du montage :

$$V_s(t) = -V_e(t) \frac{R_2}{R_1}$$

- 2 On réalise un premier relevé de mesures avec les paramètres suivants : $f = 360$ kHz, et $V_0 = 5$ V. On observe le spectre de la tension de sortie $V_s(t)$ présenté ci-contre.



- a. Le montage fonctionne-t-il en régime linéaire ? Justifier.
 - b. Quel est le nom du défaut de l'ALI réel qui est ici mis en évidence, et qui introduit un fonctionnement non-linéaire ? Donner l'ordre de grandeur caractéristique de ce défaut.
- 3 On réalise ensuite un second relevé de mesures, en modifiant les paramètres : on fixe $f = 1$ MHz, et $V_0 = 1$ V. Le spectre de $V_s(t)$ obtenu est composé d'une seule fréquence f , mais l'amplitude du signal obtenu n'est pas celle prévue par la loi de fonctionnement.
- a. Le montage fonctionne-t-il en régime linéaire ? Justifier.
 - b. Expliquer la valeur de l'amplitude du signal obtenu, en décrivant le phénomène observé, et en explicitant sa cause.

Pour vous aider à démarrer

EXERCICE 1.1

On pourra s'intéresser au type de rétroaction du montage.

Solutions des exercices

EXERCICE 1.1

- 1 Il existe une rétroaction négative, le régime de fonctionnement linéaire est donc possible pour ce montage.
- 2 a. Alors que l'on a injecté une tension sinusoïdale pure de fréquence f , on obtient sur le spectre du signal de sortie plusieurs fréquences. Cet enrichissement du spectre est caractéristique d'un fonctionnement non-linéaire.
b. Le défaut mis en évidence ici est la vitesse de balayage finie de l'ALI. Cette vitesse de balayage, que l'on note σ , exprime la limitation en vitesse de changement pour la tension de sortie ; elle est de l'ordre de $1 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$.
La loi de fonctionnement impose à la tension de sortie $V_s(t)$ de passer de deux extrema de tension en une demi-période (notée $\frac{T}{2}$), d'où la vitesse de balayage :

$$\sigma = \left| \frac{\Delta V}{\Delta t} \right| = \frac{\frac{R_2}{R_1} 2V_0}{T/2} = 1,2 \frac{4V_0}{f} = 67 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$$

Cette valeur étant bien plus grande que l'ordre de grandeur classique, le signal est déformé, et le fonctionnement n'est donc pas linéaire.

- 3 a. Le spectre conserve une seule fréquence, identique à la fréquence d'entrée. Le fonctionnement est donc linéaire.
b. Cependant, on observe une amplitude moindre que celle prévue par la relation entrée-sortie établie plus haut.
Le phénomène qui est responsable de cet écart d'amplitude est la conservation du produit "Gain \times Bande passante" pour tout montage à ALI. Ce dernier peut en effet être modélisé comme un filtre passe-bas du premier ordre, de fréquence de coupure de l'ordre du mégahertz. La fréquence du signal imposé étant très importante, le gain diminue, ce qui explique l'écart constaté avec la valeur théorique du signal de sortie $V_s(t)$.
Ce défaut de l'ALI est cependant un défaut linéaire, car on n'observe pas d'enrichissement du spectre du signal de sortie par rapport au signal d'entrée.



Établir la loi entrée-sortie d'un montage à ALI fonctionnant en régime linéaire

Quand on ne sait pas !

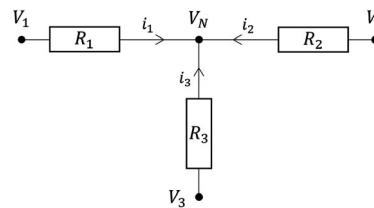
- Dans cette fiche, on supposera que la présence d'une rétroaction négative est une condition suffisante au fonctionnement en régime linéaire d'un montage à ALI (elle n'est en fait que nécessaire, comme vu dans la fiche précédente).

- Dans le cas où l'ALI fonctionne en régime linéaire, la **tension différentielle ε est nulle** :

$$\varepsilon = V^+ - V^- = 0$$

- La **loi des nœuds en terme de potentiels** permet d'exprimer le potentiel V_N du nœud N en fonction des tensions et résistances des branches issues de ce nœud :

$$V_N = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{V_k}{R_k}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$$



Le potentiel du nœud N est en fait la moyenne des tensions environnantes, pondérée par l'inverse des résistances.

Que faire !

- Pour établir la loi entrée-sortie en régime linéaire :
 - ▶ vérifier qu'il existe une rétroaction négative (sortie bouclée sur l'entrée inverseuse de l'ALI)
 - ▶ exprimer les potentiels V^+ et V^- aux deux entrées de l'ALI à l'aide de la loi des nœuds en terme de potentiels. Avec la présence à la rétroaction, on est assuré que le potentiel V_s de la sortie de l'ALI sera présent dans l'expression de V^-
 - ▶ écrire l'équation de fonctionnement de l'ALI en régime linéaire :

$$\varepsilon = V^+ - V^- = 0 \Leftrightarrow V^+ = V^-$$

- ▶ en déduire l'expression du potentiel de sortie V_s en fonction des potentiels d'entrée V^+ et V^-

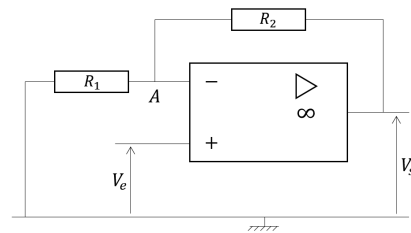
Conseils

- La loi des nœuds en terme de potentiels est très utile pour écrire rapidement et facilement la loi entrée-sortie des montages électroniques avec ALI en régime linéaire. Il est par conséquent très fortement conseillé de la connaître et de savoir la mettre en œuvre correctement.
- La condition de rétraction négative n'est qu'une condition nécessaire au fonctionnement en régime linéaire de l'ALI. On supposera dans les exercices qu'elle est suffisante, et qu'il existe une certaine plage de valeurs des tensions d'entrée pour laquelle ce régime existe.
- Il n'existe pas de règle générale pour la place de l'entrée inverseuse et de l'entrée non-inverseuse sur les représentations des ALI. Il convient donc de bien prendre le temps de lire le schéma pour les identifier.

Exemple traité

Amplificateur non inverseur

On considère le montage à amplificateur opérationnel présenté ci-contre. La référence pour les potentiels est prise à 0 V, au niveau du fil de masse. On cherche à déterminer la forme de la relation entrée-sortie de ce système, l'entrée étant V_e , la sortie V_s .



- 1 On utilise le modèle de l'ALI idéal. Rappeler les hypothèses de ce modèle.
- 2 Justifier que l'ALI fonctionne en régime linéaire. Quelle équation est alors vérifiée ?
- 3 Écrire l'expression des potentiels d'entrée V^+ et V^- en fonction des données du problème.
- 4 En utilisant l'équation, valable en régime linéaire, qui relie ces deux potentiels, écrire la loi entrée-sortie du montage.
- 5 Justifier alors le titre de l'exercice.
- 6 Le régime de fonctionnement linéaire de l'ALI est-il toujours assuré avec ce montage ?

► SOLUTION

- 1 Le modèle de l'ALI idéal consiste à supposer que :
 - ▶ les résistances d'entrée sont infinies, ce qui implique que les courants d'entrée sont nuls,
 - ▶ la résistance de sortie est nulle,
 - ▶ le gain différentiel μ est infini, ce qui implique l'égalité des tensions d'entrée en régime linéaire.

- 2 Il existe une liaison entre la sortie de l'ALI et son entrée inverseuse, *via* la résistance R_2 . Le fonctionnement en régime linéaire est donc possible pour une certaine plage de valeurs des tensions d'entrée.
- 3 On a $V^+ = V_e$ d'une part.
Pour l'entrée inverseuse, on écrit la loi des nœuds en terme de potentiels au nœud A :

$$V^- = \frac{\frac{0}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = V_s \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

- 4 Le régime linéaire étant possible, on a l'équation $\varepsilon = V^+ - V^- = 0$. Cela donne directement :

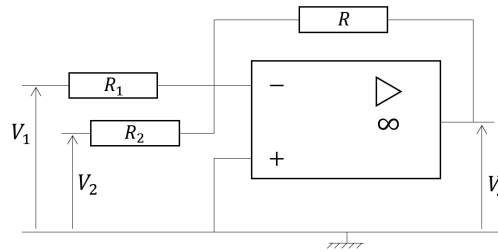
$$V_s = V_e \frac{R_1 + R_2}{R_1} = V_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

- 5 Ce montage est appelé amplificateur non inverseur : la tension de sortie V_s est l'amplification de la tension d'entrée V_e par un facteur $\frac{R_2}{R_1}$.
- 6 La tension de sortie de l'ALI sature à une tension $+V_{\text{sat}}$ de l'ordre de 15 V, qui correspond à la tension d'alimentation de l'ALI. Il existe ainsi des cas de figure où la tension de sortie n'est plus reliée à la tension d'entrée par la loi calculée plus haut (gain $\frac{R_2}{R_1}$ trop élevé, amplitude de la tension d'entrée trop élevée, etc.) car elle sature à $+V_{\text{sat}}$. L'ALI fonctionne alors en régime saturé.

Exercices

EXERCICE 2.1 Montage sommateur inverseur

On considère à présent le montage à ALI présenté ci-contre. On utilise le modèle de l'ALI idéal pour décrire son fonctionnement.



- 1 L'ALI fonctionne-t-il en régime linéaire ou saturé ? Justifier.
- 2 Écrire les expressions des potentiels d'entrée V^+ et V^- en fonction des paramètres du circuit.
- 3 En déduire l'expression de la loi entrée-sortie de ce montage.
- 4 Quel est l'intérêt d'un tel montage ?