

Amplificateur Linéaire Intégré.

P. Ribière

Collège Stanislas

Année Scolaire 2016/2017

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Présentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Représentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

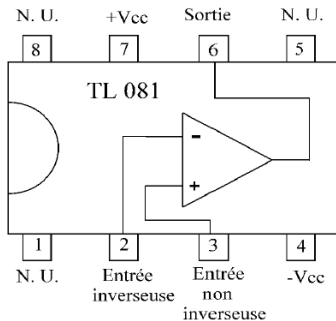


FIGURE – Présentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.

Un ALI (ex-Amplificateur Opérationnel), dont le sens est repéré par une encoche, est composée de :

- deux bornes d'alimentation en tension continue (en 7 et 4), notée $\pm V_{cc} \simeq \pm 15V$.
Alimenter l'ALI est la première étape de branchement (afin de le protéger.)
Ces deux bornes d'alimentation ne sont pas représentées dans les circuits.
- deux bornes d'entrée :
l'entrée "+", non inverseuse (en 3) et
l'entrée "-", inverseuse (en 2).
- une borne de sortie (en 6)
- deux bornes de réglage fin (en 1 et 5) que nous n'utiliserons pas, non représentées par la suite.
- une borne non connectée (en 8), non représentée.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Présentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Représentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

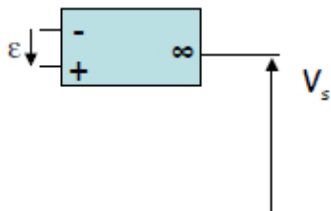


FIGURE – Schématisation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.

Notations de l'ALI :

- i_+ et i_- désignent les courants d'entrées "+" et "-".
- V_+ et V_- désignent les potentiels d'entrées "+" et "-".
- $\epsilon = V_+ - V_-$ tension différentielle d'entrée.
- V_s la tension de sortie.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 **Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire**
 - **Modèle de l'ALI idéal de gain infini en régime linéaire**
 - Application du modèle de l'ALI idéal en régime linéaire.
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Modèle de l'ALI idéal, de gain infini.

ALI idéal est tel que $i_+ = i_- = 0$.

(L'impédance d'entrée de l'ALI idéal est très grande).

ALI idéal de gain infini en régime linéaire est tel que $\epsilon = 0$ donc $V_+ = V_-$.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 **Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire**
 - Modèle de l'ALI idéal de gain infini en régime linéaire
 - **Application du modèle de l'ALI idéal en régime linéaire.**
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Montage suiveur :

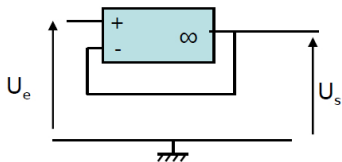


FIGURE – Montage suiveur (ALI idéal, en régime linéaire).

Montage suiveur :

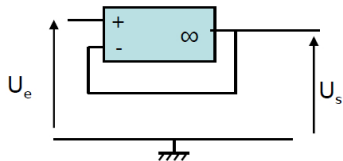


FIGURE – Montage suiveur (ALI idéal, en régime linéaire).

La rétroaction se fait sur la borne inverseuse, ce qui permet de supposer le régime linéaire pour l'ALI idéal.

$$V_+ = e(t)$$

$$V_- = s(t)$$

$\epsilon = 0$ donc

$$s(t) = e(t)$$

Montage suiveur

Intérêt : isoler les diverses parties de circuit en cascade.

Montage amplificateur inverseur :

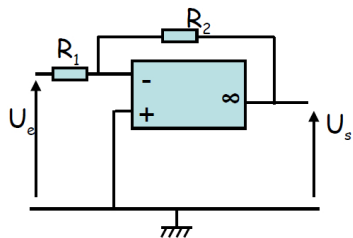


FIGURE – Montage amplificateur inverseur (ALI idéal, en régime linéaire.

Montage amplificateur inverseur :

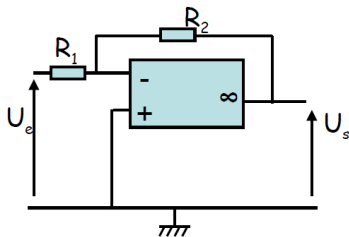


FIGURE – Montage amplificateur inverseur (ALI idéal, en régime linéaire.

La rétroaction se fait sur la borne inverseuse, ce qui permet de supposer le régime linéaire pour l'ALI idéal.

$$V_+ = 0$$

$$V_- = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} + 0}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$\epsilon = 0$ donc

$$s(t) = -\frac{R_2}{R_1} e(t)$$

Montage amplificateur inverseur

Montage amplificateur non inverseur :

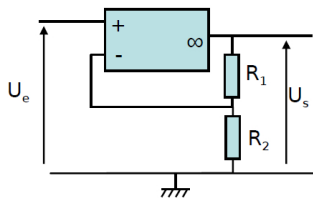


FIGURE – Montage amplificateur non inverseur (ALI idéal, en régime linéaire).

Montage amplificateur non inverseur :

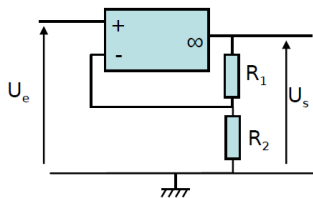


FIGURE – Montage amplificateur non inverseur (ALI idéal, en régime linéaire).

La rétroaction se fait sur la borne inverseuse, ce qui permet de supposer le régime linéaire pour l'ALI idéal.

$$V_+ = e(t)$$

$$V_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} s(t)$$

$\epsilon = 0$ donc

$$s(t) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) e(t)$$

Montage amplificateur non inverseur

Montage intégrateur :

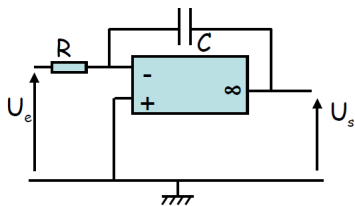


FIGURE – Montage integrateur (ALI idéal, en régime linéaire.

Montage intégrateur :

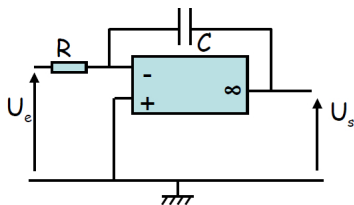


FIGURE – Montage intégrateur (ALI idéal, en régime linéaire).

La rétroaction se fait sur la borne inverseuse, ce qui permet de supposer le régime linéaire pour l'ALI idéal. Il est alors possible pour le régime linéaire d'utiliser la notation complexe.

$$V_+ = 0$$

$$V_- = \frac{\frac{e}{R} + s \cdot jRC\omega + 0}{\frac{1}{R} + jRC\omega}$$

$\epsilon = 0$ donc

$$s(t) = -\frac{1}{jRC\omega} \cdot e(t) = -\frac{1}{RC} \int e(t) dt$$

Montage intégrateur.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 **Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).**
 - **Modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.**
 - Application au montage amplificateur inverseur
 - Conclusion sur les apports du modèle de l'ALI idéal comme filtre passe bas du premier ordre
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.

ALI idéal est tel que $i_+ = i_- = 0$.

(L'impédance d'entrée de l'ALI idéal est très grande).

ALI idéal comme filtre passe bas du premier ordre est tel que

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s = \mu_0 \cdot \epsilon$$

soit une fonction de transfert de l'ALI seul (nu) comme un filtre passe bas du premier ordre

$$\underline{\mu} = \frac{V_s}{\epsilon} = \frac{\mu_0}{1 + j\omega\tau}$$

τ est le temps caractéristique de l'ALI $\simeq 10^{-2}s$

μ_0 est le gain statique de l'A.O. $\simeq 10^5$

Le schéma fonctionnel de l'ALI ainsi modélisé associe un soustracteur pour les entrées, un passe-bas du premier ordre et un opérateur proportionnel de gain, le gain statique μ_0 .

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 **Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).**
 - Modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.
 - **Application au montage amplificateur inverseur**
 - Conclusion sur les apports du modèle de l'ALI idéal comme filtre passe bas du premier ordre
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Retour sur le montage amplificateur inverseur à l'aide du modèle de l'ALI idéal comme un filtre passe bas du premier ordre :

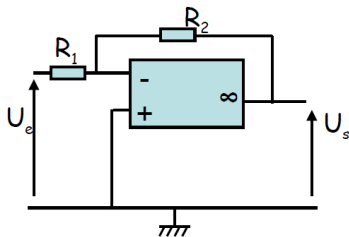


FIGURE – Montage amplificateur inverseur.

Retour sur le montage amplificateur inverseur à l'aide du modèle de l'ALI idéal comme un filtre passe bas du premier ordre :

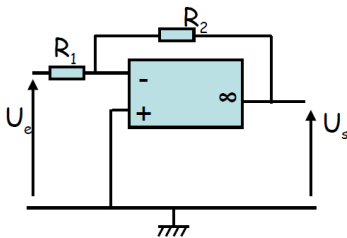


FIGURE – Montage amplificateur inverseur.

La rétroaction se fait sur la borne inverseuse, ce qui permet de supposer le régime linéaire pour l'ALI idéal.

$$V_+ = 0$$

$$V_- = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} + 0}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

donc

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s = \mu_0 \cdot \epsilon = \mu_0 \left(0 - \frac{kV_e + V_s}{1 + k} \right)$$

avec $k = \frac{R_2}{R_1}$

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s \left(1 + \frac{\mu_0}{1 + k} \right) = - \frac{\mu_0 \cdot k \cdot V_e}{1 + k}$$

L'équation différentielle homogène a tous ses coefficients de même signe donc le régime est stable.

Critère a priori de stabilité du modèle linéaire.

La stabilité du régime linéaire de l'ALI est liée à la rétroaction sur la borne inverseuse "-"

Inversion des bornes d'entrées du montage amplificateur inverseur

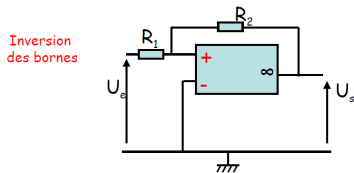
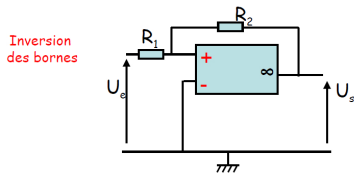


FIGURE – Montage amplificateur inverseur avec bornes d'entrée inversées.

Inversion des bornes d'entrées du montage amplificateur inverseur



$$V_- = 0$$

$$V_+ = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} + 0}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

Le modèle de l'ALI idéal redonne les mêmes résultats qu'avant l'inversion.

FIGURE – Montage amplificateur inverseur avec bornes d'entrée inversées.

Le modèle de l'ALI idéal comme filtre conduit lui à une équation différentielle différente.

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s = \mu_0 \cdot \epsilon = \mu_0 \left(\frac{kV_e + V_s}{1+k} - 0 \right)$$

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s \left(1 - \frac{\mu_0}{1+k} \right) = \frac{\mu_0 \cdot k \cdot V_e}{1+k}$$

L'équation différentielle homogène n'a pas tous ses coefficients de même signe donc le régime est instable.

Critère a priori de stabilité du modèle linéaire.

L'instabilité du régime linéaire de l'ALI est liée à la rétroaction sur la borne non inverseuse "+"

Retour sur le montage amplificateur inverseur à l'aide du modèle de l'ALI idéal comme un filtre passe bas du premier ordre :

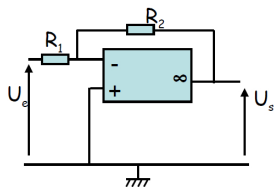


FIGURE – Montage amplificateur inverseur.

Retour sur le montage amplificateur inverseur à l'aide du modèle de l'ALI idéal comme un filtre passe bas du premier ordre :

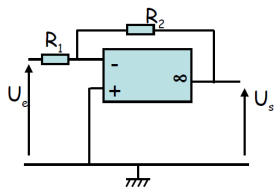


FIGURE – Montage amplificateur inverseur.

$$\tau \frac{dV_s}{dt} + V_s = \mu_0 \cdot \epsilon = \mu_0 \left(0 - \frac{kV_e + V_s}{1+k} \right)$$

D'où

$$\frac{V_s}{V_e} = - \frac{\frac{\mu_0 \cdot k}{1+k}}{1 + \frac{\mu_0}{1+k} + j\omega\tau} \approx - \frac{\frac{\mu_0 \cdot k}{1+k}}{\frac{\mu_0}{1+k} + j\omega\tau}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = - \frac{k}{1 + j\omega(\tau \cdot \frac{1+k}{\mu_0})}$$

Validation du modèle de l'ALI idéal de gain infini.

A basse fréquence, la fonction de transfert est équivalente à celle trouver dans le modèle de l'ALI idéal de gain infini : $\frac{V_s}{V_e} \simeq -k$

Ce résultat est "indépendant" des caractéristiques de l'ALI.

A haute fréquence, la fonction de transfert chute avec une pente de $-20dB/décade$: l'ALI se comporte comme un filtre passe bas, "**défaut**" linéaire de l'ALI.

La sortie est atténué au lieu d'être amplifié mais reste à la même fréquence que l'entrée.

Le produit gain/bande passante est constant.

Plus le gain à basse fréquence est élevée, plus le défaut linéaire de l'ALI apparaît tôt.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).**
 - Modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.
 - Application au montage amplificateur inverseur
 - Conclusion sur les apports du modèle de l'ALI idéal comme filtre passe bas du premier ordre
- 4 L'amplificateur en régime saturé.

Apport du modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.

Le modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre permet

- d'expliquer la stabilité du régime linéaire grâce à la rétroaction sur la borne inverseuse.
- de valider à basse fréquence les résultats obtenus avec le modèle de l'ALI idéal de gain infini en régime linéaire.
- de donner un cadre de validité au modèle de l'ALI idéal de gain infini en régime linéaire, en expliquant le "**défaut**" **linéaire de l'ALI**, la chute du gain à haute fréquence, en donnant la pulsation de coupure, limite d'apparition du défaut linéaire en révélant que le produit gain-bande passante est fixé.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 **L'amplificateur en régime saturé.**
 - **La saturation en tension de sortie.**
 - Application de la saturation, le comparateur à hystérésis.
 - Les autres saturations possibles de l'ALI.

Saturation de la tension de sortie de l'ALI.

La tension de sortie est limitée en valeur absolue. Elle ne peut pas dépasser un maximum, appelé tension de saturation V_{sat} .

$$-V_{sat} \leq V_s \leq V_{sat}$$

- la tension de sortie V_s est en saturation haute $V_s = +V_{sat}$ si et seulement si $\varepsilon > 0$
- la tension de sortie V_s est en saturation basse $V_s = -V_{sat}$ si et seulement si $\varepsilon < 0$
- Ce comportement est un "défaut" non linéaire, qui peut conduire à un enrichissement du spectre de Fourier.

Application directe : ALI sans rétroaction : le comparateur simple.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 **L'amplificateur en régime saturé.**
 - La saturation en tension de sortie.
 - **Application de la saturation, le comparateur à hystérésis.**
 - Les autres saturations possibles de l'ALI.

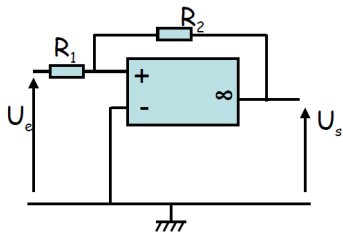


FIGURE – Comparateur à hystérésis, ALI en saturation.

La rétroaction se fait sur la borne non inverseuse, ce qui permet de supposer le régime saturé pour l'ALI idéal.

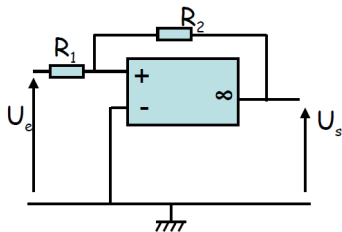


FIGURE – Comparateur à hystérésis, ALI en saturation.

$$V_+ = \frac{\frac{e}{R_1} + \frac{s}{R_2} + 0}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$V_- = 0$$

Supposons la saturation haute : $V_s = +V_{sat}$
 Quelle est la condition sur V_e pour que cette hypothèse soit vraie ?

$$\varepsilon > 0, \text{ Or } \varepsilon = \frac{k \cdot V_e + V_{sat}}{1+k} - 0 > 0 \text{ soit au final}$$

$$V_e > -\frac{V_{sat}}{k}$$

Supposons la saturation basse : $V_s = -V_{sat}$
 Quelle est la condition sur V_e pour que cette hypothèse soit vraie ?

$$\varepsilon < 0, \text{ Or } \varepsilon = \frac{k \cdot V_e - V_{sat}}{1+k} - 0 > 0 \text{ soit au final}$$

$$V_e < \frac{V_{sat}}{k}$$

La saturation haute : $V_s = +V_{sat}$ si et seulement si
 $V_e > -\frac{V_{sat}}{k}$

La saturation basse : $V_s = -V_{sat}$ si et seulement si
 $V_e < \frac{V_{sat}}{k}$

La saturation haute : $V_s = +V_{sat}$ si et seulement si
 $V_e > -\frac{V_{sat}}{k}$

La saturation basse : $V_s = -V_{sat}$ si et seulement si
 $V_e < \frac{V_{sat}}{k}$

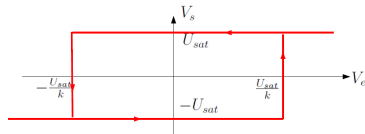


FIGURE – Schéma à hystérésis, effet mémoire.

Pour une même valeur de la tension d'entrée V_e , il y a plusieurs tensions de sorties possibles, dont la valeur est déterminée par l'état antérieur du circuit : le système garde donc la mémoire de son histoire.

Plan

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
- 4 **L'amplificateur en régime saturé.**
 - La saturation en tension de sortie.
 - Application de la saturation, le comparateur à hystérésis.
 - **Les autres saturations possibles de l'ALI.**

Autres défauts non linéaires de l'ALI (pouvant conduire à un enrichissement du spectre du signal).

L'intensité du courant de sortie i_s est limitée :

$$i_s < i_{s \text{ max}} \simeq 200 \text{mA}$$

Par conséquent, dans les montages à ALI, on utilise des résistances de l'ordre du $k\Omega$ pour éviter la saturation en courant de sortie, sinon l'amplitude du signal de sortie est limitée.

Les montages à ALI servent à amplifier une tension mais comme le courant est limité, la puissance de sortie l'est aussi. Il ne s'agit donc pas d'amplification en puissance.

La vitesse limite de variation de tension de sortie en fonction du temps dite "vitesse de balayage" est elle aussi limitée :

$$\frac{dV_s}{dt} \leq \sigma \simeq 0,5 \text{V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$$

Cela conduit à une "triangulation" du signal.

- 1 Description de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Présentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
 - Représentation de l'Amplificateur Linéaire Intégré.
- 2 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré idéal, en régime linéaire
 - Modèle de l'ALI idéal de gain infini en régime linéaire
 - Application du modèle de l'ALI idéal en régime linéaire.
- 3 Modèle de l'Amplificateur Linéaire Intégré comme un filtre du 1er ordre (régime linéaire).
 - Modèle de l'ALI comme filtre passe bas du premier ordre.
 - Application au montage amplificateur inverseur
 - Conclusion sur les apports du modèle de l'ALI idéal comme filtre passe bas du premier ordre
- 4 L'amplificateur en régime saturé.
 - La saturation en tension de sortie.
 - Application de la saturation, le comparateur à hystérésis.
 - Les autres saturations possibles de l'ALI.