

Électronique

II — Rétroaction

L'amplificateur linéaire intégré (ALI)

Modélisation

L'ALI amplifie la tension différentielle $\varepsilon = v_+ - v_-$ entre ses bornes d'entrée; c'est un amplificateur différentiel.

C'est un composé actif qui nécessite une alimentation externe : alimentation continue +15 V/-15 V symétrique par rapport à une masse prise comme origine des potentiels pour le circuit.

On adopte le modèle suivant :

- résistance d'entrée infinie : $i_+ = i_- = 0$;
- résistance de sortie nulle;
- saturation de l'intensité en sortie : $|i_s| \leq i_{s,\max} \approx 40 \text{ mA}$;
- saturation de la tension de sortie $|v_s| \leq V_{\text{sat}} \approx 15 \text{ V}$.

L'ALI est un circuit intégré disposant de 8 broches. Les broches d'alimentation symétrique ne sont pas représentées sur le symbole de l'ALI. La masse du circuit est celle de l'alimentation symétrique 15 V/-15 V qui n'est pas représentée sur les schémas.

Dans la pratique, on utilise les 5 broches indiquées en gras sur la figure.

- Les grandeurs numériques données part la suite sont celle d'un ALI de type TL081. Leurs ordres de grandeur sont à retenir.

Caractéristique statique de l'ALI

L'ALI peut fonctionner selon deux modes :

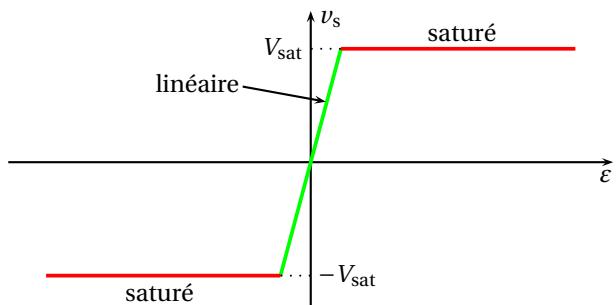
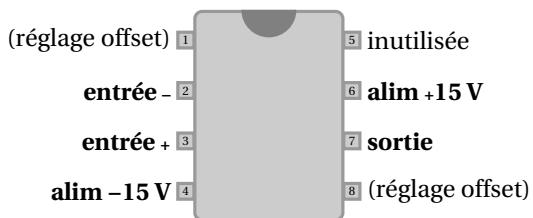
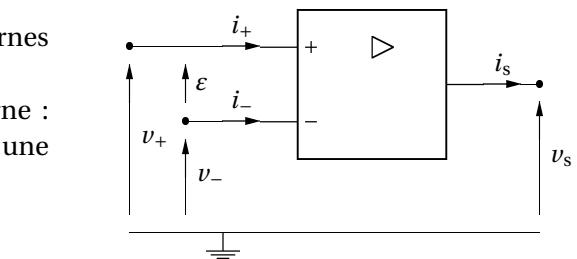
régime linéaire : $-V_{\text{sat}} < v_s < V_{\text{sat}}$

On a $v_s = A_0 \varepsilon$, avec $A_0 \approx 2 \times 10^5$.

régime saturé : $|v_s| = V_{\text{sat}}$.

On a $v_s = +V_{\text{sat}}$ ou $v_s = -V_{\text{sat}}$ selon le signe de ε .

saturation en courant L'intensité du courant de sortie est limitée : $-i_{\text{sat}} \leq i_s \leq i_{\text{sat}}$ avec $i_{\text{sat}} \approx 40 \text{ mA}$.



L'ALI en régime variable : fonction de transfert

En fonctionnement linéaire, l'ALI est décrit par une fonction de transfert passe-bas du 1^{er} ordre

$$A(jf) = \frac{A_0}{1 + j \frac{f}{f_0}} \quad \text{avec} \quad A_0 \approx 2 \times 10^5 \quad \text{et} \quad f_0 \approx 20 \text{ Hz.}$$

Il est caractérisé par un temps de réponse $\tau = \frac{1}{2\pi f_0}$ soit $\tau \approx 8 \text{ ms}$.

Vitesse de balayage

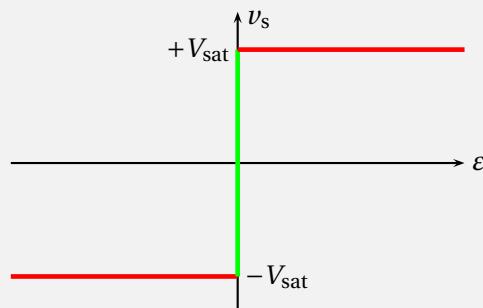
La vitesse de variation de la tension de sortie est limitée : $\left| \frac{dV_s}{dt} \right| \leq \sigma$ avec $\sigma \approx 16 \text{ V}/\mu\text{s}$.

La grandeur σ est appelée vitesse de balayage, ou *slew rate*.

Modèle de l'ALI idéal de gain infini

Modèle :

- résistance d'entrée infinie ($i_+ = i_- = 0$);
- résistance de sortie nulle;
- gain infini : $A_0 = \infty$;
- *slew rate* infini (réponse instantanée);
- on prend en compte les saturations de la tension de sortie ($|v_s| \leq V_{\text{sat}}$) et du courant de sortie ($|i_s| \leq i_{\text{sat}}$).



Régime linéaire : $\varepsilon = 0$ avec $-V_{\text{sat}} < v_s < V_{\text{sat}}$.

Régime de saturation : $v_s = \begin{cases} +V_{\text{sat}} & \text{si } \varepsilon > 0 \\ -V_{\text{sat}} & \text{si } \varepsilon < 0. \end{cases}$

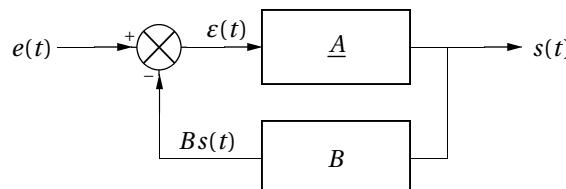
Rétroaction

Principe de la rétroaction

Une boucle de rétroaction est un dispositif dans lequel le signal de sortie affecte le signal d'entrée.

► Cette définition, très générale, ne se limite pas au cadre de l'électronique, ni même à celui de la physique.

Schéma fonctionnel d'une boucle de rétroaction négative :

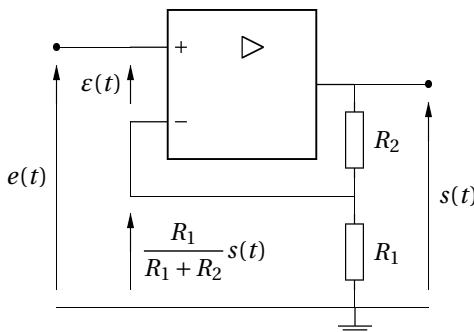


La chaîne directe est caractérisée par une fonction de transfert $\underline{A}(j\omega)$.

La chaîne de retour est un ampli de gain B .

Le signal envoyé en entrée de la chaîne directe est $\varepsilon(t) = e(t) - Bs(t)$.

Montage amplificateur non inverseur — Montage comparateur à hystérésis

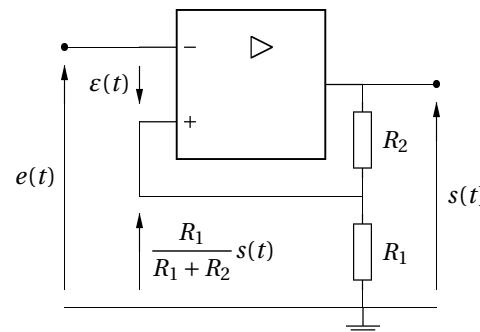


La rétroaction est négative : $\varepsilon(t) = e(t) - \frac{R_1}{R_1 + R_2}s(t)$.

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{A_0}{1 + \beta A_0 + \tau j\omega} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Le montage est stable : $1 + \beta A_0 > 0$ et $\tau > 0$.

L'ALI peut fonctionner en régime linéaire.



La rétroaction est positive : $\varepsilon(t) = \frac{R_1}{R_1 + R_2}s(t) - e(t)$.

$$\underline{H}(j\omega) = \frac{-A_0}{1 - \beta A_0 + \tau j\omega} \quad \text{avec} \quad \beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Le montage est instable : $1 - \beta A_0 < 0$ et $\tau > 0$.

L'ALI fonctionne en régime de saturation.

Comportement fréquentiel

Compromis gain-bande passante

Montage	Bande passante	Gain statique
ALI en boucle ouverte	$[0, f_0]$	A_0
Amplificateur non inverseur	$[0, \beta A_1 f_0]$	$1/\beta$

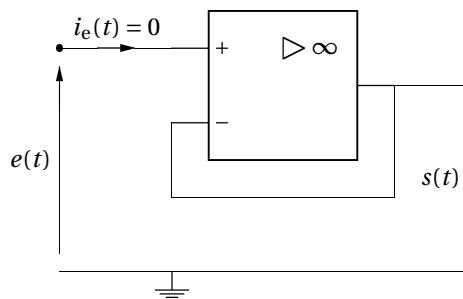
Le produit gain × bande passante est constant : $A_0 f_0 \approx 4 \text{ MHz}$.

- La rétroaction élargit la bande passante (passe-bas). Cela se fait avec une diminution du gain.
- Une augmentation du gain se fait au détriment de la bande passante.
- Tout ceci n'est valable que quand l'ALI fonctionne en régime linéaire.

Montages fondamentaux avec ALI idéal de gain infini

ALI en régime linéaire

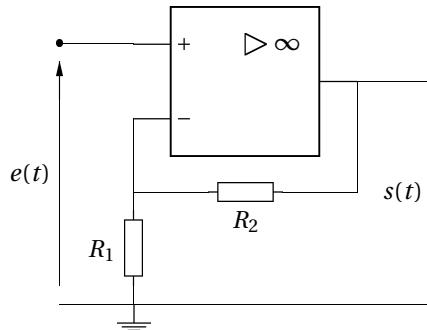
Montage suiveur



$$s(t) = e(t) \quad \text{pour} \quad |e(t)| < V_{\text{sat}}.$$

- L'impédance d'entrée est infinie : $i_e(t) = 0$. Ce montage permet de réaliser une adaptation d'impédance : il ne prélève pas de courant sur le montage placé en entrée du suiveur.

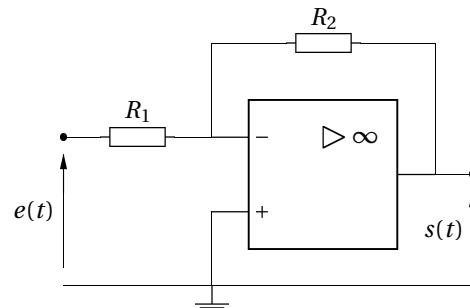
Amplificateur non inverseur



$$s(t) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e(t) \quad \text{pour} \quad |e(t)| < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}.$$

- L'impédance d'entrée est infinie.

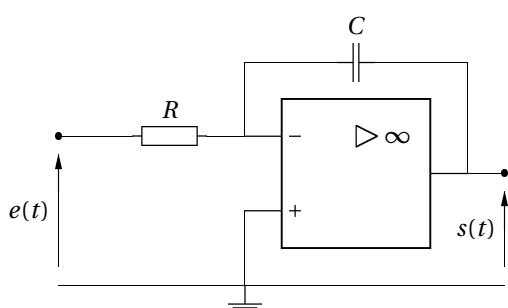
Amplificateur inverseur



$$s(t) = -\frac{R_2}{R_1} e(t) \quad \text{pour} \quad |e(t)| < \frac{R_1}{R_2} V_{\text{sat}}.$$

- L'impédance d'entrée vaut $Z_e = R_1$.

Montage intégrateur



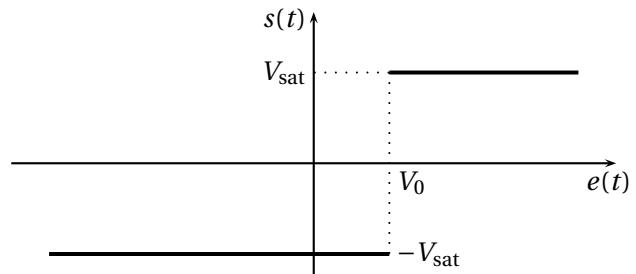
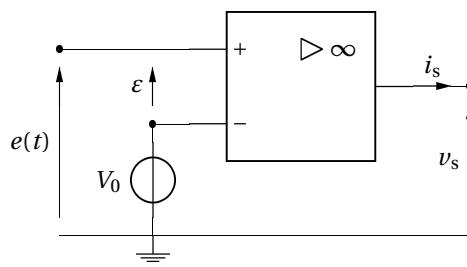
Fonction de transfert $\underline{H}(j\omega) = -\frac{1}{RC} \frac{1}{j\omega}$, soit

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

- Ce montage est instable avec le modèle de l'ALI idéal (saturation pour $\omega \rightarrow 0$).

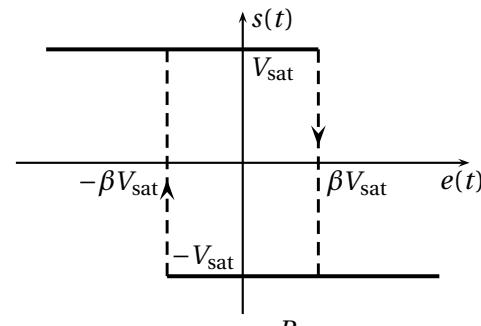
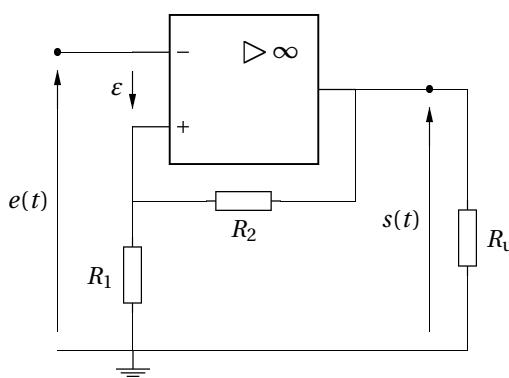
ALI en régime de saturation

Comparateur simple



- Sensibilité de la bascule si $e(t) \approx V_0$.
- Ce montage n'est pas linéaire.

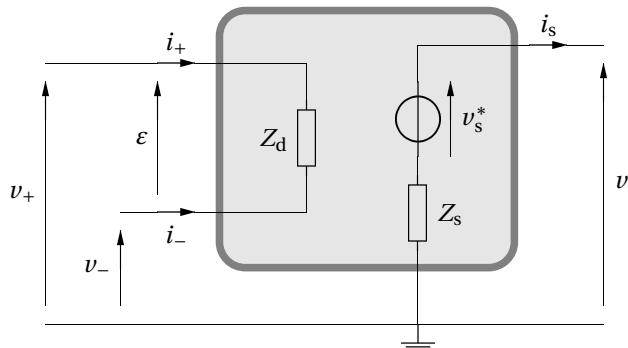
Comparateur à hystérésis inverseur



On pose $\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{\text{sat}}$.

- Le système n'est pas sensible aux fluctuations de $e(t)$ dans l'intervalle $[-\beta V_{\text{sat}}, \beta V_{\text{sat}}]$.
- Ce montage n'est pas linéaire.
- Dans la zone $\beta V_{\text{sat}} < e(t) < \beta V_{\text{sat}}$, les deux valeurs $-V_{\text{sat}}$ et $+V_{\text{sat}}$ sont possibles pour $s(t)$. C'est l'état antérieur du système qui détermine la valeur prise par $s(t)$: le système présente un **phénomène d'hystérésis**¹.

Données sur l'ALI réel



Grandeur	ALI réel	ALI idéal
gain différentiel statique	$A_0 \approx 2 \times 10^5$	∞
fréquence de coupure	$f_0 \approx 20 \text{ Hz}$	\times
résistance d'entrée différentielle	$R_e \approx 10^6 \Omega \text{ à } 10^{12} \Omega$	∞
résistance de sortie	$R_s \approx 100 \Omega$	0
vitesse de balayage en sortie (<i>slew rate</i>)	$\sigma = 16 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	\times

1. Le phénomène d'hystérésis est la persistance d'un effet quand sa cause a disparu.