Électronique – Chapitre 2

Rétroaction d'un amplificateur linéaire intégré

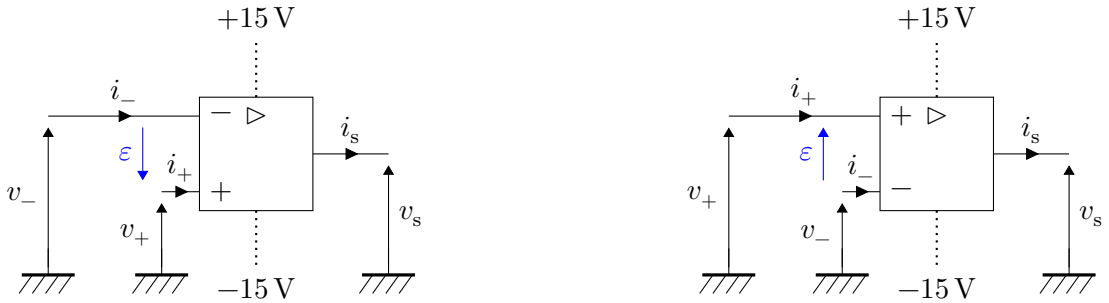
I. Amplificateur linéaire intégré . . . 1
I.1. Description du composant . . . 1
I.2. Régimes de fonctionnement statique . . . 2
I.3. Comportement dynamique en régime linéaire . . . 3
I.4. Modèle de l'ALI idéal . . . 3
I.5. Rétroaction . . . 4
II. Montages à ALI en régime linéaire . . . 4
II.1. Étude du montage amplificateur non-inverseur . . . 4
II.2. Étude du montage suiveur . . . 5
II.3. Étude du montage amplificateur inverseur . . . 5
II.4. Étude du montage intégrateur . . . 5
III. Montages à ALI en régime saturé . . . 6
III.1. Étude du montage comparateur simple . . . 6
III.2. Étude du montage comparateur à hystérésis non-inverseur . . . 6
III.3. Vitesse limite de balayage . . . 8

I. Amplificateur linéaire intégré

I.1. Description du composant

L'amplification de signaux électroniques a connu de grandes avancées à partir de la seconde moitié du XX^{e} siècle grâce au développement de l'**amplificateur linéaire intégré** (ALI), aussi appelé **amplificateur opérationnel** (AO).

Le schéma électrique d'un ALI peut être représenté sous deux formes, en fonction de la position des branches :



On appelle :

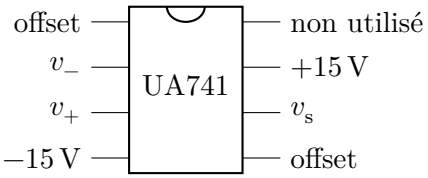
- v_+ le **potentiel de l'entrée non-inverseuse** ;
- v_- le **potentiel de l'entrée inverseuse** ;
- v_s le **potentiel de la sortie** ;
- i_+ et i_- les **courants de polarisation** ;
- i_s le **courant de sortie**.

La différence de potentiel entre les deux entrées est :

$$\varepsilon = v_+ - v_-$$

L'alimentation électrique $+15\,\text{V}/-15\,\text{V}$ d'un ALI est indispensable à son fonctionnement, mais on ne la représentera plus par la suite pour éviter de surcharger son schéma électrique.

En pratique, un ALI se présente généralement sous la forme d'une puce à huit branches, comme par exemple le UA741 représenté ci-contre. Il est constitué de nombreux transistors, réalisés à partir de matériaux semi-conducteurs.



I.2. Régimes de fonctionnement statique

Dans le cas statique, c'est-à-dire lorsque toutes les tensions sont constantes au cours du temps, un ALI présente deux régimes de fonctionnement : le régime linéaire et le régime saturé.

Régime linéaire

En **régime linéaire**, un ALI amplifie la différence de potentiel ε en délivrant une tension en sortie :

$$\boxed{v_\mathrm{s} = \mu_0\,\varepsilon}$$

avec $\mu_0 \sim 10^5$ le **gain différentiel** de l'ALI.

Cette tension en sortie ne peut cependant pas dépasser une certaine valeur V_sat, appelée **tension de saturation**, qui est légèrement inférieure à la tension d'alimentation de l'ALI ($V_\mathrm{sat} \approx 13\,\mathrm{V}$ en pratique). Le régime linéaire n'est donc observé que si $|v_\mathrm{s}| < V_\mathrm{sat}$, soit :

$$|\varepsilon| < \frac{V_\mathrm{sat}}{\mu_0}.$$

Régime saturé

Lorsque $\varepsilon > \dfrac{V_\mathrm{sat}}{\mu_0}$, un ALI présente un **régime saturé**, il délivre alors une tension en sortie :

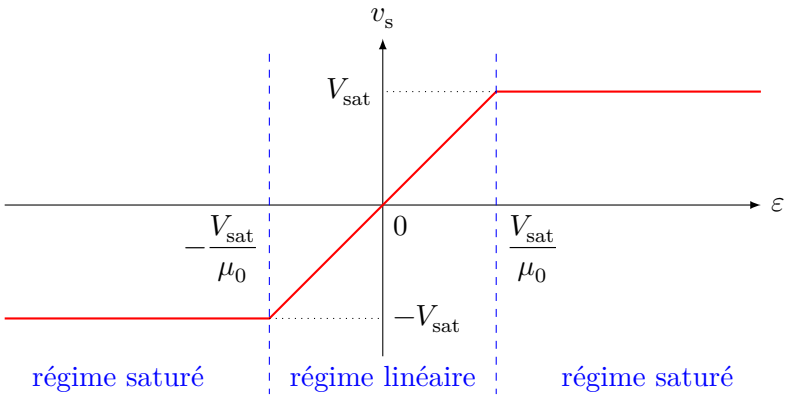
$$v_\mathrm{s} = +V_\mathrm{sat}.$$

Lorsque $\varepsilon < -\dfrac{V_\mathrm{sat}}{\mu_0}$, un ALI présente un **régime saturé**, il délivre alors une tension en sortie :

$$v_\mathrm{s} = -V_\mathrm{sat}.$$

Caractéristique statique

On peut représenter la **caractéristique statique** $v_\mathrm{s} = f(\varepsilon)$ d'un **ALI réel** :



I.3. Comportement dynamique en régime linéaire

Dans le cas dynamique, c'est-à-dire lorsque les tensions sont variables, on admet que les tensions ε et v_s sont reliées par une équation différentielle du premier ordre de la forme :

$$v_s + \tau \frac{\mathrm{d}v_s}{\mathrm{d}t} = \mu_0 \, \varepsilon$$

avec $\tau \approx 0{,}1\,\mathrm{s}$ le **temps de réponse** de l'ALI.

En régime sinusoïdal, cette équation différentielle donne en représentation complexe :

$$\underline{v_s} + \mathrm{j}\,\omega\,\tau\,\underline{v_s} = \mu_0\,\underline{\varepsilon}$$

d'où :

$$\underline{v_s} = \frac{\mu_0}{1 + \mathrm{j}\,\omega\,\tau}\,\underline{\varepsilon}$$

un ALI joue donc le rôle d'un **filtre passe-bas**.

Le modèle dynamique de l'ALI permet notamment d'étudier la stabilité d'un montage.

I.4. Modèle de l'ALI idéal

Un ALI réel présente les caractéristiques suivantes :

- le régime linéaire n'est obtenu que lorsque $|\varepsilon| < \dfrac{V_{\mathrm{sat}}}{\mu_0} \approx 10^{-4}\,\mathrm{V}$, soit pour $\varepsilon \approx 0\,\mathrm{V}$;
- les courants de polarisation i_+ et i_- sont très faibles, de l'ordre de $10^{-11}\,\mathrm{A}$, à cause de la présence d'une électrode isolante à chaque entrée ;
- les impédances d'entrées $Z_+ = \dfrac{v_+}{i_+}$ et $Z_- = \dfrac{v_-}{i_-}$ sont très grandes, de l'ordre de $10^{12}\,\Omega$;
- le courant de sortie i_s est limité à une valeur maximale de l'ordre de $20\,\mathrm{mA}$;
- l'impédance de sortie $Z_s = \dfrac{v_s}{i_s}$ est faible, de l'ordre de $10^2\,\Omega$.

Pour simplifier l'étude de la plupart des montages, on peut considérer que l'ALI est **idéal**, il présente alors les caractéristiques suivantes :

- son gain différentiel est **infini** :

  $$\boxed{\mu_0 \to +\infty}$$

  le régime linéaire n'est donc obtenu que pour $\varepsilon = 0$;
- les courants de polarisations sont **nuls** :

  $$\boxed{i_+ = i_- = 0}$$

- les impédances d'entrées sont **infinies** :

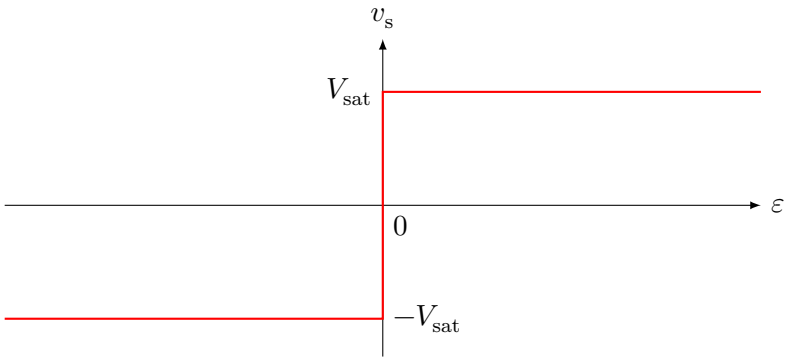
  $$\boxed{Z_+ = Z_- = \infty}$$

- l'impédance de sortie est **nulle** :

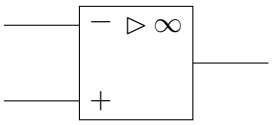
  $$\boxed{Z_s = 0}$$

  l'ALI est donc équivalent à une source idéale de tension.

On peut représenter la **caractéristique statique** $v_s = f(\varepsilon)$ d'un **ALI idéal** :



Pour préciser qu'un ALI est supposé idéal, on rajoute le symbole ∞ sur son schéma électrique, comme représenté ci-contre.



I.5. Rétroaction

Un ALI présente une **rétroaction** si sa sortie est reliée électriquement à l'une de ses entrées.

Une rétroaction a un effet sur la stabilité du montage, et donc sur le régime de fonctionnement de l'ALI. On admet alors les résultats suivants :

- si un ALI présente uniquement une **rétroaction sur son entrée inverseuse**, il fonctionne en **régime linéaire** ;
- si un ALI présente uniquement une **rétroaction sur son entrée non-inverseuse**, il fonctionne en **régime saturé** ;
- si un ALI ne présente **pas de rétroaction**, il fonctionne en **régime saturé** ;
- si un ALI présente une **rétroaction sur ses deux entrées**, on ne peut pas prévoir son régime de fonctionnement, il faut **étudier séparément les deux cas**.

II. Montages à ALI en régime linéaire

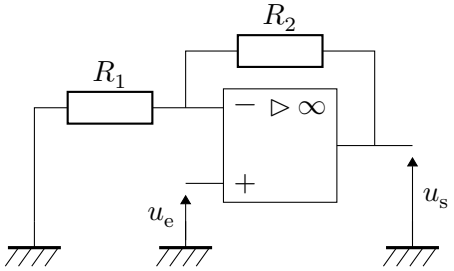
Un montage à ALI est qualifié de :

- **non-inverseur** si une tension d'entrée u_e est reliée à l'entrée non-inverseuse de l'ALI ;
- **inverseur** si une tension d'entrée u_e est reliée à l'entrée inverseuse de l'ALI.

Attention à ne pas confondre ces qualificatifs avec la rétroaction que présente l'ALI.

II.1. Étude du montage amplificateur non-inverseur

Le montage amplificateur non-inverseur est représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.



Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire, d'où :

$$\varepsilon = 0$$

et on en déduit que :

$$v_- = v_+ = u_e.$$

Comme $i_- = 0$, le pont diviseur de tension donne :

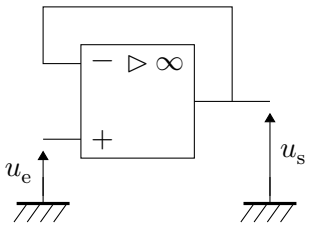
$$v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2}\, u_\mathrm{s}.$$

On en déduit alors le gain du montage amplificateur non-inverseur :

$$G = \frac{u_\mathrm{s}}{u_\mathrm{e}} = \frac{u_\mathrm{s}}{v_-} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}.$$

II.2. Étude du montage suiveur

Le montage suiveur est représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.



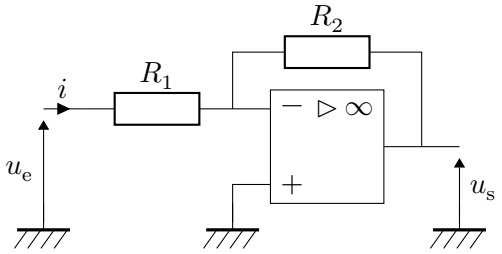
Application :

Exprimons la tension u_s en fonction de la tension u_e.
Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire, d'où : $\varepsilon = 0$, et on en déduit que : $u_\mathrm{s} = v_- = v_+ = u_\mathrm{e}$.

Ce montage est notamment utilisé pour obtenir une impédance de sortie nulle ou une impédance d'entrée infinie.

II.3. Étude du montage amplificateur inverseur

Le montage amplificateur inverseur est représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.

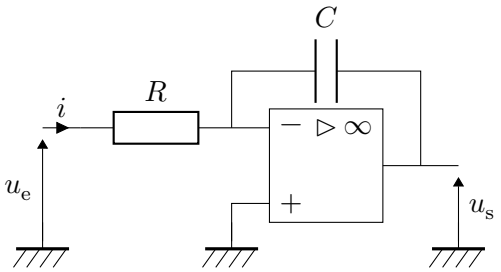


Application :

Exprimons la tension u_s en fonction de la tension u_e.
Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire, d'où : $\varepsilon = 0$, et on en déduit que : $v_- = v_+ = 0$.
Comme $i_- = 0$, on a : $u_\mathrm{e} = R_1\, i$ et $u_\mathrm{s} = -R_2\, i$, d'où finalement : $u_\mathrm{s} = -\dfrac{R_2}{R_1}\, u_\mathrm{e}$.

II.4. Étude du montage intégrateur

Le montage intégrateur est représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.



Application :

Exprimons la tension u_s en fonction de la tension u_e.

Comme la rétroaction est sur l'entrée inverseuse, l'ALI fonctionne en régime linéaire, d'où : $\varepsilon = 0$, et on en déduit que : $v_- = v_+ = 0$.

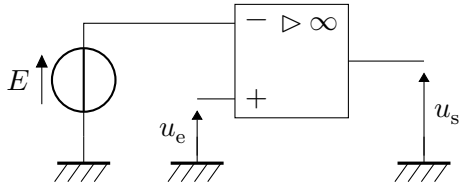
Comme $i_- = 0$, on a : $u_e = R\,i$ et $i = -C\,\dfrac{\mathrm{d}u_s}{\mathrm{d}t}$, d'où finalement : $u_s = -\dfrac{1}{RC}\displaystyle\int u_e\,\mathrm{d}t$.

Le montage est qualifié d'« intégrateur » comme la tension en sortie est proportionnelle à l'intégrale de la tension en entrée.

III. Montages à ALI en régime saturé

III.1. Étude du montage comparateur simple

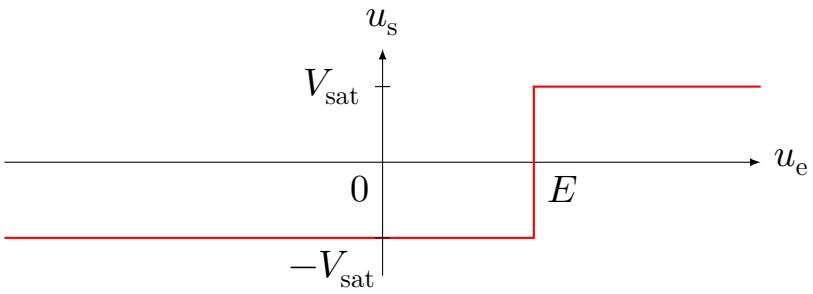
Pour comparer la valeur instantanée d'une tension u_e à une tension de référence E, on peut utiliser le montage comparateur simple représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.



Comme il n'y a pas de rétroaction, l'ALI fonctionne en régime saturé :

- si $u_e > E$, alors $\varepsilon = v_+ - v_- = u_e - E > 0$, d'où : $u_s = +V_{sat}$;
- si $u_e < E$, alors $\varepsilon = v_+ - v_- = u_e - E < 0$, d'où : $u_s = -V_{sat}$.

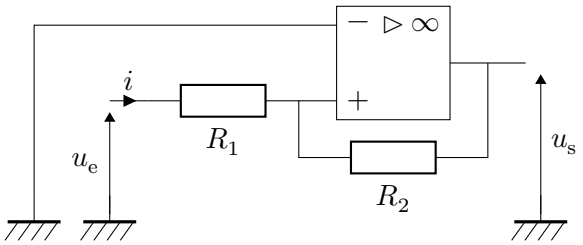
On représente la caractéristique $u_s = f(u_e)$ du montage :



III.2. Étude du montage comparateur à hystérésis non-inverseur

Si la tension $u_e(t)$ à comparer varie autour de la tension de référence E, il peut être préférable d'utiliser un comparateur à deux seuils, appelé comparateur à hystérésis.

Le montage comparateur à hystérésis non-inverseur est représenté ci-dessous, où on suppose que l'ALI est idéal.



La loi d'Ohm donne :

$$i = \frac{u_e - v_+}{R_1} = \frac{v_+ - u_s}{R_2}$$

d'où le potentiel de l'entrée non-inverseuse :

$$v_+ = \frac{R_1\, u_s + R_2\, u_e}{R_1 + R_2}$$

et comme $v_- = 0$, on exprime la différence de potentiel :

$$\varepsilon = v_+ - v_- = \frac{R_1\, u_s + R_2\, u_e}{R_1 + R_2}.$$

Comme il y a rétroaction sur l'entrée non-inverseuse, l'ALI fonctionne en régime saturé, soit : $u_s = \pm V_{sat}$, et il faut étudier séparément les deux cas :

- Lorsque $u_s = +V_{sat}$, on obtient :

$$\varepsilon = \frac{R_1\, V_{sat} + R_2\, u_e}{R_1 + R_2}$$

  - si $u_e > -\dfrac{R_1}{R_2}\, V_{sat}$, alors $\varepsilon > 0$, la tension en sortie reste $u_s = +V_{sat}$;
  - si $u_e < -\dfrac{R_1}{R_2}\, V_{sat}$, alors $\varepsilon < 0$, la tension en sortie passe à $u_s = -V_{sat}$, il y a **commutation** (aussi appelé **basculement**) de l'ALI à partir de la **tension seuil** :

$$E_- = -\frac{R_1}{R_2}\, V_{sat}.$$

- Lorsque $u_s = -V_{sat}$, on obtient :

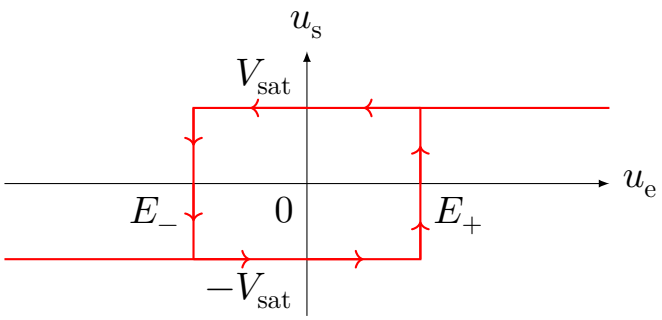
$$\varepsilon = \frac{-R_1\, V_{sat} + R_2\, u_e}{R_1 + R_2}$$

  - si $u_e < \dfrac{R_1}{R_2}\, V_{sat}$, alors $\varepsilon < 0$, la tension en sortie reste $u_s = -V_{sat}$;
  - si $u_e > \dfrac{R_1}{R_2}\, V_{sat}$, alors $\varepsilon > 0$, la tension en sortie passe à $u_s = +V_{sat}$, il y a **commutation** (aussi appelé **basculement**) de l'ALI à partir de la **tension seuil** :

$$E_+ = \frac{R_1}{R_2}\, V_{sat}.$$

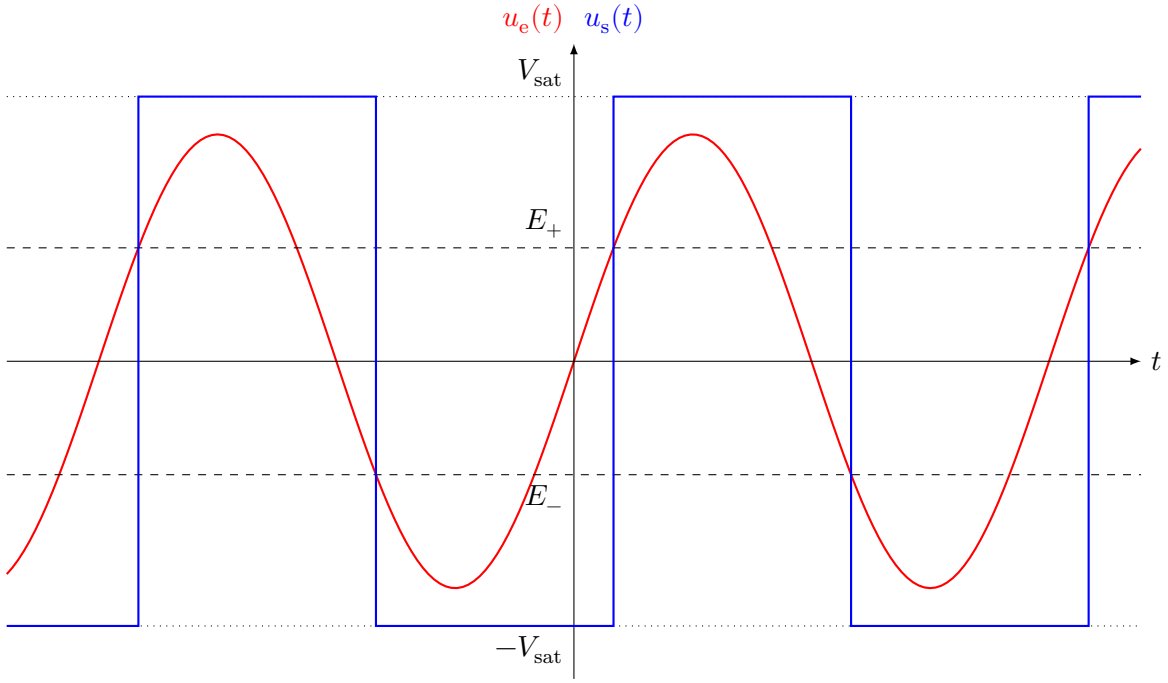
La caractéristique $u_s = f(u_e)$ du montage présente donc un hystérésis :

- si $u_e < E_-$, alors $u_s = -V_{sat}$;
- si $E_- < u_e < E_+$, alors $u_s = \pm V_{sat}$ en fonction de l'état antérieur du système ;
- si $u_e > E_+$, alors $u_s = +V_{sat}$.



Application :

Représentons la tension en sortie $u_s(t)$ pour une tension d'entrée $u_e(t)$ sinusoïdale.



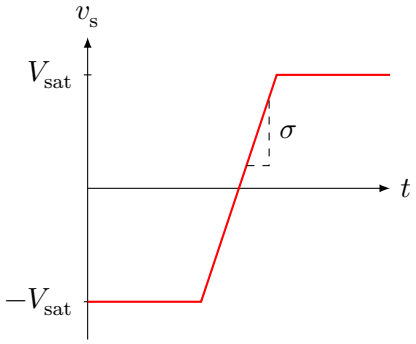
On remarque que la saturation de l'ALI engendre la génération d'harmoniques dans le spectre puisque la tension en sortie est un créneau, et non plus une tension sinusoïdale comme en entrée.

III.3. Vitesse limite de balayage

Lors de la commutation d'un ALI idéal, on suppose que la tension en sortie de l'ALI passe instantanément de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$ (ou de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$).

En pratique, les variations de la tension en sortie d'un ALI réel sont limitées par une **vitesse limite de balayage**, aussi appelé *slew rate*, définie comme la pente maximale de la tension de sortie v_s en fonction du temps :

$$\sigma = \max \left| \frac{\mathrm{d}v_s}{\mathrm{d}t} \right|.$$



Pour les ALI utilisés en TP, on a typiquement : $\sigma \sim 1\,\mathrm{V/\mu s}$.