

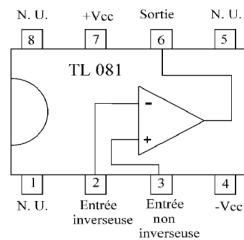
Nous allons étudier dans ce chapitre des montages comportant une rétroaction, essentiellement à travers des montages utilisant l'amplificateur linéaire intégré (ALI dans la suite). Nous commencerons donc par présenter ce composant avant d'étudier les montages qui utilisent ses propriétés.

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

I Amplificateur linéaire intégré

I.1 Aspect du composant

L'ALI est un composant comportant 8 bornes ressemblant généralement au schéma ci dessous :

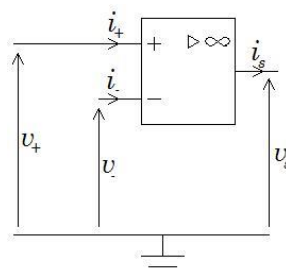


Les bornes ont les fonctions suivantes :

- les bornes 7 et 4 ($+V_{cc}$ et $-V_{cc}$) servent à alimenter l'ALI avec des tensions continues, en général de valeurs $+15$ et -15 V. Toute utilisation de l'ALI dans un montage **doit** être précédée du branchement de ces deux bornes et de la mise sous tension de l'alimentation continue,
- les deux bornes 2 et 3 (- et +) sont les entrées non inverseuse et inverseuse,
- la borne 6 est la borne de sortie,
- les bornes 1 et 5 servent à corriger des défauts de l'ALI réel, que nous n'utiliserons pas,
- la borne 8 n'est pas utilisée.

I.2 Représentation du composant

Pour simplifier, l'ALI est schématisé de la manière suivante, en ne représentant que les bornes d'entrée et de sortie

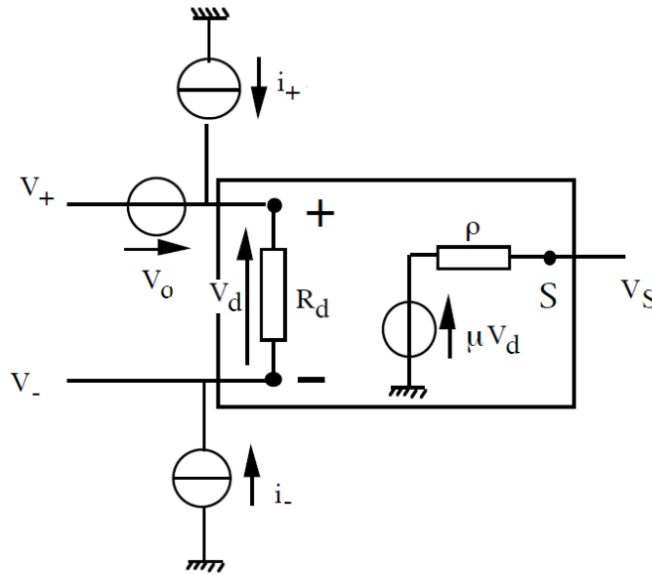


Dans cette représentation

- i_+ et i_- désignent les courants d'entrée,
- v_+ et v_- désignent les potentiels d'entrée,
- on note en général $v_d = \varepsilon = v_+ - v_-$,
- i_s et v_s désignent le courant et le potentiel de sortie.

I.3 Modèle général de l'ALI

En prenant en compte l'essentiel des écarts au modèle idéal que nous utiliserons plus loin, l'ALI peut être représenté ainsi



Dans la pratique, nous nous limiterons à un modèle possédant les hypothèses suivantes :

- la tension de décalage (ou offset) V_0 est nulle (quelques mV dans la réalité),
- Les courants d'entrée (dits de polarisation) sont nuls (ALI **idéal**) (de 10 pA à 100 nA dans la réalité),
- résistance de sortie ρ nulle (de l'ordre de 100 Ω dans la réalité),
- résistance d'entrée infinie ($10^5 \Omega$ au minimum, souvent 10^{12} dans la réalité).

Pour finir, la vitesse de variation de la tension de sortie est limitée. On parle de **vitesse de balayage** σ pour la vitesse limite, elle est de l'ordre de $0,7 V \cdot \mu s^{-1}$ dans l'ALI réel.

On prendra donc garde à ne pas oublier que ces hypothèses sont valides dans un certain domaine de fonctionnement, et que sortir du domaine de fonctionnement risque de créer des soucis expérimentaux.

I.4 Modes de fonctionnement

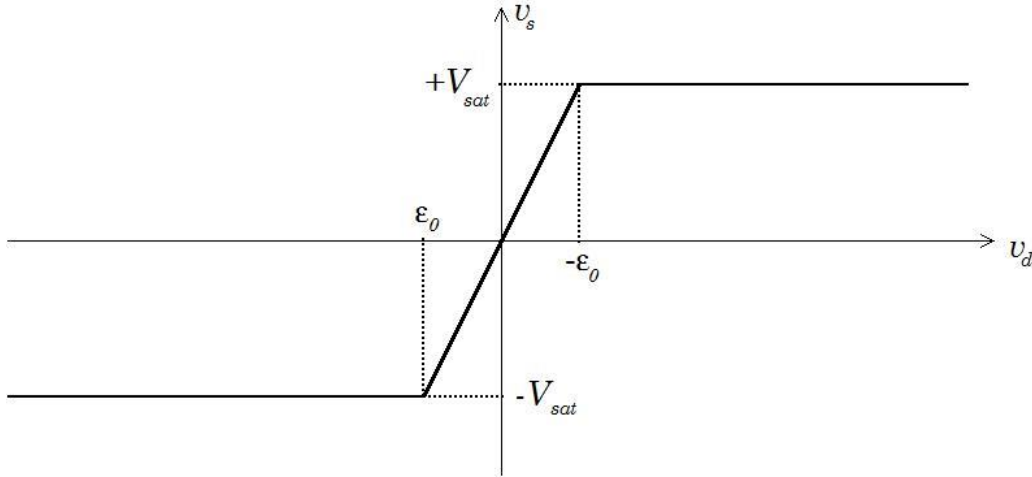
Dans la pratique, l'ALI peut passer en saturation :

- la tension de sortie ne doit pas dépasser en valeur absolue une valeur caractéristique de l'ALI et de son alimentation, appelée **tension de saturation** V_{sat} , qui est en général légèrement inférieure à la tension d'alimentation de l'ALI,
- le courant de sortie est limité en valeur absolue par le courant de saturation, en pratique de l'ordre de 20 mA.

Compte tenu de ces limites, on observe deux régimes de fonctionnement pour l'ALI

- le régime linéaire pour lequel $-V_{sat} < v_s < +V_{sat}$,
- le régime saturé pour lequel $v_s = \pm V_{sat}$.

La caractéristique (v_s en fonction de v_d) de l'ALI est représentée ci dessous



- si $v_d \leq -\varepsilon_0$, alors $v_s = -V_{sat}$: l'ALI est en saturation basse,
- si $v_d \geq \varepsilon_0$, alors $v_s = V_{sat}$: l'ALI est en saturation haute,
- si $-\varepsilon_0 < v_d < \varepsilon_0$, alors $v_s = \mu v_d$: l'ALI est en fonctionnement linéaire.

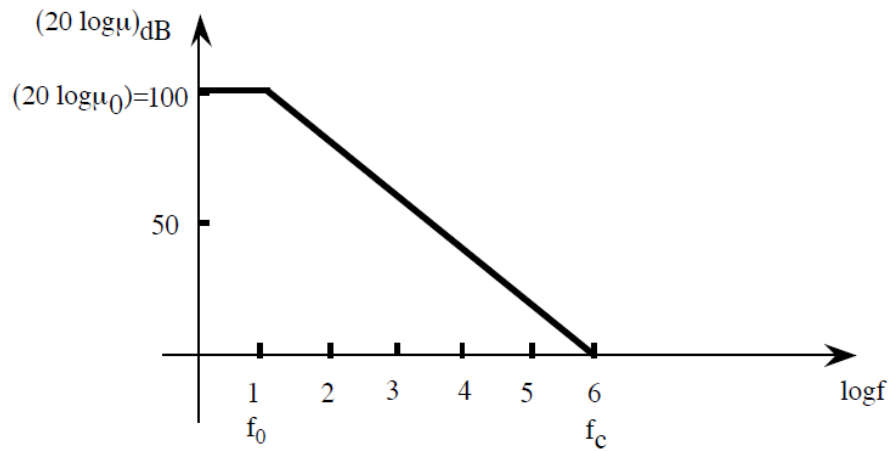
II Modélisation du comportement de l'ALI

II.1 Fonctionnement en régime linéaire

Dans le cadre du modèle vu précédemment, il reste une caractéristique importante à l'ALI : la dépendance du gain μ en fonction de la fréquence. Cette caractéristique est imposée dans les ALI que nous utilisons afin de garantir la stabilité des montages les utilisant. On modélise cette caractéristique par un système du premier ordre, c'est à dire que l'on considère l'ALI comme un filtre passe bas du premier ordre de gain statique élevé :

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

où dans la pratique $\mu_0 \approx 10^5$ et $f_0 \approx 10 \text{ Hz}$.



On peut alors écrire la relation entre v_d et v_s

$$v_s = \mu v_d = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} v_d$$

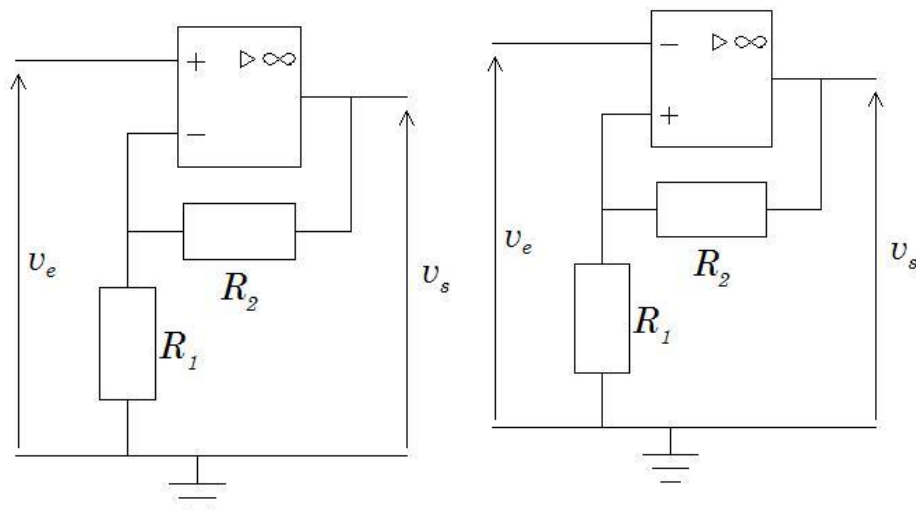
ce qui donne en revenant dans le domaine temporel

$$v_s + \frac{1}{\omega_0} \frac{dv_s}{dt} = \mu_0 v_d$$

On pose $\tau = \frac{1}{\omega_0}$ le temps de réponse, qui est de l'ordre de 10 ms.

II.2 Stabilité

Nous allons étudier la stabilité des montages comportant des ALI sur deux montages identiques à l'exception de l'inversion des deux bornes d'entrée.



II.2.1 Montage amplificateur non inverseur

Le montage est celui de gauche. On se place en régime sinusoïdal forcé et on cherche à déterminer la relation entre $\underline{v}_s$ et $\underline{v}_e$. Notons que $\underline{v}_+ = \underline{v}_e$. Par ailleurs, $\underline{i}_- = 0$ donc les deux résistances sont placées en série. On reconnait donc un montage diviseur de tension

$$\underline{v}_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{v}_s$$

De plus, $\underline{v}_s = \mu \underline{v}_d = \mu(\underline{v}_+ - \underline{v}_-)$ soit

$$\underline{v}_s = \mu \left(\underline{v}_e - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{v}_s \right) \Rightarrow \underline{v}_s \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu \right) = \mu \underline{v}_e$$

Finalement en exprimant le caractère passe bas du gain de l'ALI

$$\underline{v}_s \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \right) = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \underline{v}_e$$

et donc

$$\underline{v}_s = \frac{\mu_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \right)} \underline{v}_e$$

que l'on remet en forme

$$\underline{v}_s = \frac{\mu_0}{\left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu_0 \right) + j \frac{\omega}{\omega_0}} \underline{v}_e = \frac{\mu_0}{\left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu_0 \right)} \frac{1}{1 + j \omega \frac{1}{\omega_0 \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu_0 \right)}}$$

On reconnait l'expression générale d'un filtre passe bas du premier ordre, stable puisque les coefficients du dénominateur sont tous de même signe. Le gain statique de ce système vaut

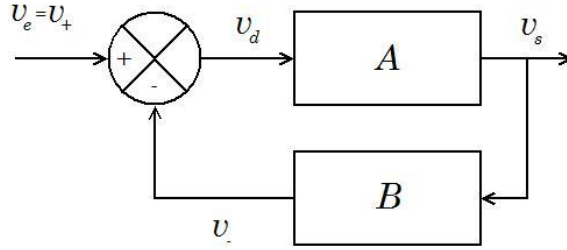
$$H_0 = \frac{\mu_0}{(1 + B\mu_0)}$$

où $B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$ et la fréquence de coupure vaut

$$\omega_c = \omega_0 (1 + B\mu_0)$$

On constate que le produit gain statique $\times$ bande passante est une constante qui est égale au produit $\mu_0 \omega_0$ qui est le produit gain statique $\times$ bande passante de l'ALI seul. Cette propriété est une propriété générale des systèmes bouclés.

Le montage peut être représenté sous forme de schéma bloc



avec

$$A = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \quad \text{et} \quad B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

II.2.2 Comparateur à hystérésis (inverseur)

Le montage est celui de droite. On se place en régime sinusoïdal for  c   et on cherche à déterminer la relation entre $\underline{v}_s$ et $\underline{v}_e$. Notons que $\underline{v}_- = \underline{v}_e$. Par ailleurs, $\underline{i}_+ = 0$ donc les deux résistances sont placées en série. On reconnait donc un montage diviseur de tension

$$\underline{v}_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{v}_s$$

De plus, $\underline{v}_s = \mu \underline{v}_d = \mu(\underline{v}_+ - \underline{v}_-)$ soit

$$\underline{v}_s = \mu \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \underline{v}_s - \underline{v}_e \right) \Rightarrow \underline{v}_s \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu \right) = -\mu \underline{v}_e$$

Finalement en exprimant le caractère passe bas du gain de l'ALI

$$\underline{v}_s \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \right) = -\frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \underline{v}_e$$

et donc

$$\underline{v}_s = -\frac{\mu_0}{\left(1 + j \frac{\omega}{\omega_0} \right) \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \frac{\mu_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}} \right)} \underline{v}_e$$

que l'on remet en forme

$$\underline{v}_s = -\frac{\mu_0}{\left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu_0 \right) + j \frac{\omega}{\omega_0}} \underline{v}_e$$

Comme $\mu_0 \gg 1$, $1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \mu_0 < 0$ donc les coefficients du dénominateur ne sont pas de même signe : le montage n'est pas stable.

II.2.3 Conclusion

En général, une rétroaction sur la borne inverseuse stabilise le montage et permet donc un fonctionnement linéaire de l'ALI, alors qu'une rétroaction sur la borne non inverseuse ou une absence de rétroaction amène à une saturation de la sortie de l'ALI.

II.3 ALI idéal de gain infini

Pour un ALI idéal, $i_+ = i_- = 0$. En supposant par ailleurs que le gain μ est infini et indépendant de la fréquence, on impose les conditions suivantes

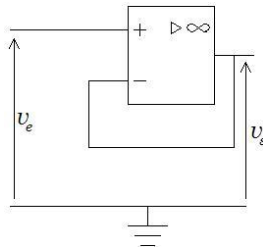
- en régime linéaire $v_+ = v_-$ (sinon v_s est infinie !),
- en régime saturé $v_s = \pm V_{sat}$.

Ce modèle est un modèle idéalisé et très simplifié du modèle d'ALI du premier ordre. Il permet cependant d'aborder correctement un certain nombre de montages, au moins du point de vue théorique.

III ALI idéal de gain infini en régime linéaire : exemples de montages

Dans la suite, nous considérerons qu'un ALI fonctionne en régime linéaire dès qu'il y a une rétroaction de la sortie vers l'entrée inverseuse, ce qui sera le cas dans les montages suivants.

III.1 Montage suiveur



L'ALI est en régime linéaire, donc $v_+ = v_-$, donc $v_s = v_- = v_e$, d'où le nom du montage. Son intérêt est une très grande impédance d'entrée et une très faible impédance de sortie.

III.2 Montage amplificateur non inverseur

C'est le montage vu précédemment, mais en utilisant le modèle de l'ALI idéal de gain infini. On a donc $v_+ = v_e$, $i_- = 0$, donc les deux résistances sont en série, ce qui permet de reconnaître un montage diviseur de tension

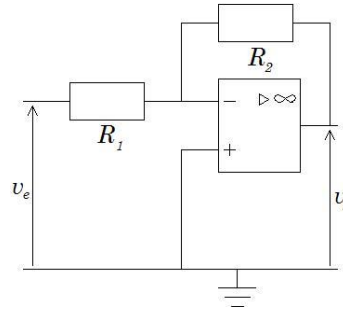
$$v_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_s$$

Or en régime linéaire $v_+ = v_-$ donc

$$v_s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) v_e$$

La résistance d'entrée du montage vaut par définition $R_e = \frac{v_e}{i_e}$ et est donc infinie dans ce modèle (courant de polarisation de l'ALI nul).

III.3 Montage amplificateur inverseur



La loi des noeuds à l'entrée inverseuse s'écrit $i_e = i_2 + i_-$. D'après la loi des mailles, $v_e - R_1 i_e - v_- = 0$ donc $i_e = \frac{v_e - v_-}{R_1}$.

De même, $v_s + R_2 i_2 - v_- = 0$ donc $i_2 = \frac{v_- - v_s}{R_2}$. Par ailleurs, $i_- = 0$, donc, comme $i_e = i_2$

$$\frac{v_e - v_-}{R_1} = \frac{v_- - v_s}{R_2}$$

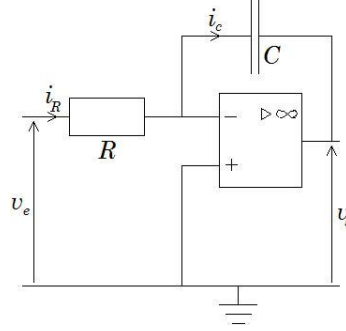
Enfin, en régime linéaire $v_+ = v_-$ et $v_+ = 0$, donc

$$\frac{v_e}{R_1} = -\frac{v_s}{R_2} \Rightarrow v_s = -\frac{R_2}{R_1} v_e$$

d'où le nom de montage inverseur.

La résistance d'entrée du montage vaut par définition $R_e = \frac{v_e}{i_e}$, ce qui donne ici $R_e = R_1$ qui est a priori peu élevée pour avoir une amplification élevée.

III.4 Montage intégrateur simpl(ist)e



L'ALI est en régime linéaire, donc $v_+ = v_-$. Comme $v_+ = 0$, alors $v_- = 0$ aussi. On a d'après la loi des mailles coté entrée $v_e - u_R = 0$ soit $v_e = Ri_R$ et coté sortie $v_s + u_C = 0$, soit $i_C = -C \frac{dv_s}{dt}$.

Comme l'amplificateur est supposé idéal, $i_- = 0$, donc d'après la loi des noeuds $i_R = i_C$ ce qui donne finalement $v_e = -RC \frac{dv_s}{dt}$ donc en intégrant pour obtenir v_s

$$v_s(t) - v_s(t_0) = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_e(t) dt$$

d'où le nom de montage intégrateur.

Pour une utilisation en régime sinusoïdal forcé, on utilise la notation complexe. Comme on est en régime linéaire, $v_+ = v_-$ et $v_+ = 0$, donc d'après la loi des mailles $\underline{v}_e - \underline{u}_R - v_- = 0$ et donc $\underline{v}_e = \underline{u}_R$. Par ailleurs, pour les mêmes raisons $\underline{v}_s + \underline{u}_C - v_- = 0$ donc $\underline{v}_s = -\underline{u}_C$. On reconnaît alors un pont diviseur de tension $\underline{u}_R = \frac{R}{R+Z_C}(\underline{u}_R + \underline{u}_C)$ soit

$$\underline{v}_e = \frac{R}{R+Z_C}(-\underline{v}_s + \underline{v}_e) \Rightarrow \underline{u}_e \left(1 - \frac{R}{R+Z_C}\right) = -\frac{R}{R+Z_C} \underline{v}_s$$

ce qui donne finalement

$$\underline{v}_s = -\underline{v}_e \frac{1 - \frac{R}{R+Z_C}}{\frac{R}{R+Z_C}} = -\underline{v}_e \frac{R+Z_C}{R} - 1 = -\underline{v}_e \frac{Z_C}{R} = -\frac{\underline{v}_e}{jCR\omega}$$

Remarque : Si le signal d'entrée comporte une composante continue, ce montage est en fait instable car $-\frac{1}{RC} \int_{t_0}^t v_e(t) dt \propto Kt$, donc la tension de sortie atteint très vite la tension de saturation.

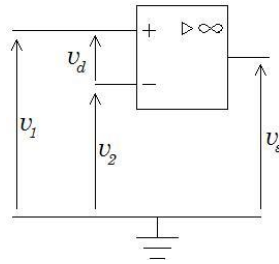
IV ALI idéal de gain infini en régime saturé : exemples

En l'absence de rétroaction sur l'entrée inverseuse, l'ALI est en régime saturé :

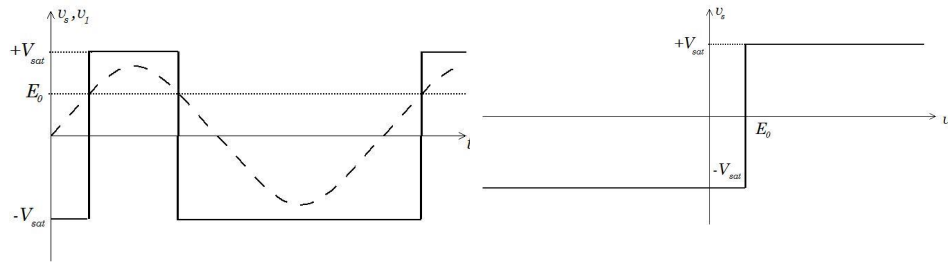
- $v_+ > v_-$, alors $v_s = V_{sat}$,
- $v_+ < v_-$, alors $v_s = -V_{sat}$.

IV.1 Comparateur simple

Le montage est le suivant



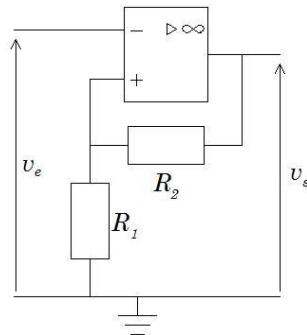
Pour illustrer le fonctionnement, on choisit une tension $v_1(t) = E_m \sin(\omega t)$ sinusoïdale et une tension $v_2(t) = E_0$ constante. On peut alors tracer la representation des tensions et la caractéristique entrée-sortie du montage



Le spectre du signal d'entrée ne comporte que le fondamental alors que le spectre du signal de sortie en créneau comporte des harmoniques d'ordres supérieurs. La non linéarité du montage a produit des harmoniques inexistantes dans le signal d'entrée.

IV.2 Comparateur à hystérésis

Le montage est présenté ci dessous



La rétroaction sur l'entrée positive assure la saturation. Nous allons déterminer les conditions assurant une saturation haute ou basse.

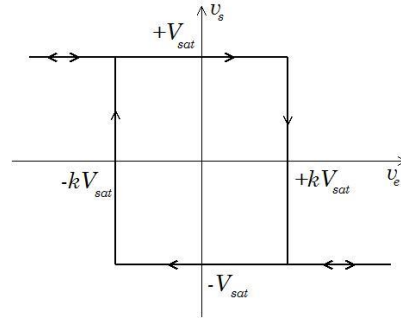
Saturation haute Dans ce cas, $v_s = +V_{sat}$ si $v_+ > v_-$. Or $v_- = v_e$. Par ailleurs, $i_+ = 0$, on reconnait un diviseur de tension $v_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2}v_s$, donc

$$v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{sat} > v_e$$

Saturation basse Dans ce cas, $v_s = -V_{sat}$ si $v_+ < v_-$. Or $v_- = v_e$. Par ailleurs, $i_+ = 0$, on reconnait un diviseur de tension $v_+ = \frac{R_1}{R_1+R_2}v_s$, donc

$$v_+ = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{sat} < v_e$$

Finalement, si la tension d'entrée est comprise entre ces deux valeurs, alors les deux   tats sont possibles, v_s dépend de la valeur antérieure qui persiste donc tant que les deux   tats sont possibles. On parle de fonction mémoire. On obtient la caractéristique suivante



Contents

I	Amplificateur linéaire intégré	2
I.1	Aspect du composant	2
I.2	Représentation du composant	2
I.3	Modèle général de l'ALI	3
I.4	Modes de fonctionnement	3
II	Modélisation du comportement de l'ALI	4
II.1	Fonctionnement en régime linéaire	4
II.2	Stabilité	5
II.2.1	Montage amplificateur non inverseur	6
II.2.2	Comparateur à hystérésis (inverseur)	7
II.2.3	Conclusion	8
II.3	ALI idéal de gain infini	8
III	ALI idéal de gain infini en régime linéaire : exemples de montages	8
III.1	Montage suiveur	8
III.2	Montage amplificateur non inverseur	8
III.3	Montage amplificateur inverseur	9
III.4	Montage intégrateur simpl(ist)e	10
IV	ALI idéal de gain infini en régime saturé : exemples	10
IV.1	Comparateur simple	11
IV.2	Comparateur à hystérésis	11