

Chapitre : 1.1 Rétroaction

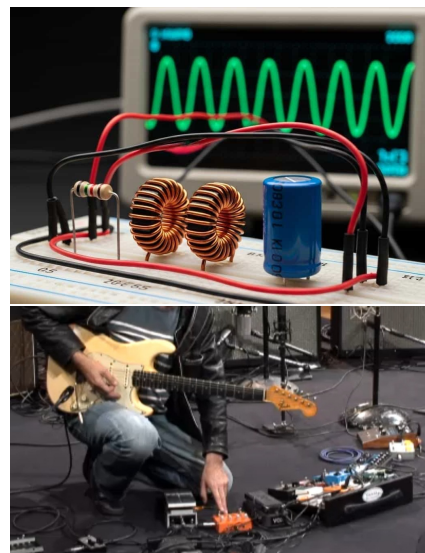
Partie : 1 Electronique

Mise en contexte

En TSI-1 vous avez appris à filtrer les signaux électriques à l'aide de circuits électriques composés de résistance, capacité, inductance.

Ces composants électriques sont dits passifs et linéaires, ils permettent de nombreuses applications de traitement de signal par filtrage linéaire, mais sont limités à un gain inférieur à 1 et à la sélection d'harmonique dans le spectre d'entrée.

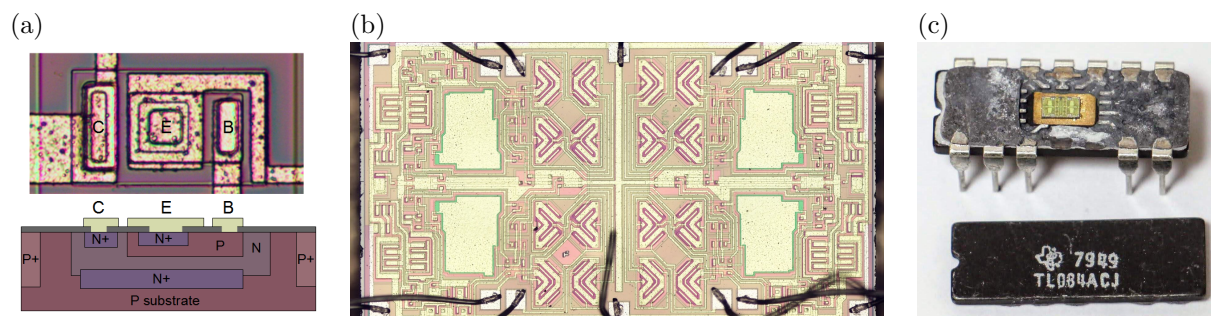
Pour étendre les possibilités de traitement de signal, nous allons étudier un composant actif : l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI). Historiquement il était utilisé pour faire des opérations (additions, soustractions ...) aujourd'hui il sert dans les instruments ou les circuits de commande au conditionnement du signal (amplification, déformation, effet de mémoire ...) ou à la compatibilité entre les différents modules.



1 Modélisation de l'Amplificateur Linéaire Intégré (ALI)

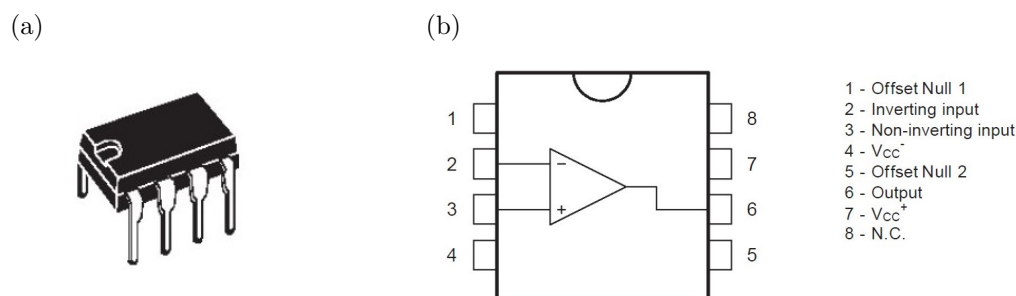
1.1 Présentation du circuit intégré

Les ALI se présentent aujourd'hui sous la forme de puces (ou circuits intégrés) comportant de nombreux composants miniaturisés sur un substrat de silicium.



Circuit intégré d'un ALI (a) Photographie d'un transistor, (b) Photographie d'une puce d'un ALI 741, (c) Photographie d'un boîtier d'un ALI TL084

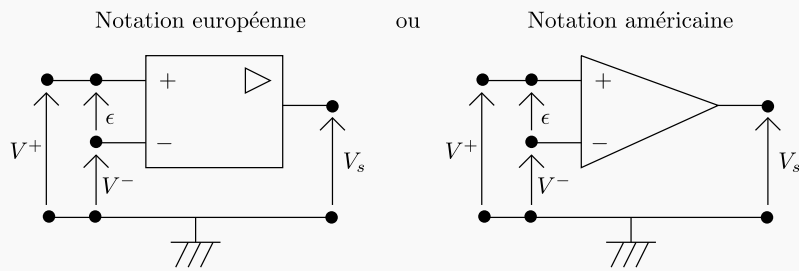
Nous n'allons pas étudier le fonctionnement interne de l'ALI, mais son fonctionnement global.



Brochage d'un ALI (a) Dessin du boîtier d'un ALI TL081, (b) Schéma du brochage correspondant.

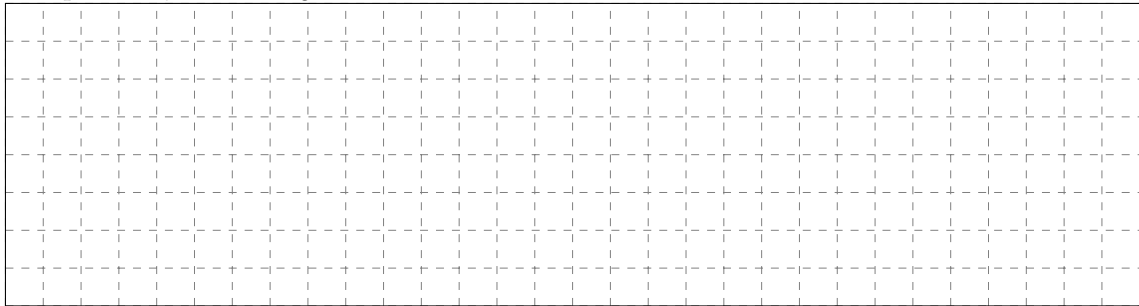
Définition 1 Amplificateur linéaire intégré (ALI)

Un amplificateur linéaire intégré, noté ALI, est un amplificateur différentiel à grand gain statique.



Sur ces schémas, V_s est la tension de sortie, V^+ est la tension de l'entrée non-inverseuse, V^- est la tension de l'entrée inverseuse, ϵ est la différence entre les deux entrées. Toutes s'expriment en Volts.

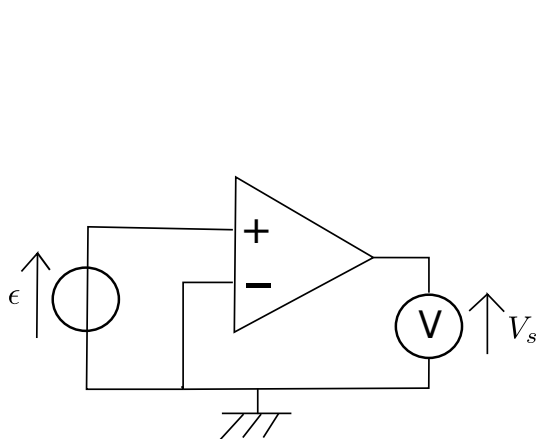
Remarques 1 *Quels brochages sont absents du schéma d'un ALI ?*



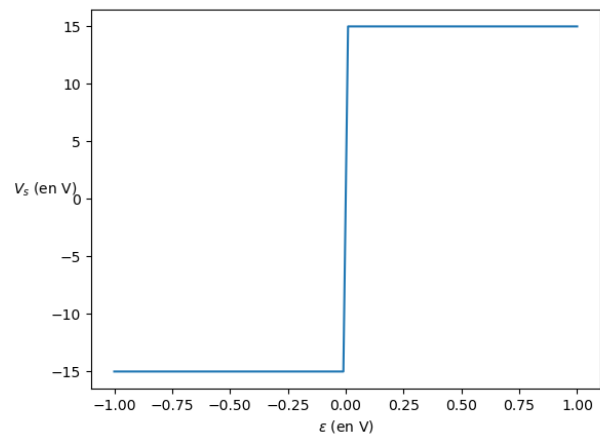
1.2 Modèle statique

En vue d'établir un modèle de l'ALI, mesurons la tension de sortie V_s en fonction de l'entrée différentielle $\epsilon = V^+ - V^-$. Nous nous plaçons dans le cas statique où toutes les tensions sont continues. Ainsi V_s est mesurée au voltmètre et ϵ est imposée par une source de tension continue.

(a)

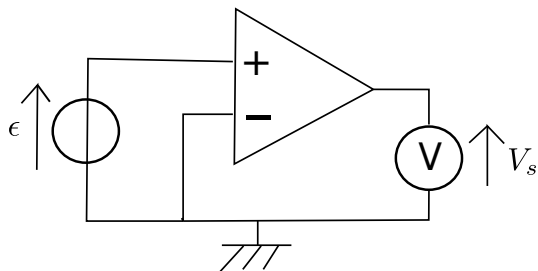


(b)

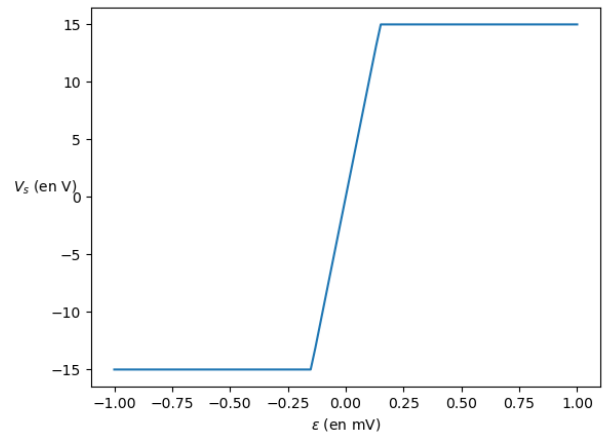


Visualisations des saturations d'un ALI (a) Schéma du montage pour mesurer le modèle statique de l'ALI, (b) Visualisation des saturations

(a)

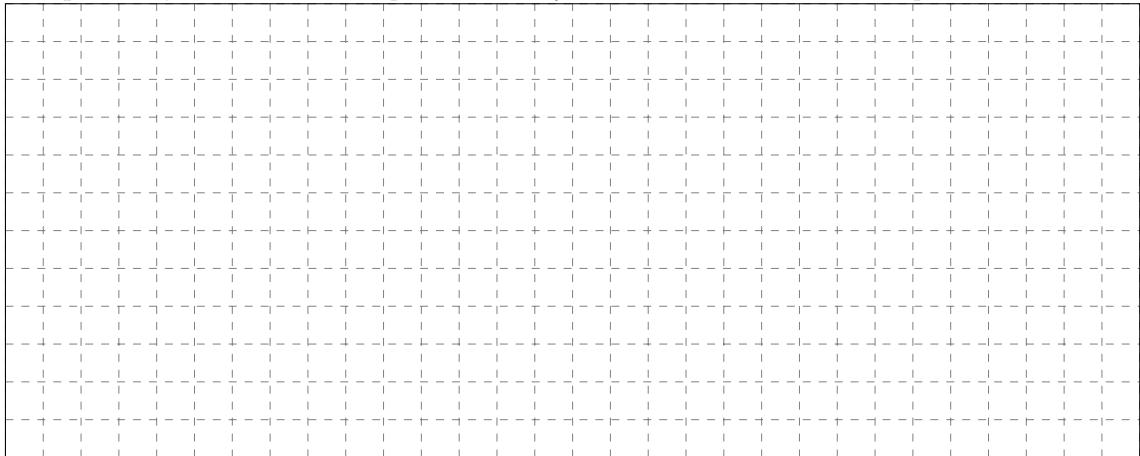


(b)



Visualisation du gain statique d'un ALI (a) Schéma du montage pour mesurer le modèle statique de l'ALI, (b) Visualisation du gain de l'ALI

Remarques 2 Quelle modélisation pouvons-nous faire de l'ALI dans le cas statique ?



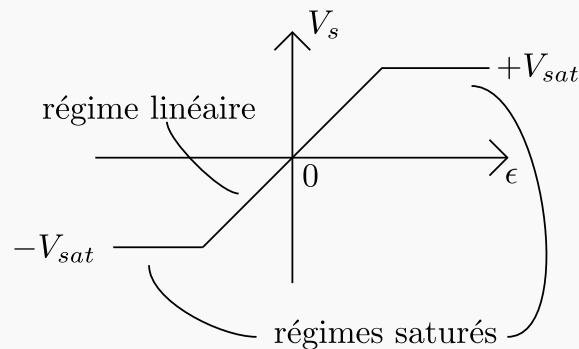
Définition 2 Régimes linéaire et saturé

Pour un ALI de paramètres ϵ (différence), A gain, V_s sortie, V_{sat} saturation, on appelle régime linéaire, la situation où :

$$|\epsilon| < \frac{V_{\text{sat}}}{A}, \quad |V_s| < V_{\text{sat}}, \quad \text{et} \quad V_s = A\epsilon$$

on appelle régime saturé, la situation où :

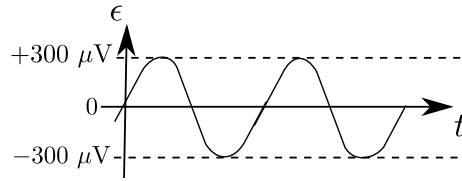
$$|\epsilon| > \frac{V_{\text{sat}}}{A}, \quad \text{et} \quad |V_s| = V_{\text{sat}}$$



Applications 1 Modèle statique de l'ALI

Q1. Estimez l'intervalle de valeurs de ϵ , où l'ALI est en régime linéaire.

Q2. Soit une différence de tension d'entrée ϵ , sinusoïdale de fréquence très faible (quasi-statique) et d'amplitude de $300 \mu\text{V}$,



tracez l'allure de la tension de sortie V_s

Q3. Repérez sur le graphique précédent les régimes linéaires et saturés.

1.3 Modèle dynamique en régime linéaire

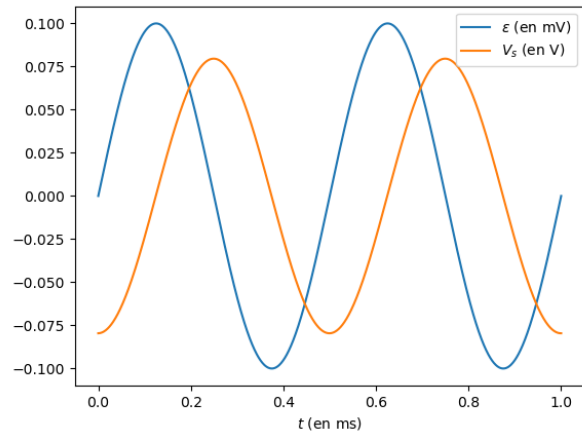
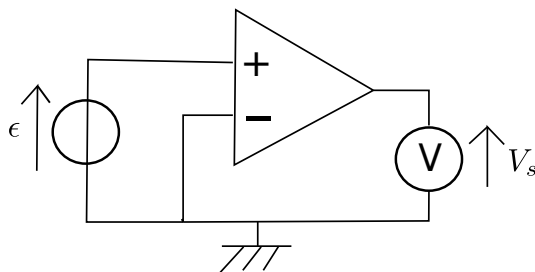
On suppose dans cette sous-section que l'ALI est toujours en régime linéaire et que l'entrée différentielle ϵ n'est plus statique (ou quasi-statique), mais un signal sinusoïdal de pulsation ω que nous pouvons noter :

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cos(\omega t + \phi_\epsilon)$$

Dans le cas dynamique l'entrée ϵ est cette fois-ci imposée par un GBF et la sortie V_s mesurée par un oscilloscope.

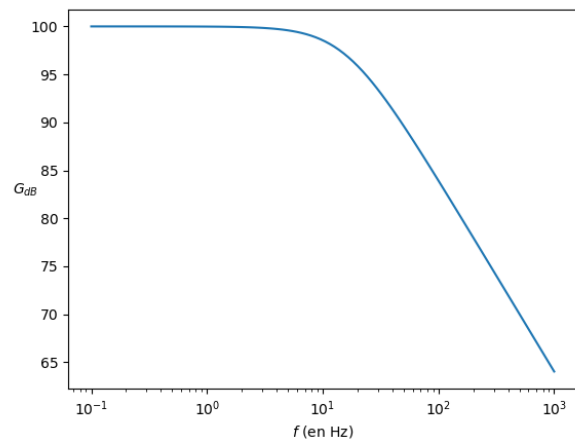
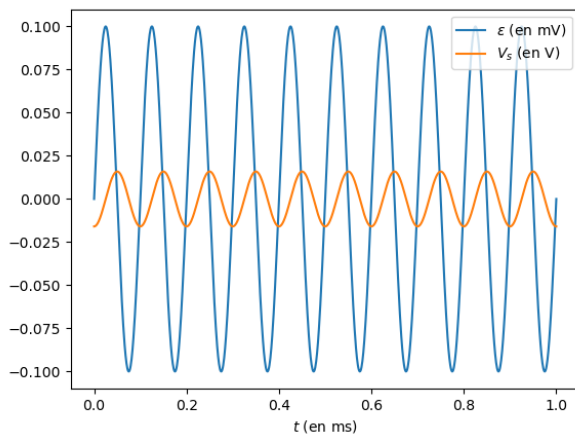
(a)

(b)



(c)

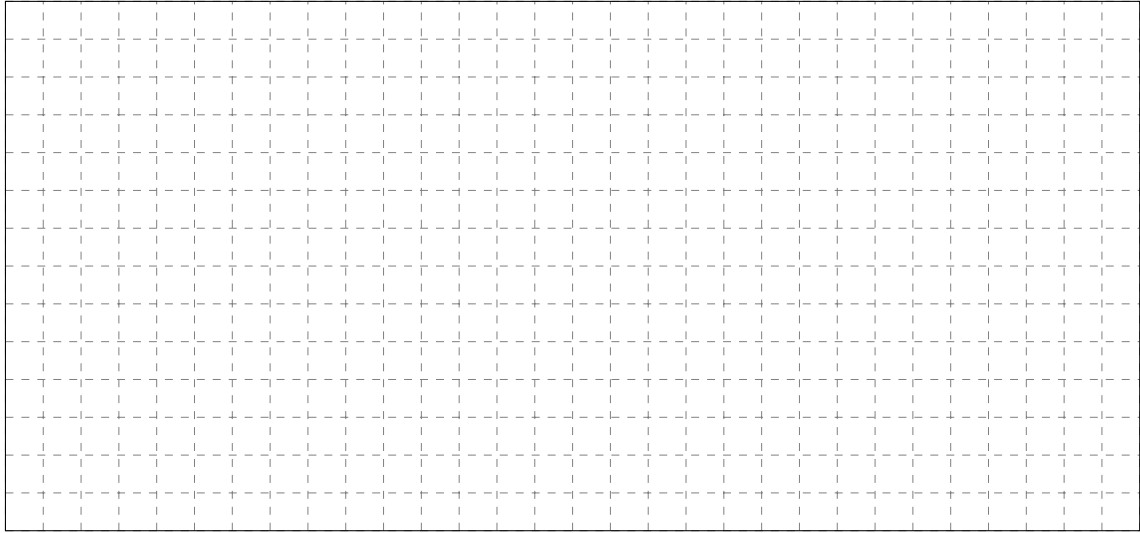
(d)



Visualisation du gain dynamique d'un ALI (a) Schéma du montage pour mesurer le gain dynamique de l'ALI, (b) Signaux à une fréquence de 2 kHz, (c) Signaux à une fréquence de 10 kHz, (d)

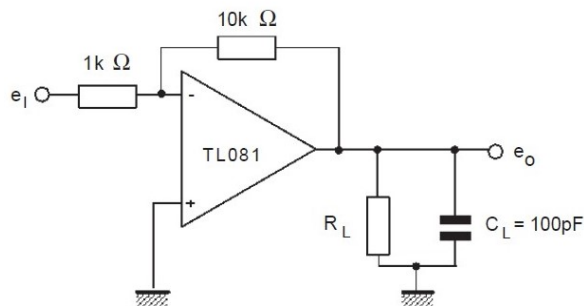
$$\text{Diagramme de Bode en gain } G_{dB} = 20 \log \left(\left| \frac{V_s}{\epsilon} \right| \right)$$

Remarques 3 Quelle modélisation pouvons-nous faire de l'ALI dans le cas dynamique ?



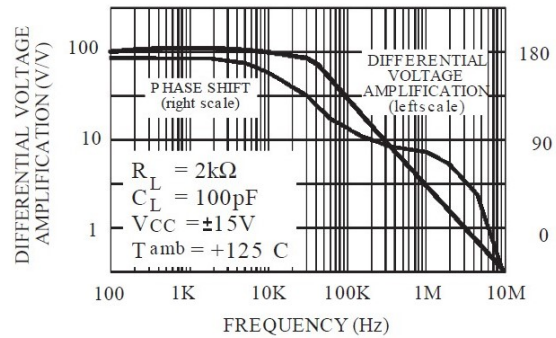
Dans un montage comportant un ALI, le modèle dynamique de l'ALI est à prendre en compte à partir des hautes fréquences, par exemple sur le montage amplificateur ci-dessous on voit une différence entre les cas statique et dynamique à partir de 100 kHz.

(a)



(b)

LARGE SIGNAL DIFFERENTIAL VOLTAGE AMPLIFICATION AND PHASE SHIFT VERSUS FREQUENCY



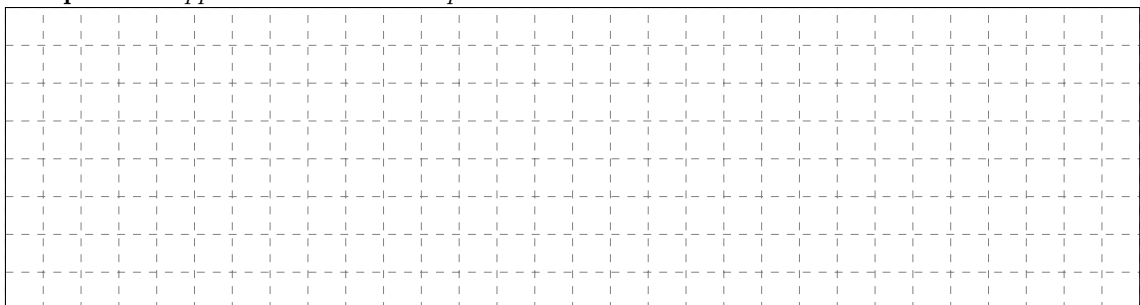
Mesure du gain dynamique d'un ALI (a) Schéma d'un montage amplificateur utilisant un ALI, (b) Mesure sur la fiche technique de la chute de gain avec la fréquence.

Applications 2 Modèle dynamique de l'ALI en régime linéaire

- Q1.** Calculez le gain G en fonction de la pulsation ω de la fonction de transfert de l'ALI.
- Q2.** Calculez la phase Φ en fonction de ω de la fonction de transfert de l'ALI.
- Q3.** Exprimez d'abord en notation complexe, prise en notation réelle la tension de sortie en fonction de ϵ , ϕ_ϵ et ω , G , Φ .
- Q4.** Donnez l'expression approchée de $V_s(t)$ pour $\omega \ll 1/\tau$ et $\omega \gg 1/\tau$.

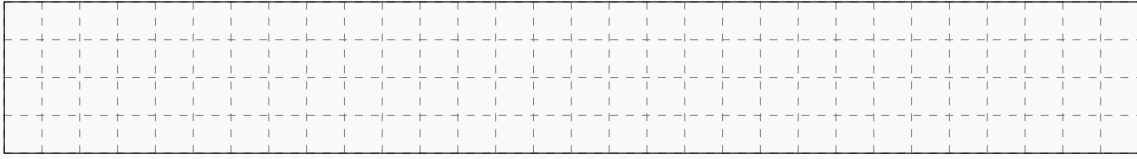
1.4 Modèle de l'ALI parfait et idéal

Remarques 4 Rappelez les notions d'impédance d'entrée et de sortie.



Propriétés 1 ALI idéal et linéaire

Si un ALI est idéal alors en régime linéaire $\epsilon = 0$

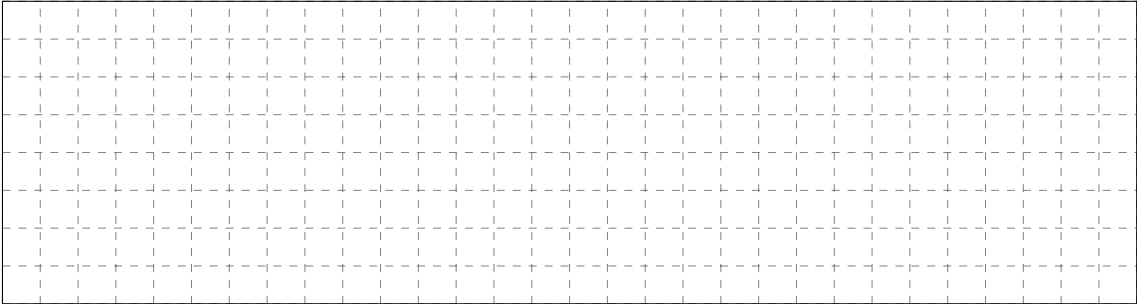


Propriétés 2 ALI idéal et saturé

Si un ALI est idéal alors $\epsilon \neq 0$ implique $V_s = \pm V_{\text{sat}}$

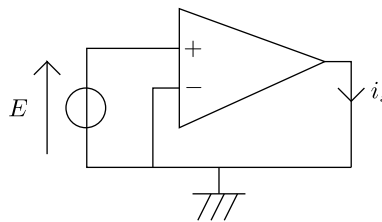


Remarques 6 Quel graphique représente V_s en fonction de ϵ d'un ALI idéal ?



Applications 3 Modèle de l'ALI parfait et idéal

- Q1.** Pour une résistance d'entrée de $10^{12} \Omega$ et des tensions d'entrée maximale de $\pm 15 \text{ V}$, évaluez la valeur du courant de polarisation maximal.
- Q2.** Si on place l'ALI en régime saturé avec une sortie court-circuité, on observe un courant de court-circuit de 60 mA , estimez la résistance de sortie de l'ALI.



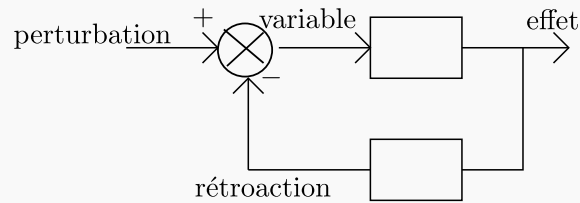
2 ALI idéal en régime linéaire

2.1 Stabilité du régime linéaire

Dans l'hypothèse d'un ALI idéal, la plage de valeur de l'entrée différentielle ϵ du régime linéaire est réduite à 1 seul point : $\epsilon = 0$. En effet si $\epsilon \neq 0$ alors le régime est saturé. Il faut donc un mécanisme pour éviter qu'une légère perturbation de ϵ change de régime l'ALI.

Une rétroaction est un processus dans lequel la perturbation d'une variable a pour effet d'influer sur la variable initiale.

Une rétroaction négative a pour effet d'atténuer les perturbations.



Remarques 7 Quelles vont être les éléments correspondant dans le cas d'un ALI aux : perturbation, variable, effet, rétroaction ?

A full-page view of a blank sheet of graph paper. The grid consists of small squares formed by dashed lines. There are 20 columns and 15 rows of squares. A solid black border runs along the top, bottom, and left edges of the page, while the right edge is open.

2.2 Critère de stabilité

La connexion électrique entre la sortie de l'ALI et l'entrée inverseuse est un indice de stabilité du régime linéaire de l'ALI.

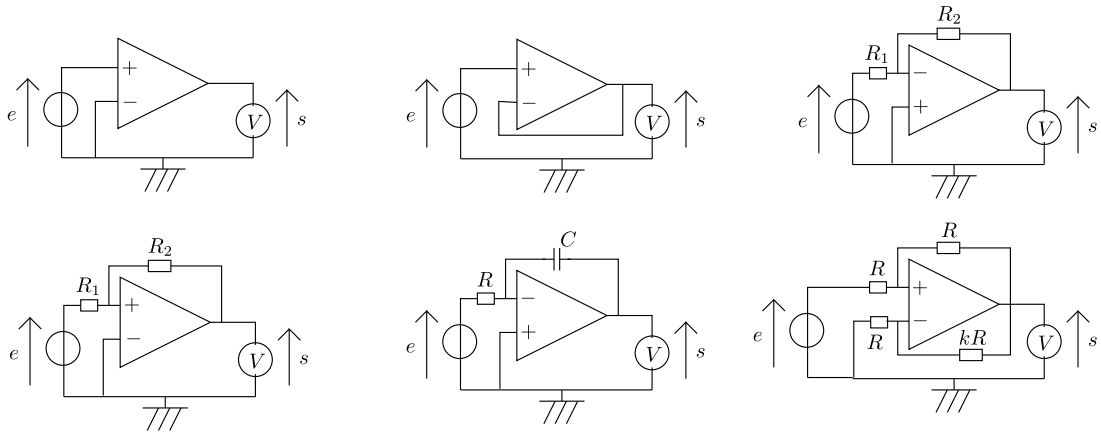
[illegible]

Remarques 8 Quelles hypothèses ont été faite pour l'explication de ce critère ? Et quelle conséquence pouvons-nous tirer si le critère n'est pas vérifié ?

[illegible]

Applications 4 Stabilité du régime linéaire

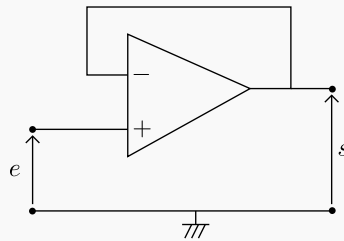
Q1. Identifiez les boucles de rétroactions négatives et les amplificateurs en régime saturé :



2.3 Exemple de montage en régime linéaire

Définition 7 Montage suiveur

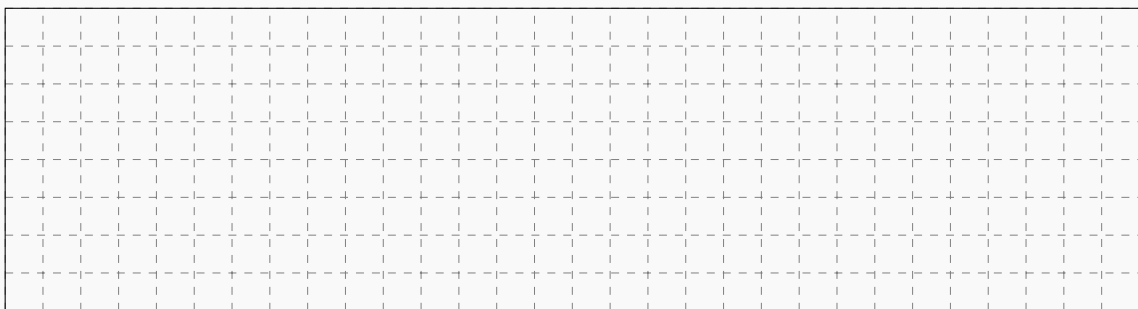
On appelle montage suiveur, une simple rétroaction par un fil sur l'entrée inverseuse d'un ALI idéal.



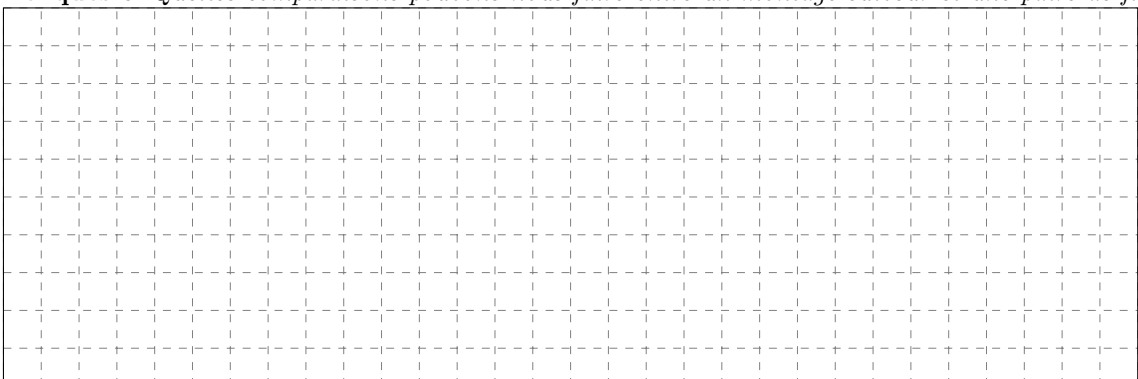
Sur ce schéma e est la tension d'entrée et s la tension de sortie. Toutes s'expriment en Volts.

Propriétés 4 Relation entrée/sortie du montage suiveur

Dans un montage suiveur $e = s$ avec e est la tension d'entrée et s la tension de sortie.

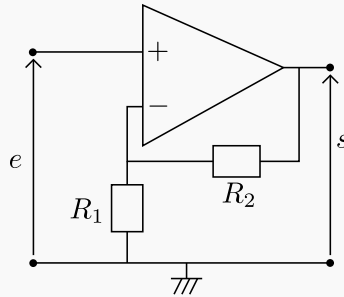


Remarques 9 Quelles comparaisons pouvons nous faire entre un montage suiveur et une paire de fils ?



Définition 8 *Montage non-inverseur*

On appelle montage non-inverseur, une rétroaction par un pont diviseur de tension sur l'entrée inverseuse d'un ALI idéal :



Sur ce schéma e est la tension d'entrée et s la tension de sortie, elles s'expriment en Volts.
 R_1 et R_2 sont les résistances composant le pont diviseur de tension, elles s'expriment en Ohms.

Propriétés 5 *Relation entrée/sortie du montage non-inverseur*

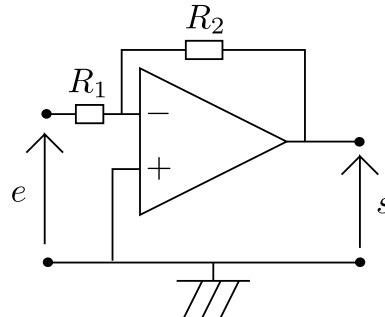
Dans un montage non-inverseur $s = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) e$ avec e est la tension d'entrée et s la tension de sortie.

Remarques 10 *Quelles comparaisons pouvons nous faire entre un montage non-inverseur et un pont diviseur de tension ?*



Applications 5 Exemple de montage en régime linéaire

Q1. Établissez la relation entre les tensions d'entrée e et de sortie s du montage inverseur suivant :



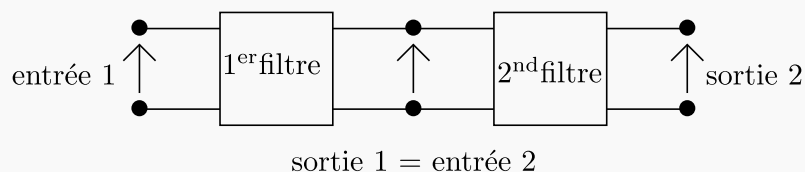
2.4 Mise en cascade de filtre

Remarques 11 Rappelez les notions et liens entre fonctions de transfert en sortie ouverte, influence d'une charge, d'un générateur réel, cas d'un filtre parfait.



Définition 9 Cascade

Deux filtres sont en cascade quand l'entrée du 2nd filtre est connecté à la sortie du 1^{er}.

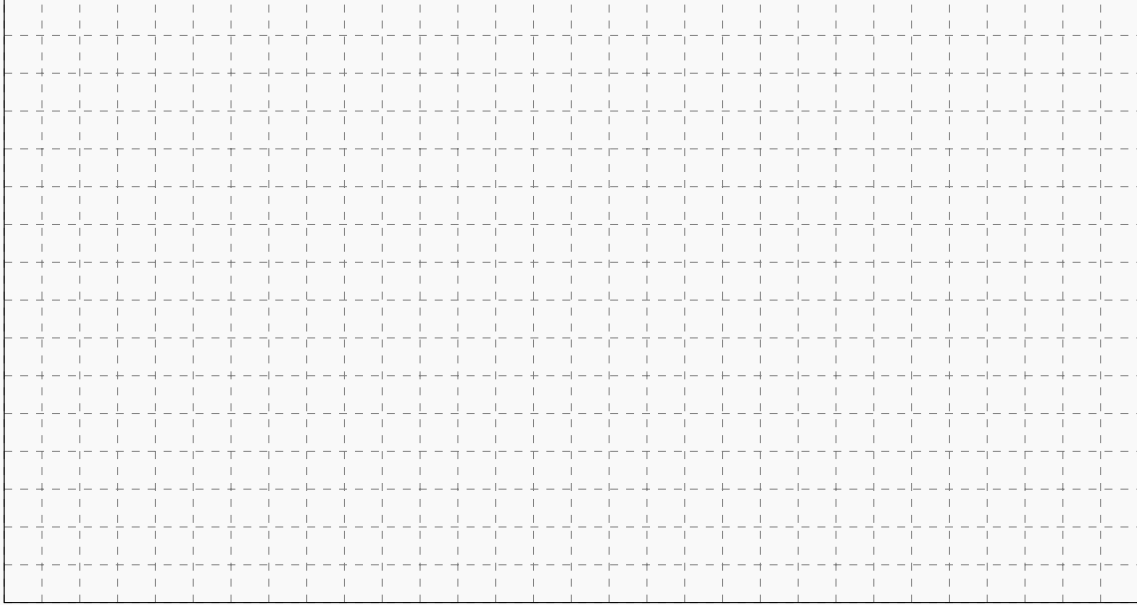


Propriétés 6 Fonction de transfert globale de deux filtres en cascade

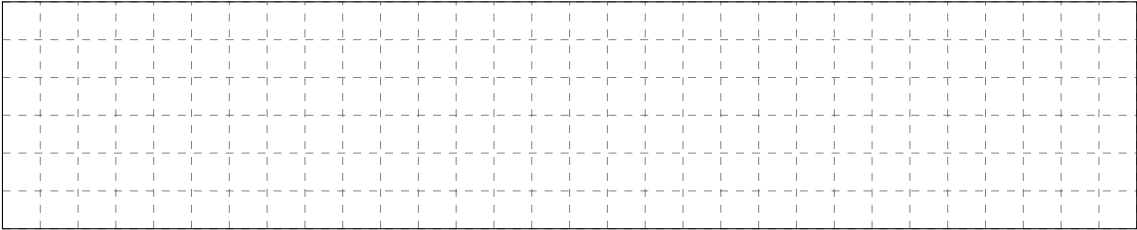
Pour deux filtres en cascade, de fonction de transfert $\underline{H}_1$ et $\underline{H}_2$, et d'impédance de sortie et d'entrée $\underline{Z}_{s1}$ et $\underline{Z}_{e2}$,

la fonction de transfert globale s'écrit en toute généralité $\underline{H}_{\text{globale}} = \underline{H}_2 \times \left(\frac{\underline{Z}_{e2}}{\underline{Z}_{e2} + \underline{Z}_{s1}} \right) \times \underline{H}_1$;

si $|\underline{Z}_{s1}| \ll |\underline{Z}_{e2}|$ alors elle se simplifie comme $\underline{H}_{\text{globale}} \simeq \underline{H}_2 \times \underline{H}_1$.

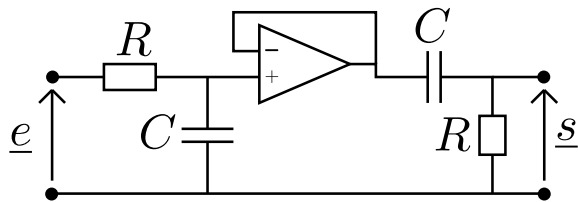
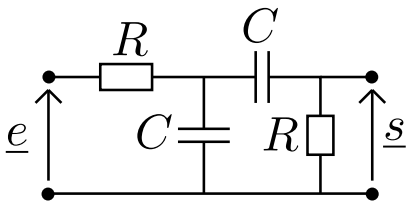


Remarques 12 Quel est l'intérêt de l'utilisation d'un ALI dans la mise en cascade de filtre ?



Applications 6 Mise en cascade de filtre

Q1. Établissez et comparez les fonctions de transfert des deux filtres suivants :



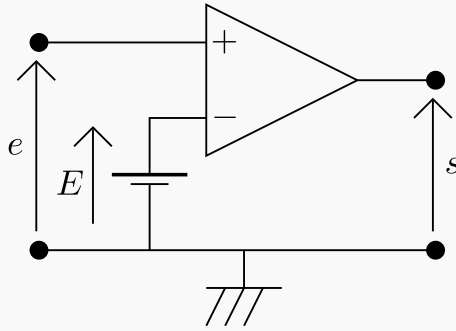
3 ALI idéal en régime saturé

3.1 Le comparateur simple

Pour l'étude de montage comportant un ALI en régime saturé, une première approche consiste à ne pas avoir de rétroaction pour l'ALI.

Définition 10 *Comparateur simple*

On appelle comparateur simple, un ALI sans boucle de rétroaction et dont l'entrée inverseuse est à un potentiel fixé.

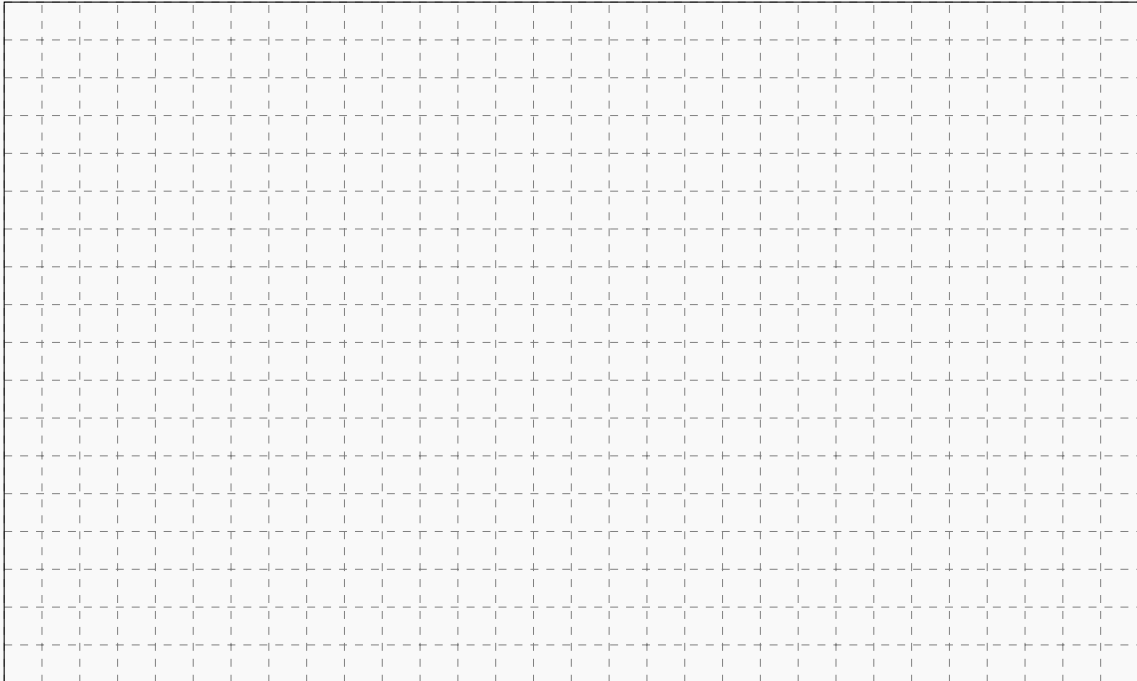


Sur ce schéma e est la tension d'entrée, s la tension de sortie et E le potentiel fixé. Tous s'expriment en Volts.

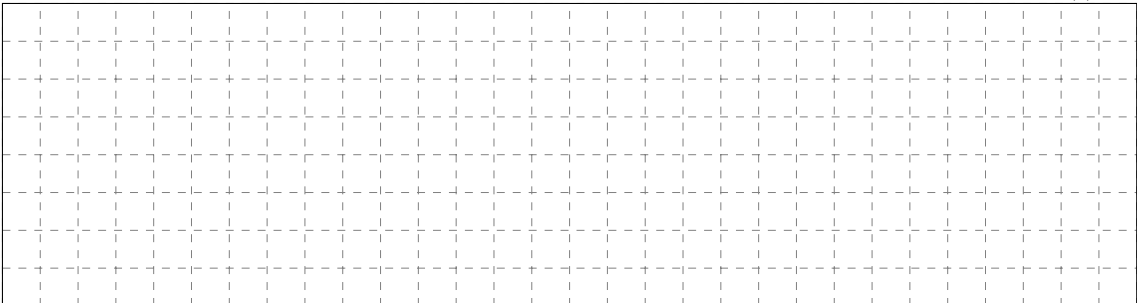
Propriétés 7 *Relation entrée/sortie d'un comparateur simple*

Pour un comparateur simple d'entrée e , de potentiel fixé E et de sortie s ,

$$\begin{aligned} \text{si } e(t) > E, \text{ alors } s(t) &= +V_{\text{sat}} \\ \text{si } e(t) < E, \text{ alors } s(t) &= -V_{\text{sat}} \end{aligned}$$

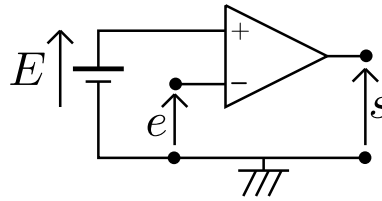


Remarques 13 Justifiez de la dénomination "comparateur" du montage. Que se passe-t-il en $e(t) = E$?



Applications 7 Le comparateur simple

Q1. Établissez la relation entrée-sortie du montage suivant :



Q2. Puis tracez s en fonction de e

3.2 Effet non-linéaire en régime saturé

Comparons pour une même entrée sinusoïdale, la sortie de deux montages simples à ALI :

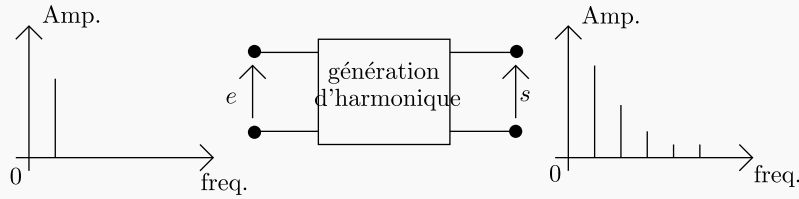
- d'une part le montage suiveur (en régime linéaire)
- d'autre part le montage comparateur simple (en régime saturé)

Montage suiveur vs comparateur simple

	Montage suiveur	Comparateur simple
Schéma		
Relation e/s	$s(t) = e(t)$	• si $e(t) > 0$, alors $s(t) = +V_{sat}$ • si $e(t) < 0$, alors $s(t) = -V_{sat}$
$e(t)$ et $s(t)$		
$s(e)$		
$e(f)$ et $s(f)$		

Définition 11 Génération d'harmonique

On appelle génération d'harmonique, le processus dans lequel un filtre fait apparaître dans le spectre du signal de sortie des harmoniques absentes dans le spectre du signal d'entrée.



Sur ce schéma e est la tension d'entrée et son spectre ne présente qu'une harmonique, et s est la tension de sortie et son spectre présente plusieurs harmoniques.

Formellement on dit qu'il y a génération d'harmonique avec :

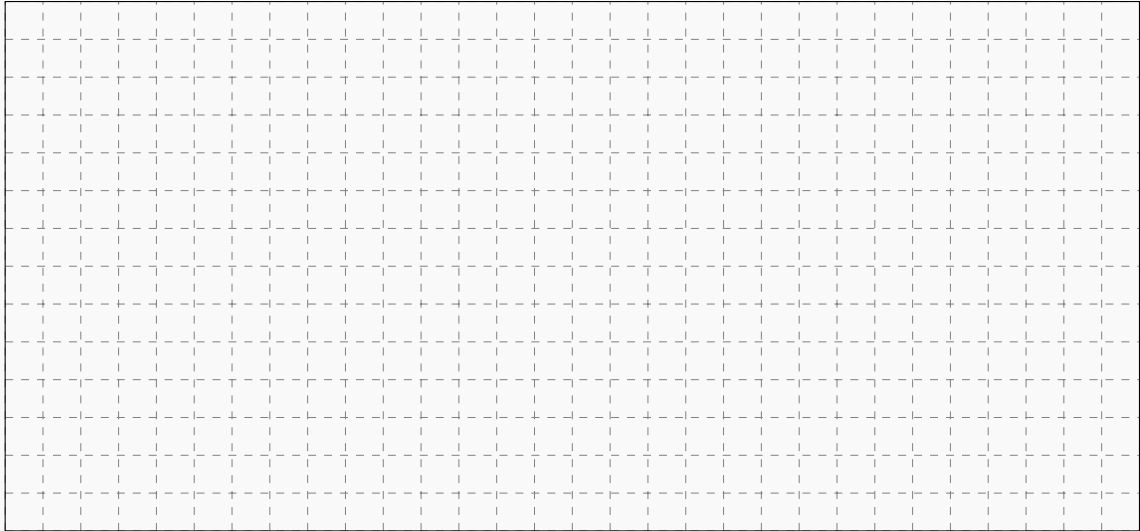
Soit $(E_n, \Phi_{e,n})$ les composantes de la série de Fourier de l'entrée telles que $e(t) = E_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} E_n \cos(n\omega_0 t + \Phi_{e,n})$,

soit $(S_n, \Phi_{s,n})$ les composantes de la série de Fourier de la sortie telles que $s(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} S_n \cos(n\omega_0 t + \Phi_{s,n})$,

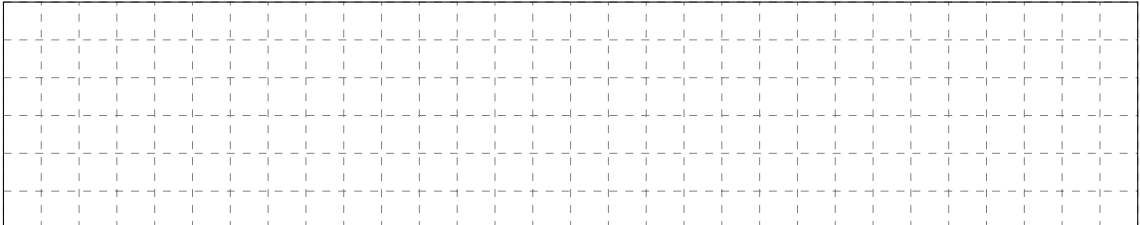
si il existe un n tel que $E_n = 0$ et $S_n \neq 0$, alors il y a eu génération d'harmonique entre e et s .

Propriétés 8 La génération d'harmonique indique la non-linéarité d'un filtre

Si il existe un signal d'entrée $e(t)$ tel qu'il y ait une génération d'harmonique pour la sortie $s(t)$, alors le filtre est non-linéaire.

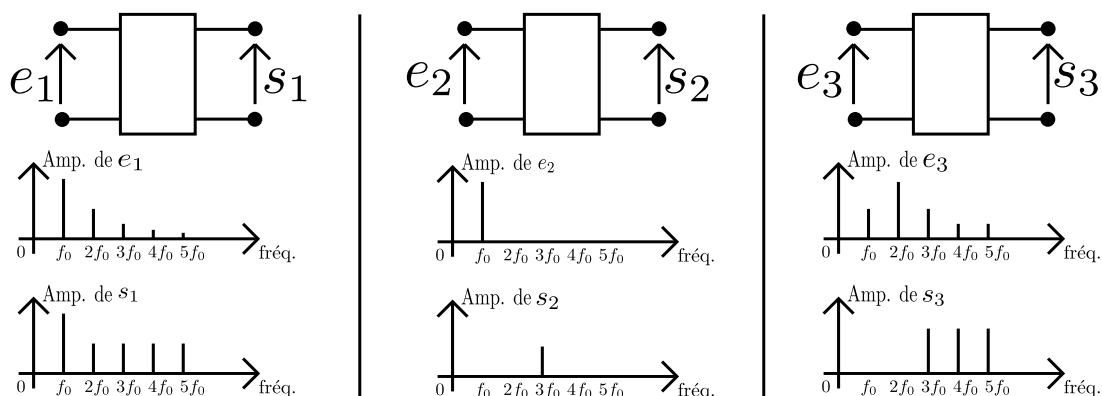


Remarques 14 Quel lien pouvons nous faire entre régime de fonctionnement d'un ALI et linéarité du filtre où il intervient ?



Applications 8 Effet non-linéaire en régime saturé

Q1. Pour chaque situations indépendantes suivantes, pouvez vous dire si le filtre est linéaire ou non-linéaire.

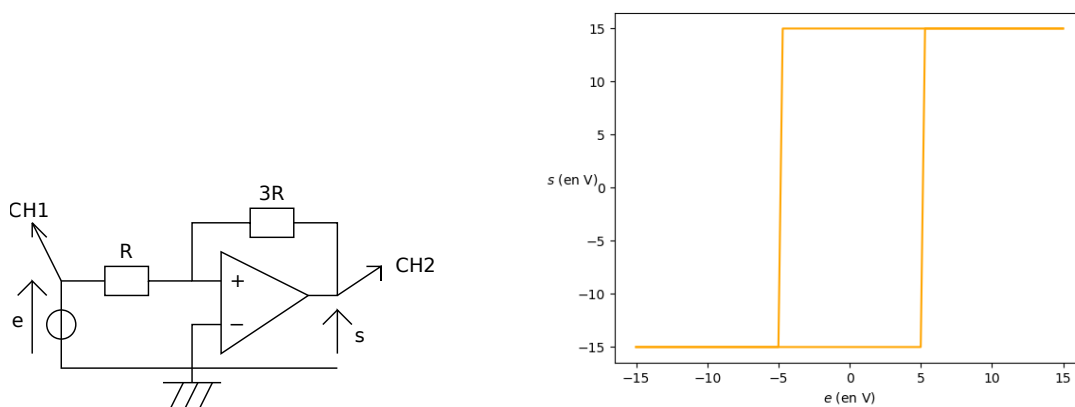


3.3 Le comparateur à hystérésis

Une deuxième catégorie de montage comportant un ALI en régime saturé est basée sur la présence d'une boucle de rétroaction positive.

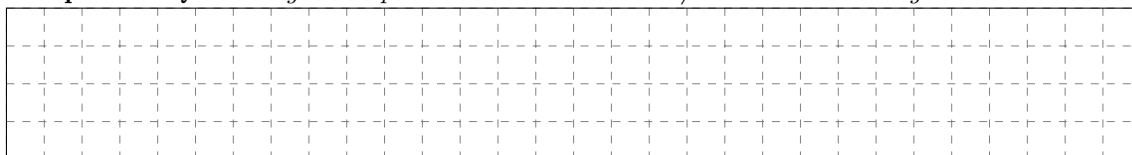
(a)

(b)



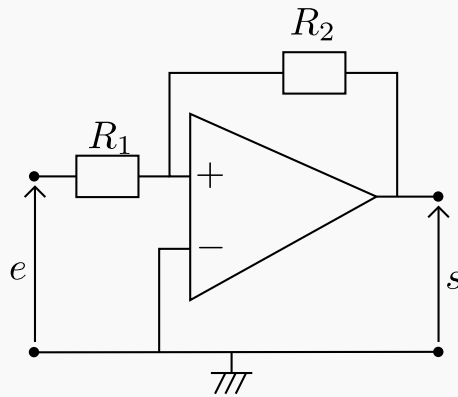
Comparteur à hystérésis non inverseur (a) Schéma d'un montage de comparateur à hystérésis non inverseur, (b) Tracé du cycle d'hystérésis correspondant

Remarques 15 *Quelle originalité présente la relation entrée/sortie de ce montage ?*



Définition 12 Comparateur à hystérésis non-inverseur

On appelle comparateur à hystérésis non-inverseur, un montage avec un ALI possédant une boucle de rétroaction positive et un signal d'entrée connecté à la borne non-inverseuse.

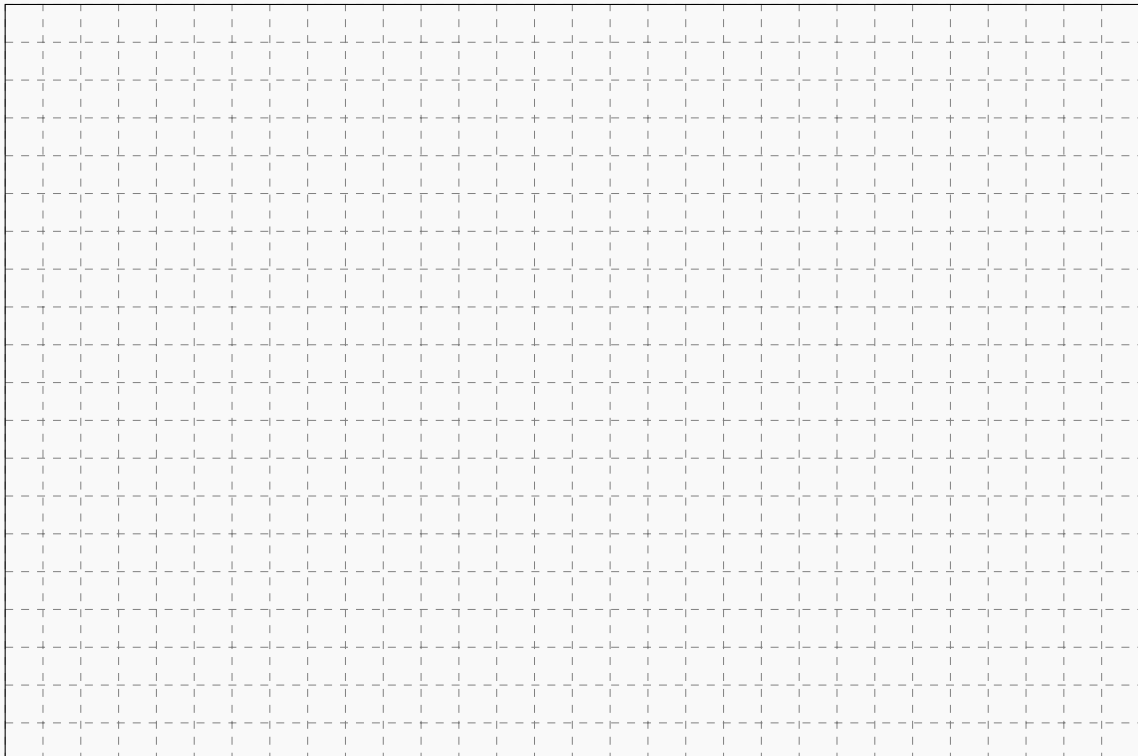


Sur ce schéma e représente la tension d'entrée et s la tension de sortie, elles s'expriment en Volts. R_1 et R_2 sont les résistances présentes dans le montage, elles s'expriment en Ohms.

Propriétés 9 Relation entrée/sortie d'un comparateur à hystérésis non-inverseur

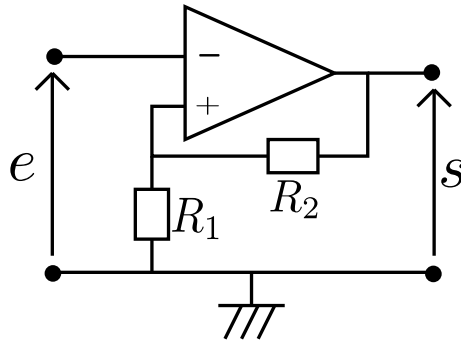
Pour un comparateur à hystérésis non-inverseur la relation entrée/sortie dépend de la saturation initiale de l'ALI :

- si l'ALI est en saturation négative, la tension seuil de basculement est de $+V_0 = +\frac{R_1}{R_2}V_{\text{sat}}$ tel que :
 - tant que $e < +V_0$, s reste égal à $-V_{\text{sat}}$
 - dès que $e \geq +V_0$, s bascule à $+V_{\text{sat}}$ et l'ALI passe en saturation positive
- si l'ALI est en saturation positive, la tension seuil de basculement est de $-V_0 = -\frac{R_1}{R_2}V_{\text{sat}}$ tel que :
 - tant que $e > -V_0$, s reste égal à $+V_{\text{sat}}$
 - dès que $e \leq -V_0$, s bascule à $-V_{\text{sat}}$ et l'ALI passe en saturation négative

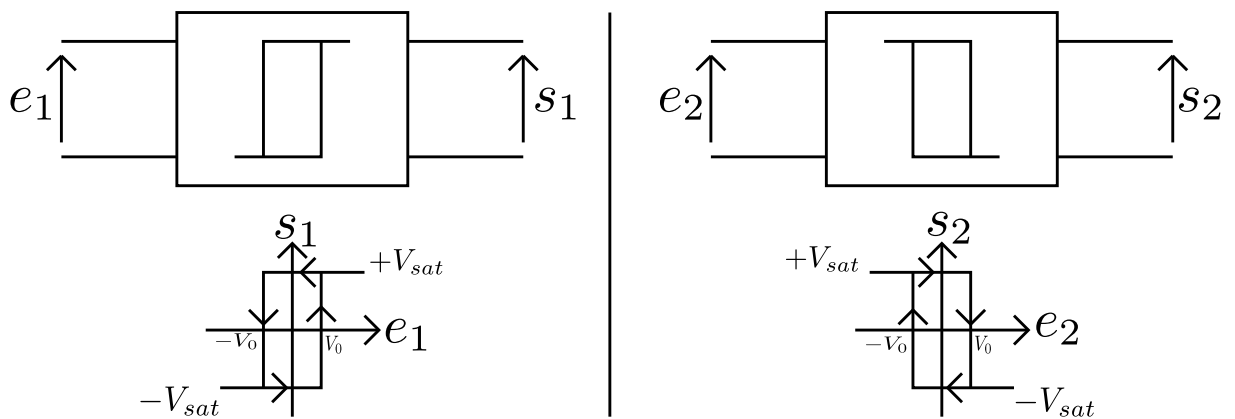


Applications 9 Le comparateur à hystérésis

Q1. Établissez et tracez le cycle d'hystérésis du montage suivant :



Q2. Soient deux comparateur à hystérésis l'un inverseur et l'autre non-inverseur de même tension de saturation V_{sat} et de même tension de bascule $\pm V_0$:



On applique à l'entrée des deux comparateurs le même signal e sinusoïdal d'amplitude $2V_0$, tracez sur un même graphe e et les sorties s_1 et s_2 des deux comparateurs.

Vers les concours :

- Savoir quand et comment appliquer une loi des nœuds ou un pont diviseur de tension pour relier les potentiels d'un circuit à ALI.
- Identifier un régime linéaire ou saturé et en exploiter les implications dans l'hypothèse d'un ALI idéal.
- Connaître les limitations de l'ALI.
- Savoir faire une disjonction de cas et interpréter l'évolution du signal lors d'un phénomène d'hystérésis.
- Connaître le montage suiveur et son intérêt dans la mise en cascade de filtre.