Rétroaction

Extrait du programme

La partie **1** illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des noeuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est uniquement évoquée en TP afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire du système étudié. L'identification de certains montages à des systèmes bouclés permet de faire le lien avec le cours d'automatique de SII.

Notions et contenus	Capacités exigibles
1. **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 par un schéma bloc fonctionnel.
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Distinguer les différents régimes de fonctionnement.
Vitesse de balayage.	Identifier la manifestation de la vitesse limite de balayage d'un ALI dans un montage.
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 stabilité du régime linéaire.
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 du comparateur à hystérésis.

Sommaire

1 Modèle de l'ALI
- **1.1 Composant électronique**
- **1.2 Propriétés essentielles**
- **1.3 Régimes de fonctionnement**
- **1.4 Modèle idéal de l'ALI**
- **1.5 Vitesse de balayage**

2 Principe de rétroaction
- **2.1 Montage amplificateur non inverseur (TP-cours 1)**
- **2.2 Montage comparateur à hystérésis (TP-cours 2)**

3 Questions de cours

4 Questions à choix multiples

5 Exercices
- **5.1 Etude d'un amplificateur inverseur**
- **5.2 Manipulation d'un comparateur à hystérésis**
- **5.3 Filtre actif**
- **5.4 Intégrateur réalisé à l'aide d'un amplificateur linéaire intégré**

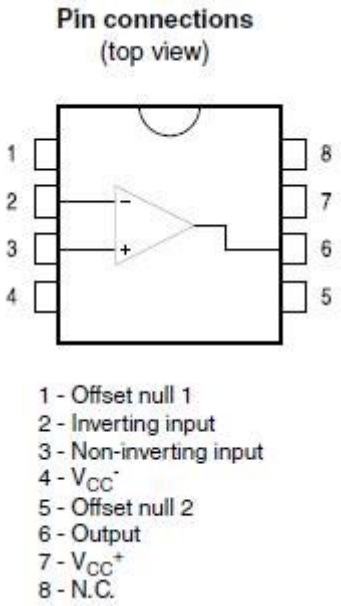
1 Modèle de l'ALI

1.1 Composant électronique

L'ALI se présente sous la forme d'une puce électronique, de surface 11 mm x 6,6 mm, dont la notice est fournie. Il est emballé dans un boitier DIP (Dual in-line package). Il comporte 8 pattes et une encoche semi-circulaire, qui permet de les distinguer.

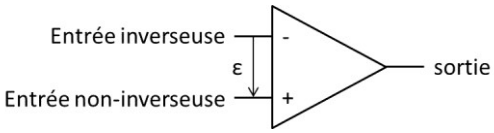
La référence du circuit est TL081. Tous les constructeurs utilisent la même référence pour une même fonction, qui est ici celle d'amplificateur opérationnel. Il est composé de transistors principalement.
Le brochage des pattes est donné :
- Offset Null 1 : permet de compenser les petits défauts en tension, dus à la construction (non utilisé ici)
- Inverting input : c'est l'entrée inverseuse, que l'on repèrera sur le schéma par le signe (-)
- Non-inverting input : c'est l'entrée non-inverseuse, repérée par le signe (+)
- V_{CC}^{-} : tension d'alimentation négative de la puce, en général -15V
- Offset Null 2 : idem à Offset Null 1 (non utilisé ici)
- Output : sortie
- V_{CC}^{+} : tension d'alimentation positive de la puce, en général +15V
- NC : ne sert à rien

Comme on peut le voir ici l'amplificateur opérationnel doit être alimenté pour fonctionner, ce qui en fait un composant actif.



L'alimentation est la première chose à brancher lors d'un montage électronique.

Toutefois, elle n'est pas représentée sur les schémas électriques, dans lesquels l'ALI est symbolisée par un triangle entre deux entrées et une sortie :



1.2 Propriétés essentielles

1.2.1 Courants de polarisation nuls

Les courants de polarisation ou encore courants d'entrée $i_+ \; et \; i_-$ d'un ALI sont nuls : $i_+ = i_- = 0A$.

1) Expliquer à partir de la notice le fait que l'on puisse considérer ces courants comme nuls.

1.2.2 Résistance de sortie nulle

La valeur de la tension de sortie s est indépendante du courant débité en sortie de l'ALI. L'étage de sortie de l'ALI est donc assimilable à une source idéale de tension. On parle de **résistance de sortie nulle** pour ce modèle.

1.2.3 Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire

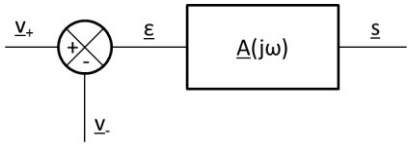
La fonction de transfert de l'amplificateur opérationnel relie l'entrée différentielle, notée ε, et la sortie, notée s. **L'entrée différentielle** est la différence entre les potentiels des entrées non-inverseuse et inverseuse, noté respectivement v_+ et v_- tel que : $\varepsilon = v_+ - v_-$.

La fonction de transfert est aussi appelée **gain différentiel** car il opère sur l'entrée différentielle. En première approche, on la définit comme un passe-bas du premier ordre :

$$\boxed{\underline{A}(j\omega) = \frac{\underline{s}(j\omega)}{\underline{\varepsilon}(j\omega)} = \frac{A_{vd}}{1 + j\tau\omega} \quad avec \quad \begin{cases} A_{vd} \approx 2.10^5 \\ \tau \approx 5.10^{-2} s \end{cases}}$$

2) Retrouver les valeurs du gain statique dans la notice. Tracer le diagramme de Bode en amplitude de la fonction de transfert.

On peut utiliser le schéma fonctionnel suivant pour modéliser un ALI :



1.2.4 Saturation de la tension de sortie

La tension maximale que délivre l'amplificateur opérationnel en sortie reste limitée : elle ne peut dépasser en valeur absolue la tension d'alimentation V_{CC}^+. Cette tension maximale de sortie est communément appelée **tension de saturation**, notée V_{sat}. Elle est inférieure à la tension d'alimentation : $|V_{sat}| < |V_{CC}^+| = 15V$.

La tension de sortie est donc limitée à l'intervalle $[-V_{sat}, +V_{sat}]$.

1.2.5 Saturation de l'intensité de sortie

L'intensité du courant délivré en sortie est, elle aussi, limitée. Elle est expérimentalement obtenue en court-circuitant la sortie avec un ampèremètre, afin de faire débiter une intensité maximale qu'on mesure.

3) Quelle est la valeur de l'intensité du courant délivré en sortie dans la notice ?

1.2.6 Synthèse

Le **modèle de l'ALI** est donné par les propriétés suivantes :
- Courants de polarisation nuls $i_+ = i_- = 0A$
- Résistance de sortie nulle
- Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire $A_d(j\omega) = \frac{\underline{s}(j\omega)}{\underline{\varepsilon}(j\omega)} = \frac{A_0}{1+j\tau\omega}$
- Saturation de la tension de sortie à V_{sat}
- Saturation de l'intensité de sortie

1.3 Régimes de fonctionnement

Les propriétés précédemment exposées du modèle de l'ALI nous permettent de comprendre que la sortie n'est liée à l'entrée par la fonction de transfert du premier ordre que dans un domaine précis, appelé **plage de linéarité**. On supposera ici que l'on peut assimiler la fonction de transfert à son gain statique dans la gamme de fréquence étudiée : $\underline{A}(j\omega) \approx A_{vd}$.

Au-delà, la tension de sortie atteint en valeur absolue la tension de saturation : **domaine de saturation**.

On distingue 3 domaines :

- la plage de linéarité (1) : $|\varepsilon| < \frac{V_{sat}}{A_{vd}}$, le signal de sortie est proportionnel à ε.
- la zone de saturation positive (2) : $\varepsilon \geq \frac{V_{sat}}{A_{vd}}$ alors $s = V_{sat} \approx V_{CC}^+$
- la zone de saturation négative (3) : $\varepsilon \leq -\frac{V_{sat}}{A_{vd}}$ alors $s = -V_{sat} \approx V_{CC}^-$

4) Représenter la caractéristique d'un ALI.

1.4 Modèle idéal de l'ALI

5) A partir des valeurs typiques de la tension de saturation et du gain statique, montrer qu'en régime linéaire la tension différentielle est inférieure à une valeur que l'on précisera. Conclure.

De plus, le gain de la fonction de transfert est très grand et peut être considéré infini, soit : $A_{vd} \to \infty$.

6) Représenter la caractéristique d'un ALI idéal.

On distingue alors les 3 domaines suivants :

- la plage de linéarité (1) : $|s| < V_{sat} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = 0 \quad ou \quad v_+ = v_-$
- la zone de saturation positive (2) : $\varepsilon > 0 \quad \Rightarrow \quad s = V_{sat}$
- la zone de saturation négative (3) : $\varepsilon < 0 \quad \Rightarrow \quad s = -V_{sat}$

Le **modèle de l'ALI idéal** rajoute au modèle précédent les propriétés suivantes :
- Fonction de transfert en régime linéaire assimilée à son gain statique infini $\underline{A} = A_{vd} \to +\infty$
- Egalité des tensions d'entrée en régime linéaire $v_+ = v_-$

1.5 Vitesse de balayage

La vitesse de balayage σ ou slew rate SR fait partie des propriétés de l'ALI. Cette vitesse de balayage provient d'un condensateur au sein du circuit intégré. Celui-ci est utile pour obtenir le comportement d'un filtre du premier ordre avec une fréquence de coupure suffisamment faible. Il vient donc limiter la rapidité du circuit.

7) Retrouver la valeur de la vitesse de balayage dans la notice. En déduire sa signification.

On pose donc : $\sigma = \left|\frac{ds}{dt}\right|_{max}$

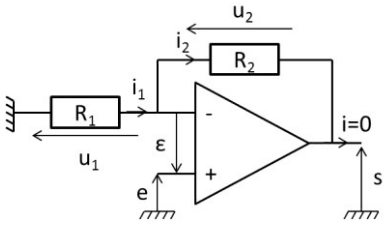
Cette limitation est particulièrement visible lors des phases de commutations des montages comparateurs. Elle se manifeste par l'apparition de portions rectilignes de pente $\overset{+}{-}\sigma$ sur l'oscillogramme de la tension de sortie.

2 Principe de rétroaction

2.1 Montage amplificateur non inverseur (TP-cours 1)

2.1.1 Schéma

Ce montage est conçu pour amplifier la tension d'entrée. On raisonne sur le circuit suivant.



2.1.2 Modèle idéal de l'ALI

8) Donner l'expression de la fonction de transfert du montage en régime linéaire. On utilisera les hypothèses simplificatrices du modèle idéal en régime linéaire.

9) Donner la caractéristique entrée-sortie de l'amplificateur. On fera apparaître les zones de saturation.

10) Réaliser le circuit précédent. Observer sa tension d'entrée $e(t)$ d'amplitude $E_0 = 0,1V$ et de fréquence $f = 1kHz$, ainsi que sa tension de sortie $s(t)$ sur l'oscilloscope. On prendra pour résistances $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 100k\Omega$. Vérifier le comportement amplificateur prévu.

11) En augmentant l'amplitude du signal d'entrée, observer la saturation du signal de sortie. En passant en mode XY, retrouver la caractéristique entrée-sortie de l'amplificateur.

2.1.3 Fonction de transfert du circuit

12) <u>En revenant dans la zone de régime linéaire du montage, augmenter maintenant la fréquence du signal d'entrée. Le signal de sortie est-il toujours amplifié ? Qu'observe-t-on ? Mesurer la fréquence pour laquelle</u> $|s(t)| = \frac{s_{max}}{\sqrt{2}}$ ***<u>. Comment pourrait-on appeler cette fréquence ? Définir alors la bande passante du montage.</u>***

<u>Rappel</u> : On définit la bande passante de l'amplificateur comme la gamme de pulsation pour laquelle : $|H| > \frac{|H|_{max}}{\sqrt{2}}$, soit pour un passe-bas du premier ordre : $BP = [0, \omega_c]$.

13) Rappeler la fonction de transfert reliant l'entrée différentielle de l'ALI à sa tension de sortie.

14) Montrer que : $\underline{\varepsilon} = \underline{e} - \frac{R_1}{R_1+R_2}\underline{s}$

15) A partir du schéma fonctionnel de l'ALI, modéliser le montage amplificateur par un schéma-bloc.

Stabilité du montage : une rétroaction négative est stabilisatrice.

16) Montrer que la fonction de transfert $\underline{H}$ liant les tensions d'entrée $\underline{e}$ et de sortie $\underline{s}$ du montage amplificateur non inverseur peut se mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = \frac{G_0}{1+j\tau_c\omega}$ avec $G_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ et $\tau_c = G_0 \frac{\tau}{A_{vd}}$. On utilisera le fait que $A_{vd} \gg 1$. Quel type de filtre retrouve-t-on ?

Remarque :

Les coefficients du dénominateur de la fonction de transfert sont tous de même signe. Ceci est une caractéristique d'un système est stable.

17) Pour les valeurs de résistances $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 100k\Omega$, faire l'application numérique pour le gain statique G_0 et la constante de temps τ_c. On calculera aussi la pulsation ω_c et la fréquence de coupure f_c . Comparer aux mesures faites précédemment.

2.1.4 Produit gain-bande passante

18) Dans quelle bande de fréquence doit-on se situer pour avoir un comportement amplificateur ? Commenter.

19) Sur quelle valeur pourrait-on jouer pour augmenter cette bande de fréquence ? Quel problème cela pose-t-il ?

20) Donner la valeur de la bande passante, BP . Que remarque-t-on lorsqu'on fait le produit gain-bande passante ?

Ceci est caractéristique de tout système du premier ordre bouclé.

21) Retrouver dans la notice la valeur du produit gain-bande passante.

22) Utilisez différentes valeurs de résistances que vous préciserez pour vérifier la valeur du produit gain-bande passante de votre amplificateur. Conclure.

2.1.5 Vitesse de balayage

23) En reprenant le montage amplificateur avec $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 10k\Omega$, et une tension d'entrée sinusoïdale d'amplitude 1V et de fréquence 100kHz, mettre en évidence la distorsion due à la vitesse de balayage.

2.2 Montage comparateur à hystérésis (TP-cours 2)

2.2.1 Fonction comparateur simple

2.2.1.1 Caractéristique

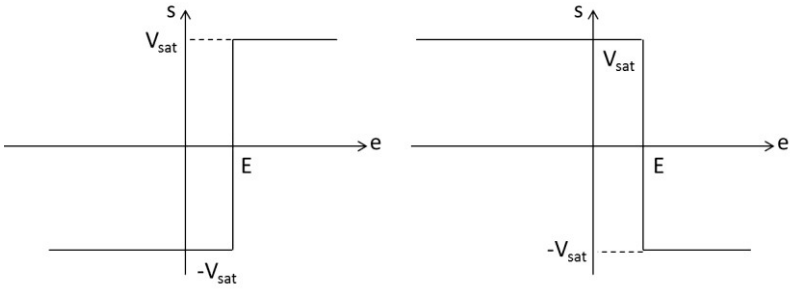
Il est souvent utile de comparer la valeur instantanée d'un signal $e(t)$ à un niveau de référence.

Exemple : détecteur de lumière qui commande un dispositif d'éclairage.

Le signal issu du capteur est comparé à une valeur correspondant à la pénombre et déclenche le relais alimentant les lampes, en fonction du résultat de cette comparaison.

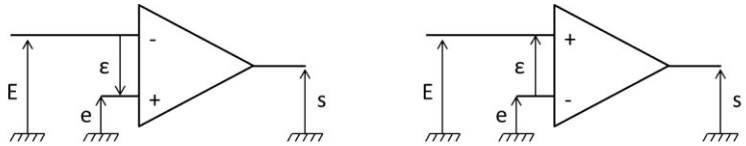
Lien utile : https://famillecoq.pagesperso-orange.fr/physique/tp/applets/electronsignal/compsimple.htm

La caractéristique entrée-sortie d'un tel opérateur est donnée dans la figure suivante :



Comparateur non inverseur — Comparateur inverseur

Ces comparateurs simples peuvent être réalisés à l'aide des circuits suivants :



Comparateur non inverseur — Comparateur inverseur

24) En supposant les ALI idéaux en régime saturé, retrouver les caractéristiques entrée-sortie des deux comparateurs.

25) <u>Vérifier par un montage la caractéristique du comparateur simple non inverseur. On pourra prendre une tension de seuil de 0 V. On spécifiera les réglages utilisés à l'oscilloscope. En faisant varier l'offset de la tension d'entrée, observer le changement de rapport cyclique.</u>

2.2.1.2 Génération d'harmoniques

Pour un système linéaire, on peut définir la notion de fonction de transfert. Le signal de sortie a alors exactement le même nombre d'harmoniques que le signal d'entrée, bien qu'elles puissent être atténuées ou amplifiées.
Le système non linéaire qu'est donc le comparateur enrichit le spectre du signal de sortie de fréquences absentes du signal d'entrée.

<u>26) Pour le comparateur non inverseur précédent, quel est le signal de sortie si le signal d'entrée est sous la forme : $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$ avec $E = 0V$? Observer le spectre des deux signaux.</u>

2.2.2 Fonction comparateur à hystérésis (vient du mot grec qui veut dire retard)

2.2.2.1 Caractéristiques

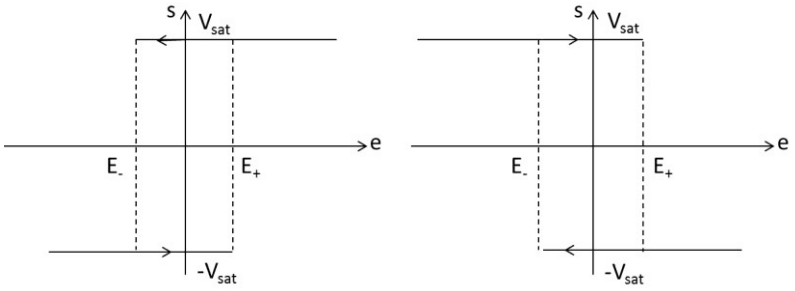
Les comparateurs simples peuvent se révéler insuffisants pour assurer certaines comparaisons.

Exemple : dispositif de commande d'éclairage

S'il a son capteur de lumière placé dans une zone où la luminosité varie autour de la valeur ambiante, le dispositif risque de déclencher l'allumage puis l'extinction plusieurs fois de suite. Il est alors judicieux de recourir à un comparateur à deux seuils, appelé comparateur à hystérésis.

Lien utile : https://famillecoq.pagesperso-orange.fr/physique/tp/applets/electronsignal/comphyst.htm

La caractéristique entrée-sortie d'un tel opérateur est donnée dans la figure suivante.



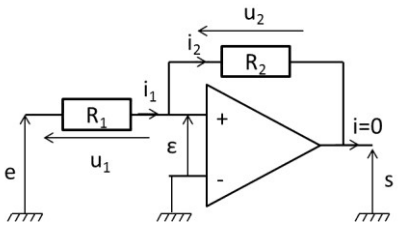
Comparateur non inverseur Comparateur inverseur

Deux seuils sont utilisés : E_- et E_+

- si $e \leq E_-$, la sortie du comparateur non inverseur est $-V_{sat}$
- si $e \geq E_+$, la sortie du comparateur non inverseur est V_{sat}
- si $E_- < e < E_+$, la sortie du comparateur non inverseur dépend de l'évolution antérieure du signal d'entrée, comme l'indique les flèches sur la caractéristique.

2.2.2.2 Montage comparateur à hystérésis non inverseur

On raisonne sur le circuit suivant comparateur non inverseur. Attention l'ALI ne fonctionne pas en régime linéaire.



27) Montrer que : $\varepsilon = \frac{R_1}{R_1+R_2}s + \frac{R_2}{R_1+R_2}e$

2.2.2.3 Stabilité du montage

Imaginons qu'une perturbation électromagnétique provoque une augmentation de la tension de sortie s. La valeur du potentiel v_+ se trouve instantanément accrue et ε croit. Donc si le montage est en régime linéaire, cela induit une augmentation de s. Le système bouclé entrainera ainsi une saturation de la tension de sortie. Le montage ne peut plus alors être considéré comme linéaire, car la sortie étant bloquée à $\pm V_{sat}$ n'est plus proportionnelle à l'entrée.

On dira qu'une rétroaction positive est déstabilisatrice.

2.2.2.4 Modèle idéal d'ALI

28) En supposant l'ALI idéal en régime saturé, trouver les deux tensions de seuil du cycle d'hystérésis du comparateur non inverseur.

2.2.2.5 Manipulations

29) En réalisant le montage du comparateur à hystérésis non inverseur pour $R_1 = 1k\Omega \quad R_2 = 10k\Omega$, vérifier les tensions de seuil déterminées précédemment. Observer les tensions en mode temporel et en mode XY. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?

2.2.2.6 Vitesse de balayage

30) <u>En zoomant sur le signal de sortie, observer l'effet de la vitesse de balayage. Faire une mesure de la vitesse de balayage.</u>

4 Questions de cours

1) Donner les hypothèses du modèle de l'ALI.

2) Donner les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse d'un ALI en régime linéaire.

3) Tracer la caractéristique de l'ALI. Comment est-elle modifiée si on fait l'hypothèse d'un ALI idéal ? On justifiera son tracé.

4) Modéliser un ALI fonctionnant en régime linéaire par un schéma bloc fonctionnel.

5) Donner le montage d'un amplificateur non inverseur. A quoi le reconnait-on ?

6) Donner le montage d'un comparateur à hystérésis. A quoi le reconnait-on ?

7) Qu'appelle-t-on vitesse de balayage ?

8) Dans quel cas un montage à base d'ALI est-il dit stable ?

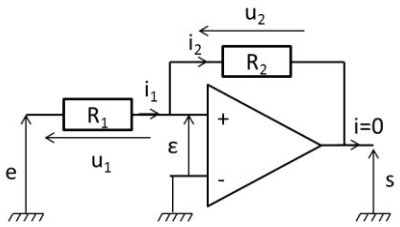
9) Etablir la relation entrée-sortie du comparateur simple.

10) Pour une entrée sinusoïdale sur un comparateur simple, quelle est la forme du signal de sortie ? Que peut-on dire de son spectre ?

11) Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.

12)

On raisonne sur le circuit suivant comparateur non inverseur. En supposant l'ALI idéal en régime saturé, trouver les deux tensions de seuil du cycle d'hystérésis du comparateur non inverseur. Tracer alors son cycle d'hystérésis.



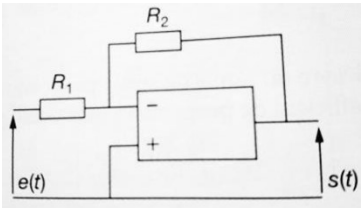
5 Questions à choix multiples

En ligne sur la plateforme Moodle accessible via Atrium : section « Elec / Retroaction / Test ».

6 Exercices

6.1 Etude d'un amplificateur inverseur

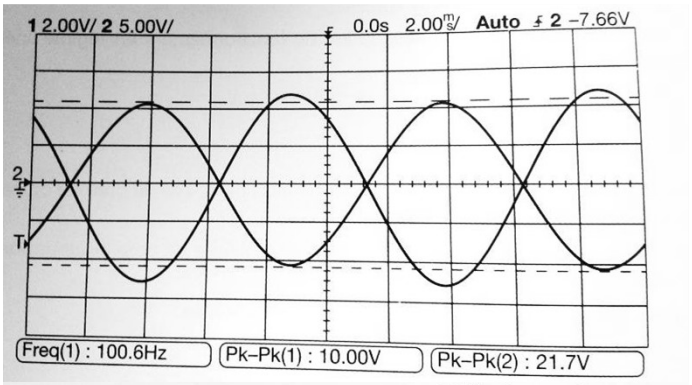
Un amplificateur intégré linéaire est associé à deux résistors $R_1 = 33k\Omega$ et $R_2 = 68k\Omega$ comme indiqué sur la figure suivante.



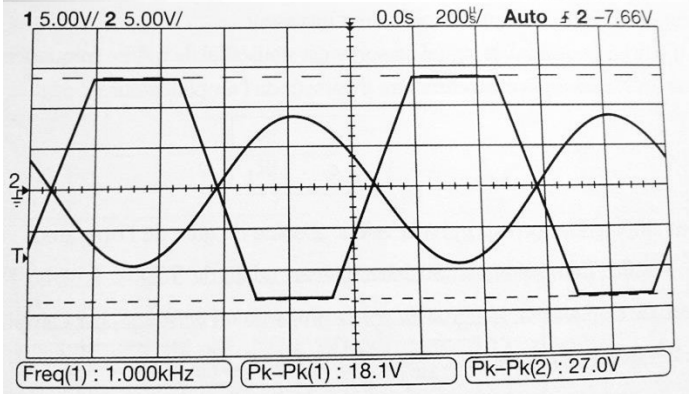
1) Observations expérimentales

En appliquant un signal sinusoïdal d'amplitude crête à crête égale à 10,0 V de fréquence 100 Hz à l'entrée de cet opérateur, on obtient les oscillogrammes de la figure suivante. L'amplitude crête à crête du signal de sortie s'avère égale à 21,7V.

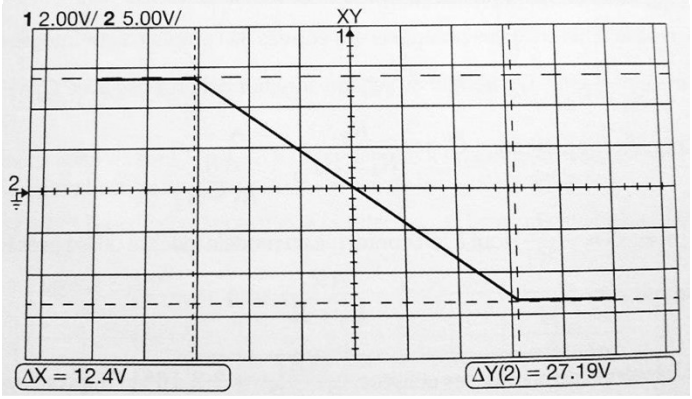
a) Commenter la forme des signaux et leur déphasage. Les observations quantitatives sont-elles conformes aux attentes, compte tenu des valeurs de résistances utilisées ?



b) Dans un deuxième temps, l'utilisateur applique un signal sinusoïdal d'amplitude crête à crête égale à 18,1 V, de fréquence 1,0 kHz à l'entrée du même dispositif et obtient les oscillogrammes suivants. L'amplitude crête à crête du signal de sortie s'avère égale à 27,0 V. Quel phénomène est apparu ? Que peut-on en déduire comme renseignement de l'amplitude crête à crête relevée en sortie ?



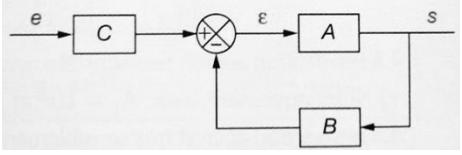
c) Avec les mêmes signaux, mais en sélectionnant le mode XY, le manipulateur obtient la trace représentée à la figure suivante. Expliquer. Quelle propriété de l'opérateur peut-on déduire de l'indication des curseurs : $\Delta X = 12{,}4V$ et $\Delta Y = 27{,}2V$?



2) Modélisation de la rétroaction

On souhaite tenir compte du gain différentiel fini, noté A, de l'amplificateur linéaire intégré. Pour cette étude, on suppose que l'amplitude du signal d'entrée est suffisamment faible pour qu'aucune saturation n'apparaisse.

a) On pose $\varepsilon = V_+ - V_-$ différence de potentiels des entrées l'amplificateur intégré. Proposer un schéma fonctionnel composé de 3 blocs linéaires, tels qu'indiqué sur la figure suivante.



b) Exprimer en régime stationnaire le rapport d'amplification $G = \frac{s}{e}$ de l'opérateur et examiner le comportement dans la limite $A \to \infty$. Conclure.

3) Etude de la bande passante

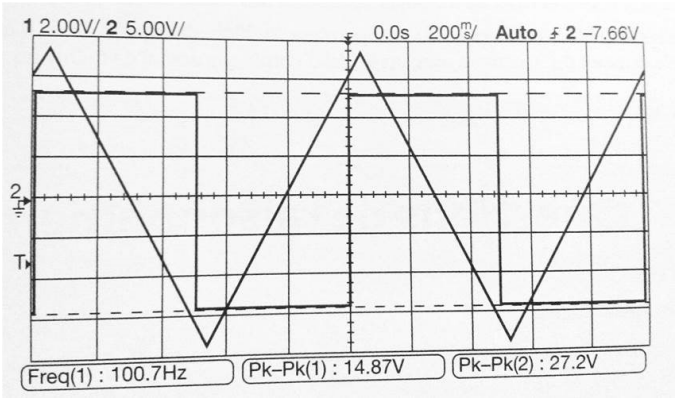
a) Justifier que la bande passante de l'opérateur complet est fixée par celle du réseau bouclé formé par le soustracteur et les blocs A et B.

b) En déduire l'expression de la bande passante de l'opérateur dans l'hypothèse d'un amplificateur linéaire intégré du premier ordre de gain statique A_0 et de fréquence de coupure f_0.

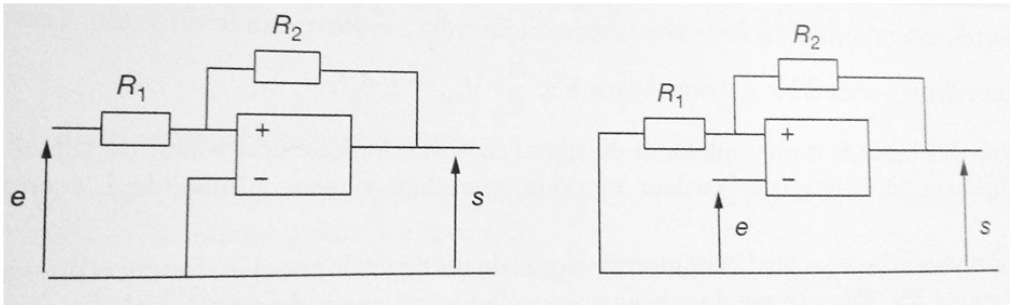
c) Proposer une valeur numérique. Conclure sur les observations effectuées au début de l'étude.

6.2 Manipulation d'un comparateur à hystérésis

Un comparateur à hystérésis a permis le relevé des oscillogrammes de la figure suivante, lorsque le signal d'entrée est un signal de forme triangulaire d'amplitude crête à crête égale à 14,9 V et de fréquence 100Hz.



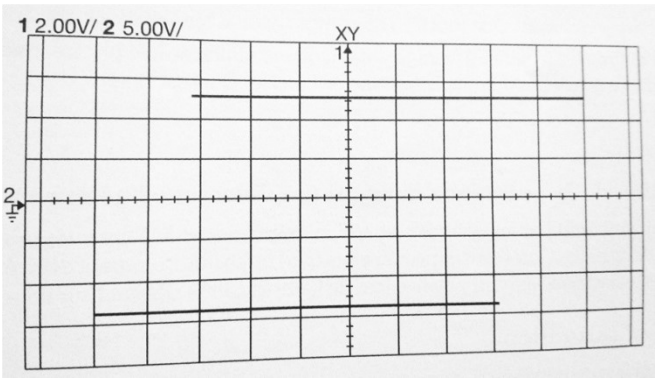
1) Laquelle des deux structures de la figure suivante a été utilisée ?



2) Les valeurs de résistances utilisées sont $R_1 = 33k\Omega$ et $R_2 = 68k\Omega$. Les observations sont-elles cohérentes avec ce choix, sachant que l'amplitude crête à crête mesurée en sortie est égale à 27,2 V ?

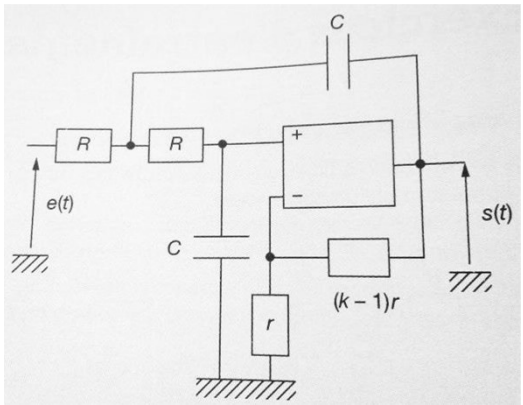
3) Quel mode de visualisation à l'oscilloscope permet d'obtenir la courbe représentée sur la figure suivante ?

4) Pour cette dernière courbe, l'utilisation d'un signal d'entrée sinusoïdal aurait-elle donné le même relevé ?



6.3 Filtre actif

Le schéma suivant est celui d'un filtre actif, réalisé à l'aide d'un amplificateur linéaire intégré, que l'on supposera idéal. Le paramètre noté k est un nombre strictement supérieur à l'unité.



1) Quelle relation permet d'exprimer le potentiel de l'entrée + en fonction de la tension de sortie ?

2) Déterminer la fonction de transfert et la mettre sous la forme : $\underline{H}(j\omega) = \frac{H_0}{1+2j\sigma\frac{\omega}{\omega_0}-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}}$

3) De quel type de filtre s'agit-il ?

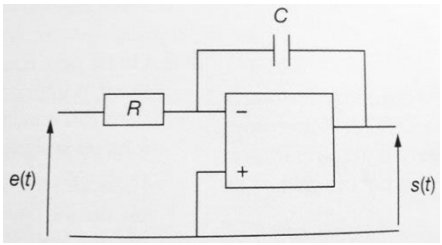
4) Retrouver la valeur du gain statique sans calcul.

5) Quelle condition sur k assure la stabilité du circuit ?

6.4 Intégrateur réalisé à l'aide d'un amplificateur linéaire intégré

On considère l'opérateur de la figure suivante couramment appelé intégrateur-inverseur. On se propose de déterminer l'influence, sur sa fonction de transfert, de la variation de gain différentiel de l'amplificateur linéaire intégré avec la fréquence.

On utilisera les valeurs R = 1 kΩ et C = 100 nF ainsi que les paramètres caractéristiques de l'amplificateur intégré : gain statique $A_0 = 10^5$ et fréquence de coupure $f_0 = 30$ Hz.



1) Dans le modèle d'ALI idéal, quelle est la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{\underline{s}}{\underline{e}}$ de l'opérateur ?

2) On tient compte à présent du gain fini $\underline{A_d}$ de l'ALI. Proposer une nouvelle expression de la fonction de transfert, en faisant intervenir $\underline{A_d}$.

3) Dans le modèle d'un gain prenant la forme d'une fonction de transfert du premier ordre de gain statique A_0 et de fréquence de coupure f_0, mettre la fonction, de transfert de l'opérateur sous la forme d'une fonction du second ordre.

4) Peut-on envisager une factorisation en un produit de fonctions de transfert du premier ordre ? Dans l'affirmative, quelles en sont les pulsations de coupure ?

5) La gamme des fréquences d'utilisation est choisie égale à [1 kHz ; 1 MHz], quel comportement approché peut-on proposer pour l'opérateur ? Conclure.