

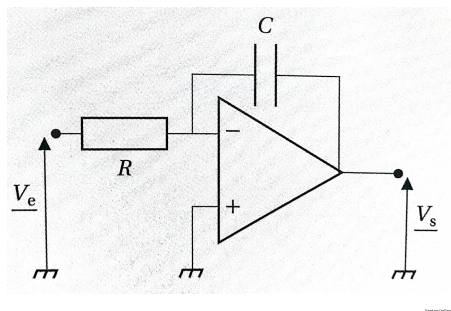
Travaux dirigés du chapitre : 1.1 Rétroaction

Partie : 1 Electronique

1 Divers montages

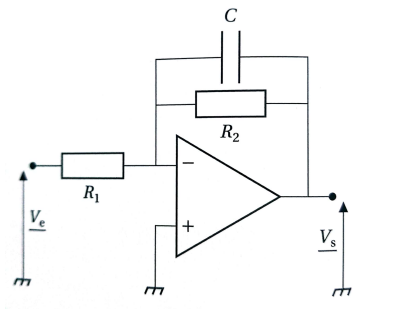
1.1 Montage intégrateur

1.1.1 Montage idéal



1. Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ?
2. En déduire la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{V_s}{V_e}$ du montage.
3. Justifier la dénomination "montage intégrateur".
4. L'impédance d'entrée du montage est le rapport entre la tension d'entrée V_e et le courant d'entrée. Exprimer l'impédance d'entrée de ce montage.

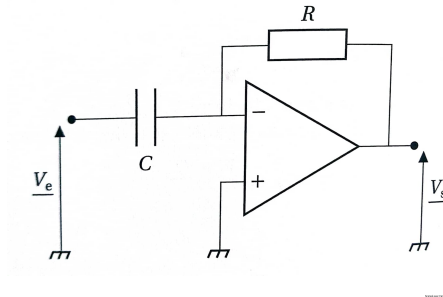
1.1.2 Variante du montage idéal



1. Justifier que l'ALI fonctionne en régime linéaire.
2. Donner la fonction de transfert du montage.

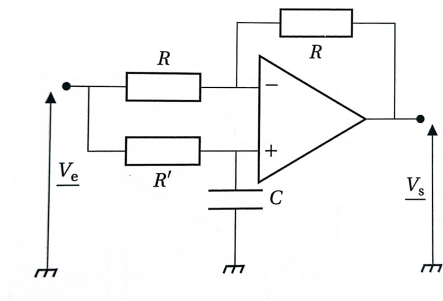
- Donner la relation, éventuellement sous forme d'équation différentielle, entre le signal d'entrée $V_e(t)$ et celui de sortie $V_s(t)$.
- Préciser l'intérêt du dispositif.

1.2 Montage dérivateur



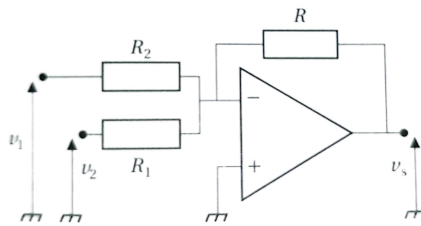
- Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ?
- En déduire la fonction de transfert $H = \frac{V_s}{V_e}$ du montage.
- Justifier la dénomination "montage dérivateur"
- L'impédance d'entrée d'un montage est le rapport entre la tension d'entrée V_e et le courant d'entrée. Exprimer l'impédance d'entrée de ce montage.

1.3 Montage déphaseur



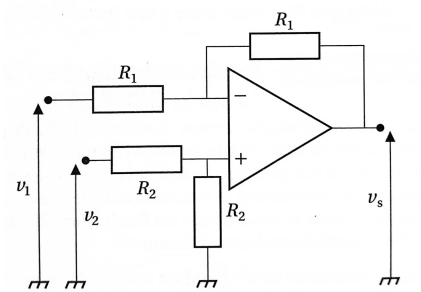
- Justifier que l'ALI fonctionne en régime linéaire.
- Donner la fonction de transfert du montage.
- Donner la relation, éventuellement sous forme d'équation différentielle, entre le signal d'entrée $V_e(t)$ et celui de sortie $V_s(t)$.
- Préciser l'intérêt du dispositif.

1.4 Montage sommateur



1. Déterminer la relation entre v_s , v_1 et v_2 .

1.5 Montage soustracteur

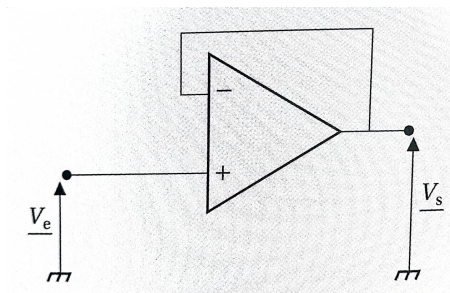


1. Déterminer la relation entre v_s , v_1 et v_2 .

2 Propriétés de montage en régime linéaire

2.1 Montage suiveur

2.1.1 Modèle idéal

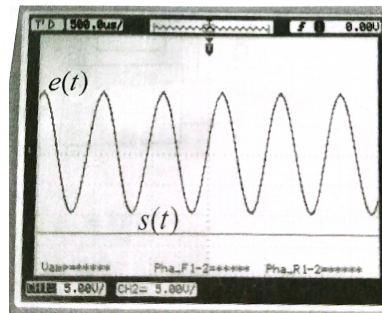


1. Le montage ci-dessus est étudié en supposant l'ALI idéal. Quelle est la relation entre les tensions d'entrée et de sortie ?
2. Quel peut être l'intérêt d'un tel montage ?

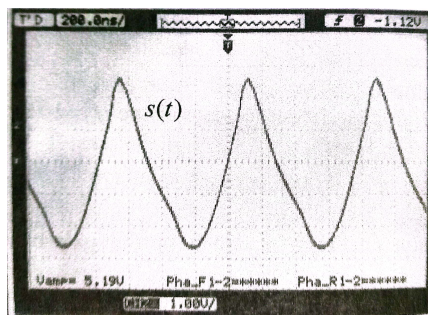
2.1.2 Quelques limites du modèle de l'ALI linéaire du 1er ordre

Lors de travaux pratiques, un expérimentateur souhaite mettre en œuvre le circuit suiveur. L'ALI étant un composant actif, il n'oublie pas d'utiliser une alimentation +15/0/-15 V. Afin de tester son montage, il met en entrée un signal $e(t)$ sinusoïdal d'amplitude 10 V pour vérifier qu'il obtient bien en sortie un signal sinusoïdal $s(t) = e(t)$.

1. Malheureusement, il observe en sortie un signal continu $s(t) = -14,6$ V dont la photo de l'écran d'oscilloscope est reproduite ci-contre. Quelle erreur a-t-il probablement faite ?

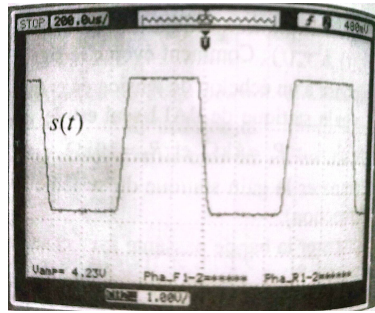


2. Après avoir corrigé son erreur de câblage, il observe en sortie le signal de la photo :



Un signal quasi-triangulaire. On précise que la fréquence de $e(t)$ est de 1,2 MHz.

- (a) Le comportement du montage est-il linéaire ? Proposer une explication.
 - (b) Estimer la valeur du facteur limitant, sachant que la mesure crête-crête du signal est de 5V. Est-ce en accord avec la valeur attendue ? Quelle fréquence maximale ne doit-il pas dépasser pour que le signal ne soit pas déformé ?
3. Après avoir abaissé la fréquence à 1 kHz et résolu son problème, il utilise le suiveur pour alimenter une résistance de $R_u = 100 \Omega$ placée entre la sortie et la masse. Il observe le signal de la photo :

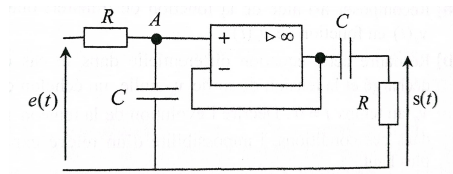


Ce signal est proche d'un créneau $+2,5 \text{ V}/-2\text{V}$.

- (a) Le comportement du montage est-il linéaire ? Est-ce dû à une saturation en tension ? Proposer une explication du problème.
- (b) Estimer la valeur de la saturation en cause. Est-ce en accord avec la valeur attendue ? Que pouvez-vous lui proposer pour l'aider à résoudre son problème s'il veut garder un signal de 10 V d'amplitude en entrée ?

2.1.3 Association en cascade : synthèse d'un filtre

On souhaite réaliser un filtre en associant en cascade un passe bas RC et un passe haut CR. Pour cela on réalise le montage ci-dessous.



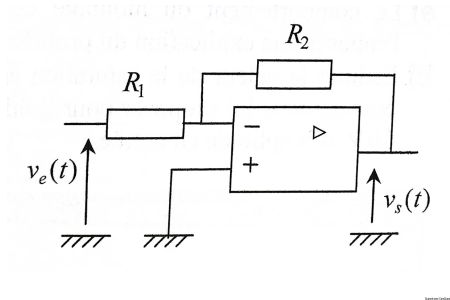
1. Quel est le rôle de l'amplificateur suiveur ?
2. Donner le comportement asymptotique basse fréquence et haute fréquence du filtre à l'aide de schéma et sans calcul. De quel type de filtre s'agit-il ?
3. Déterminer la fonction de transfert $\underline{H}(\omega)$ du filtre et retrouver les résultats de la question précédente.
4. Pour quelles fréquences le filtre se comporte comme un intégrateur ? Un dérivateur ?
5. Tracer les diagrammes de Bode asymptotiques (asymptotes BF et HF).
6. Compléter ce diagramme en recherchant le maximum de $|H| = |\underline{s}/\underline{e}|$ ainsi que la bande passante à -3 dB . En déduire le facteur de qualité.
7. Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $s(t)$ si l'on met un échelon de tension en entrée. Retrouver directement sur le facteur de qualité l'équation différentielle.

2.2 Amplificateur inverseur

2.2.1 Gain et bande passante de l'amplificateur inverseur

On considérera le modèle de l'amplificateur linéaire intégré linéaire du 1er ordre :

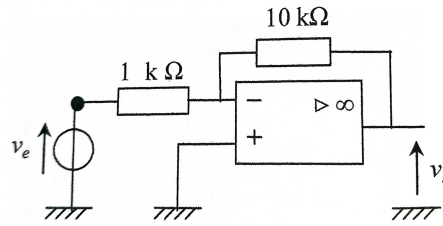
$$\underline{H}(\omega) = \frac{H_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$



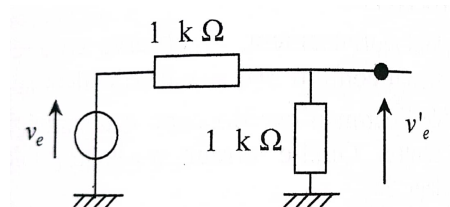
1. Quel est a priori le régime de fonctionnement de l'ALI ?
2. Déterminer la fonction de transfert du montage l'amplificateur non inverseur ci-dessus. En déduire la stabilité du système.
3. Établir l'équation différentielle du montage liant $v_s(t)$ à $v_e(t)$. Comment évolue le signal $v_s(t)$ en réponse à un échelon de tension en entrée ? Commenter.
4. Le gain statique de l'ALI seul est de $H_{0,dB} = 100\text{dB}$ et sa fréquence de coupure $f_0 = 10\text{Hz}$. On choisit $R_1 = 1\text{k}\Omega$ et $R_2 = 10\text{k}\Omega$.
 - (a) Comparer le gain statique du système bouclé avec celui de la chaîne direct (ALI seul sans rétroaction).
 - (b) Comparer la bande passante avec et sans rétroaction. Que peut-on dire du produit gain - bande passante ?
 - (c) Comparer également le temps caractéristique de réponse de la chaîne directe et celui du système bouclé. Commenter.
5. On suppose dans cette question que l'ALI est idéal, en déduire la fonction de transfert du montage amplificateur non-inverseur.

2.2.2 Adaptation d'impédance

On veut observer, en sortie v_s du montage schématisé sur la figure ci-dessous, une tension v_e au moyen d'un amplificateur opérationnel qui sature à $\pm 15\text{ V}$. Les résistances de $1\text{ k}\Omega$ sont notées R_1 et celle de $10\text{ k}\Omega$ notée R_2 .

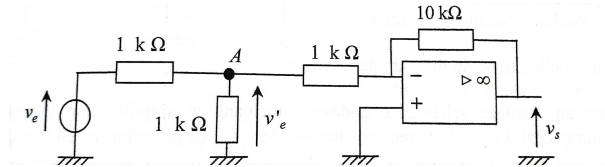


1. L'impédance d'entrée d'un montage est le rapport entre la tension d'entrée v_e et le courant d'entrée. Exprimer l'impédance d'entrée de ce montage.
2. Sachant que la tension v_e peut atteindre 2 V, expliquer pourquoi ce montage pose problème.
3. Un moyen simple pour éviter cette difficulté consiste à interposer, entre la source de tension v_e et l'entrée de l'amplificateur, un diviseur de tension tel que représenté sur la figure

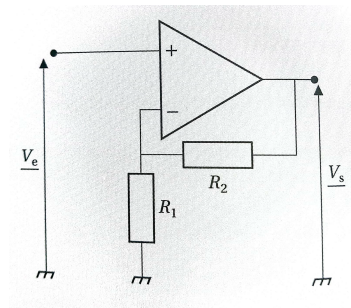


Dans l'état avant raccordement, exprimer en fonction de v_e , la tension v'_e , observée en sortie du pont diviseur.

4. En multipliant le coefficient d'atténuation du pont diviseur (v'_e/v_e) par le gain de l'amplificateur, on peut penser obtenir ainsi un gain convenable ; préciser la valeur du gain ainsi calculé. Dans cette hypothèse, quelle est la valeur prévisible de la tension v_s lorsque v_e atteint 2 V ?
5. En fait l'expérience lors du raccordement des deux circuits donne une valeur différente ; préciser laquelle et en déduire le gain effectivement obtenu. Expliquer en terme d'adaptation d'impédance, les raisons de ce désaccord.



2.3 Amplificateur non-inverseur



2.3.1 Étude de la stabilité du montage

1. Rappeler l'expression de la fonction de transfert $\underline{H}(\omega)$ de l'ALI et donner les ordres de grandeurs des différents termes introduits.
2. Donner la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée à l'aide de la fonction de transfert réelle $\underline{H}(\omega)$. On posera $G = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.
3. En déduire la relation complexe entre les tensions $\underline{V}_s$ et $\underline{V}_e$. Quelle est la nature de cette relation ?
4. Discuter alors la stabilité du montage.

2.3.2 Étude avec l'ALI idéal

On suppose maintenant que l'ALI est idéal.

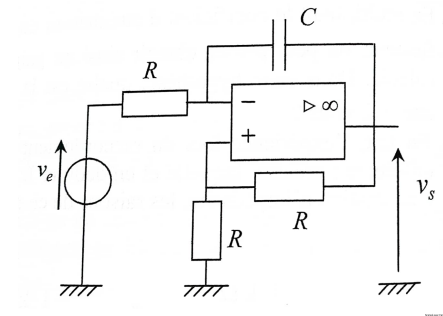
1. Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ?
2. En déduire la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e}$ du montage.
3. L'impédance d'entrée d'un montage est le rapport entre la tension d'entrée $\underline{V}_e$ et le courant d'entrée. Exprimer l'impédance d'entrée de ce montage.

2.4 Stabilité d'un montage

2.4.1 Premier exemple

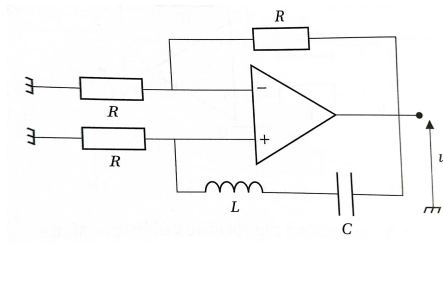
L'analyse fréquentielle de Bode inclut a priori une hypothèse de stabilité pour le fonctionnement des montages électroniques étudiés.

Le montage étudié ci-après donne l'exemple d'une fonction de transfert dont la représentation de Bode peut-être dessinée, mais ne correspondrait pas à un relevé expérimental.



- On s'intéresse au montage schématisé, incluant un amplificateur opérationnel considéré comme idéal. Lorsqu'une tension sinusoïdale $v_e(t)$ de pulsation ω est appliquée à l'entrée, une tension $v_s(t)$ apparaît en sortie. Exprimer la fonction de transfert complexe $\underline{H} = \underline{V}_s / \underline{V}_e$ associée à ce montage, en supposant le fonctionnement linéaire. En préciser la valeur du gain et du déphasage, puis dessiner une représentation asymptotique pour le gain et le déphasage.
- Comportement temporel :
 - Recomposer à l'aide de la fonction de transfert obtenue l'équation différentielle qui régit $v_s(t)$ en fonction de $v_e(t)$.
 - Résoudre cette équation différentielle dans le cas où, le condensateur étant initialement déchargé et la tension de sortie v_s nulle, un échelon de tension égal à $1 \mu\text{V}$ est appliqué en v_e au temps $t = 0$ s. Décrire l'évolution de la tension $v_s(t)$ au cours du temps. Justifier alors dans ces conditions, l'impossibilité d'un relevé expérimental du tracé de Bode déterminé plus haut.

2.4.2 Deuxième exemple

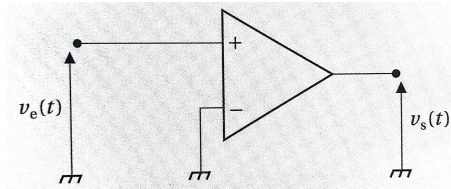


- Établir l'équation différentielle vérifiée par la tension de sortie. Le circuit est-il stable ?
- L'entrée du montage est initialement nulle, comment évolue le signal en fonction du temps ? Peut-on considérer que l'ALI fonctionne à tout instant en régime linéaire ?

3 Montages en régime saturé

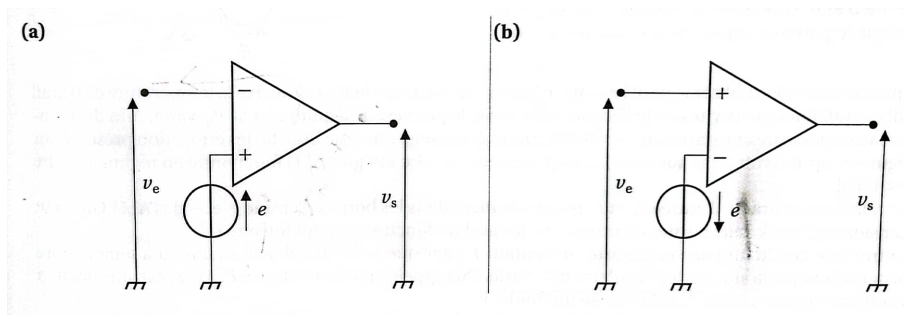
3.1 Comparateur simple

3.1.1 Cas classique



1. Décrire la tension de sortie en fonction de la tension d'entrée.
2. Quel sera l'effet d'un tel montage sur un signal sinusoïdal ?

3.1.2 Variantes



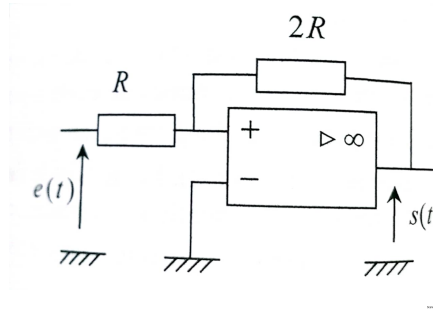
Pour chacun des montages :

1. Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ? Est-ce qu'un phénomène d'hystérésis est présent ?
2. Exprimer la tension différentielle ϵ en fonction de e et v_e .
3. Tracer la courbe de fonctionnement du comparateur.

3.2 Trigger de Schmidt

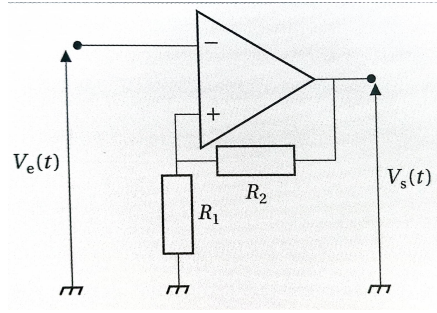
On considère le montage de la figure ci-dessous où l'ALI est supposé parfait et idéal mais en fonctionnant en régime non linéaire. Le montage est alimenté par une tension $e(t)$ d'amplitude variable.

La tension de sortie de l'amplificateur vaut $s = \pm V_{sat}$.



1. A quelle condition sur V_+ , potentiel de la borne d'entrée non inverseuse, a-t-on $s = +V_{sat}$?
2. Montrer que le potentiel V_+ s'écrit comme une combinaison linéaire des tensions e et s : $V_+ = \alpha e + \beta s$ où l'on précisera les valeurs des coefficients α et β .
3. (a) Supposons que la tension e soit suffisamment négative pour que s soit égale à $-V_{sat}$. La tension e augmente alors. Pour quelle valeur V_1 de e la sortie s bascule de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$?
 (b) Supposons maintenant que la tension e soit suffisamment positive pour que s soit égale à $+V_{sat}$. La tension e diminue alors. Pour quelle valeur V_2 de e la sortie s bascule de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$?
4. Tracer l'allure de la caractéristique $s(e)$ du montage. On précisera bien le sens du parcours de la caractéristique en y plaçant des flèches.
5. On applique un signal $e(t) = V_0 \sin(\omega t)$ en entrée. On suppose qu'au départ à $t = 0$ la sortie est saturée $-V_{sat}$. Tracez sur une même figure $e(t)$ et $s(t)$ dans les deux cas suivant : $V_0 < V_1$ puis $V_0 > V_1$.
6. (a) Un tel montage peut servir à stocker de l'information : par exemple, lorsque la sortie est "bloquée" à la valeur $+V_{sat}$, on dit que l'on a enregistré un bit de valeur "1" et lorsque la sortie est "bloquée" à la valeur $-V_{sat}$, on dit que l'on a enregistré un bit de valeur "0".
 On souhaite enregistrer un code formé de 4 chiffres (allant de 0 à 9). On rappelle que tout entier peut se décomposer en binaire selon la relation $N = \sum_{k=0}^p b_k 2^k$ où $b_k = 0$ ou 1. L'ensemble des b_k forme le code binaire de l'entier N .
 Quel est le plus grand nombre binaire que l'on puisse écrire avec un code binaire de 13 chiffres et de 14 chiffres ? En déduire le nombre de circuits "trigger de Schmidt" à utiliser pour stocker un code formé de 4 chiffres en base décimale.
 (b) Citer une autre application du trigger de Schmidt.

3.3 Comparateur à hystérésis



3.3.1 Étude de la stabilité du montage

1. Quelle est la différence avec le montage de l'amplificateur non inverseur ?
2. Rappeler l'expression de la fonction de transfert réelle $\underline{H}(\omega)$ de l'ALI et indiquer les ordres de grandeurs des différents termes introduits.
3. Donner la relation entre la tension de sortie et la tension d'entrée à l'aide de la fonction de transfert réelle $\underline{H}(\omega)$. On posera $G = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$
4. En déduire la relation complexe entre les tensions $\underline{V}_s$ et $\underline{V}_e$.
5. Discuter alors de la stabilité du montage.

3.3.2 Étude avec l'ALI idéal

On suppose maintenant que l'ALI est idéal

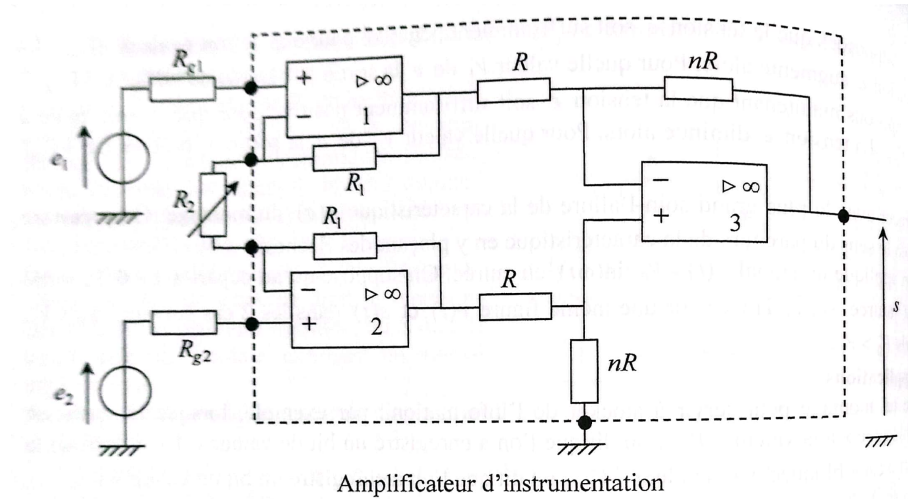
1. Quel est le régime de fonctionnement de l'ALI ?
2. Notons V_{sat} la tension de saturation de l'ALI. Supposons que la tension d'entrée soit initialement très inférieure à $-\frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{sat}$. Que vaut alors la tension de sortie V_s ?
3. La tension d'entrée initialement à la valeur de la question précédente est progressivement augmentée. Comment évolue la tension de sortie ?
4. Une fois que la tension d'entrée a dépassé la valeur $V_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}V_{sat}$, on inverse le processus et on la diminue progressivement. Comment évolue la tension de sortie ?
5. Tracer sur un même graphique le cycle de fonctionnement du système. Définir le phénomène d'hystérésis.

4 Problèmes

4.1 Montage à plusieurs ALI

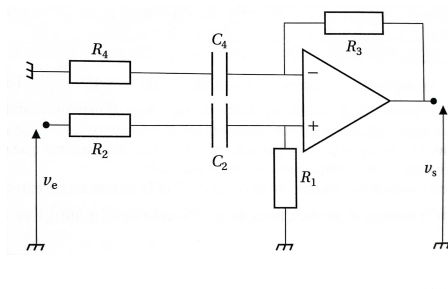
L'amplificateur d'instrumentation existe sous forme de circuit intégré (en pointillé sur le schéma). Il a de nombreuses utilisations : il est appliqué par exemple à l'électrocardiographie pour mesurer la différence de potentiel entre 2 électrodes placées sur le corps humain. Le but est d'effectuer une amplification différentielle de tension de la forme $s = A_0(e_2 - e_1)$. L'ALI seul effectue déjà cette opération entre V_+ et V_- , mais avec un facteur d'amplification A_0 beaucoup trop important, ce qui le fait saturer.

1. Les ALI sont considérés idéaux de gain infini. Exprimer s en fonction de e_1 , e_2 et des résistances. Que vaut A_0 ?
2. Le facteur d'amplification dépend-il de R_{g1} et R_{g2} ? Commenter.
3. Quelle est l'utilité de rendre la résistance R_2 variable ?



4.2 Étude d'un filtre

On étudie le circuit ci-après où v_e est une tension sinusoïdale de pulsation ω . L'ALI est idéal et fonctionne en régime linéaire.



1. Tracer la caractéristique statique d'un ALI idéal représentant la tension de sortie en fonction de la tension différentielle d'entrée et la commenter.
2. Dessiner les schémas équivalents en basses et hautes fréquences du circuit en tête d'exercice.
3. Déterminer alors les expressions de la tension de sortie v_s dans ces limites.
4. En déduire la nature probable du filtre.

5. Déterminer la fonction de transfert $\underline{H}(\omega) = \frac{v_s}{v_e}$ et la mettre sous la forme :

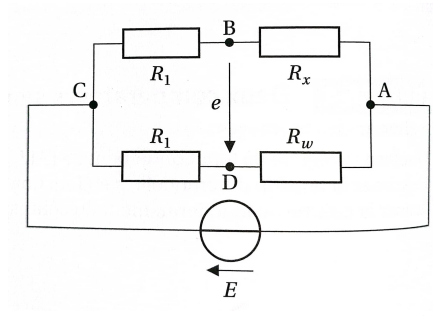
$$\underline{H}(\omega) = \frac{\underline{H}_1(\omega)\underline{H}_2(\omega)}{\underline{H}_3(\omega)\underline{H}_4(\omega)}$$

où $\underline{H}_1$, $\underline{H}_2$, $\underline{H}_3$ et $\underline{H}_4$ sont quatre fonctions de transferts du premier ordre de la forme $\underline{H}_1(\omega) = j\frac{\omega}{\omega_1}$ et $\underline{H}_i(\omega) = 1 + j\frac{\omega}{\omega_i}$ pour $i = 2, 3$ et 4 .

On exprimera les ω_i en fonction des composants.

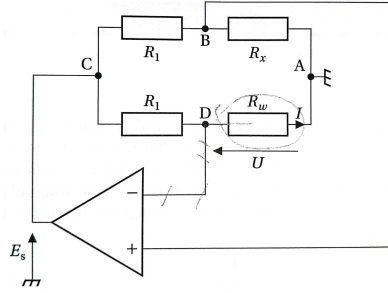
4.3 Électronique d'asservissement

Le problème étudie la mesure du débit d'un fluide grâce à un dispositif appelé "anémomètre à fil chaud". Une résistance variable est placée dans l'écoulement. A cause de celui-ci, un transfert thermique passe de la résistance vers le fluide. La température de celle-ci est donc asservie pour rester constante. La mesure de cet asservissement permet de remonter à la vitesse du fluide. Par ailleurs, pour une valeur de résistance donnée, la température de celle-ci est fixée de façon univoque.



1. La résistance du fil chaud est insérée dans un circuit de type "pont de Wheastone". Ce circuit comporte deux résistance égales à R_1 , une résistance R_x , que l'on peut faire varier, et le fil chaud représenté par la résistance R_w . En utilisant deux diviseurs de tension bien choisis, montrer que la tension e est égale à $e = R \left(\frac{1}{1+\delta} - \frac{1}{1+\beta} \right)$, où l'on précisera les expressions de β et de δ . Quelle est la condition sur R_w et R_x pour que le pont soit équilibré, c'est-à-dire $e = 0$?

On peut choisir d'équilibrer le pont ($e = 0$) en jouant sur la valeur de R_x , ce qui fixe la température de travail du fil chaud. Lorsque la vitesse de l'écoulement varie, le pont est déséquilibré, car R_w varie. Afin de maintenir la température constante, le circuit électrique doit comporter une boucle de rétroaction présenté sur la figure ci-après. L'amplificateur linéaire intégré (ALI) fonctionne en régime linéaire et est idéal.

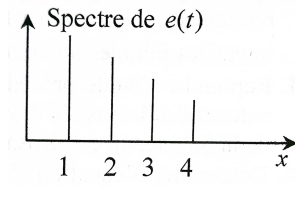


2. Que valent les courants d'entrée i_+ et i_- respectivement dans les bornes d'entrée + et - de l'ALI? Que vaut la tension entre ces deux bornes d'entrée dans le cas d'un fonctionnement linéaire?
3. Montrer que ce circuit permet d'ajuster le courant I pour que le fil chaud soit maintenu à température constante lorsque la vitesse de l'écoulement V varie. On rappelle que la résistance $R_w(V, I)$ est une fonction du courant qui la traverse, I , et la vitesse du fluide, V .
4. Montrer que la tension de sortie de l'ALI, E_s , vaut γU , où l'on exprimera γ en fonction de R_1 et R_w . En admettant que $R_w I^2 = \alpha + \beta \sqrt{V}$, montrer que la tension de sortie de l'ALI vérifie la loi de King $E_s^2 = A + B\sqrt{V}$, où l'on ne cherchera pas l'expression des coefficients.

5 Généralités

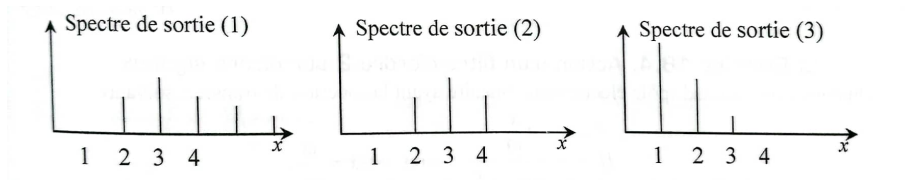
5.1 Linéarité d'un filtre

On envoie en entrée de différents filtres le signal $e(t)$ dont le spectre en amplitude est représenté :



On note $x = f/f_0$ avec $f_0 = 1$ kHz.

On obtient en sortie des filtres (1), (2) et (3) un signal $s(t)$ dont les spectres en amplitudes sont donnés en figure ci-dessous.

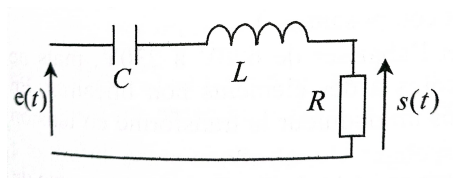


Source : voir Cours/Chapitre

1. Quel est (ou quels sont) le(s) filtre(s) non linéaire(s) ?
2. Caractériser le(s) filtre(s) linéaire(s), et donner un ordre de grandeur de sa(leurs) fréquence(s) de coupure.

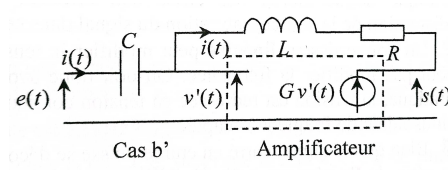
5.2 Stabilité d'un système linéaire en électronique

Considérons un circuit R-L-C avec R petite (faible amortissement) et $s(t)$ la tension aux bornes de R :



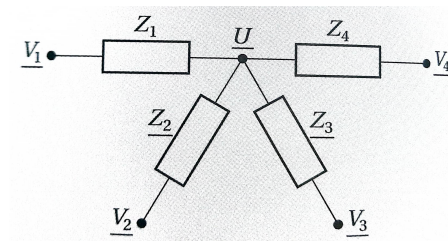
Source : voir Cours/Chapitre

Considérons un circuit R-L-C avec un amplificateur de gain $G = 2$:



1. Établir l'équation différentielle reliant e et s dans les deux cas. Les simplifier pour $e(t) = 0$ (régime libre). Comparer les signes des coefficients dans les 2 équations différentielles.
2. En déduire le régime établi dans les 2 cas.
3. Que se passe-t-il si une légère perturbation écarte le signal de sortie de son régime établi? Donner la forme des solutions sans chercher à expliciter les constantes d'intégration. Discuter de la stabilité.

5.3 Loi des noeuds en terme de potentiel (Millmann)



Les potentiels affichés correspondent aux tensions par rapport à la masse du système.

1. Exprimer le courant qui parcourt chacune des impédances en fonction des potentiels et des valeurs des impédances.
2. Démontrer la relation :

$$\underline{U} = \frac{\sum_{k=1}^4 \frac{V_k}{Z_k}}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{Z_k}}$$