



BLAISE PASCAL
PT 2024-2025

TD 5 – Électronique

Amplificateur linéaire intégré

- Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
- Difficulté technique et calculatoire ;
- Exercice important.



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

Ceinture		Proposition de parcours d'entraînement
	Ceinture blanche	Applications + exercices 1 à 5
	Ceinture jaune	Applications + exercices 1 à 5, 7, 8 et 11
	Ceinture rouge	Applications (★) + exercices 1 et 2 puis 5 à 12
	Ceinture noire	Applications (★) + exercices 1 et 2 puis 5 à 13

Applications de cours

Seuls les étudiants du groupe PT* seront interrogés en colle sur les applications marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

(★) 5.1 - Rappeler les hypothèses du modèle d'ALI idéal de gain infini. Représenter sa caractéristique statique. Rappeler les ordres de grandeur de V_{sat} (tension de saturation) et I_{sat} (courant de saturation). Expérimentalement, comment distinguer une saturation en tension d'une saturation en courant ? Dans le cas d'un montage suiveur débitant dans une résistance R_0 , comment procéder expérimentalement pour observer une saturation en tension ? une saturation en courant ?

Les hypothèses attendues sont celles citées dans l'encadré à mémoriser, évidemment pas celles du paragraphe « pour approfondir ». Une partie de cette question se rapporte au TP « Premiers montages à ALI ».

5.2 - Établir la relation entrée-sortie du montage amplificateur non-inverseur OU amplificateur inverseur OU intégrateur pur (c'est-à-dire sans résistance en parallèle du condensateur), au choix de l'interrogateur.

La connaissance des montages n'est pas exigible. Même s'il serait préférable que les étudiants les (re)connaissent, ils pourront être rappelés par l'interrogateur si besoin.

5.3 - Établir et représenter le cycle du comparateur à hystérésis non-inverseur.

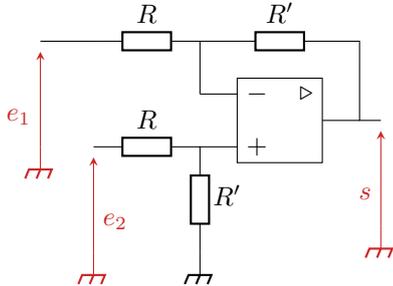
Idem sur la connaissance du montage.

(★) 5.4 - Procéder à l'étude de stabilité linéaire du montage amplificateur non inverseur OU du comparateur à hystérésis inverseur, au choix de l'interrogateur. En déduire le régime de fonctionnement de l'ALI du montage étudié.

Analyse de corrigé

Exercice 1 : Montage soustracteur 💡 1 | ✂ 1 | ⚡

- ▶ Montage simple à ALI;
- ▶ Régime linéaire.



Établir la relation entrée-sortie du montage ci-contre.

Correction — D'après la loi des nœuds en potentiel (théorème de Millman) appliquée à l'entrée \ominus de l'ALI,

$$\frac{e_1 - v_-}{R} + \frac{s - v_-}{R'} = 0 \quad \text{soit} \quad \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right)v_- = \frac{e_1}{R} + \frac{s}{R'}$$

et en multipliant l'ensemble par RR' on obtient

$$(R + R')v_- = R' e_1 + R s \quad \text{soit} \quad v_- = \frac{R'}{R + R'} e_1 + \frac{R}{R + R'} s.$$

Question d'analyse 1 - Pourquoi le courant entrant dans l'ALI n'intervient-il pas dans la loi des nœuds ?

Question d'analyse 2 - Pourquoi la LNP est-elle ici plus efficace qu'un pont diviseur de tension ?

Par ailleurs, en identifiant un pont diviseur de tension dans la branche « en bas à gauche » de l'ALI,

$$\frac{v_+}{e_2} = \frac{R'}{R + R'}.$$

Question d'analyse 3 - Pourquoi un pont diviseur est-il cette fois le plus adapté ? Écrire explicitement la LNP ... et vérifiez que vous arrivez au même résultat !

Enfin, l'ALI fonctionnant en régime linéaire, on a $v_+ = v_-$ d'où

$$\frac{R'}{R + R'} e_1 + \frac{R}{R + R'} s = \frac{R'}{R + R'} e_2$$

ce qui conduit finalement à

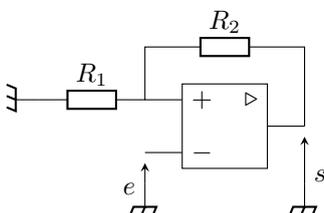
$$s = \frac{R'}{R} (e_2 - e_1).$$

Question d'analyse 4 - Pourquoi l'hypothèse de régime linéaire est-elle légitime ?

Question d'analyse 5 - Peut-on déduire du fonctionnement linéaire que $v_+ = v_- = 0$?

Exercice 2 : Comparateur à hystérésis inverseur 💡 2 | ✂ 1 | ⚡

- ▶ Montage simple à ALI;
- ▶ Régime de saturation.



- 1 - Identifier le régime de fonctionnement de l'ALI ci-contre.
- 2 - Exprimer le potentiel v_+ en fonction de s .
- 3 - En déduire les tensions de basculement.
- 4 - On choisit $R_2 = 2R_1$. Représenter le cycle d'hystérésis du montage.
- 5 - Représenter le signal de sortie pour une entrée sinusoïdale d'amplitude 10 V.

Correction — 1 - L'ALI fonctionne en régime de saturation.

Question d'analyse 1 - Justifier cette affirmation.

2 - Les deux résistances R_1 et R_2 sont parcourues par le même courant et forment donc un pont diviseur. Ainsi,

$$\frac{v_+}{s} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad \text{donc} \quad v_+ = \frac{R_1}{R_1 + R_2} s.$$

Question d'analyse 2 - Justifier que le courant dans les résistances est le même.

Question d'analyse 3 - Représenter sur le schéma les flèches de tension montrant le pont diviseur.

3 - Supposons l'ALI en saturation haute. Il y reste tant que

$$v_- < v_+ \quad \text{soit} \quad e < \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}.$$

Supposons maintenant l'ALI en saturation basse. Il y reste tant que

$$v_- > v_+ \quad \text{soit} \quad e > -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat}.$$

Question d'analyse 4 - Expliquer l'apparition du signe – dans la dernière inégalité.

4 - Voir figure 1 à gauche.

Question d'analyse 5 - Indiquer par des flèches le sens dans lequel les parties verticales du cycle sont parcourues.

5 - Voir figure 1 à droite.

Question d'analyse 6 - Pourquoi la sortie ne bascule-t-elle pas aux instants notés t_1 et t_2 ?

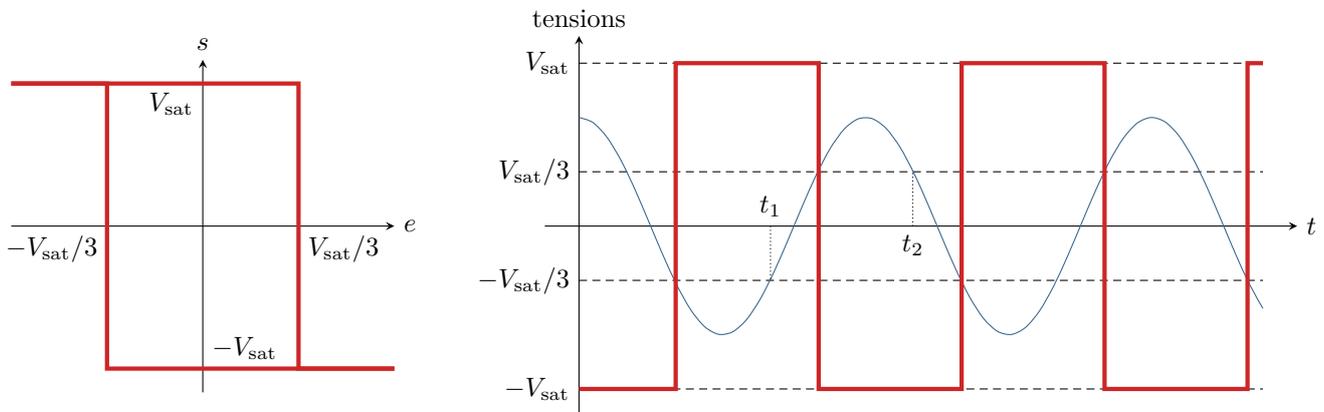
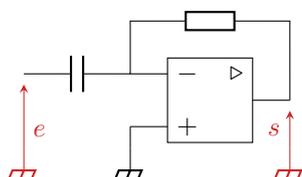


Figure 1 – Comparateur à hystérésis inverseur. Gauche : diagramme entrée-sortie. Droite : signal de sortie pour un signal d'entrée sinusoïdal.

Montages simples

Exercice 3 : Montage dérivateur 💡 1 | ✂ 1 | 🔄

- ▷ Montage simple à ALI ;
- ▷ Régime linéaire.

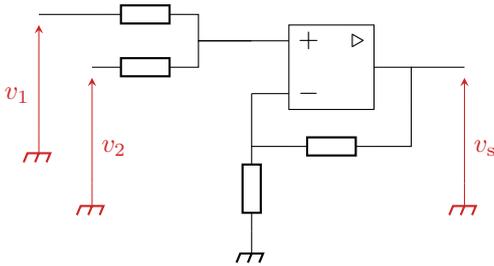


Établir la relation entrée-sortie du montage.

Exercice 4 : Montage sommateur

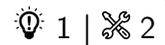


- ▷ Montage simple à ALI;
- ▷ Régime linéaire.

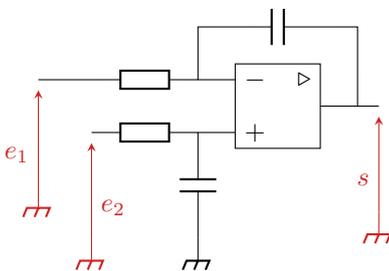


Exprimer v_s en fonction de v_1 et v_2 . Les quatre résistances R sont identiques.

Exercice 5 : Intégrateur différentiel



- ▷ Montage simple à ALI;
- ▷ Régime linéaire.

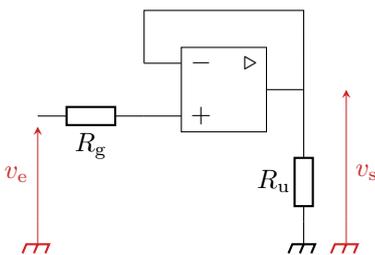


Exprimer dans le domaine fréquentiel puis temporel la relation entre la tension de sortie et les deux tensions d'entrée du montage. Les deux résistances R et les deux condensateurs C sont identiques.

Exercice 6 : ALI avec défauts

oral banque PT | 2 | 1

- ▷ Modèle du premier ordre;
- ▷ Modèle de l'ALI idéal.



L'ALI du montage ci-contre est décrit par sa fonction de transfert

$$\underline{A_d} = \frac{v_s}{\underline{\varepsilon}} = \frac{A_0}{1 + j\omega\tau} \quad \text{avec} \quad \varepsilon = v_+ - v_- .$$

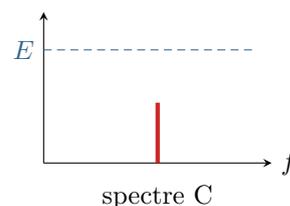
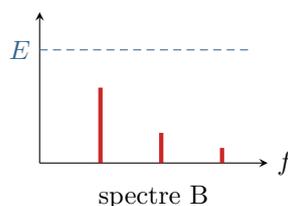
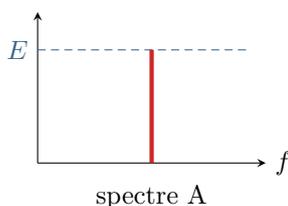
Sa tension de saturation est $V_{\text{sat}} = 14 \text{ V}$. On impose en entrée un signal de la forme

$$v_e(t) = E \sin(2\pi ft) .$$

1 - En l'absence de défaut, déterminer v_s . Quel est l'intérêt du montage ?

2 - On réalise trois expériences, qui donnent les trois spectres ci-dessous. Associer chaque spectre à une expérience et interpréter.

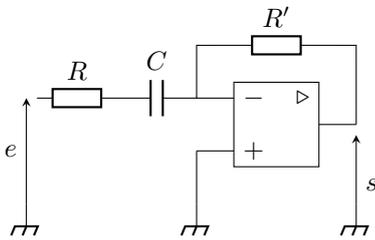
- ▷ Expérience 1 : $E = 20 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ kHz}$;
- ▷ Expérience 2 : $E = 1 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ MHz}$;
- ▷ Expérience 3 : $E = 1 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ kHz}$.



Exercice 7 : Filtre actif amplificateur



- ▷ Montage simple à ALI;
- ▷ Régime linéaire et de saturation;
- ▷ Filtrage.



- 1 - Identifier sans calcul la nature du filtre ci-contre.
- 2 - Établir sa fonction de transfert sous forme canonique

$$H = \frac{H_0}{1 - j\omega_c/\omega}$$

- 3 - On souhaite une pulsation de coupure $\omega_c = 1 \cdot 10^4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ et un gain de 20 dB en haute fréquence. Déterminer les valeurs à donner à R' et C pour $R = 1 \text{ k}\Omega$.

- 4 - Tracer le diagramme de Bode du filtre.

- 5 - On envoie en entrée du filtre une tension sinusoïdale $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$. Donner l'allure de la tension de sortie et de son spectre dans les quatre cas suivants :

- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ▷ $E_0 = 1 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;
- ▷ $E_0 = 3 \text{ V}$ et $\omega = 1 \cdot 10^5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$.

Exercice 8 : Régulation de température

inspiré écrit Centrale TSI 2018 | 2 | 2

- ▷ Comparateur à hystérésis.

Cet exercice propose l'étude d'un dispositif simple de régulation thermique, réalisable avec des composants électroniques bon marché. Le régulateur permet de maintenir la température T d'une pièce autour d'une valeur de consigne T_c , en enclenchant le système de chauffage lorsque $T \leq T_c - \Delta T$ et en le stoppant lorsque $T \geq T_c + \Delta T$. Le déclenchement du système de chauffage se fait pour un signal de commande positif, l'arrêt pour un signal de commande négatif.

Le régulateur dispose d'une sonde de température permettant la mesure de T . On utilise comme capteur de température une thermistance CTN (pour Coefficient de Température Négatif), dont la résistance $R(T)$ diminue lorsque la température T augmente. Le dispositif de régulation est réalisé à l'aide du montage représenté figure 2 dans lequel $R(T)$ est la résistance CTN et $E(T_c)$ est fonction de la température de consigne T_c selon la loi

$$E(T_c) = a + bT_c,$$

L'ALI du bloc 2 est supposé idéal, de tensions de saturation $\pm V_{\text{sat}}$. L'objectif est de dimensionner le bloc 2, c'est-à-dire de déterminer les coefficients a, b et une condition sur les résistances R_1 et R_2 .

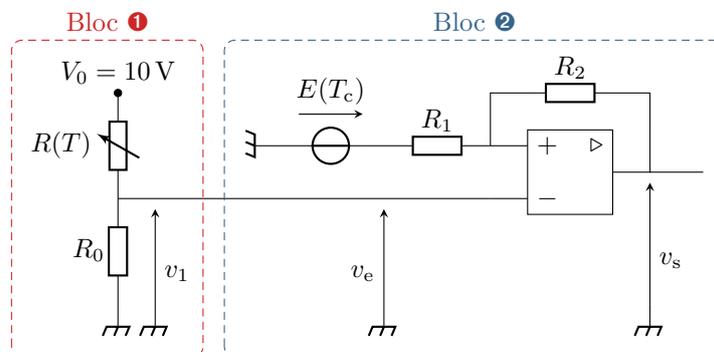


Figure 2 – Schéma du régulateur de température.

- 1 - Déterminer l'expression littérale de $v_1(T)$ en fonction des composants du bloc 1. On admet que dans la plage de température étudiée, la loi de comportement de la thermistance CTN permet d'approximer

$$v_1(T) \simeq \alpha + \beta T \quad (\alpha, \beta \text{ deux constantes connues}).$$

2 - Montrer que le potentiel de l'entrée non-inverseuse de l'ALI s'écrit

$$v_+ = k v_s + (1 - k)E \quad \text{avec} \quad k = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

3 - Justifier que l'ALI du bloc 2 fonctionne en régime de saturation. Déterminer en fonction de E les valeurs de la tension v_e pour lesquels il y a changement d'état de saturation.

4 - Tracer la caractéristique $v_s = f(v_e)$. Quelle est la fonction réalisée par le montage ?

5 - Écrire les conditions de basculement en termes des températures. En déduire que le bon fonctionnement du système impose

$$k = \frac{\beta \Delta T}{V_{\text{sat}}}.$$

6 - Montrer alors que les coefficients doivent vérifier la relation

$$[(1 - k)b - \beta] T_c + [(1 - k)a - \alpha] = 0$$

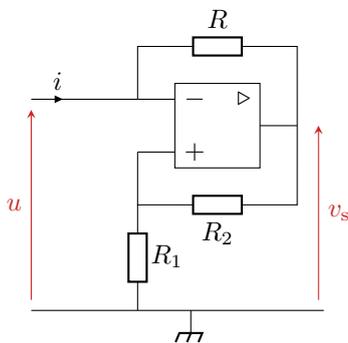
En déduire les expressions de a et b .

7 - Pourquoi est-il intéressant d'imposer une tension $v_1(T)$ fonction affine de T ?

Impédance d'entrée, simulation de dipôles

Exercice 9 : Résistance négative 💡 2 | ✂️ 2

- Montage simple à ALI ;
- Impédance d'entrée ;
- Régime linéaire et de saturation.



1 - Peut-on anticiper simplement le régime de fonctionnement de l'ALI ? Sans faire d'hypothèse, exprimer les potentiels v^+ et v^- en fonction de i et v_s .

2 - En régime linéaire, en déduire une relation entre u et i . Justifier de manière rigoureuse que ce montage se comporte alors comme un dipôle de résistance $R_N < 0$ à exprimer en fonction de R_1 , R_2 et R .

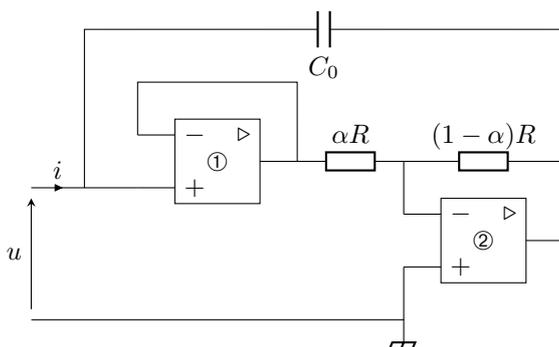
3 - A quelle condition l'ALI quitte-t-il le régime linéaire pour basculer en saturation haute ? Déterminer le domaine de courant i pour lequel ce régime est atteint. Le montage a-t-il un comportement d'hystérésis ?

4 - Reprendre la question pour le régime de saturation basse.

5 - Tracer la caractéristique statique u en fonction de i en précisant les zones correspondant au fonctionnement en régime linéaire, en saturation positive et négative. Donner les équations de chaque portion de la caractéristique.

Exercice 10 : Capacité réglable 💡 2 | ✂️ 1

- Montage à plusieurs blocs ;
- Impédance d'entrée ;
- Régime linéaire.



Les deux ALI du montage ci-contre fonctionnent en régime linéaire. Montrer que ce montage équivaut à un condensateur de capacité C que l'on exprimera en fonction de C_0 et α . Quel est son intérêt ?

D'autres montages plus élaborés

Exercice 11 : Amplificateur différentiel

PT A 2019 |  2 |  2

- ▷ Montage à plusieurs blocs ;
- ▷ Régime linéaire.

Les électrodes sont reliées à l'amplificateur d'instrumentation représenté à la figure 3. Celui-ci comporte 3 ALI (notés AL1, AL2, AL3).

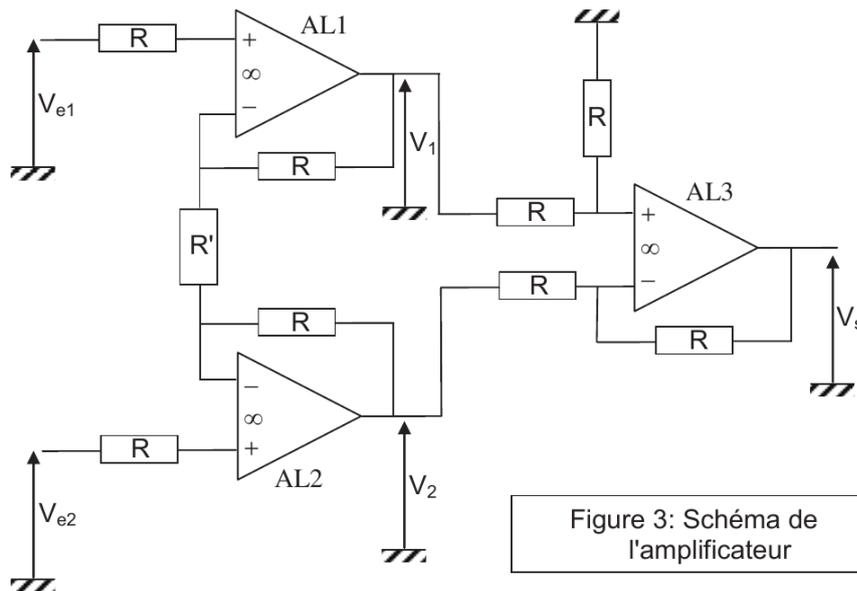


Figure 3: Schéma de l'amplificateur

On donne : $R = 100 \text{ k}\Omega$, $R' = 2 \text{ k}\Omega$.

- a- Rappeler les ordres de grandeurs du gain statique, de l'impédance d'entrée et de l'impédance de sortie d'un ALI réel.
- b- Quelles sont les valeurs de ces mêmes grandeurs pour un ALI idéal ?

Dans toute la suite, les ALI seront considérés comme idéaux et fonctionnant en régime linéaire.

- c- L'électrode en A, dont le potentiel par rapport à une référence est noté V_{e1} , est reliée à AL1. L'électrode en A', dont le potentiel par rapport à une référence est noté V_{e2} , est reliée à AL2 (fig 3). Déterminer $V_2 - V_1$ en fonction de $V_{e2} - V_{e1}$, R et R'.
- d- En déduire la tension de sortie V_s en fonction de $V_{e2} - V_{e1}$.

e- Le gain A_d de l'amplificateur est donné par $A_d = \left| \frac{V_s}{V_{e2} - V_{e1}} \right|$.

Expliciter A_d littéralement puis numériquement.

- f- Les électrodes fournissent une différence de potentiel ayant une amplitude de l'ordre de $100 \mu\text{V}$. Quel est l'ordre de grandeur de l'amplitude du signal en sortie de l'amplificateur ?

Exercice 12 : Filtre en peigne de fréquence

oral banque PT |  2 |  2

- ▷ Montage à plusieurs blocs ;
- ▷ Régime linéaire ;
- ▷ Filtrage.

On s'intéresse au montage de la figure 3. Les deux ALI fonctionnent en régime linéaire et on suppose $0 < \beta < 1$.

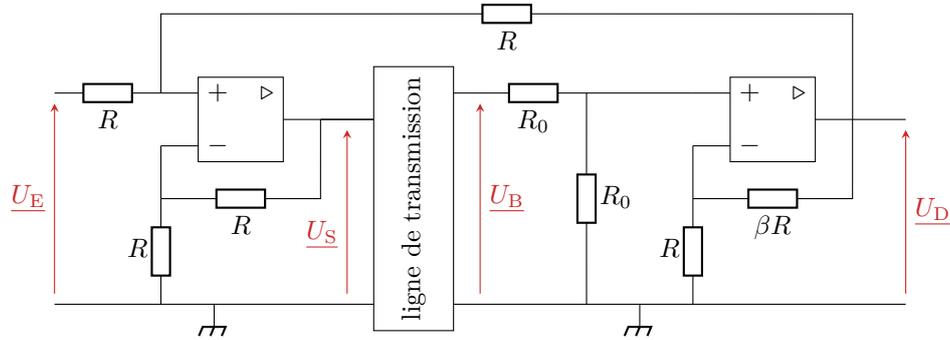


Figure 3 – Schéma du filtre en peigne de fréquence.

1 - La fonction de transfert de la ligne de transmission est de la forme

$$\underline{H}_L(j\omega) = \frac{U_B}{U_S} = e^{-j\omega\tau},$$

où τ est une constante caractéristique de la ligne. Quel est le phénomène physique qui justifie d'écrire cette fonction de transfert sous cette forme ?

2 - Exprimer $\underline{H}_B(j\omega) = U_D/U_B$ en fonction de $\alpha = (1 + \beta)/2$.

3 - Déterminer $\underline{H}(j\omega) = U_D/U_E$.

4 - La figure 4 représente $|\underline{H}(j\omega)|$. Déterminer les grandeurs définies sur la figure : H_{\max} , H_{\min} , Ω et la largeur $\Delta\omega$ de la bande passante à -3 dB .

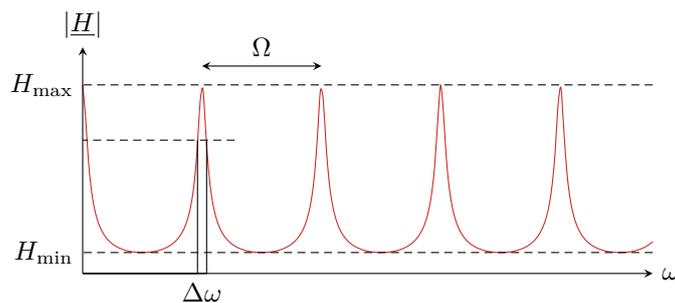


Figure 4 – Fonction de transfert du filtre en peigne de fréquence.

5 - On envoie en entrée du filtre un signal s'écrivant comme la somme :

▷ d'un signal d'intérêt u_0 tel que $\forall t, u_0(t + T) = u_0(t)$;

▷ d'un bruit modélisé par un ensemble de signaux sinusoïdaux v_i de fréquence $f_i \neq 1/T$.

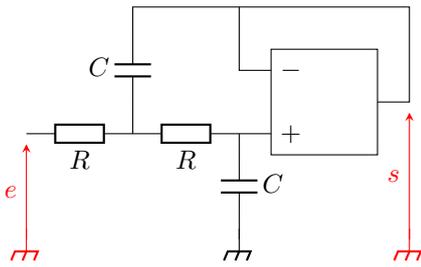
Comment choisir τ pour éliminer le bruit ?

Exercice 13 : Filtre de Sallen-Key

oral banque PT | 💡 3 | ✂️ 3



▷ Régime linéaire ;
▷ Filtrage.



On suppose que l'ALI du montage ci-contre fonctionne en régime linéaire.

- 1 - Identifier la nature du filtre.
- 2 - Établir sa fonction de transfert. Identifier une pulsation caractéristique ω_0 .
- 3 - Représenter son diagramme de Bode en gain.
- 4 - Discuter l'allure du signal de sortie pour un créneau en entrée.