






BLAISE PASCAL
PT 2023-2024





TD 5 – Électronique

Amplificateur linéaire intégré

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



Flasher ce code pour
accéder au corrigé

Ceinture		Proposition de parcours d'entraînement
	Ceinture blanche	Questions de cours + exercices 1 à 4, 7
	Ceinture jaune	Questions de cours + exercices 1 à 4, 6, 7 et 9
	Ceinture rouge	Questions de cours (★) + exercices 4 à 10
	Ceinture noire	Questions de cours (★) + exercices 4 à 11

Questions et applications de cours

Seuls les étudiants du groupe PT* seront interrogés en colle sur les questions 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 ?

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).

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.

Idem sur la connaissance du montage. J'ai traité en cours le cas du non-inverseur (entrée du montage sur la résistance, entrée \ominus de l'ALI à la masse).

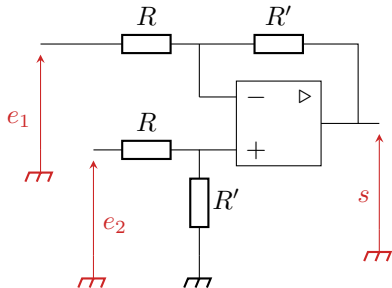
(★) 5.4 - Procéder à l'étude de stabilité linéaire du montage amplificateur non inverseur OU du comparateur à hystérésis. En déduire le régime de fonctionnement de l'ALI de ces montages.

Analyse de corrigé

Exercice 1 : Montage soustracteur



- ▷ 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 ?

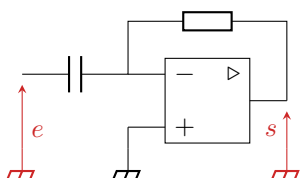
Question d'analyse 5 - Peut-on déduire du fonctionnement linéaire que $v_+ = v_- = 0$?

Montages simples

Exercice 2 : Montage dérivateur



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

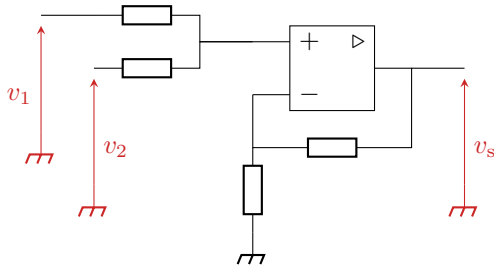


Établir la relation entrée-sortie du montage.

Exercice 3 : Montage sommateur

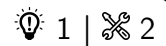


- ▷ Montage simple à ALI;
- ▷ Régime linéaire.

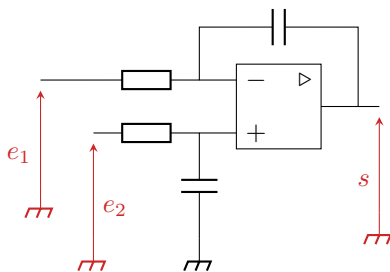


Exprimer v_s en fonction de v_1 et v_2 . Les quatre résistances R sont identiques.

Exercice 4 : Intégrateur différentiel



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

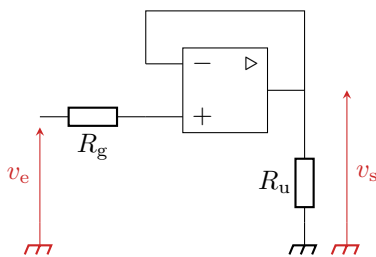


Exprimer dans le domaine fréquentiel puis temporel la relation entre la tension de sortie et les deux tensions d'entrée du montage. Les deux résistances R et les deux condensateurs C sont identiques.

Exercice 5 : 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

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

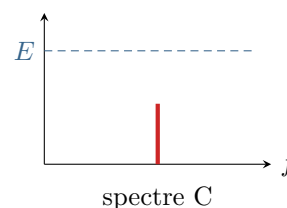
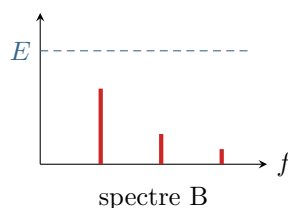
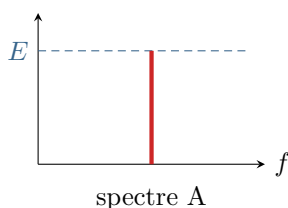
Sa tension de saturation est $V_{\text{sat}} = 14 \text{ V}$. On impose en entrée un signal de la forme

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

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.

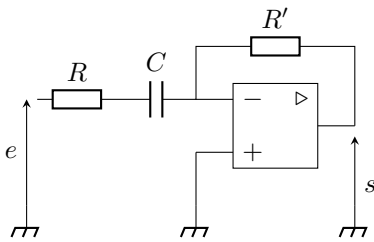
- ▷ Expérience 1 : $E = 20 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ kHz}$;
- ▷ Expérience 2 : $E = 1 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ MHz}$;
- ▷ Expérience 3 : $E = 1 \text{ V}$ et $f = 1 \text{ kHz}$.



Exercice 6 : 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 7 : 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 1 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 .

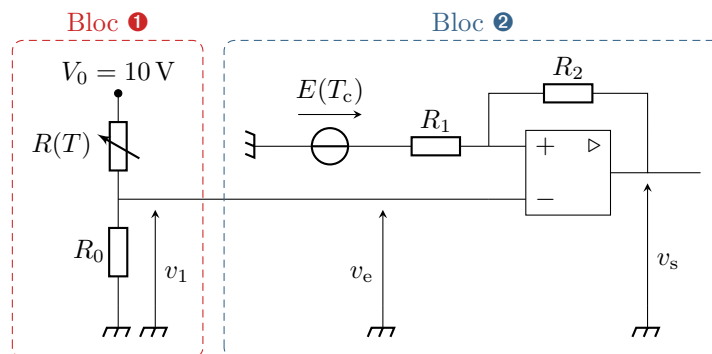


Figure 1 – Schéma du régulateur de température.

- 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

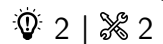
$$[(1 - k)b - \beta] T_c + [(1 - k)a - \alpha] = 0$$

En déduire les expressions de a et b .

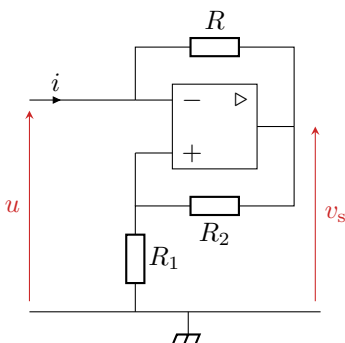
7 - Pourquoi est-il intéressant d'imposer une tension $v_1(T)$ fonction affine de T ?

Impédance d'entrée, simulation de dipôles

Exercice 8 : Résistance négative



- ▷ 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 .

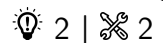
2 - En régime linéaire, en déduire une relation entre u et i . Justifier de manière rigoureuse que ce montage se comporte alors comme un dipôle de résistance $R_N < 0$ à exprimer en fonction de R_1 , R_2 et R .

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 ?

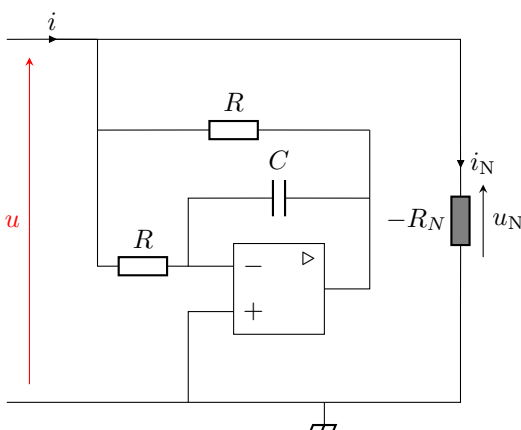
4 - Reprendre la question pour le régime de saturation basse.

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 9 : Simulateur d'inductance



- ▷ Impédance d'entrée ;
- ▷ Régime linéaire.



Les bobines sont des composants très utilisés en électronique de puissance, mais leur grande taille les rend peu pratiques à insérer dans des circuits intégrés. Ce n'est cependant pas un souci puisqu'elles peuvent être remplacées par des montages à ALI comme celui représenté ci-contre, beaucoup plus compact.

L'ALI fonctionne en régime linéaire. Le dipôle « $-R_N$ » désigne l'impédance d'entrée d'un autre montage à ALI, dit à résistance négative, dont la loi de comportement s'écrit $u_N = -R_N i_N$.

1 - Déterminer l'impédance d'entrée Z du montage. Il pourra être plus simple de déterminer d'abord l'admittance $Y = 1/Z$.

2 - En déduire la valeur à donner à R_N pour que le montage soit équivalent à une inductance pure, et en déduire $L_{\text{éq}}$.

D'autres montages plus élaborés

Exercice 10 : 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 2. Les deux ALI fonctionnent en régime linéaire et on suppose $0 < \beta < 1$.

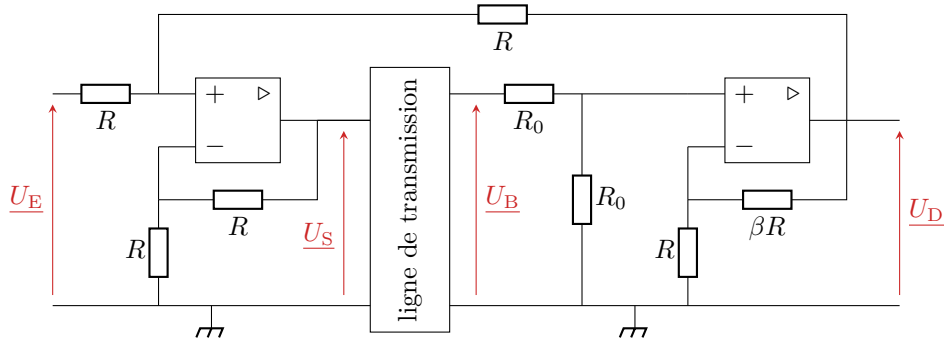


Figure 2 – Schéma du filtre en peigne de fréquence.

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 3 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.

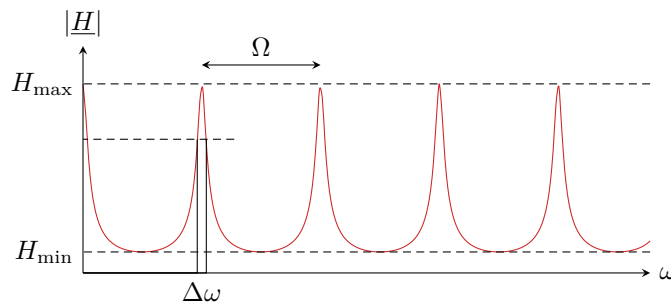


Figure 3 – Fonction de transfert du filtre en peigne de fréquence.


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 11 : Démodulateur à déphasage

oral banque PT | 💡 3 | ✂️ 2

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

Considérons le montage figure 4. Le potentiel de sortie du multiplieur est relié aux potentiels de ses entrées par $v_m = K v_x v_y$, où K est une constante positive s'exprimant en V^{-1} . L'impédance des entrées x et y est infinie.

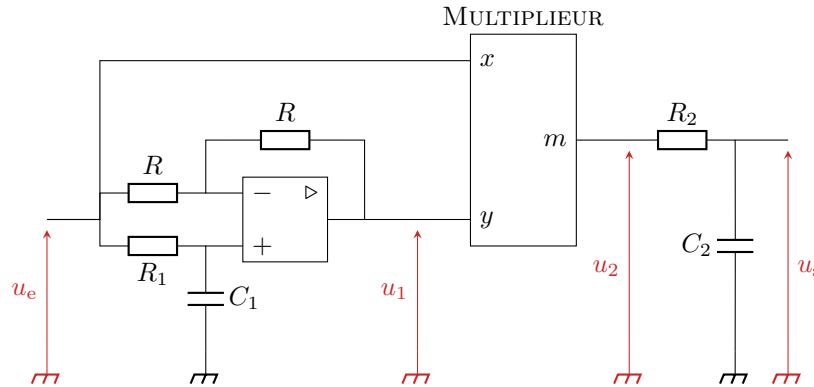


Figure 4 – Démodulateur à déphasage.

- 1 - Rappeler les spécificités d'un ALI idéal. Quel est le mode de fonctionnement de l'ALI présent dans le système ?
- 2 - Déterminer $\underline{H}_1 = \underline{U}_1 / \underline{U}_e$, exprimer son module et son argument.
- 3 - Déterminer la pulsation ω_0 telle que pour une entrée $u_e(t) = A \cos(\omega_0 t)$ on ait

$$u_1(t) = A \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right).$$

- 4 - Calculer $u_2(t)$ pour $u_e(t) = A \cos(\omega t)$ avec ω quelconque. Que dire si $\omega = \omega_0$?
- 5 - Calculer $u_s(t)$ pour $\omega = \omega_0$. Comment choisir C_2 pour que u_s soit « constante » ?
- 6 - Calculer u_s pour $u_e = A \cos((\omega_0 + \Delta\omega)t)$ avec $\Delta\omega \ll \omega_0$. Comment en déduire $\Delta\omega$?