

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electronique



Travaux dirigés (TD)

Capteurs et Instrumentation

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique

Niveau : 3^{ème} année Licence

Dr. Mohamed El Hossine DAACHI

E-mail: m_daachi@yahoo.fr

(2020/2021)

TD N° 1 :

Exercice 1 :

Soit un potentiomètre de $12.5\text{ k}\Omega$ utilisé comme capteur de déplacement, pour mesurer une plage de déplacements de 0 à 600 cm, et alimenté par une tension de 10 Volts.

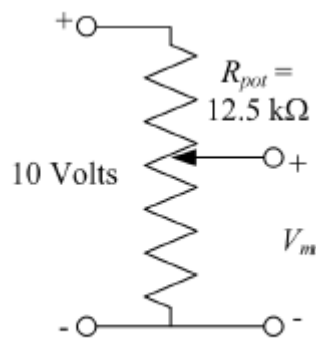


Figure 1

1. Quelle est la sensibilité de ce dispositif en V/mm ?
2. Si la classe de précision de ce capteur est de $\pm 0.25\%$ E.M., quelle est son erreur absolue et son erreur relative à 375 cm ?
3. Refaire la question 2 pour une distance de 1 cm. Interpréter.

Exercice 2 :

Soit un capteur de niveau ayant une étendue de mesure de 0.5 à 25 mètres et donnant un signal de sortie 4 – 20 mA (4 mA à 0.5 m et 20 mA à 25 m) envoyé à un automate ayant un convertisseur analogique/numérique de 10 bits (erreur absolue de ± 1 sur le résultat de la conversion).

1. Quel est le niveau mesuré si la valeur lue par l'automate (à la sortie du convertisseur) est $(668)_{10}$? (Lire 668 en base 10).
2. Si le capteur possède une classe de précision de $\pm 0.125\%$ EM, et que le convertisseur possède une erreur absolue de ± 1 sur le résultat de la conversion, quelle sera l'erreur relative sur la mesure ?

Solution du TD N° 1 :

Exercice 1 :

1. On suppose que le potentiomètre est connecté à la source de 10Volts et que la résistance entre le curseur et la masse est de $0K\Omega$ ((Ce qui donne 0V en sortie) à 0 cm et de $12,5 K\Omega$ (ce qui donne 10V en sortie) à 600 cm.

$$S = \frac{\Delta_{sortie}}{\Delta_{entrée}} = \frac{10V - 0V}{6000mm - 0mm} = \frac{10V}{6000mm} = 0,00167 V/mm$$

2. L'erreur absolue du capteur, correspondant à une classe de précision de $\pm 0,25\%$ EM est :

$$E_{Abs} = \pm 0,25\% \cdot 600cm = \frac{\pm 0,25}{100} 600cm = \pm 1,5cm$$

Connaissant cette valeur, nous pouvons maintenant calculer l'erreur relative à une mesure de 375 cm :

$$E_{Rel} = \frac{E_{Abs}}{Mesure} \cdot 100\% = \frac{\pm 1,5cm}{375cm} \cdot 100\% = \pm 0,4\%$$

3. L'erreur absolue ayant été obtenue en 2, ça reste à évaluer l'erreur relative pour une mesure de 1 cm. Cette erreur est :

$$E_{Rel} = \frac{E_{Abs}}{Mesure} \cdot 100\% = \frac{\pm 1,5cm}{1cm} \cdot 100\% = \pm 150\%$$

L'erreur relative s'accroît au fur et à mesure que la mesure décroît vers 0 cm. Elle est égale à la classe de précision lorsque la mesure est égale à l'étendue de mesure de 600cm. Elle devient infinie à 0 cm.

Ainsi, si la mesure à 375 cm est raisonnable, celle à 1 cm ne l'est pas.

Exercice 2 :

1. Pour résoudre l'exercice, il faut calculer la fonction de transfert du capteur et celle de la carte d'entrée analogique de l'automate. En attribuant la variable x au mesurande du capteur, la variable y à sa sortie et la variable z au contenu

du registre recevant la sortie du convertisseur analogique/numérique, on peut écrire :

$$y = m_1 x + b_1$$

Pour le capteur et :

$$z = m_2 y + b_2$$

Pour la carte d'entrée analogique.

La sensibilité m_1 du capteur est :

$$m_1 = \frac{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}}{25 \text{ m} - 0,5 \text{ m}} = \frac{16 \text{ mA}}{24,5 \text{ m}} = 0,653 \text{ mA/m}$$

Pour trouver b_1 , il suffit d'évaluer la fonction de transfert quand le réservoir est au maximum. Ainsi :

$$20 \text{ mA} = 0,653 \frac{\text{mA}}{\text{m}} \cdot 25 \text{ m} + b_1$$

Et la valeur de b_1 qui résout cette équation est $3,675 \text{ mA}$.

La fonction de transfert du capteur est donc :

$$y = 0,653 \frac{\text{mA}}{\text{m}} \cdot x + 3,675 \text{ mA}$$

La sensibilité m_2 du convertisseur A/N est :

$$m_2 = \frac{2^{10}}{20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}} = \frac{1024}{16 \text{ mA}} = 64 \text{ mA}^{-1}$$

Pour trouver b_2 , il suffit d'évaluer la fonction de transfert quand le signal est minimum. Ainsi :

$$0 = 64 \text{ mA}^{-1} \cdot 4 \text{ mA} + b_2$$

Et la valeur de b_2 qui résout cette équation est -256 .

La fonction de transfert du convertisseur A/N est donc :

$$z = 64 \text{ mA}^{-1} \cdot y - 256$$

Nous avons maintenant tout ce qu'il faut pour répondre à la question. La valeur de courant y correspondant à une valeur de 668 est la solution de :

$$z = 668 = 64 \text{ mA}^{-1} \cdot y - 256$$

Ce qui mène à $y = 14,4375 \text{ mA}$.

Le niveau correspondant est la solution de :

$$y = 14,4375 \text{ mA} = 0,653 \frac{\text{mA}}{\text{m}} \cdot x + 3,675 \text{ mA}$$

Ce qui donne $x = 16,48 \text{ mètres}$.

Le niveau du réservoir correspondant à une valeur de 668 dans la mémoire de l'automate est 16,48 m.

2. Il faut calculer l'erreur sur la chaîne de mesure générée par le capteur et la carte d'entrée analogique.

La classe de précision de $\pm 0.125 \% \text{ EM}$. donne une erreur absolue Δy sur la sortie du capteur de :

$$\Delta y = \pm 0,125\% (20 \text{ mA} - 4 \text{ mA}) = \pm 0,125\% \cdot 16 \text{ mA} = \pm 0,02 \text{ mA}$$

L'erreur au niveau de la carte d'entrée analogique de l'automate est :

$$\Delta z = \Delta m_2 \left| \frac{\partial z}{\partial m_2} \right| + \Delta y \left| \frac{\partial z}{\partial y} \right| + \Delta m_2 \Delta y \left| \frac{\partial^2 z}{\partial m_2 \partial y} \right|$$

$$\Delta z = \Delta m_2 |y| + \Delta y |m_2| + \Delta m_2 \Delta y$$

L'erreur absolue Δm_2 est ± 1 sur une plage de 16 mA soit $\pm \frac{1}{16} \text{ mA}^{-1}$ et y max est 20 mA . Donc on peut calculer :

$$\Delta z = \frac{\pm 1}{16} \text{ mA}^{-1} |20 \text{ mA}| + \pm 0,02 \text{ mA} |64 \text{ mA}^{-1}| + \frac{\pm 1}{16} \text{ mA}^{-1} \cdot \pm 0,02 \text{ mA}$$

$$= \pm 2,531 \Rightarrow \pm 3$$

L'erreur absolue de la chaîne de mesure du point de vue de l'automate est ± 3 .

L'erreur relative à la mesure de 668 sera :

$$E_{Rel} = \frac{E_{Abs}}{Mesure} \cdot 100\% = \frac{\pm 3}{668} \cdot 100\% = \pm 0,45\%$$

Notez que la classe de précision de la chaîne de mesure peut être obtenue de la façon suivante :

$$C.P. = \frac{E_{Abs}}{EM} \cdot 100\% = \frac{\pm 3}{2^{10}} \cdot 100\% = \pm 0,29\%$$

Soit une classe de précision de $\pm 0,29 EM$.

TD N° 2

Exercice 1 :

On considère le montage potentiométrique de la figure 1 suivante :

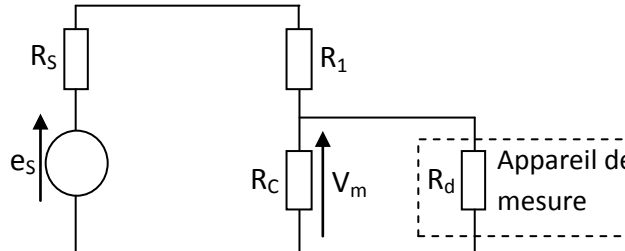


Figure 1

Avec R_c la résistance du capteur et V_m la tension à ses bornes.

1. Pour quel type de capteur est utilisé le conditionneur de la figure 1? Expliquer.
2. Donner l'expression de la tension mesurée V_m .
3. Que devient V_m lorsque $R_c \ll R_d$?
4. La tension V_m est-elle fonction linéaire de R_c ?
5. La résistance du capteur variant de R_{c0} à $R_{c0} + \Delta R_c$, la tension V_m passe de V_{m0} à $V_{m0} + \Delta V_m$.
 - Donner l'expression de ΔV_m .
 - Quelle est la condition pour laquelle ΔV_m soit une fonction linéaire de ΔR_c ? (se situer dans le cas de fonctionnement en « petits signaux »)
6. En déduire l'expression de la sensibilité du conditionneur $S = \frac{\Delta V_m}{\Delta R_c}$
7. Quelle est la condition pour laquelle S soit maximale ? Donner son expression dans ce cas.
8. Outre le problème de linéarité, quel est l'inconvénient du montage potentiométrique ? Proposer une solution pour pallier cet inconvénient.

Exercice 2 :

On considère la structure de la figure 2, constituée de deux condensateurs plans identiques C_1 et C_2 , de surface carrée ou rectangulaire d'aire A , entre les armatures desquelles se déplace selon l'axe x un noyau diélectrique de permittivité relative ϵ_r .

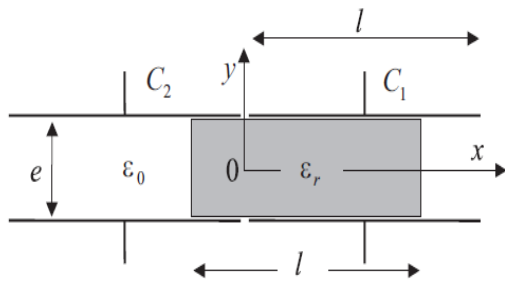


Figure 2 - Condensateur à diélectrique glissant

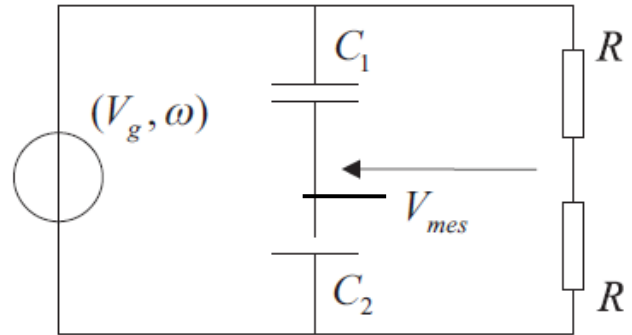


Figure 3 - Montage du capteur

1. Le noyau étant à sa position initiale, centré en $x = 0$, déterminer l'expression des capacités $C_1(x = 0) = C_2(x = 0)$ que l'on notera C_0 (on négligera pour cela les effets de bords et le couplage possible entre les deux condensateurs). On donne :

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}, \epsilon_r = 3, e = 1 \text{ mm et } A = 6 \text{ cm}^2.$$

2. Le noyau est déplacé de x de sa position d'origine, déterminer les expressions de $C_1(x)$ et $C_2(x)$.

Les écrire sous la forme $C_1(x) = C_0 + \Delta C_1(x)$ et $C_2(x) = C_0 + \Delta C_2(x)$ en précisant les expressions de $\Delta C_1(x)$ et de $\Delta C_2(x)$ en fonction de C_0, x, l et ϵ_r .

3. Les deux condensateurs sont montés dans un circuit en pont selon le schéma de la figure 2. Exprimer la tension différentielle de mesure V_{mes} en fonction de x, l, ϵ_r et V_g .
4. En déduire la sensibilité S de la mesure. On donne : $l = 2 \text{ cm}$ et $V_g = 10 \text{ V}$.
5. Quelles sont les valeurs de l'étendue de mesure $E.M.$ et de l'excursion de V_{mes} ?

Exercice 3 :

On désire mesurer la température par une résistance thermométrique de Platine (figure 4) dont le comportement avec la température T est donné par :

$$R(T) = R_0(1 + \alpha T)$$

$R_0 = 100 \Omega$ est la résistance à $T = 0^\circ \text{C}$, α est le coefficient de température.

Les amplificateurs opérationnels sont supposés parfaits. La diode Zener est également supposée parfaite.

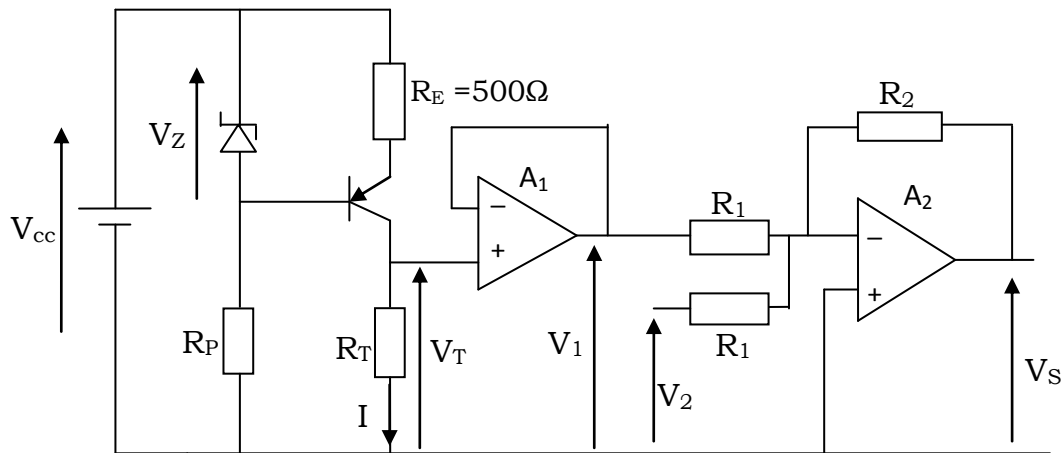


Figure 4

1. Montrer que le courant I , passant dans la résistance R_T , est constant. Calculer sa valeur.

On donne : $R_E = 500\Omega$, la tension Zener $V_Z = 5,6V$, $V_{BE} = -0,6V$.

Pour le transistor PNP, on prend égaux les courants du collecteur et d'émetteur.

2. Montrer que la tension V_T aux bornes de R_T s'écrit sous la forme : $V_T = V_0 (1 + \alpha T)$.
 - Exprimer V_0 en fonction de I et R_0 . Calculer sa valeur.
3. Quel est l'intérêt du montage de l'amplificateur opérationnel A_1 ?
4. Quelle est l'expression de la tension V_1 ?
5. Exprimer la tension V_S en fonction de V_1 et V_2 .
6. Comment doit-on choisir la tension V_2 pour que la tension V_S soit égale à $-kT$. Où k est une constante positive dont on demande de déterminer l'expression.
7. On souhaite inverser la tension V_S pour obtenir la tension $V'_S = kT$. Représenter un montage à amplificateur opérationnel assurant cette fonction complétant ainsi le conditionneur.

Solution du TD №2 :

Exercice 1 :

1. Ce type de montage, montage potentiométrique, est utilisé pour le conditionnement des capteurs passifs. Pour ce type de capteur, on a besoin d'une source d'énergie externe (tension ou courant). la grandeur à mesurer se traduit par la variation de l'impédance (résistance) du capteur. Cette variation d'impédance est à son tour traduite par une variation de tension.

2. Expression de la tension mesurée :

$$V_m = \frac{(R_C // R_d)}{R_S + R_1 + (R_C // R_d)} e_S$$

3. $R_C \ll R_d \Rightarrow R_C // R_d = R_C$:

$$V_m = \frac{R_C}{R_S + R_1 + R_C} e_S$$

4. D'après l'expression de V_m , on constate bien qu'elle n'est pas une fonction linéaire de R_C .
5. La résistance du capteur variant de R_{C0} à $R_{C0} + \Delta R_C$, la tension V_m passe de V_{m0} à $V_{m0} + \Delta V_m$. On a alors :

$$\begin{aligned} V_m &= V_{m0} + \Delta V_m = \frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_S + R_1 + R_{C0} + \Delta R_C} e_S \\ \Delta V_m &= V_m - V_{m0} = \left(\frac{R_{C0} + \Delta R_C}{R_S + R_1 + R_{C0} + \Delta R_C} - \frac{R_C}{R_S + R_1 + R_C} \right) e_S \\ \Delta V_m &= \frac{(R_S + R_1) \Delta R_C}{(R_S + R_1 + R_C)(R_S + R_1 + R_{C0} + \Delta R_C)} e_S \\ \Delta V_m &= \frac{(R_S + R_1) \Delta R_C}{(R_S + R_1 + R_{C0})^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta R_C}{R_S + R_1 + R_{C0}}} e_S \\ \text{si } \Delta R_C &\ll R_S + R_1 + R_{C0}, \quad \Delta V_m = \frac{(R_S + R_1) \Delta R_C}{(R_S + R_1 + R_{C0})^2} e_S \end{aligned}$$

6. La sensibilité S :

$$\frac{\Delta V_m}{\Delta R_C} = \frac{(R_S + R_1)}{(R_S + R_1 + R_{C0})^2} e_S$$

7. La sensibilité du conditionneur $\frac{\Delta V_m}{\Delta R_C}$ est maximale si l'on choisit $R_S + R_1 = R_{C0}$; dans ce cas :

$$\frac{\Delta V_m}{\Delta R_C} = \frac{e_S}{4R_{C0}} \quad c - \grave{a} - d \quad \Delta V_m = \frac{\Delta R_C}{R_{C0}} \cdot \frac{e_S}{4}$$

8. Pour le montage potentiométrique, il y a toujours une tension aux bornes de R_C , que ce soit la grandeur physique à mesurer varie ou non (Autrement dit, la tension mesurée ne correspond pas seulement à la variation de la grandeur physique mesurée), mais elle est composée à la fois par la variation ΔV_m , qui porte l'information, superposée à une tension V_{m0} qui lui est en général de beaucoup supérieure. Ceci risque de rendre la mesure particulièrement imprécise dans le cas des phénomènes statiques pour lesquels ΔR_C est constant ou lentement variable : si par exemple, $V_{m0} = 5V$ et $\Delta V_m = 5 mV$, il est évidemment très difficile de faire une lecture précise de ΔV_m sur le calibre 6 V d'un Voltmètre. Pour remédier à cet inconvénient, on utilise le montage en pont. les différentes résistances du pont, seront choisies de sorte qu'à l'équilibre, la tension mesurée vaudra 0. Par cette façon de faire, on est sûr que la tension mesurée correspond exclusivement à la variation de la grandeur physique à mesurer à la différence du montage potentiométrique.

Dans le cas de phénomènes dynamiques où les variations du mesurande sont alternatives, il en est de même pour les variations de résistance du capteur et de la tension de mesure ΔV_m . Si V_{m0} est une tension continue ($e_s = E_s$), un filtre passe-haut simple (figure 1) permet alors de séparer ΔV_m et V_{m0} : il suffit que sa fréquence de coupure : $f_c = \frac{1}{2\pi R_d C}$ soit inférieure à la fréquence la plus basse du phénomène étudié.

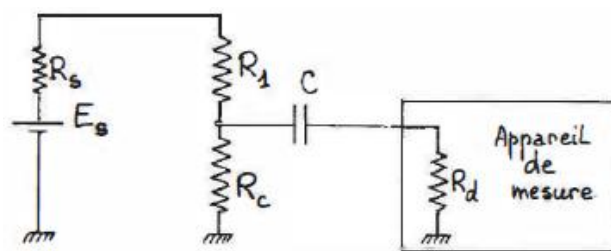


Figure 1: Montage potentiométrique : élimination de la composante permanente.

Exercice 2 :

1. Le diélectrique étant centré, chaque condensateur équivaut à la mise en parallèle de deux condensateurs plans de surface $A/2$, l'un de diélectrique de permittivité ϵ_0 , l'autre de permittivité $\epsilon_r \epsilon_0$. On a donc immédiatement :

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 A}{2e} + \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{2e} = \frac{\varepsilon_0 A}{2e} (1 + \varepsilon_r) = 10,62 \text{ PF}$$

2. Si le diélectrique est déplacé d'une quantité x , on a alors :

$$\begin{aligned} C_1(x) &= \frac{\varepsilon_0 A}{e} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{2} - x \right) + \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{e} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{2} + x \right) \\ &= \frac{\varepsilon_0 A}{2e} (1 + \varepsilon_r) \left[1 + \frac{2x}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] = C_0 \left[1 + \frac{2x}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] = C_0 + \Delta C_1(x) \end{aligned}$$

De même, on obtient :

$$\begin{aligned} C_2(x) &= \frac{\varepsilon_0 A}{e} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{2} + x \right) + \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{e} \frac{l}{2} \left(\frac{l}{2} - x \right) \\ &= \frac{\varepsilon_0 A}{2e} (1 + \varepsilon_r) \left[1 - \frac{2x}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] = C_0 \left[1 - \frac{2x}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) \right] = C_0 + \Delta C_2(x) \end{aligned}$$

Les deux condensateurs fonctionnent en mode push-pull puisque $\Delta C_1(x) = -\Delta C_2(x)$

3. D'après la figure 2, il vient en notant respectivement Z_1 et Z_2 les impédances des condensateurs $C_1(x)$ et $C_2(x)$:

$$V_{mes} = \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} - \frac{1}{2} \right) V_g = \frac{C_1(x) - C_2(x)}{C_1(x) + C_2(x)} \frac{V_g}{2} = \frac{x}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) V_g$$

La mesure est linéaire puisque le signal de mesure, ici la tension V_{mes} , est proportionnelle au déplacement x .

4. On en déduit la sensibilité de la mesure par :

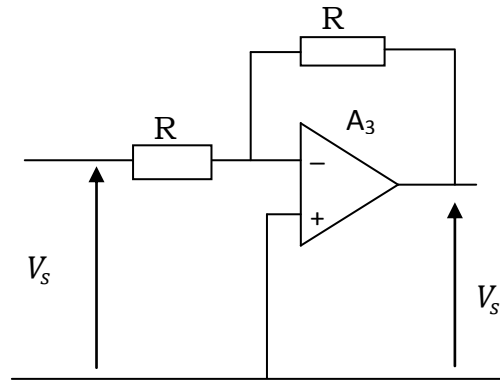
$$S = \frac{V_{mes}}{x} = \frac{1}{l} \left(\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \right) V_g = 2,5 \text{ V/cm}$$

5. Au maximum $x = \mp l/2$, ce qui correspond à l'étendue de mesure :

$E.M. = [-1 \text{ cm}, +1 \text{ cm}]$, il vient alors : $V_{mes} \in [-2,5 \text{ V}, +2,5 \text{ V}]$.

Exercice 3 :

1. On a $I = I_c = I_E$ et $V_Z = R_E I - V_{BE} \Rightarrow I = \frac{V_Z - V_{BE}}{R_E} = 10 \text{ mA} = \text{constante}$.
 2. $V_T = R_T I = R_0 I (1 + \alpha T) = V_0 (1 + \alpha T)$ avec $V_0 = R_0 I = 1 \text{ V}$.
 3. C'est un montage suiveur qui permet de ne pas prélever du courant au capteur de température tout en reproduisant la même tension V_T en sortie (adaptation d'impédance).
 4. $V_1 = V_T = V_0 (1 + \alpha T)$
 5. $V_s = -\frac{R_2}{R_1} (V_1 + V_2) = -\frac{R_2}{R_1} (V_0 + V_0 \alpha T + V_2)$
- Si $V_2 = -V_0 \Rightarrow V_s = -\frac{R_2}{R_1} V_0 \alpha T = -kT$ avec $k = \frac{R_2}{R_1} V_0 \alpha$
6. Il faut utiliser un montage inverseur comme dans le schéma ci-dessous :



$$V_s' = -\frac{R}{R} V_s = -V_s = \frac{R_2}{R_1} V_0 \alpha T = kT$$

TD N°3 :

Amplificateurs d'Instrumentation : Réjection de la tension de mode Commun

Exercice 1 :

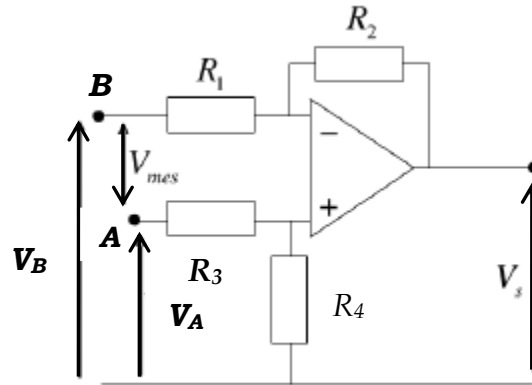


Figure 1

On considère le montage amplificateur de la figure 1 où les tensions V_A et V_B sont issues d'un capteur.

1. L'amplificateur opérationnel est considéré parfait. Déterminer l'expression de la tension de sortie V_s .
2. En prenant en considération la tension de mode commun, réécrire l'expression de V_s sous la forme : $V_s = A_d V_{mes} + A_{mc} e_{mc}$

Avec : A_d gain d'amplification différentiel en boucle ouverte, $V_{mes} = V_A - V_B$: tension différentielle, A_{mc} : gain d'amplification en mode commun, e_{mc} : tension de mode commun.

3. Que devient l'expression de la tension V_s lorsque $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$? Interpréter.
4. Donner l'expression de la tension V_s lorsque $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$. Interpréter.
 - Calculer, dans ce cas, la valeur de la tension de sortie V_s . On donne :

$$R_2 = 1000R_1 = 1M\Omega \text{ et } V_{mes} = V_A - V_B = 1mV$$

- On considère maintenant que l'amplificateur opérationnel utilisé a un facteur de réjection du mode commun $\tau = \frac{A_d}{A_{mc}}$ fini. Calculer la nouvelle valeur de la tension de sortie V_s . On donne :

$$V_{mc} = \frac{(V_A + V_B)}{2} = 1V, \tau = 80 \text{ dB et } A_d = 10^3.$$

- Calculer l'erreur relative introduite par la tension de mode commun.
Que peut-on conclure ?

Exercice 2 : Amplificateur d'instrumentation

Pour pallier le problème lié à l'amplification de la tension de mode commun (montage à un seul amplificateur opérationnel), on réalise le montage amplificateur de différence ou amplificateur d'instrumentation de la figure 2. Cet amplificateur est réalisé à partir d'amplificateurs opérationnels identiques à celui de l'exercice 1.

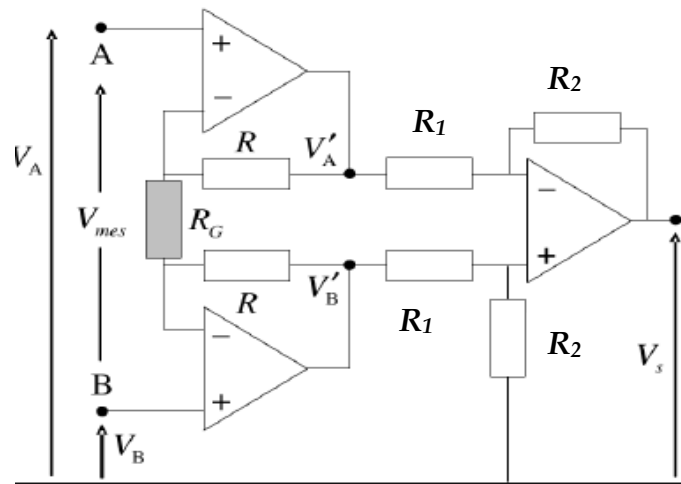


Figure 2 : Amplificateur d'Instrumentation.

1. Déterminer les expressions des tensions V'_A et V'_B .
2. En tenant compte de la tension de mode commun, réécrire les tensions V'_A et V'_B sous la forme :

$$V'_A = A_{d1}V_{mes} + A_{mc1}e_{mc} \text{ et } V'_B = A_{d2}V_{mes} + A_{mc2}e_{mc}.$$

3. Déterminer l'expression de la tension V_s .
4. Conclure.

Solution du TD N°3 :

Rappel :

- Les amplificateurs d'instrumentation sont des amplificateurs différentiels à base d'AOP.
- L'amplificateur d'instrumentation est dédié à l'amplification de signaux de très faible amplitude, généralement issus des capteurs. En effet, le rôle de l'amplificateur d'instrumentation est de supprimer la tension de mode commun (perturbations) et d'amplifier la tension différentielle (information) ou du moins augmenter le TRMC et par conséquent amplifier beaucoup plus la tension différentielle (information) que la tension de mode commun (perturbations).
- Si par exemple les deux tensions sont amplifiées de la même façon, il se trouve que le signal total amplifié se rapporte beaucoup plus à la tension de mode commun (perturbations) qu'à la tension différentielle (information). De plus, cela pourra provoquer une saturation.

Exercice 1 :

1. Calcul de la tension de sortie :

Puisque il s'agit d'un amplificateur opérationnel idéal, alors :

$$\begin{cases} V^+ = V^- \\ i^+ = i^- = 0 \end{cases}$$

$$V_s = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \left[V_A \frac{R_4}{R_3 + R_4} - V_B \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right]$$

2. En prenant en considération la tension de mode commun :

$$V_s = A_d V_{mes} + A_{mc} V_{mc}$$

Avec : A_d gain d'amplification différentiel en boucle ouverte, $V_{mes} = V_A - V_B$: tension différentielle (tension utile : information), A_{mc} : gain d'amplification en mode commun, V_{mc} : tension de mode commun (perturbations).

- Identification du mode commun :

$$V_s = A_1 [A_2 V_A - A_3 V_B]$$

$$\text{Avec : } A_1 = \frac{R_1+R_2}{R_1}, A_2 = \frac{R_4}{R_3+R_4}, A_3 = \frac{R_2}{R_1+R_2}$$

$$\text{On a : } \begin{cases} V_{mes} = V_A - V_B \\ V_{mc} = \frac{V_A+V_B}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_A = V_{mc} + \frac{V_{mes}}{2} \\ V_B = V_{mc} - \frac{V_{mes}}{2} \end{cases}$$

Remplaçons dans l'expression de V_s :

$$V_s = A_1 \left[A_2 \left(V_{mc} + \frac{V_{mes}}{2} \right) - A_3 \left(V_{mc} - \frac{V_{mes}}{2} \right) \right]$$

$$V_s = \left(\frac{A_1 A_2}{2} + \frac{A_1 A_3}{2} \right) V_{mes} + (A_1 A_2 - A_1 A_3) V_{mc} = A_d V_{mes} + A_{mc} V_{mc}$$

$$A_d = \left(\frac{A_1 A_2}{2} + \frac{A_1 A_3}{2} \right) \text{ et } A_{mc} = A_1 A_2 - A_1 A_3$$

3. Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$:

$$A_2 = A_3 = \frac{1}{2} \text{ et } A_1 = 2 \Rightarrow A_d = 1 \text{ et } A_{mc} = 0.$$

Théoriquement le choix $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ permet d'éliminer la tension de mode commun (perturbations). Pratiquement, il est impossible d'avoir des résistances égales à 100% ce qui fait que la tension de mode commun existe toujours.

De l'autre part, ce choix ne permet pas d'amplifier la tension utile (information).

4. Si $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$:

$$V_s = \left(\frac{A_1 A_2}{2} + \frac{A_1 A_3}{2} \right) V_{mes} = \frac{R_2}{R_1} V_{mes}$$

Grace à un tel choix, on a quand même une amplification de la tension utile (information), mais la tension de mode commun existe toujours du fait qu'il est impossible d'avoir $R_1 = R_3$ et $R_2 = R_4$ à 100%.

- Pour $R_2 = 1000R_1 = 1M\Omega$ et $V_{mes} = V_A - V_B = 1mV$:

$$\frac{R_2}{R_1} V_{mes} = 1V.$$

- $\tau = \frac{A_d}{A_{mc}}$ fini :

$$V_s = A_d V_{mes} + A_{mc} V_{mc} = A_d \left(V_{mes} + \frac{1}{\tau} V_{mc} \right)$$

$$V_s = 10^3 (10^{-3} + 10^{-4})$$

$$V_s = 1,1V$$

- L'erreur relative : $\varepsilon_r = \frac{\Delta V_s}{V_s} = \frac{0,1}{1} = 10\%$

L'erreur relative est beaucoup élevée, donc il est nécessaire d'utiliser un amplificateur d'instrumentation ayant un taux de réjection en mode commun élevé (amplificateur d'instrumentation à trois amplificateurs opérationnels).

Exercice 2 :**1.**

$$V'_A = V_A + \frac{V_A - V_B}{R_G} R = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) V_A - \frac{R}{R_G} V_B$$

$$V'_B = V_B - \frac{V_A - V_B}{R_G} R = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) V_B - \frac{R}{R_G} V_A$$

2.

$$V'_A = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) V_A - \frac{R}{R_G} V_B$$

$$V'_B = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) V_B - \frac{R}{R_G} V_A$$

$$\begin{cases} V_A = V_{mc} + \frac{V_{mes}}{2} \\ V_B = V_{mc} - \frac{V_{mes}}{2} \end{cases}$$

$$V'_A = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) \left(V_{mc} + \frac{V_{mes}}{2}\right) - \frac{R}{R_G} \left(V_{mc} - \frac{V_{mes}}{2}\right)$$

$$V'_A = \frac{V_{mes}}{2} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) + V_{mc}$$

$$V'_A = A_{d1} V_{mes} + A_{mc1} V_{mc}$$

$$Avec : A_{d1} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \text{ et } A_{mc1} = 1.$$

$$V'_B = \left(1 + \frac{R}{R_G}\right) \left(V_{mc} - \frac{V_{mes}}{2}\right) - \frac{R}{R_G} \left(V_{mc} + \frac{V_{mes}}{2}\right)$$

$$V'_B = -\frac{V_{mes}}{2} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) + V_{mc}$$

$$V'_B = A_{d2} V_{mes} + A_{mc2} V_{mc}$$

$$Avec : A_{d2} = -\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \text{ et } A_{mc2} = 1.$$

D'après les expressions de V'_A et V'_B , nous constatons que seule la tension différentielle (tension utile) est amplifiée, alors qu'il n'est pas le cas pour la tension de mode commun (perturbations).

3. Calcul de la tension de sortie V_s :

On a :

$$\begin{cases} V_d = V'_A - V'_B = V_{mes} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \\ e_{mc} = \frac{V'_A + V'_B}{2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V'_A = e_{mc} + \frac{V_d}{2} \\ V'_B = e_{mc} - \frac{V_d}{2} \end{cases}$$

$$V_s = \frac{R_2}{R_1} (V'_B - V'_A) = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) V_{mes} = A_d V_{mes}$$

$$\text{Avec } A_d = A_{d1} \cdot A_{d2} \text{ où } A_{d1} = \left(1 + \frac{2R}{R_G}\right) \text{ et } A_{d2} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Théoriquement, nous constatons que cette façon de faire permet une amplification importante de la tension différentielle ($V_s = A_d V_{mes} = A_{d1} \cdot A_{d2} V_{mes}$) et permet également de supprimer carrément la tension de mode commun (perturbations). Même s'il est impossible pratiquement de fabriquer des résistances égales à 100%, c.-à-d. la tension de mode commun pourrait exister, mais elle ne sera pas amplifiée à la différence de la tension utile qui est amplifiée deux fois ($A_d = A_{d1} \cdot A_{d2}$), ce qui augmente davantage le TRMC d'où l'utilité d'un tel montage pour l'amplification des signaux de très faibles amplitude issues généralement des capteurs.

Les avantages de l'amplificateur d'instrumentation :

- Gains précis et stable réglé avec une seule résistance extérieure R_G (et plus avec un rapport de résistance plus difficile à obtenir), R_1 et R_2 sont fixes.
- Impédance d'entrée très importante (de l'ordre de $10^{10} \Omega$)
- TRMC généralement > 100 .

TD N° 4

Capteurs de température

Exercice 1 :

On dispose d'un capteur non linéaire de température dans la gamme 0 -300°C de sensibilité moyenne + 0,85 mV/°C de 0 à 80°C, +0,79 mV/°C de 80 à 180°C, +0,70 mV/°C de 180 à 300°C. Ce capteur fournit une tension de 520 mV à 0°C. Quelle est son indication à 300 °C ?

Exercice 2 :

Les valeurs de résistances suivantes d'un thermomètre à résistance de platine, sont mesurées pour une plage de température. Déterminer la sensibilité de mesure de l'instrument en Ohms/°C.

Résistance (Ω)	Température (°C)
307	200
314	230
321	260
328	290

Exercice 3 :

Le coefficient de température d'une thermistance CTN est de $-2 \text{ } \%(K^{-1})$ à 25°C.

- Calculer sa valeur à 50°C.
- Cette thermistance a pour résistance 10000Ω à 25°C. calculer sa valeur à 50°C.

Exercice 4 :

Une thermistance CTN est parcourue par un courant de $1 \mu A$, suffisamment faible pour que son échauffement soit négligeable. Quand la température est de 25°C, la tension à ses bornes est 1100mV ; à 50°C cette tension vaut 385mV.

- Calculer la sensibilité thermique de cette thermistance à 30°C.

Exercice 5 :

On considère une résistance thermométrique à variation non linéaire :

$$R'_C = R'_{C0}(1 + A'T + B'T^2)$$

Avec : T en °C, $R'_{C0} = 10\Omega$, $A' = 4.10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, $B' = 6.10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$.

1. Montrer qu'on associant en série à la résistance précédente une seconde résistance non linéaire :

$$R''_C = R''_{C0}(1 + A''T + B''T^2)$$

$$A'' = \frac{10^{-3}}{^{\circ}\text{C}}, \quad B'' = -2.10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$$

On peut par un choix adéquat de R''_{C0} que l'on détermine, réaliser un ensemble dont la résistance R_C est une variation thermique linéaire.

2. Quel est le coefficient de température de R_C ?
3. Quelle est la valeur de R_C à 300°C ?

Exercice 6 :

1. Un thermocouple type J est utilisé pour mesurer la température T_C dans un four électrique. Avec la soudure froide à 20°C, on a mesuré une f.é.m égale à 17,427 mV.
✓ Quelle est la température correspondant à la soudure chaude ?
2. Un conducteur en platine est pris comme référence dans la formation de différents thermocouples.

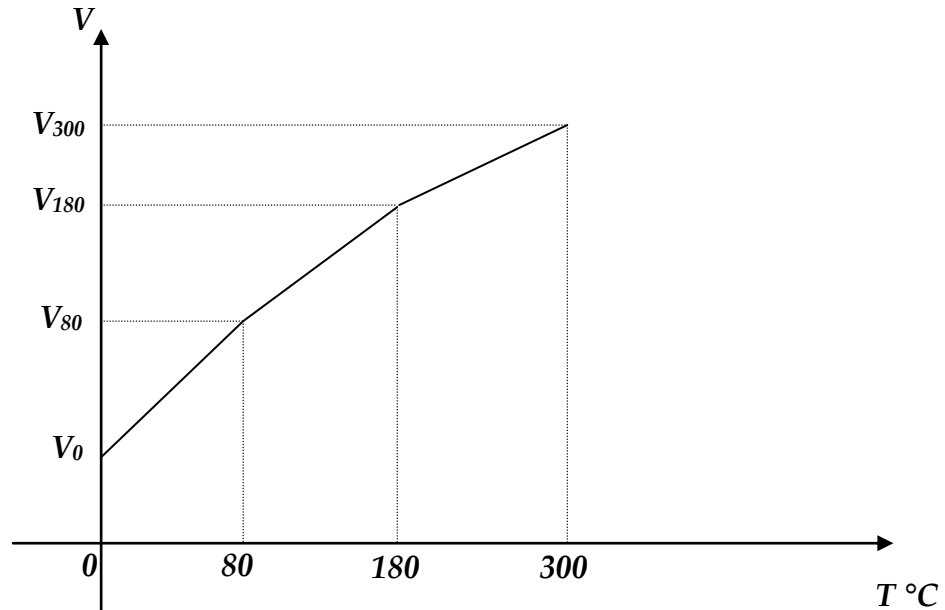
Pour une température $T = 40^{\circ}\text{C}$, on donne les f.e.ms correspondantes dans le tableau suivant :

Couple	f.e.m (μV)
Fe/Pt	640
Cu/Pt	80
Const/Pt	-1200

- ✓ Dédurre la f.é.m. des couples Fe/Cu, Fe/Const et Cu/Const.

Solution du TD N°4

Exercice 1 :



$$S_1 = \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{V_{80} - V_0}{T - T_0} = \frac{V_{80} - V_0}{80 - 0} = 0,85 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \Rightarrow V_{80} = 588 \text{ mV}.$$

$$S_2 = \frac{V_{180} - V_{80}}{180 - 80} = 0,79 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \Rightarrow V_{180} = 667 \text{ mV}.$$

$$S_3 = \frac{V_{300} - V_{180}}{300 - 180} = 0,70 \frac{\text{mV}}{^{\circ}\text{C}} \Rightarrow V_{300} = 571 \text{ mV}.$$

Exercice 2 :

D'après le tableau donné, nous constatons que la résistance varie de la même quantité pour le même pas de variation de la température. Cela signifie que la variation de la résistance est une fonction linéaire de la température, donc la sensibilité est constante.

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{314 - 307}{230 - 200} \Omega/^{\circ}\text{C} = 0,23 \Omega/^{\circ}\text{C}$$

Exercice 3 :

Le coefficient de température α :

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2}, \text{ (T en Kelvin)}$$

$$\alpha = -0,02 \text{ à } 25^\circ\text{C}$$

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2} = -0,02 \text{ avec } T = (25 + 273)\text{K} = 298 \text{ K}$$

$$\alpha_{25} = -\frac{\beta}{(298)^2} = -0,02 \Rightarrow \beta_{CTN} = 0,02 \cdot (298)^2 = 1776$$

$$\alpha_{50} = -\frac{\beta}{(50 + 273)^2} = -0,017$$

La résistance de thermistance (CTN), $R(T) = R(T_0)e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$

En général, $T = 25^\circ\text{C}$

$$R(50) = R(25)e^{\beta_{CTN}\left(\frac{1}{(50+273)} - \frac{1}{(25+273)}\right)} = 6,3 \text{ K}\Omega$$

Exercice 4 :

La sensibilité thermique $\alpha = -\frac{\beta}{T^2}$

La résistance thermique $R(T) = R(T_0)e^{\beta\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$

$$\text{A } 25^\circ\text{C}, R(T) = R(T_0) = \frac{V}{I} = \frac{1100\text{mV}}{1\text{mA}} = 1100\text{K}\Omega$$

$$\text{A } 50^\circ\text{C}, R(T) = \frac{V}{I} = \frac{385\text{mV}}{1\text{mA}} = 385\text{K}\Omega$$

$$R(50) = R(25)e^{\beta\left(\frac{1}{(50+273)} - \frac{1}{(25+273)}\right)} \Rightarrow \beta = \left[\ln\left(\frac{R(50)}{R(25)}\right) \right] \frac{1}{\left(\frac{1}{(50+273)} - \frac{1}{(25+273)}\right)}$$

$$\beta = 4041,9\text{K}$$

$$\alpha_{30} = -\frac{\beta}{(30 + 273)^2} = -0,044 \text{ K}^{-1}$$

Exercice 5 :

$$1. R_c = R'_c + R''_c = R_{c0}(1 + \alpha T) = (R'_{c0} + R''_{c0}) + (R'_{c0}A' + R''_{c0}A'')T + (R'_{c0}B' + R''_{c0}B'')T^2$$

$$(R'_{c0}B' + R''_{c0}B'')T^2 = 0 \Rightarrow R''_{c0} = -\frac{R'_{c0}B'}{B''} = 30\Omega$$

$$2. (R'_{c0} + R''_{c0}) + (R'_{c0}A' + R''_{c0}A'')T = R_{c0}(1 + \alpha T) = R_{c0} + R_{c0}\alpha T$$

Par identification :

$$R_{c0} = R'_{c0} + R''_{c0} = 40\Omega \text{ et } \alpha = \frac{R'_{c0}A' + R''_{c0}A''}{R'_{c0} + R''_{c0}} = 0,07/^{\circ}C$$

$$3. R_c(300) = R_{c0}(1 + \alpha T) = 61\Omega.$$

Exercice 6 :

$$1. T_a = 20^{\circ}C :$$

$$E_{AB}^{T_c(^{\circ}C)} = E_{AB}^{T_a(^{\circ}0)} + E_{AB}^{T_c T_a}$$

$E_{AB}^{T_a(^{\circ}0)}$: voir le tableau relatif au thermocouple de type (J)

$$\Rightarrow E_{AB}^{T_a(^{\circ}0)} = 1,019 \text{ mV}.$$

$$E_{AB}^{T_c T_a} (\text{mesuré}) = 17,427 \text{ mV}.$$

$$E_{AB}^{T_c(^{\circ}C)} = 17,427 \text{ mV} + 1,019 \text{ mV} = 18,446 \text{ mV}.$$

Donc : $T_c = 338^{\circ}C$ ou bien $339^{\circ}C$.

$$2. E_{Fe/Cu} = E_{Fe/Pt} - E_{Cu/Pt} = (640 - 80)\text{mV} = 560 \text{ mV}.$$

$$E_{Fe/Const} = E_{Fe/Pt} - E_{Const/Pt} = (640 + 1200)\text{mV} = 1840 \text{ mV}$$

$$E_{Cu/Const} = E_{Cu/Pt} - E_{Const/Pt} = (80 + 1200)\text{mV} = 1280 \text{ mV}$$

TD N° 5

Capteurs de déplacement, de proximité (capacitifs et inductifs) et capteurs optiques

Exercice 1 : (Capteur à condensateur d'épaisseur variable)

Soit un capteur de déplacement constitué par un condensateur plan dont l'épaisseur x varie de Δx autour de son épaisseur au repos $e = 1\text{mm}$ (figure1). La surface des armatures de ce condensateur est S . on suppose que le milieu dans lequel se trouve le capteur est l'air assimilé au vide de permittivité électrique ϵ_0 .

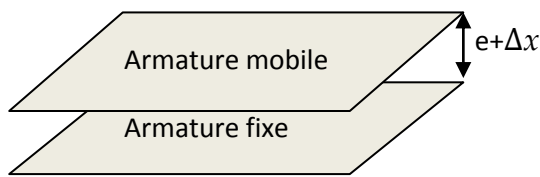


Figure 1 : Schéma de principe du capteur

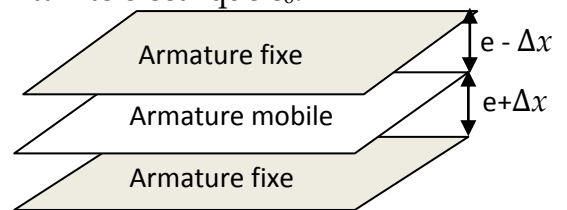


Figure 2 : Principe du capteur en mode push-pull

1. Donner l'expression de $Z_C(x)$ en régime permanent sinusoïdal à la pulsation w .
2. Le capteur est monté en série avec un condensateur réglable, d'impédance Z , dont la valeur sera fixée à celle du capteur au repos, c.-à-d. pour $\Delta x = 0$. le dipôle ainsi constitué est alimenté à la pulsation w , par un générateur de tension f.é.m. sinusoïdale d'amplitude V_g et d'impédance interne nulle.

Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} prise aux bornes de $Z_C(x)$ en fonction de Δx , e et V_g .

3. En considérant un fonctionnement en petits signaux tel que $\Delta x \ll e$, donner l'approximation linéaire $V_{mes, lin}$ de V_{mes} . Donner l'expression de $\Delta V_{mes, lin}$, variation de la tension de mesure par rapport à sa valeur au repos.
4. Quelle est la sensibilité réduite S_r , de la mesure ?
5. Conclure quant au dimensionnement du capteur pour avoir une bonne sensibilité et en déduire le domaine d'application de ce type de capteur de déplacement.
6. On alimente le capteur par une source de courant parfaite, sinusoïdale, d'amplitude I_g et de pulsation w . donner les expressions de la tension de

mesure V_{mes} prise aux bornes du capteur et de sa variation ΔV_{mes} par rapport à sa valeur à la position de repos.

- On utilise maintenant le même principe de capteur mais en fonctionnement push-pull comme indiqué sur la figure 2.

L'ensemble est alimenté à la pulsation ω , par une source de tension sinusoïdale d'amplitude V_g et d'impédance interne nulle. Donner l'expression de la tension de mesure V_{mes} prise aux bornes de $Z_C(x)$, puis de sa variation ΔV_{mes} . Quelle est la sensibilité réduite S_r de la mesure ?

Exercice 2 : (Capteur inductif à reluctance variable)

- Etude du capteur** : Soit le circuit magnétique de la figure 3 :

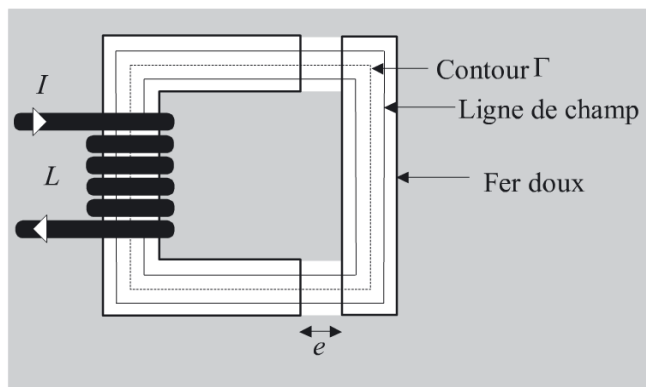


Figure 3 : Schéma de principe du capteur

Le corps du circuit magnétique est réalisé en fer doux feuilleté. On suppose que les lignes de champ sont parfaitement guidées par le circuit magnétique et que l'entrefer e est suffisamment petit (on néglige les lignes de champ pouvant fuir dans la région symbolisée en gris sur la figure 3).

- Donner l'expression de la circulation du champ magnétique $\vec{H}$ sur la fibre moyenne, contour moyen Γ , sachant que la bobine possède N spires et que l'intensité de courant la parcourant est I .
- Sachant que l'induction magnétique $\vec{B}$ est à flux conservatif, que la section du circuit magnétique est supposée constante, donner les relations liant l'induction magnétique $\vec{B}$ aux champs dans l'air, $\vec{H}_{air}$, et dans le fer doux, $\vec{H}_{fer}$.

On notera μ_0 la perméabilité de l'air (assimilé au vide) et $\mu = \mu_r \mu_0$ celle du fer doux.

- Donner l'expression du flux d'induction magnétique au travers de la bobine, puis l'exprimer en fonction de l'inductance propre L de la bobine.
- En appelant l la longueur du contour Γ dans le fer doux, donner l'expression de l'inductance L .
- Si on alimente la bobine par un courant sinusoïdal de pulsation ω , quelle est l'expression de son impédance $Z(\omega)$? Que conclure quant au capteur de position ainsi réalisé (e pouvant varier) ?

II. Montage push – pull :

Deux capteurs de même type que le précédent sont montés en push-pull tel qu'il est schématisé par les figures 4 et 5. En position de repos, les distances des pièces en U à la pièce mobile sont égales à e_0

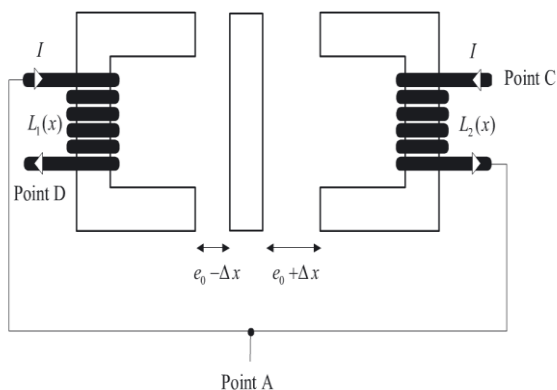


Figure 4 : Fonctionnement en mode push - pull

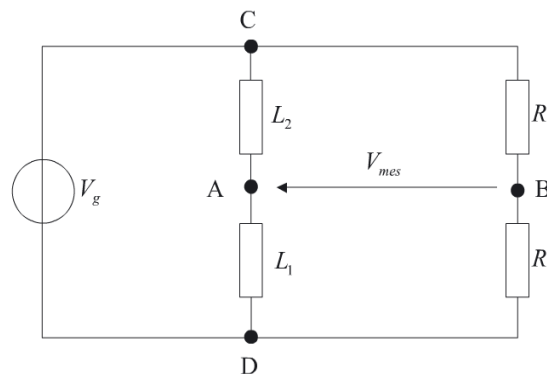


Figure 5 : Conditionnement

- Donner l'expression de la tension de mesure en fonction de v_g, Z_1 et Z_2 , puis v_g, L_1 et L_2 . $v_g = V_g \cos(\omega t)$
- Montrer que le pont est équilibré pour $\Delta x = 0$.
- Calculer la tension ΔV_{mes} de la tension de mesure pour $\Delta x \neq 0$ par rapport à sa valeur pour $\Delta x = 0$.
- Calculer la sensibilité globale S_{mes} du système de mesure. On donne :

$$l = 6 \text{ cm}, e_0 = 2 \text{ mm}, \quad V_g = 10 \text{ V}, \mu_r = 400.$$

10. La perméabilité μ_r n'est pas constante, mais dépend de la fréquence f du champ magnétique, en première approximation, on peut considérer que l'on a :

$$\mu_r = \mu_{r0} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

μ_r représente la perméabilité relative statique, et f_c la fréquence de coupure. Calculer la fréquence max d'alimentation, f_{max} , pour que la sensibilité globale reste supérieure à $S_{min} = 1,5 \frac{mV}{\mu m}$. On donne $f_c = 500 \text{ Hz}$.

Exercice 3 :

On considère le capteur capacitif de la figure 6. Le but de la mesure est détecter la distance x entre la tête de mesure et la cible.

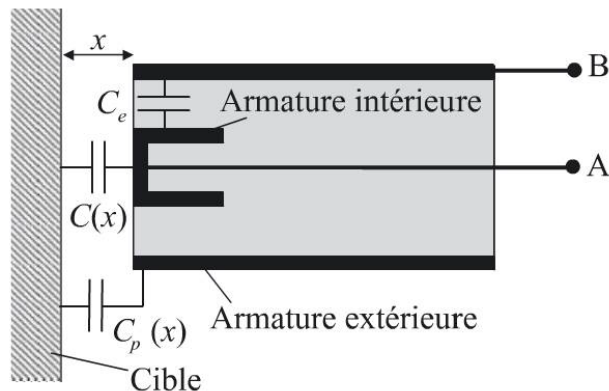


Figure 6 : principe de la détection de proximité capacitive

1. Donner la capacité C_{AB} présentée par la tête de mesure entre ses bornes A et B, capacité constituée des capacités de mesure C_x , inter-électrodes C_e et capacité de parasite $C_p(x)$.
2. Montrer que la mise à la masse de l'armature extérieure et de la cible simplifie le problème. On se placera sous cette hypothèse pour la suite du problème.
3. Soit s la surface de l'électrode active en regard de la cible et $s' = 2\pi r h$ la surface en regard de l'électrode intérieure (figure 7). Le milieu ambiant est supposé de permittivité égale à celle du vide soit ϵ_0 . Donner en première

approximation l'expression de la capacité C_{AB} . Dans cette expression, on se contentera d'un développement au premier ordre en e/r pour $C_e(x)$.

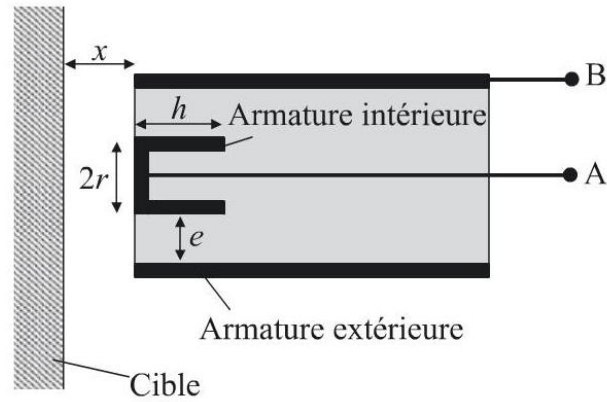


Figure 7 : Géométrie du capteur.

- Le capteur est réalisé de façon à fonctionner pour une distance tête de mesure-cible évoluant de Δx à partir de la valeur de référence $x_0 = 2 \text{ mm}$.

Donner l'expression de C_{AB} au premier ordre en $\Delta x/x_0$ et la mettre sous la forme $C_{AB} = C_0(1 + k\Delta x/x_0)$.

On donne $r = 1 \text{ cm}$, $h = 1 \text{ cm}$, $e = 1 \text{ mm}$, et $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$.

- Le capteur de capacité C_{AB} est utilisé dans le circuit de la figure 8, constitué de deux blocs amplificateur et filtre.

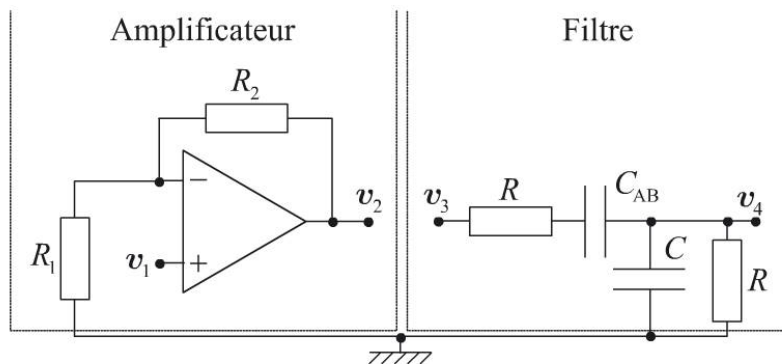


Figure 8 : Schéma de principe de la mesure.

- Calculer les fonctions de transfert en boucle ouverte :

$$H_1(p) = V_2(p)/V_1(p) \text{ et } H_2(p) = V_4(p)/V_3(p)$$

L'amplificateur opérationnel étant considéré idéal.

6. On relie la borne de sortie de l'amplificateur à l'entrée du filtre et la borne de sortie du filtre à la borne non inverseuse de l'amplificateur opérationnel de façon à réaliser $v_2 = v_3$ et $v_1 = v_4$. Montrer que ceci entraîne deux conditions dites d'amplitude et de phase sur la fonction de transfert $H(p) = H_1(p).H_2(p)$.
7. En admettant que le fonctionnement du système sera celui d'un oscillateur sinusoïdal de pulsation ω , calculer les relations dérivant des conditions de phase et d'amplitude à tenir entre les valeurs des composants.
8. On fixe $C = C_0$ et $R = R_2 = 100 \text{ K}\Omega$ et on suppose que $\Delta x = 0$. Déterminer les valeurs de la résistance R_1 et de la pulsation de l'oscillateur que l'on notera ω_0 .

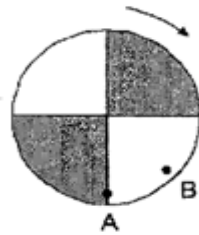
Lorsque l'on déplace la tête du capteur par rapport à la cible, la capacité C_{AB} varie. La condition d'amplitude ne peut plus être vérifiée à chaque instant par une résistance fixe puisque cette condition s'écrit en fonction de C_{AB} . La résistance R_1 est remplacée par un système de façon à ce que la condition d'amplitude soit toujours vérifiée (ce système ne sera pas étudié ici).

9. Donner alors l'expression de la pulsation au premier ordre en $\Delta x/x_0$.
10. Δx pouvant éventuellement dépendre de la fréquence, donner l'expression de la tension instantanée v_1 de l'oscillateur. On notera V_0 son amplitude sans chercher la calculer. On notera :

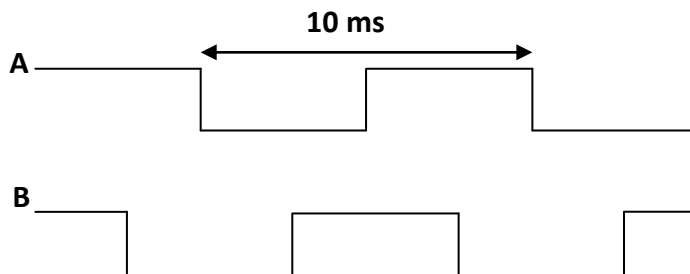
$$F(t) = \int k\omega_0 \frac{\Delta x}{2x_0} dt$$

Exercice 4 (Les deux parties I et II sont indépendantes):

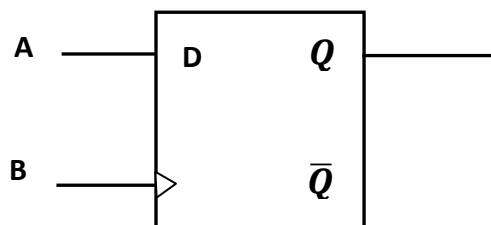
I. Sur l'axe d'un moteur, on place un disque :



Les capteurs optiques A et B donnent en sortie, un niveau logique 1 en présence de blanc et 0 en présence de noir :



- En déduire la vitesse de rotation du moteur (en tr/min).
- Les signaux issus des capteurs sont appliqués en entrée d'une bascule D : Que vaut Q ?



- On inverse le sens de rotation du moteur, dessiner en concordance de temps A et B.

En déduire Q. Interpréter.

II. Les résistances de polarisation du capteur optoélectronique (figure 6) sont calculées pour que son phototransistor fonctionne en commutation : bloqué / saturé. A l'état saturé $v_1 = 0$.

Le disque troué de $p = 4$ trous tourne à la vitesse de 500 tr/min.

- a. Expliquer le fonctionnement du capteur optoélectronique lorsque le transistor est éclairé et lorsque le phototransistor n'est pas éclairé.
- b. Calculer la fréquence f et la période T de la tension v_1 .

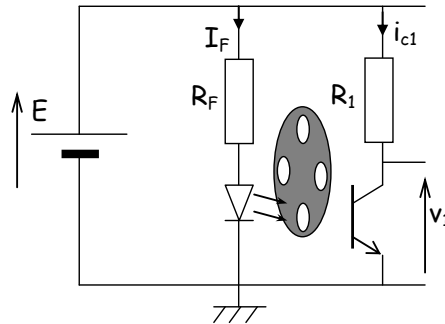


Figure 9

Solution du TD №5:

Exercice 1 :

1. le condensateur étant plan et alimenté en régime sinusoïdal, on a $Z_C(x) = \frac{1}{jC(x)\omega}$ avec $C(x) = \frac{\varepsilon_0 S}{x} = \frac{\varepsilon_0 S}{e + \Delta x}$ soit $Z_C(x) = \frac{e + \Delta x}{j\varepsilon_0 S \omega}$
2. Comme $Z = Z_{C0} = Z_C(x = 0) = \frac{e}{j\varepsilon_0 S \omega}$, on a pour la tension de mesure :

$$V_{mes} = \frac{Z_C(x)}{Z + Z_C(x)} V_g = \frac{e + \Delta x}{2e + \Delta x} V_g$$

La présence de Δx au dénominateur entraîne que la mesure n'est pas linéaire en fonction de Δx .

3. l'approximation linéaire de V_{mes} est donnée par le développement limité de l'équation précédente au premier ordre. en $\frac{\Delta x}{e}$, soit :

$$V_{mes} = \frac{e(1 + \frac{\Delta x}{e})}{2e(1 + \frac{\Delta x}{2e})} V_g = \left(1 + \frac{\Delta x}{e}\right) \left(1 - \frac{\Delta x}{2e}\right) \frac{V_g}{2} \approx \left(1 + \frac{\Delta x}{2e}\right) \frac{V_g}{2} = V_{mes,lin}$$

On en déduit la variation de V_{mes} par rapport à sa valeur à la position de repos :

$$\Delta V_{mes,lin} = \frac{\Delta x}{4e} V_g$$

4. Pour $\Delta x = 0$, on $V_{mes}(\Delta x = 0) = V_{mes,lin}(\Delta x = 0) = V_0 = \frac{V_g}{2}$. La sensibilité réduite de mesure est donc :

$$S_r = \frac{1}{V_g} \frac{V_{mes,lin} - V_0}{\Delta x} = \frac{1}{V_g} \frac{\Delta V_{mes,lin}}{\Delta x} = \frac{1}{4e} = 250 \frac{mV}{mm.V}$$

5. Pour obtenir une bonne sensibilité, il est nécessaire que e soit petit, ce qui limite l'excursion Δx (risque de court-circuit entre les deux armatures du condensateur). L'utilisation de ce type de capteur est donc limitée aux mesures de faibles déplacements.

6. Si l'alimentation se fait par une source de courant, la tension de mesure devient

$$V_{mes} = Z_C(x)I_g = \frac{e + \Delta x}{j\epsilon_0 S w} I_g$$

La variation de la tension de mesure par rapport à sa valeur pour $\Delta x = 0$, c-à-d :

$$V_0 = Z_C(\Delta x = 0)I_g = \frac{e}{j\epsilon_0 S w} I_g, \text{ s'écrit :}$$

$$\Delta V_{mes} = \frac{\Delta x}{j\epsilon_0 S w} I_g$$

La tension de mesure est une fonction linéaire du déplacement.

7. La tension de mesure est maintenant donnée par :

$$V_{mes} = \frac{Z_C(e + \Delta x)}{Z_C(e + \Delta x) + Z_C(e - \Delta x)} V_g = \frac{e + \Delta x}{2e} V_g$$

Par rapport à la tension de mesure à la position de repos $\Delta x = 0$ donnée par $\frac{V_g}{2}$, la variation de la tension de mesure est :

$$\Delta V_{mes} = \frac{\Delta x}{2e} V_g$$

La sensibilité réduite est alors :

$$S_r = \frac{1}{V_g} \frac{\Delta V_{mes}}{\Delta x} = \frac{1}{2e} = 500 \frac{mV}{mm.V}$$

Le fonctionnement est parfaitement linéaire et la sensibilité est doublée par rapport au cas du montage à un seul condensateur.

Exercice 2 :

- la circulation du champ magnétique $\vec{H}$ sur la fibre moyenne Γ s'exprime simplement à l'aide du théorème d'Ampère par :

$$\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (1)$$

2. puisque l'on néglige les fuites de flux, le circuit magnétique de fer doux constitue un tube de champ. $\vec{B}$ étant à flux conservatif, on a :

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = Cste \quad (2)$$

Section du circuit
magnétique

Comme le long de chaque fibre du circuit magnétique $\vec{B}$ et $d\vec{S}$ sont colinéaires et comme la section du circuit magnétique est constante, on en déduit que B est constant dans le circuit magnétique et l'entrefer.

Soit en utilisant les perméabilités magnétiques de l'air et du fer doux :

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}_{air} = \mu \vec{H}_{fer} = \mu_r \mu_0 \vec{H}_{fer} \quad (3)$$

3. le flux magnétique au travers la bobine est donné par :

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = NBS = LI \quad (4)$$

Bobine

4. La circulation (équation 2) le long de Γ peut encore s'écrire

$$\int_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{\Gamma, fer} \vec{H} \cdot d\vec{l} + \int_{\Gamma, air} \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \quad (5)$$

Ce qui devient en utilisant les équations 3 et 4 :

$$\frac{B}{\mu} l + \frac{B}{\mu_0} 2e = \frac{N^2 BS}{L}$$

On en déduit l'expression de l'inductance de la bobine :

$$L = \frac{N^2 S}{\frac{l}{\mu} + \frac{2e}{\mu_0}}$$

5. La bobine étant alimenté au sinusoïdal, l'impédance de la bobine en régime permanent s'écrit $Z(e) = jL(e)\omega$ en négligeant la résistance du fil. Le capteur de déplacement réalisé en faisant varier l'entrefer e a une impédance qui une fonction non linéaire de e .

Exercice 3 :

1. $C_{AB} = C_e + \frac{C(x)C_p(x)}{C(x)+C_p(x)} \dots\dots\dots (1)$
2. Si la cible et l'armature extérieure sont au même potentiel, la capacité parasite $C_p(x)$ se trouve court-circuitée. Alors :

$$C_{AB} = C_e + C(x) \dots\dots\dots (2)$$

3. En première approximation, on peut négliger tout effet de bord et on peut considérer que la capacité $C(x)$ est celle d'un condensateur plan et que la capacité $C_e(x)$ est celle d'un condensateur cylindrique. Il vient alors :

$$C(x) = \frac{\epsilon_0 S}{x} = \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{x} \text{ et } C_e = \frac{\epsilon_0 2\pi h}{\ln((r+e)/r)} \approx \frac{\epsilon_0 2\pi h r}{e}$$

C_{AB} peut s'écrire :

$$C_{AB} = \frac{\epsilon_0 2\pi h r}{e} + \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{x} \dots\dots\dots (3)$$

4. Avec $x = x_0 + \Delta x$, il vient au premier ordre en $\Delta x/x_0$:

$$\begin{aligned} C_{AB} &= \frac{\epsilon_0 2\pi h r}{e} + \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{x(1 + \Delta x/x_0)} \approx \frac{\epsilon_0 2\pi h r}{e} + \frac{\epsilon_0 \pi r^2}{x_0} \left(1 - k \frac{\Delta x}{x_0}\right) \\ &= \frac{\epsilon_0 \pi r}{x_0 e} (2hx_0 + re) \left[\frac{1 - k \frac{\Delta x}{x_0}}{1 + \frac{\Delta x}{x_0}} \right] = C_0 \left[1 - k \frac{\Delta x}{x_0} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

L'application numérique donne $C_0 = 6,951 \text{ pF}$ et $k = -0,2$.

5. L'amplificateur étant supposé idéal, on a immédiatement dans le domaine de Laplace :

$$H_1(p) = V_2(p)/V_1(p) \text{ et } H_2(p) = V_4(p)/V_3(p)$$

$$H_1(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \dots \dots (5)$$

Pour le filtre on obtient :

$$V_4(p) = \frac{\frac{R}{1 + RCp}}{\frac{R}{1 + RCp} + \frac{1 + RC_{AB}p}{C_{AB}p}} V_3(p)$$

$$\text{Calcul fait, il vient : } H_2(p) = \frac{V_4(p)}{V_3(p)} = \frac{RC_{AB}p}{1 + R(2C_{AB} + C)p + R^2CC_{AB}p^2} \dots \dots (6)$$

Il s'agit donc d'un filtre passe-bas d'ordre 2.

6. Si on impose $v_2 = v_3$ et $v_1 = v_4$ en connectant ensemble les deux éléments du montage de la figure 6, on doit avoir :

$$H_1(p) = \frac{V_2(p)}{V_1(p)} = \frac{V_3(p)}{V_4(p)} = \frac{1}{H_2(p)} \text{ soit } H_1(p)H_2(p) = H(p) = 1 \dots \dots \dots (7)$$

Les fonctions de transfert étant complexe (domaine de Laplace), on doit donc avoir :

$$|H(p)| = 1 \text{ et } \arg(H(p)) = 0$$

Ceci constitue les deux conditions dites respectivement d'amplitude et de phase.

7. Le système étant un oscillateur sinusoïdal de pulsation ω , la condition de phase s'écrit d'après les équations 5 et 6 :

$$\arg(H(j\omega)) = \arg(H_2(j\omega)) = \arctan \left[\frac{RC_{AB}\omega(1 - R^2CC_{AB}\omega^2)}{R^2C_{AB}(2C_{AB} + C)\omega^2} \right] \dots \dots \dots (8)$$

La pulsation de l'oscillateur est donc :

$$\omega = \frac{1}{R\sqrt{CC_{AB}}} \dots \dots \dots (9)$$

La condition d'amplitude s'écrit d'après les équations 5, 6, 7 :

$$\frac{RC_{AB}\omega}{\sqrt{(1 - R^2CC_{AB}\omega^2)^2 + (R(2C_{AB} + C)\omega)^2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \dots \dots \dots (10)$$

En utilisant les expressions 9 et 10 :

$$(R_1 + R_2)C_{AB} = R_1(2C_{AB} + C) \dots \dots \dots (11)$$

8. D'après (9), on a $\omega_0 = \frac{1}{RC_0} = 1,439 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$ soit une fréquence $f_0 = 229 \text{ KHz}$. D'après (10), on tire $R_1 = R_2/2$.

9. La pulsation est toujours donnée par (9) puisque cette relation est indépendante de R_1 . Elle s'écrit maintenant pour $\Delta x \neq 0$:

$$\omega = \frac{1}{R\sqrt{C C_{AB}}} = \omega = \frac{1}{R\sqrt{C_0^2 \left(1 + k \frac{\Delta x}{2x_0}\right)}} = \omega_0 \frac{1}{\sqrt{1 + k \frac{\Delta x}{2x_0}}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{k \Delta x}{4x_0}\right) \quad (12)$$

10. La tension v_1 est sinusoïdale de pulsation instantanée donnée par (12).
Sa phase instantanée s'écrit donc :

$$\varphi(t) = \int \omega dt \approx \omega_0 t - \int k \omega_0 \frac{\Delta x}{2x_0} dt = \omega_0 t - F(t)$$

La tension instantanée est de la forme :

$$v_1 = V_0 \sin(\omega_0 t - F(t)).$$

Exercice 4 :

I.

- Temps de rotation :

$$1 \text{ tour} = 2T = 10 \text{ ms}$$

$$1 \text{ tour} \longrightarrow \frac{20 \cdot 10^{-3}}{60} \text{ min}$$

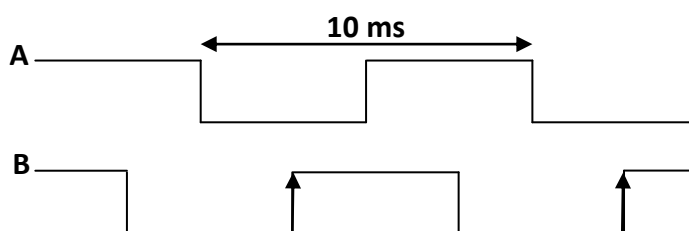
$$x \longrightarrow 1 \text{ min}$$

$$\Rightarrow x = 3000 \text{ tour}$$

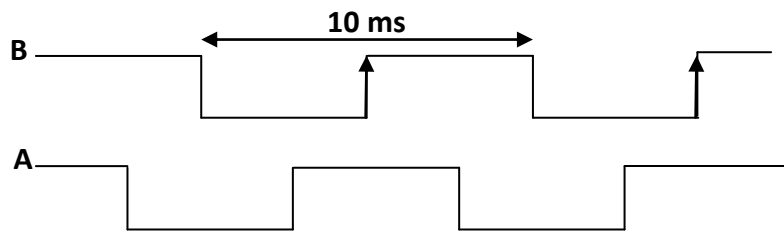
- La vitesse de rotation : $V = 3000 \text{ tr/min}$.

1. ($Q = B$) à chaque front montant ($Q = D = A$).

Front montant : $Q = 0$.



2. Si on inverse le sens de rotation ($Q = D = A$): $\Rightarrow Q = 1$.



II.

II.1.

- Eclairé : phototransistor saturé : $v_1 = 0$
- A l'ombre (obscurité), $i_{c1} = 0 \Rightarrow v_1 = E - R_1 i_{c1} = E$

II.2. $500 \frac{tr}{min}$ et $4 \frac{trous}{tour} \Rightarrow 2000 \frac{trou}{min} \Rightarrow 33,33 \frac{trou}{s}$

$$\Rightarrow f = 33,3 \text{ Hz}$$

$$\Rightarrow T = 30 \text{ ms}$$

TD N° 6

Capteurs de force et de pression

Exercice 1 :

Quatre jauges de contrainte, collées sur un corps d'épreuve, se déforment sous l'action d'une force. Ces capteurs dont la résistance est notée respectivement R_1 , R_2 , R_3 et R_4 sont placés dans le schéma électrique de la figure 1.

Au repos, la résistance de chacune d'entre elles est $R_0 = 150 \, \Omega$. En présence de forces, les deux jauges R_1 et R_4 sont en extension : $R_1=R_4= R_0+\Delta R$, alors que les deux autres sont en compression : $R_2=R_3= R_0-\Delta R$.

La variation ΔR vérifie la relation : $\Delta R/R_0 = kF$. Avec $k = 0,3 \cdot 10^{-3} \, \text{N}^{-1}$.

1. Exprimer la tension V_{AB} en fonction de ΔR , R_0 et E .
2. Montrer que la tension V_s est proportionnelle à la force F .
3. Quelle est la valeur de la force appliquée, lorsque $V_s = 30\text{V}$?

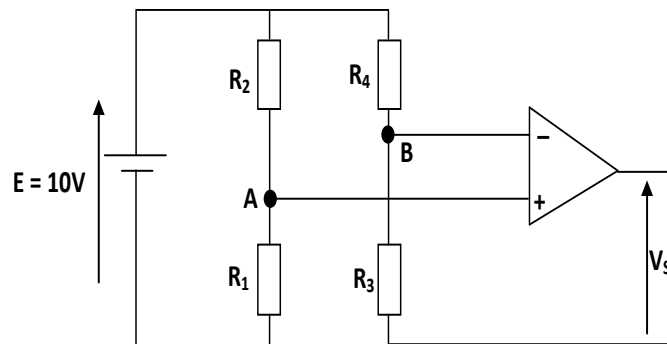
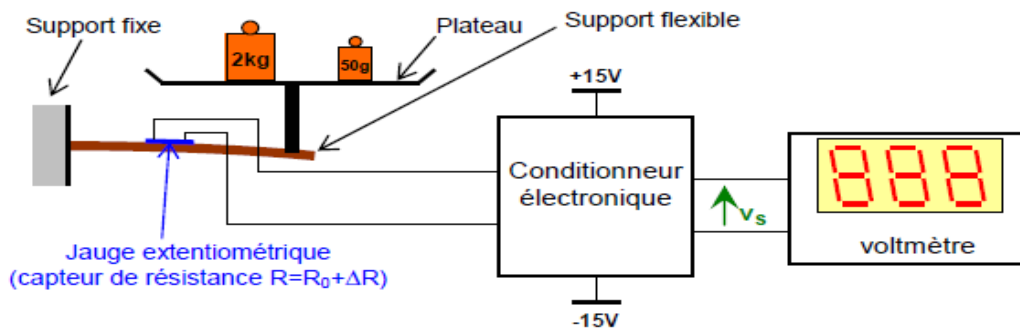


Figure 1

L'amplificateur opérationnel est considéré parfait avec un gain $G= 100$.

Exercice 2 :

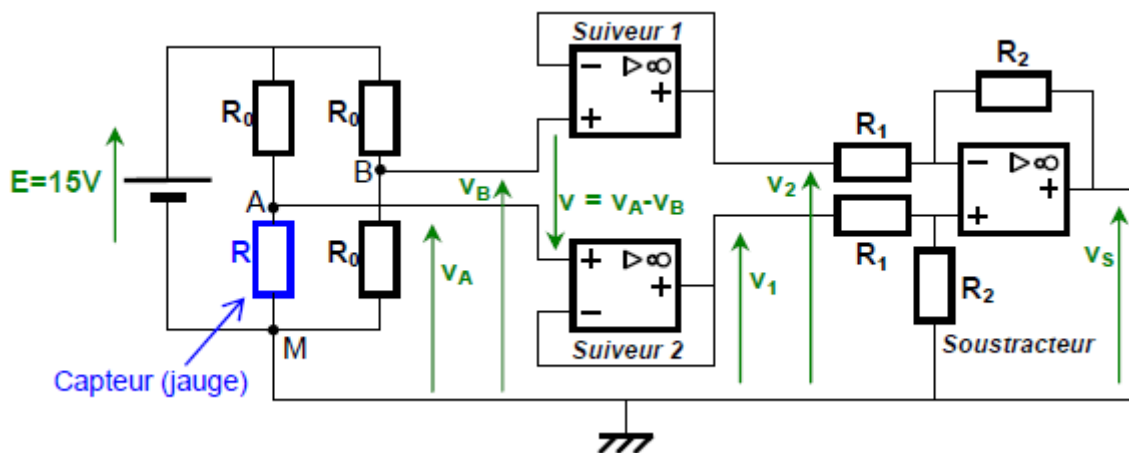
La mesure de poids repose sur le principe de déformation d'une jauge de contrainte collée sur le support flexible de pesage (schéma ci-dessous):



La jauge est une résistance R qui varie avec la déformation due à la masse m sur le plateau :

$$R = R_0 + \Delta R \text{ avec } R_0 = 360\Omega \quad \text{et} \quad \frac{\Delta R}{R_0} = K.m \text{ avec } K = 4.10^{-3} \text{ kg}^{-1}$$

1- Étude du conditionneur :



1) Etude du pont de la jauge :

- Exprimer la tension V_A en fonction de E , R_0 et ΔR .
- Exprimer la tension V_B en fonction de E .
- En déduire la tension sous la forme $V = E \frac{\Delta R}{4R_0 + 2\Delta R}$
- Montrer que l'on peut simplifier l'expression de V pour obtenir $V = \frac{E}{4} \frac{K.m}{1 + \frac{K.m}{2}}$
- Calculer la valeur de la tension V pour $m = 10\text{kg}$.
- On admet qu'avec une masse $m < 15\text{kg}$, on a le produit $K.m \ll 1$; simplifier alors l'expression de V pour la rendre linéaire.

2) Etude des montages suiveurs :

- Montrer que $V_1 - V_2 = V$.
- Expliquer le rôle de ces étages.

3) Etude du montage soustracteur :

- Exprimer V^+ en fonction de R_1 , R_2 et V_1 .
 - Exprimer V^- en fonction de V_2 ; V_S ; R_1 et R_2 .
 - En déduire la tension V_S .
 - On donne $R_2 = 10k\Omega$.
- Calculer la valeur de R_1 pour obtenir $V_S = 10V$ lorsque $m = 10kg$. Justifier l'intérêt de ce choix.

2- Mise au point de l'ensemble :

- Calculer la puissance dissipée au repos ($m = 0$) par l'ensemble du pont de jauge.
- Tracer la caractéristique $V_S = f(m)$. En déduire la masse maximale mesurable.
- On désire augmenter la sensibilité de la balance en utilisant une deuxième jauge identique à la première.
 - Où faudrait-il placer cette jauge sur le support flexible ?

A la place de quelle résistance R_0 du pont faudrait-il connecter cette jauge ?

Exercice 3 :

On désire réaliser le circuit électronique de la figure 3 qui mesure la différence de pression atmosphérique par rapport à 1013 mb (pression moyenne) avec une sensibilité de $1\text{mV}/\text{mb}$ (tableau 1) .

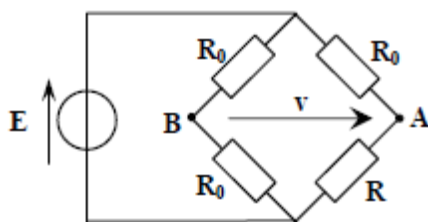


Figure 3

Tableau 1

Pression (mb)	Tension v (mV)
900	-113
1013	0
1100	87

E est une source de tension fixe;

V est la tension à la sortie du pont (image de la pression);

R_0 sont des résistances ajustables réglées à l'identique;

R est le capteur résistif linéaire de caractéristiques données dans le tableau 2.

Tableau 2

Pression (mb)	Résistance R (Ω)
0	1000
4000	3000

1. Donner l'expression de la tension v en fonction de E ; R_0 et R .
2. Montrer qu'à l'équilibre du pont (lorsque $V = 0 \text{ Volt}$), on a : $R = R_0$.
3. En utilisant le tableau caractérisant le capteur résistif, exprimer R en fonction de P .

Déterminer alors la valeur des résistances réglables R_0 .

4. Exprimer V en fonction de E et P . La relation " V fonction de E et P " est-elle linéaire?
5. En prenant $E = 12V$, calculer les valeurs respectives de V pour $P = 900mb$ et $P = 1100mb$,
 - Calculer les erreurs relatives pour les deux valeurs de v calculées plus haut.

Solution du TD N° 6

Exercice 1 :

1. Expression de la tension V_{AB} :

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E - \frac{R_3}{R_3 + R_4} E = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0} \right) \cdot E = \frac{\Delta R}{R_0} E$$

2. V_S est proportionnelle à la force F :

On a : $V_S = A \cdot V_{AB} = A \frac{\Delta R}{R_0} E = AkEF$, $AkE = \text{constante}$. D'après l'expression de

V_S , on constate bien que cette dernière est proportionnelle à la force.

3. Calcul de la valeur de la force appliquée :

$$V_S = AkEF \Rightarrow F = \frac{V_S}{AkE} = 100N.$$

Exercice 2 :

1. Etude du pont de jauge :

On est en présence de deux ponts diviseurs alimentés par la même source de tension $E = 15 \text{ V}$.

a. $V_B = \frac{R_0}{R_0 + R_0} E = \frac{1}{2} E$

b. $V_A = \frac{R}{R + R_0} E$

c. $V = V_A - V_B = \left(\frac{R}{R + R_0} - \frac{1}{2} \right) E = \frac{R - R_0}{2R + 2R_0} E$

Mais, on a : $R = R_0 + \Delta R \Rightarrow V = \frac{\Delta R}{2\Delta R + 4R_0} E$

- d. Il suffit de diviser numérateur et dénominateur par R_0 :

$$V = \frac{\frac{\Delta R}{R_0}}{\frac{\Delta R}{2R_0} + 1} \cdot \frac{E}{4} = \frac{\frac{km}{2}}{\frac{km}{2} + 1} \cdot \frac{E}{4}$$

e. Pour $m = 10kg \Rightarrow V = 0,147V$.

f. Si $km \ll 1 \Rightarrow \frac{km}{2} \ll 1 \Rightarrow \frac{km}{2} + 1 \approx 1 \Rightarrow V = \frac{EK}{4} m$

Pour $m < 10\text{kg}$, on peut donc considérer que V est proportionnelle à m .

2. Etude des montages suiveurs :

- a. Le montage suiveur 1, donne $V_1 = V_A$ et le montage suiveur 2 donne $V_2 = V_B$

$$\Rightarrow V_1 - V_2 = V_A - V_B$$

- b. Le montage suiveur répercute, en sortie, la même tension qu'en entrée tout en ne prélevant pas de courant en entrée (adaptation d'impédance)

3. Etude du montage soustracteur :

- a. On a directement $V^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1$

- b. On a aussi : $V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$

- c. En régime linéaire, donc : $V^+ = V^- \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_s$

$$\Rightarrow R_2 V_1 = R_2 V_2 + R_1 V_s \Rightarrow V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

- d. On a $V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) = \frac{R_2}{R_1} V = \frac{R_2}{R_1} \frac{Ek}{4} m \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{V_s} \frac{Ek}{4} m = 150\Omega$.

$$AN: R_1 = 150\Omega.$$

Exercice 3 :

1. On a $V = V_A - V_B$ avec $V_A = E \frac{R}{R_0 + R}$ et $V_B = E \frac{R_0}{R_0 + R_0} = \frac{E}{2}$

$$V = V_A - V_B = E \left(\frac{R}{R_0 + R} - \frac{1}{2} \right)$$

2. $V = 0$ si $\frac{R}{R_0 + R} = \frac{1}{2} \Rightarrow R = R_0$.

3. Le capteur est linéaire donc : $R = aP + b$ avec :

$$a = \frac{\Delta R}{\Delta P} = \frac{3000 - 1000}{4000} = 0,5 \text{ et } 1000 = 0,5 \cdot 0 + b \Rightarrow b = 1000 \text{ donc } R = 0,5P +$$

1000.

On a $V = 0$ lorsque $P = 1013 \text{ mB} \Rightarrow R = 0,5 \cdot 1013 + 1000 \Rightarrow R = 1506,5\Omega$.

4. D'après les résultats numériques on a : $V = E \left[\frac{0,5P + 1000}{0,5P + 1000 + 1506,5} - \frac{1}{2} \right]$

Cette équation n'a pas la forme d'une équation droite, elle n'est donc pas linéaire.

$$5. \quad V_{900} = 12 \left[\frac{0,5 \cdot 900 + 1000}{0,5 \cdot 900 + 1000 + 1506,5} - \frac{1}{2} \right] \text{ soit } V_{900} = -114,7 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow \text{Erreur } E_{900} = \frac{-114,7 - (-113)}{113} \text{ soit } E_{900} = -1,5\%$$

$$V_{1100} = 12 \left[\frac{0,5 \cdot 1100 + 1000}{0,5 \cdot 1100 + 1000 + 1506,5} - \frac{1}{2} \right] \text{ soit } V_{1100} = 85,4 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow \text{Erreur } E_{1100} = \frac{85,4 - 87}{87} \text{ soit } E_{1100} = -1,8\%$$

Bibliographie

[1] Pascal Dassonville, Les capteurs : 62 exercices et problèmes corrigés, 2^{ème} édition Dunod.

[2] Polycopie d'exercices, BTS 2, conversion d'une grandeur physique.

[3] Christian BISSIERES, TD capteurs, TS IRIS (Physique Appliquée).