

HP 23. Capteurs & transducteurs

I. Etude de capteurs (passifs) de température.

1. Etalonnage des capteurs (Etude de la jauge)

a) Dispositif expérimental.

- choix du thermomètre de référence.
- récompter d'agiter
- protocole

b) La résistance de platine.

- eqn $R = f(\theta)$
- mesure de R
- résultats.

c) La thermistance CNI

- eqn $R = f(T)$
- mesure de R
- résultats & calcul des gcs.

d) Thermocouple.

- principe
- $V = f(T)$
- résultats & calcul du pouvoir thermoelectrique.

* Bilan.

2. Comparaison des caractéristiques des capteurs

a) Sensibilité.

b) Temps de réponse.

* conclusion.

II. Etude d'un transducteur (electrodynamique) : le haut-parleur

1. Mise en évidence qualitative des couplages.

a) couplage électro-dynamique.

b) couplage dynamique - acoustique.

c) réversibilité des couplages.

2. Détermination des caractéristiques du HP.

a) linéarité en amplitude en régime dynamique

b) Détermination de la constante de couplage électromécanique.

Biblio:

- Bonni - Quarta tome IV
- Tome II
- Les capteurs - Ash } par la théorie
- Les capteurs - Berto }

Biblio:

- Quarta tome IV.
- Pomi Electrodynamique (par la théorie)

1. General Information
2. Project Description
3. Objectives
4. Methodology
5. Results
6. Conclusions
7. References
8. Appendices

1. General Information
2. Project Description
3. Objectives
4. Methodology
5. Results
6. Conclusions
7. References
8. Appendices

1. General Information
2. Project Description
3. Objectives
4. Methodology
5. Results
6. Conclusions
7. References
8. Appendices

1. General Information
2. Project Description
3. Objectives
4. Methodology
5. Results
6. Conclusions
7. References
8. Appendices

I - Capteurs de température

La mesure des températures est réalisée au moyen d'un capteur de température ou d'un thermomètre. Le choix de la grandeur thermométrique donne naissance à 4 types de thermomètres.

Nous nous intéressons ici aux thermomètres électriques et le fonctionnement utilisé des 4 variés et nous allons les comparer.

→ 1 Thermomètre à résistance métallique (Platine) : $R_{T=100}$: R varie avec T

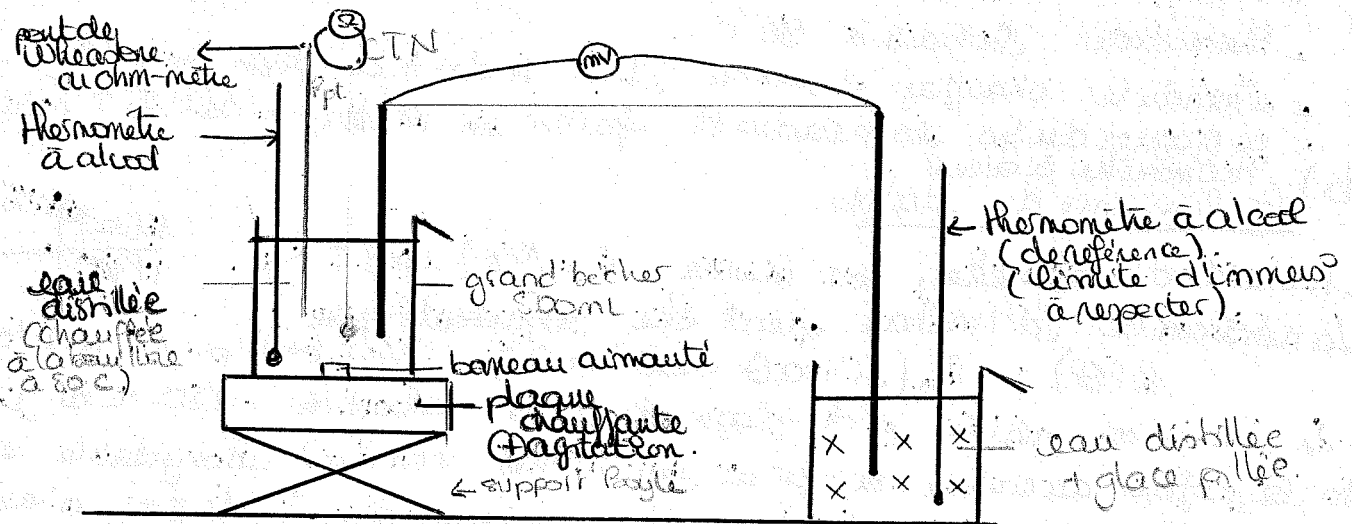
→ 2 Thermistance CTN : la R varie avec T ; $N \Rightarrow R \rightarrow \text{quand } T \uparrow$

→ 3 Thermocouple de type K : basé sur l'effet Seebeck se produisant à la soudure de 2 métaux $\neq$ à $2T^\circ$ $\neq$ (alliages).

1. Etalonnage des 4 capteurs

Pour repérer avec précision la température d'un corps caractérisé par le nb θ , on est amené à la rattacher à 1 grandeur mesurable g par l'intermédiaire d'un φ physique lié aux variat de température de ce corps. La relation $g = g(\theta)$ doit être θ° et uniforme de T par la fidélité du repérage. Cette relat définit une échelle de température.

a) Dispositif expérimental.



Remarques sur le dispositif expérimental :

• choix du thermomètre de référence :

Pour caractériser les 4 thermomètres, nous avons choisi d'utiliser comme référence 1 thermomètre de référence (thermomètre à alcool) qui a été métrologiquement étalonné par le constructeur.

En effet l'étalonnage que l'on va faire va dépendre de l'échelle thermométrique. La relat linéaire entre g et θ si elle est linéaire sera complètement.

défini par 2 temp^s gales θ_1 et θ_2 facilement réalisables 2
reproductibles et les valeurs num^{iq} st attribuées conventionnellement.

ex: 0°C : T° eq glace / eau pure à P_0

100°C : " " eau pure liquide / vapeur à P_0

pts triples

T° fusⁿ étain

Pour des lectures précises, il est nécessaire q la totalité du thermomètre
plonge ds le bain & qu'il y ait une mesure précise, sinon il faut faire
une "correctⁿ de colonne émergente" (voir Tome II Bonini). (Pb d'hystérésis
due à la dilatⁿ du verre, pression hydrostat^{iq} qui comprime le
liquide (Hg ou alcool) $\rightarrow$ ce pb est éliminé qd on mesure ds écarts de temp^{erature}
Cependant, sur certains thermomètres, cette correctⁿ est déjà effectuée
et on la remarque indiquant la limite d'immersⁿ.

nécessité d'agiter le bain

Le milieu de mesure n'est pas toujours à une temp^{erature} uniforme,
il faut noter que l'on ne devra jamais attendre d'une mesure absolue,
une précision $\gg$ à la $\neq$ max de temp^{erature} $\exists$ ds le milieu.

Il faut de agiter & avoir 1 temp. la $\oplus$ homogène possible.

Protocole

- chauffer eau distillée ds bouilloire.

- Thermostater le bain à 90°C .

- éteindre le chauffage et prendre 1 pt à des $\neq$ de T fixes entre $[90^\circ\text{C}$ et $25^\circ\text{C}]$

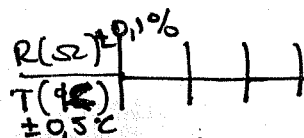
- ps gagner du ms les mesures st faites en mⁱⁿ ms; on contrôle T grâce à 1

b) la Résistance de platine

- A l'aide d'un ohmètre, on mesure $R = f(\theta)$ qnd $T \rightarrow$.

La résistance d'un métal peut être représentée par:

$$R(\theta) = R_0(1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3) \quad (\text{voir Bert p. 62 pr détail calcul})$$



- Le platine est utilisé pr ds plages de temp allant de -250°C à 1600°C .

On le préfère au cuivre, au fer ou au nichel car il est inoxydable et

on peut l'obtenir très pur (99.9%) & le Pt, le terme du 3^e degré n'est

nécessaire que pour les $\theta \in [-250^\circ\text{C}; 0^\circ\text{C}]$; aux temp. où l'on va

travailler on peut négliger le terme du 2nd degré sans introduire

($0^\circ\text{C} < 500^\circ\text{C}$) d'erreur $\gg 2\%$. ($c = -5,8 \cdot 10^{-7} \text{K}^{-2}$)

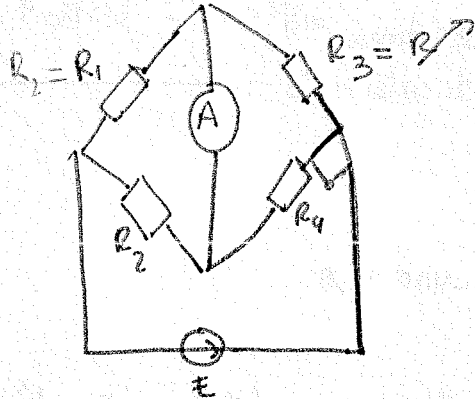
$$\Rightarrow \text{pt } 100 \Rightarrow R_0 = 100 \Omega$$

$$\text{et } R(\theta) = R_0(1 + a\theta) \quad a = 3,908 \text{K}^{-1}$$

Le fil de platine est entouré d'une gaine cylindrique de laiton ou d'étain qui assure
l'isolation et la protection.
Il a une grande résistivité ($9,81 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ à 0°C) $\Rightarrow$ encombrement réduit &

Remarque sur la mesure de R. [Asch]

Normalement, la résistance doit être mesurée avec précision à l'aide d'un pont de Wheatstone.



Le pont est équilibré quand $i = 0$ i.e.
 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ si $R_1, R_2 \gg R_3$

Si $R_4 = R_{pt}$, la précision sur R_{pt} dépend de la précision sur les 3 autres.

La + grde erreur de mesure vient du fait que les résistances des fils de connexion induisent des perturbations qui ne sont pas éliminées automatiquement.

En effet, les résistances R_{fi} peuvent ne pas être négligeables % R_{pt} .

Si les 2 fils font partie de la même branche de part et d'autre du capteur, il est impossible de distinguer une variation de résistance ΔR_{fi} due à la θ de celle de ΔR_{pt} .

$\Rightarrow$ montage à 3 fils

Cependant, ici nous disposons d'un ohm-mètre avec une précision de $\pm 0,1\%$ de calibre 200Ω . $\Rightarrow$ précision identique que pont de Wheatstone.
 [Ser p. 81]. La résistance des fils est de $0,3\Omega \ll \sim 200\Omega$

$\Rightarrow$ De la plage de température utilisée, nous avons suffisamment de précision.

Résultats.

on trace $R_{pt} = f(\theta \text{ en degrés})$ + régression linéaire. $\oplus$ 1 point
 on trouve $R_{pt} = 100 \left(1 + 3,71 \cdot 10^{-3} \theta \right) = R_0 (1 + a\theta)$

or dans les tables, $\left\{ \begin{array}{l} R_0 = 100\Omega \\ a = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{array} \right.$

$\Rightarrow$ écart relatif : $\epsilon = \frac{3,9 - 3,7}{3,7} = 5\%$

$\Rightarrow$ incertitude : $\frac{\Delta R_{pt}}{R_{pt}} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta T}{T} =$

$\Rightarrow$ bon accord, R_{pt} est bien linéaire de la donnée de températures paires.

c) La thermistance CTN.

→ Thermomètre à semi conducteur. $R = R_0 \exp \left[B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$
 protégé par gaine isolante
 où $T_0 = 273,15 K$.

$$R_0 = R(T = 0^\circ C) = 47 \Omega \text{ (donnée)} \Rightarrow \ln R = \ln R_0 + \frac{B}{T} - \frac{B}{T_0}$$

$$B = \frac{\Delta W}{2k_B} \leftarrow \text{largeur bande interdite}$$

→ mesure de R.

$$\frac{R(\Omega) \pm 0,1\%}{T(^{\circ}C) \pm 0,5^{\circ}C}$$

$\Rightarrow R \searrow$ quand $T \nearrow$

on trace $\ln R = f\left(\frac{1}{T} (K^{-1})\right) \Rightarrow$ donc

$$\ln R_{CTN} = 12,57 - 2,92 \cdot 10^3 \cdot \frac{1}{T}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta W}{2k_B} = 2,9 \cdot 10^3 K^{-1}$$

$$\text{gap} \Rightarrow \Delta W = 4 \cdot 10^{-20} J = 0,25 eV$$

$\Rightarrow$ pas dopé pr être sensible à la température.

→ incertitude

d) Thermomètre à thermocouple. p. 177 Tome II Bernini.

Principe: $\Rightarrow$ basé sur effet thermoelectrique (Seebeck, 1823)

effet Seebeck: créat d'1 ddp en circuit ouvert d'1 matériau soumis à 1 gradient de température. Effet Peltier + Effet Thomson.

$$\text{on a } \vec{E} = -\vec{\nabla} V = -\epsilon \vec{\nabla} T$$

$\uparrow$ $\uparrow$
 loi d'Ohm $\sim$ Fourier

$\Rightarrow$ ddp nulle entre 2 pts d'1 conducteur homogène retrouvant à la m T.

$\Rightarrow$ si circuit composé de matériaux $\neq \Rightarrow$ ddp du fait que ces matériaux n'ont pas le m coeff. thermoelectrique

$$e = \int dV = (E_A - E_B) \Delta T$$

ici jonction métal-1/2 conducteur (Ni-Cr / Ni-Al) car $E_A - E_B$ ord

Dispositif: Il faut déterminer la fem du thermocouple $\Rightarrow$ $\Delta T \Rightarrow$ pr s'affranchir

d'1 ΔT , on met une des soudures ds la glace + eau $\Rightarrow$ température fixe (cf binaires) et on plonge l'autre partie dans le bain. $\Rightarrow$ s'affranchir de la temp. $T = 0^\circ C$.
 $\Rightarrow$ on a alors accès directement à T_{bain} .
 La mesure est effectuée à courant nul car on veut déterminer la fem.

$\Rightarrow$ on trace $V = f(T_{\text{bain}} ^\circ C)$.

$$\frac{V(mV) \pm 0,1\%}{T_{\text{bain}}(^{\circ}K) \pm 0,5^{\circ}C}$$

$$\text{Régression linéaire} \Rightarrow V = -2,5 \cdot 10^{-4} + 6,08 \cdot 10^{-5} T$$

$$\Rightarrow \text{pouvoir thermoelectrique: } \mathcal{S} = 41 \mu V/K \quad (\text{p. 108 Beeth})$$

bilan

- Rpt linéaire d'ordre 1 étudié $\Rightarrow$ idéale pour constituer (référence (peu de pts fixes p la calibration)
 $\Rightarrow$ référence (d'ailleurs expression $R = f(\theta)$ tabulée à 6 c. après)
- CTN $\Rightarrow$ exponentielle.
- Thermocouple $\Rightarrow$ linéaire.

2 - Comparaison des caractéristiques des capteurs.

a) Sensibilité

[Bert p. 20]

Un thermomètre est d'autant + performant qu'il permet de détecter des + petites variations de θ .

La sensibilité s'exprime par $\boxed{s = \frac{d\alpha}{d\theta}}$ $\leftarrow \alpha$: grandeur variable du capteur.

$\Rightarrow$ la + petite variation de température est $\Delta\theta = \frac{\Delta\alpha}{s}$. Sensibilité

• Rpt: $s = \frac{dR_{pt}}{d\theta} = \alpha R_0 = 3,9 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1} \Rightarrow s' = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\theta} = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$

• Thermistance: $s = \frac{1}{R_{CTN}} \frac{dR_{CTN}}{dT} = -\frac{\frac{B}{T^2} - K^{-1}}{1 - \frac{B}{T^2} - K^{-1}} \Rightarrow$ pour T_{ord} , $s = 1,96 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1} \Rightarrow s \sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$
 pour T_{petit} , $s = 1,93 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$

• Thermocouple

$$s = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial \theta} = 4,08 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$$

$\Rightarrow$ Dans la gamme de T étudiée, $s_{\text{Thermistance}} > s_{\text{Rpt}} > s_{\text{thermocouple}}$

b) Temps de réponse. [Bert + Deniri]

Pour la plupart des appareils de mesure, τ petit $\Rightarrow$ ne pas en tenir compte. ($< 100 \text{ ms}$)

Ce n'est pas forcément le cas des indicateurs de θ .

$\Rightarrow$ il faut pouvoir en choisir 1; τ : temps minimal d'attente.

idéal: A $t=0$, on plonge le capteur initialement à la temp θ_0 dans milieu

initialement à la température θ_0 .

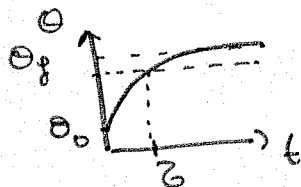
on a $\frac{d\theta}{dt} = K(\theta_1 - \theta) \Rightarrow$ $\int \frac{d\theta}{\theta_1 - \theta} = \int K dt$
 (pas calorig)

$$\boxed{\theta = \theta_1 + A e^{-t/\tau}}$$

$\theta = \theta_1$ si $t \rightarrow \infty$.

Protocole :

Le bain est à $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$. On plonge les capteurs du bain glacé
 $\rightarrow R_{pt}, R_{CTN}$ et V_{thermo} ont valeur
à $0^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ on relève les valeurs R_{pt} , R_{CTN} et V_{thermo} quand elles sont
stables. On plonge ensuite de nouveaux du bain des sondes et
on attend q les valeurs mesurées soient stables. $\Rightarrow$ REPONSE à l'ECHELON.
A $t=0$ on plonge le capteur de bain chaud; on mesure le ms nécessaire pour passer à la
valeur initiale
Def: $\tau =$ durée nécessaire pour approcher la valeur attendue de la place
à 10% près.



Résultats :

Temp. \ capteur

$$\Theta_1 = 26,5^{\circ}\text{C}$$

$$\Theta_2 = 5^{\circ}\text{C}$$

$$R_{pt} \pm 0,1\% \Omega$$

$$110,7 \Omega$$

$$106 \Omega$$

$$72 \Omega$$

$$\text{Thermocouple} \pm 0,1\%$$

$$0,0 \text{ mV}$$

$$0 \text{ mV}$$

$$4 \mu\text{V}$$

$$\text{Thermistance} \pm 0,1\%$$

$$46,6 \Omega$$

$$114,5 \Omega$$

$$2,4 \Omega$$

$$\tau (\% - 10\% \Delta X)$$

$$\Rightarrow \tau_{\text{Thermo}}, \tau_{\text{Thermistance}} \gg \tau_{\text{Rpt}} \quad \begin{matrix} \uparrow \\ \text{dépend gamme protectrice} \end{matrix}$$

$$\text{Conclusion: } \tau_{\text{Thermocouple}}, \tau_{\text{Thermistance}} \gg \tau_{\text{Rpt}}$$

$$\tau_{\text{Thermistance}} > \tau_{\text{Rpt}} > \tau_{\text{Thermocouple}}$$

$\Rightarrow$ Thermocouple & CTN servent à asservissement de T malgré mauvaise linéarité

$\Rightarrow R_{pt}$: τ long mais très linéaire $\Rightarrow$ Référence.

$\Rightarrow$ Le choix du capteur dépendra de l'utilité que l'on veut en faire.

II - Etude du HP

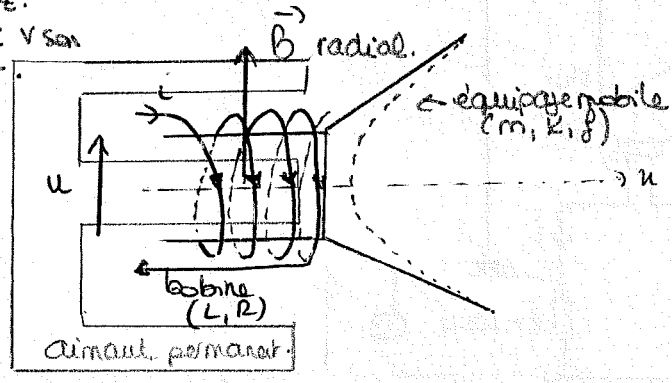
a) Def 2 eq^{ts} de fonctionnement. [Annex. 471 p. 205]

Def: Un transducteur électromécanique est l'appareil électromécanique assurant la conversion et le transfert de signaux de façon réversible d'énergie.

C'est des 2 couples.

1. Schéma du HP:

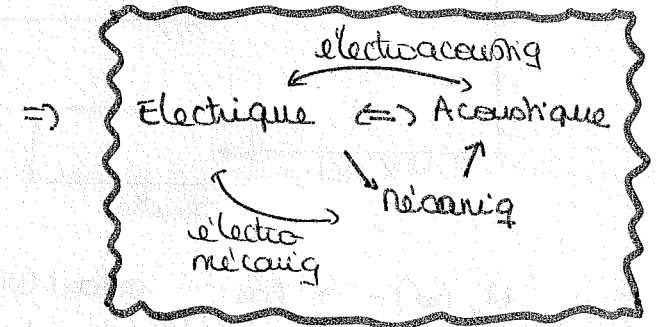
hyp: $f < 200\text{Hz}$.
dim. HP $\ll \lambda$ son
 $\Rightarrow$ champ magnétique



enroulement (bobine) de champ B crée par l'aimant.
 e : longueur enroulement
 i alternatif
 $\Downarrow$
force Laplace $\vec{F} = B \vec{e} i$
 $\Downarrow$
mvt de la membrane de masse m
 $\Downarrow$
production.

2 eq^{ts}:

$$\begin{cases} m \ddot{x} = -kx - b\dot{x} + B e i \\ u = R i + B e \dot{x} + L \frac{di}{dt} \end{cases}$$



en complexe:

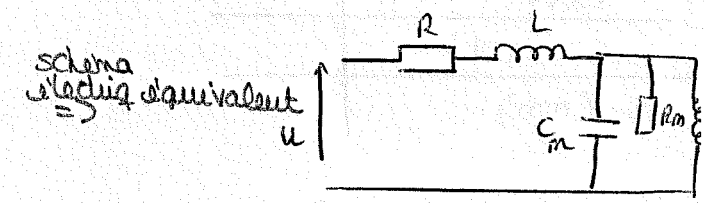
$$u = R \underline{i} + j \omega L \underline{i} + \frac{(B e)^2 j \omega \underline{i}}{m(j \omega)^2 + b j \omega + k}$$

$$\Rightarrow Z = \frac{u}{i} = R + j \omega L + \frac{Z_m}{\text{impédance mécanique}}$$

$$Z_m = R_m \parallel L_m \parallel C_m$$

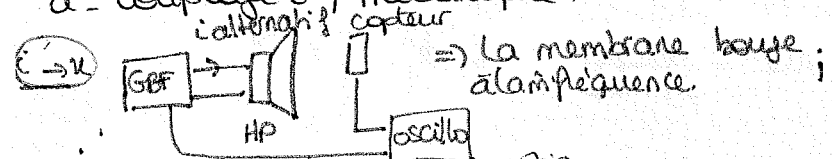
avec $R_m = \frac{(B e)^2}{f}$; $L_m = \frac{(B e)^2}{k}$; $C_m = \frac{m}{(B e)^2}$

or $f < 200\text{Hz}$, L négligeable.



1. Mise en évidence des couplages et de la réversibilité.

a - couplage i / mécanique.

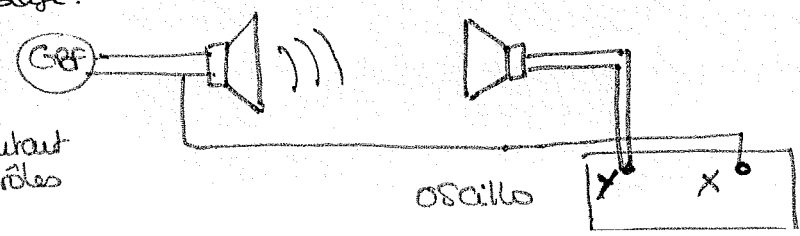


$x \rightarrow i$: on tape la membrane avec les doigts pour l'alimenter $\Rightarrow$ on voit le signal.

b) couplage mécanique / acoustique
à haute $f \Rightarrow$ on entend le son.

c) Réversibilité du couplage.

2 HP identiques

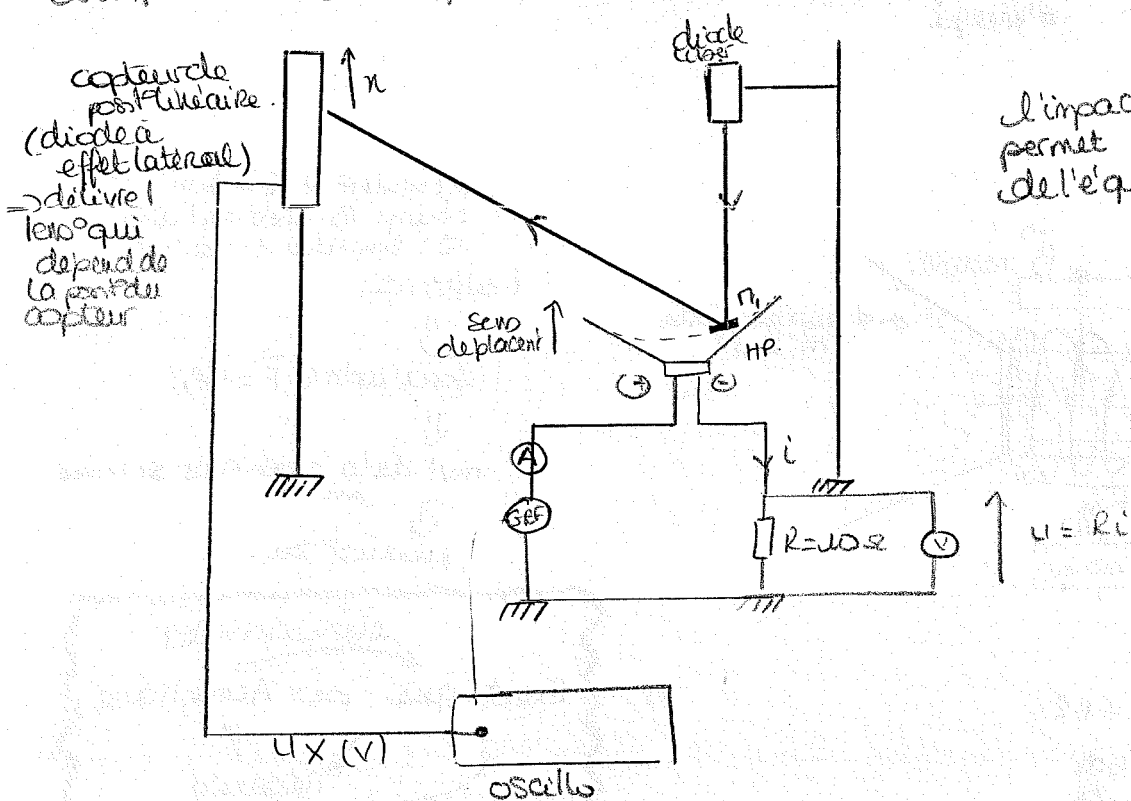


$\Rightarrow$ les 2 signaux sont amplifiés.

1 - Exercice [Bonnier p. 559].

⇒ carac. essentielle d'un capteur.

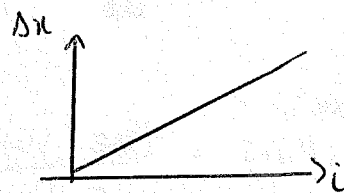
Mode op: A f donnée (poche de f_0 par avoir I_{max} d'amplitude), on mesure l'amplitude du déplacement de la membrane en fct de l'intensité envoyée.



l'impact du laser sur l'écran permet de repérer le déplacement de l'équipage mobile.

ona $U_x (V) = k \Delta x$. on fait 3 ou 4 mesures.

$U_x (V) \pm 3 mV$	
$i \pm 0,01 A$	
$\Delta x (mm)$	



Rq: A une autre f on aurait trouvé l'autre pente.

$$\underline{U} = R \underline{I} + j\omega BL \underline{x} + j\omega \underline{I}$$

$$\underline{U} = (R + j\omega L) \underline{I} + j\omega BL \underline{x}$$

$$\Rightarrow \underline{x} = \frac{\underline{U} - (R + j\omega L) \underline{I}}{j\omega BL}$$

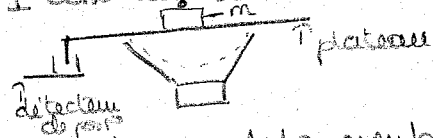
$$\Rightarrow |\underline{x}| = \frac{|\underline{U} - R \underline{I}|}{\omega BL} = \frac{|U_0 e^{j\omega t} - R I_0 e^{j\omega t}|}{\omega BL} = \frac{U_0 - R I_0}{\omega BL} = \frac{U_0 - R I_0}{\omega BL}$$

$$\Rightarrow x = \frac{U_0}{2\pi \nu BL} - \frac{R I}{2\pi \nu BL} \Rightarrow \text{pente} = \frac{R}{2\pi \nu BL} \quad \text{en } s^{-1} T^{-1} m^{-1}$$

3) Détermination du paramètre Bl

• Montage sauf que on remplace $\bar{a}$ par $\bar{a}$ constant avec 1 alimentat° B°

⇒ en statique : $Bl \dot{x} = kx$



on pose une masse de masse connue sur le plateau de la membrane.
on s'arrange pr avoir $\Delta x = 0$.

• Allég ⇒ $mg + Bl \dot{x} - kx = 0$

⇒ $g \Delta m = \frac{Bl}{k} \frac{\Delta x}{\Delta t}$

⇒ $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{Bl}{g}$

⇒ $Bl = g \frac{\Delta m}{\Delta t}$

$m = 0$

$m = 10g$

Tem° associée U_{x0}

U_{x2}

⇒ $\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{10g}{|U_{x2} - U_{x0}|} = \frac{Bl}{g}$

associée. U_{x0}

U_{x2}

→ on fait la même pr 7 pb et on trace $\Delta m = f(\Delta t)$
droite ⇒ pente $\frac{Bl}{g}$

Résultats + incertitude:

Conclusion:

Nous avons pu au cours de ce montage caractériser des capteurs et des transducteurs. Ils ont en commun la linéarité de la réponse. Opt pr le transducteur le couplage est réversible.

Correction

Sur le haut parleur :

