

Cours : Capteurs et Instrumentation

Classe: 2 TA

Enseignants:
M. Abdellatif Belhadj
Mme. Faten Kardous

Faten1_kardous@yahoo.com

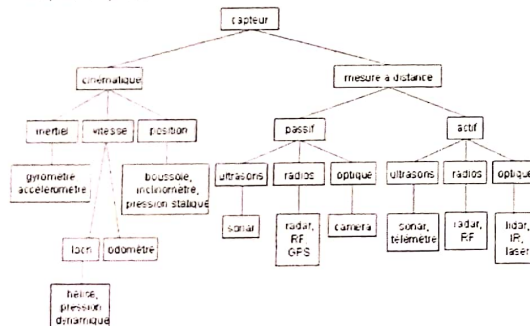
Chapitre 3 – Exemples de Capteurs

Plan du chapitre

1. Capteurs de déplacement potentiométrique
2. Capteurs à jauge de déformation
3. Capteurs de température
4. Capteurs à effet piézoélectrique
5. Capteurs à effet Hall
6. Capteurs photovoltaïques
7. Capteurs optiques

Introduction

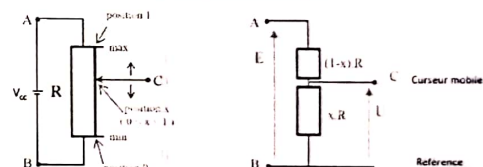
Exemples de capteurs



1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

L'objet dont on désire connaître la position est solidaire d'un potentiomètre polarisé avec une tension fixe V_{cc} .
Les détections linéaire et angulaires sont possible.

A. Potentiomètre de déplacement rectiligne



Appliquer une tension continue E entre les extrémités A et B du potentiomètre.
Mesurer entre B et C $U = xV_{cc} = \frac{\alpha}{D} V_{cc}$

La tension U en sortie est donc proportionnelle à la position α du curseur.
 D longueur totale de la résistance.

Ex 1 TD2

1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

Exemples

- ✓ Capteur haute précision avec un faible encombrement
- Etendue de mesure : de 10 à 100 mm
- Pointe de touche et ressort de rappel
- Sortie connecteur (TRS) ou câble (TR)
- Sortie potentiométrique (ou 0-10Vcc, 4-20 mA sur demande)



- ✓ Capteur de position avec curseur type slider sur le dessus
- Etendue de mesure : de 100 à 3000 mm
- Sortie connecteur uniquement
- Alimentation jusqu'à 42 Vcc
- Température de fonctionnement de -30 à +100 °C



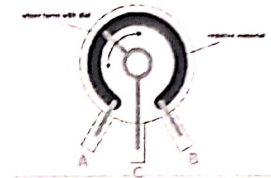
ENCORE AUTOMATIQUE

5

1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

B. Potentiomètre de déplacement circulaire – Position Angulaire

- Potentiomètre rotatif mono-tour ou multi-tours
- Résistance électrique variable
- Résistances RAC, RBC sont fonction de l'angle de rotation



ENCORE AUTOMATIQUE

6

1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

B. Potentiomètre de déplacement circulaire – Position Angulaire

- Potentiomètre rotatif mono-tour ou multi-tours

$$U = \frac{\alpha}{\alpha_{max}} V_{cc}$$



Avantages :

- Simplicité
- Capteur linéaire
- peu coûteux
- angle de mesure 10° à 360°
- la sortie est indépendante R

⇒ Stable par rapport à la température

Inconvénients :

- Friction
- Bruit si poussière
- usure

7

1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

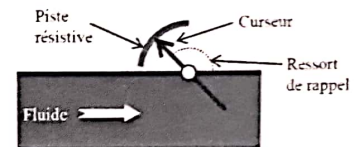
B. Potentiomètre de déplacement circulaire

Exemple d'application :

Mesure de débit de fluide

Le débit du fluide exerce une force sur un clapet relié au curseur d'un potentiomètre.

La tension en sortie du potentiomètre augmente avec la vitesse d'écoulement.



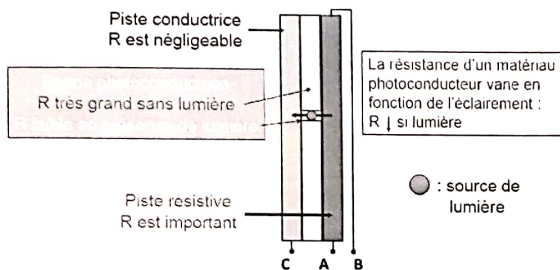
ENCORE AUTOMATIQUE

8

1. Capteurs Potentiométrique de déplacement

C. Potentiomètre Sans contact

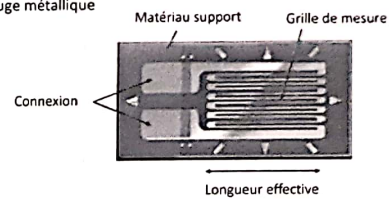
Pour réduire les problèmes de friction et d'usure, il existe des potentiomètres sans contact !



2. Capteurs à jauge d'extensométrie

Sous sa forme la plus simple, une jauge est constituée d'un très fin fil conducteur collé sur un support. Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure → **Jauge de déformation unidimensionnelle**

Exp. Jauge métallique

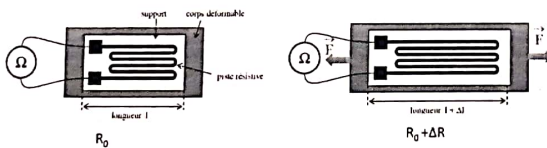


2. Capteurs à jauge d'extensométrie

La résistance d'un conducteur est donnée par la relation : $R = \frac{\rho l}{S}$

Avec, l la longueur (m), S la surface (m^2) et ρ résistivité ($\Omega \cdot m$)

La déformation du conducteur (jauge) modifie la longueur l entraînant une variation de la résistance R



Considérons, un métal cylindrique de longueur l et de diamètre D ,

Montrer que $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$

2. Capteurs à jauge d'extensométrie

Variation de la résistance en fonction de la variation de la longueur

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{4\rho l}{\pi D^2} \quad dR = \frac{4\rho}{\pi D^2} \left(dl + l \frac{d\rho}{\rho} - \frac{8\rho l}{\pi D^3} dD \right)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{dD}{D} \quad \Rightarrow \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} + 1 - 2 \frac{dD}{D}$$

$$\text{avec } \nu = -\frac{dD/D}{dl/l} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{dl/l}$$

On définit la constante de Bridgman $C = \frac{d\rho/\rho}{dV/V} = C \frac{dL}{L}$

$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$ La déformation de la structure entraîne donc une déformation de la jauge, donc une variation de résistance $\Delta R/R$ fonction de $\Delta L/L$.

$$K = 1 + 2\nu + C$$

2. Capteurs à jauge d'extensométrie

Modélisation de la résistance en fonction de la variation de la force

La force est liée à la contrainte par : $F = \sigma \cdot S$

$$F = \sigma \cdot S$$

Avec E : Module de Young

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

K : Facteur de jauge

K : 2 à 5

pour les métaux

K : + 50 à + 200

pour les semi-conducteurs

2. Capteurs à jauge d'extensométrie

Installation d'une jauge

Exemple : collage avec une colle cyanoacrylate



Positionnement sur la partie de mesure Appliquer la colle sur la jauge

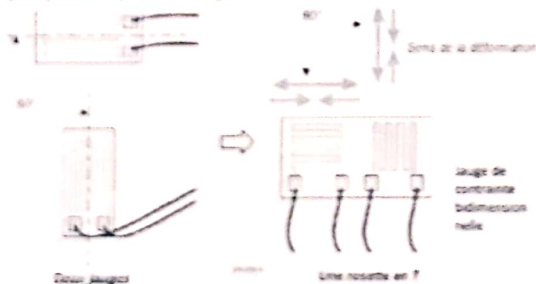


Appliquer la colle sur la zone Installer la jauge en appliquant une force homogène Laisser la film de protection

Jauges très petites → positionnement avec un angle précis délicat

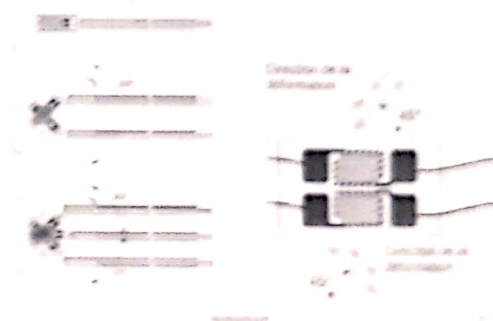
2. Capteurs à jauge d'extensométrie

- **Jauges de déformation** : très petites → positionnement avec un angle précis délicat
- **Rosettes** : un ensemble de 2 jauges ou plus déjà fixées sur le même support avec précision par une machine → Résultats plus justes et précis + un gain de temps



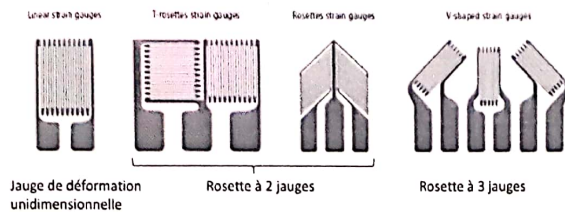
2. Capteurs à jauge d'extensométrie

- **rosette pour mesure de couple et cisaillement**



2. Capteurs à jauge d'extensométrie

- rosette pour mesure de couple et cisaillement



UNISTAR 2018/2019

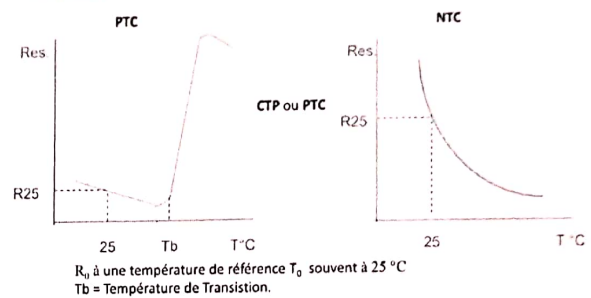
17

3. Capteurs de température

3.1. Thermistance

C'est un composant passif en matériau semi-conducteur dont la résistance varie en fonction de la température.

2 Variétés :



<http://tutoria-persona.sit.fr/page1/page29/page29.html#paragraphe3.2>

18

3. Capteurs de température

3.1. Thermistance

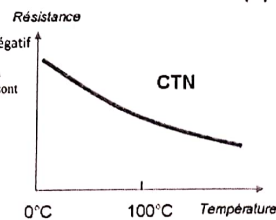
CTN ou NTC : Coefficient de Température Négatif

- fabriquées à base d'oxydes de métaux de transition (manganèse, cobalt, cuivre et nickel). Ces oxydes sont semi-conducteurs
- peuvent être utilisées dans une large plage de températures, de -200 °C à +1 000 °C

Loi de variation de la forme

$$R(T) = R_0 \exp B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

R₀ à une température de référence T₀ souvent à 25 °C



UNISTAR 2018/2019
<http://tutoria-persona.sit.fr/page1/page29/page29.html#paragraphe3.2>

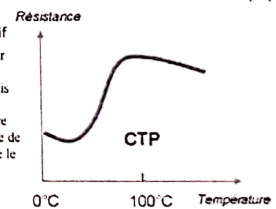
19

3. Capteurs de température

3.1. Thermistance

CTP ou PTC : Coefficient de Température Positif

- fabriquées à base de titanate de baryum. Leur valeur augmente brutalement dans un domaine étroit de température (typiquement entre 0 °C et 100 °C), puis diminue progressivement au-delà de cette zone.
- Utilisées comme détecteur de température ou encore pour détecter le niveau d'un liquide : la température de la CTP et donc sa résistance, sera différente lorsque le capteur est dans l'air ou plongé dans un liquide



UNISTAR 2018/2019

20

3. Capteurs de température

3.1. Thermistance

°C	R	°C	R
0	261.0	55	37.82
5	212.0	60	32.64
10	174.4	65	28.13
15	144.2	70	24.78
20	119.9	75	21.57
25	100.0	80	18.91
30	84.15	85	16.65
35	71.05	90	14.71
40	60.32	95	13.02
45	51.42	100	11.56
50	44.04		

ENTRAD 2008/01/01

21

3. Capteurs de température

3.2. Sondes RTD

La résistance d'un RTD varie de façon presque linéaire avec la température.

$$R = R_0 (1 + a\theta)$$

R est la résistance à la température θ

R_0 est la résistance à 0°C

a est le coefficient de température Exemple : $a = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ pour une sonde en platine selon la norme DIN 43760

On peut adopter des modèles plus précis, d'ordre supérieur à 1

$$R = R_0 [1 + a\theta + b\theta^2 + c\theta^3 (\theta - 100)]$$

$$c = \begin{cases} -4,183 \cdot 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} & \text{pour } \theta < 100^\circ\text{C} \\ 0 & \text{pour } \theta > 100^\circ\text{C} \end{cases}$$

Exemple : pour une sonde PT100 ; $R_T = 100 (1 + 3.9083 T - 5.775 \times 10^{-7} T^2)$

ENTRAD 2008/01/01

21

3. Capteurs de température

3.2. Sondes RTD

Les RTD (Resistance Temperature Detectors) fonctionnent sur le principe de la détection des variations de résistance électrique des métaux purs :

- le nickel (Ni)
- le cuivre (Cu)
- mais le platine (Pt) est de loin le plus courant, en raison de l'étendue de sa gamme de températures, de sa précision et de sa stabilité...

Exemples de sondes en platine : PT100, PT1000...



3. Capteurs de température

3.2. Sondes RTD

La courbe d'étalonnage peut être définie par un tableau représentatif de points discrets de mesure

Exemple : sonde de température résistive PT100 1000 à 0°C

°C	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
0	100.00	100.39	100.79	101.17	101.56	101.94	102.33	102.72	103.11	103.50
+10	103.90	104.29	104.67	105.06	105.45	105.84	106.23	106.62	107.01	107.40
+20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.34	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29
+30	111.67	112.06	112.44	112.83	113.22	113.61	113.99	114.38	114.77	115.16
+40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
+50	119.40	119.79	120.17	120.56	120.94	121.33	121.71	122.10	122.48	122.87
+60	123.24	123.62	124.00	124.39	124.77	125.15	125.54	125.92	126.30	126.69
+70	127.07	127.45	127.83	128.22	128.60	128.98	129.36	129.74	130.13	130.51

Le tableau s'emploie dans le sens direct (température->signal) à $\pm 1^\circ\text{C}$ près, et dans le sens inverse (signal->température)

Il est possible d'affiner la conversion réciproque par interpolation linéaire

ENTRAD 2008/01/01

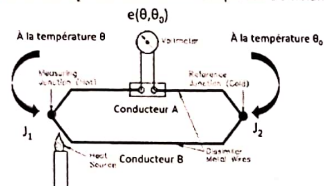
24

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple

Un thermocouple est un circuit formé de deux conducteurs A et B de natures chimiques différentes. Si les jonctions J_1 et J_2 sont à des températures θ et θ_0 , alors le circuit génère une très faible f.é.m. (qq. Dizaines de μV)

Généralement J_2 est maintenue à la température ambiante.



La f.é.m. qui apparaît dépend du couple métallique A/B et des températures θ et θ_0 sans pour autant être proportionnelle à $(\theta - \theta_0)$

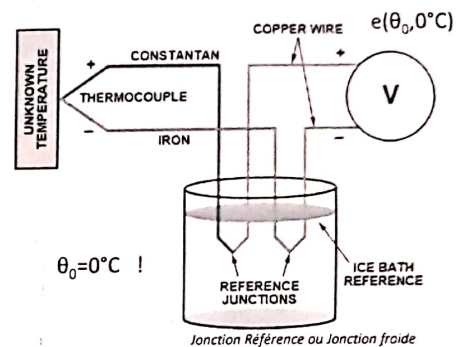
Caractéristiques Constructeurs pour $\theta_0 = 0^\circ C$!

EN51240 2018/01/17

25

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple

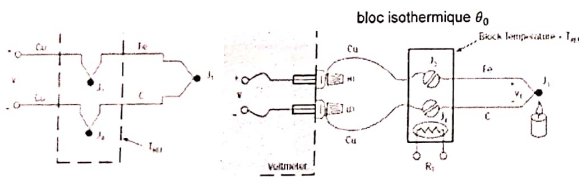


EN51240 2018/01/17

26

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple Compensation logicielle



R_T : Thermistance ou un capteur intégré mesure θ_0
Compensation logicielle $R_T \rightarrow \theta_0 \rightarrow e(\theta, 0^\circ C)$

EN51240 2018/01/17

27

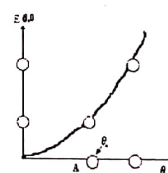
3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple Compensation logicielle

Les tables numériques de la littérature fournissent, pour tous les couples A/B, les f.é.m. délivrées lorsque J_1 est à la température θ et J_2 à la température de référence $0^\circ C$.

$\Rightarrow e(\theta, 0^\circ C)$! Comment alors la retrouver à partir de $e(\theta, \theta_0)$?

$$e(\theta, 0^\circ C) = e(\theta, \theta_0) + e(\theta_0, 0^\circ C)$$



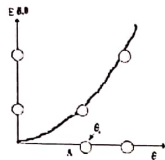
\Rightarrow Loi non linéaire

1. On mesure $e(\theta, \theta_0)$
2. On note la température ambiante θ_0 .
3. On recherche dans la table la valeur de $e(\theta_0, 0^\circ C)$ Point B
4. On calcul: $e(\theta, 0^\circ C) = e(\theta, \theta_0) + e(\theta_0, 0^\circ C)$ Point C
5. On cherche dans la table numérique appropriée la valeur de θ associée à celle de $e(\theta, 0^\circ C)$. Point D

28

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple Compensation logicielle



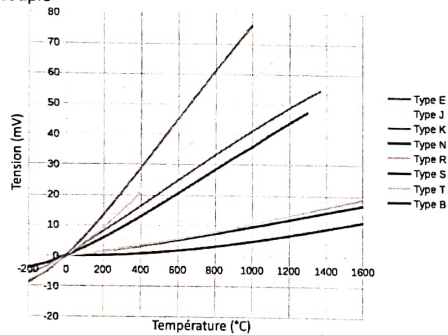
Nous utilisons un matériel (Thermistance, sonde platine ou circuit intégré) déjà capable de mesurer une température, pourquoi alors utiliser un thermocouple qui nécessite une compensation de la jonction de référence ?

ENCAD 2018/2019

29

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple



ENCAD 2018/2019

31

3. Capteurs de température

3.3. Thermocouple

Les thermocouples sont désignés par des lettres majuscules qui indiquent leurs compositions selon les conventions ANSI (American National Standards Institute). Types : B, E, J, K, N, R, S, T...

Type	Alliage	Fem (mV/°C)	Température (°C)
J	Fer / Cuivre-Nickel (Constantan)	0,051	-210 +1200
K	Nickel-Chrome / Nickel-Aluminium	0,039	-270 +1370
S	Platine-Rhodium / Platine	0,0055	-50 +1760
T	Cuivre / Cuivre-Nickel (Constantan)	0,039	-270 +400

Code couleur proposé
par IEC 60959-2

(Autres couleurs sont acceptables)



Code couleur proposé
par ANSI MC96.1

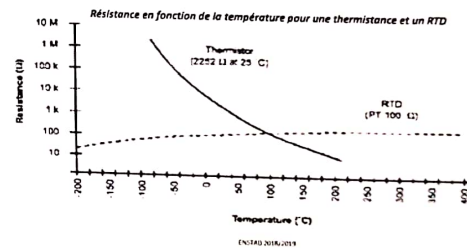
(Autres couleurs sont acceptables)



3. Capteurs de température

3.4. Quel capteur choisir ?

En règle générale, les thermistances ont une bonne résolution, ce qui les rend très sensibles aux variations de températures. Par exemple, une thermistance de 2 252 Ω a une sensibilité de - 100 Ω /°C à température ambiante. Pour comparaison, un RTD de 100 Ω a une sensibilité de 0,4 Ω /°C. Les thermistances ont une faible capacité, ce qui leur permet d'offrir un temps de réponse court mais qui les limite à une gamme réduite de températures.



ENCAD 2018/2019

32

3. Capteurs de température

3.4. Quel capteur choisir ?

Critères	Thermocouple	RTD	Thermistance	Capteur IC
Etendue de mesure	-267°C à 2316°C	-240°C à 649°C	-100°C à 500°C	-55°C à 200°C
Précision	Bonne	Optimale	Bonne	Bonne
Linéarité	Meilleure	Optimale	Bonne	Optimale
Sensibilité	Bonne	Meilleure	Optimale	Bonne
Coût	Optimale	Bon	Meilleur	Optimale
Conditionnement (circuiterie)	Complexe	Complexe	Dépend de la précision / énergie requise	Simple
Consommation d'Énergie	Moyen	Maximale	Maximale	Minimale

3. Capteurs de température

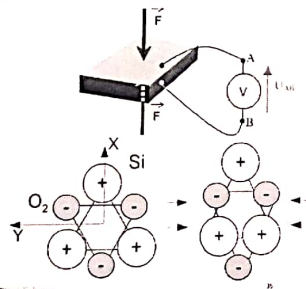
3.4. Quel capteur choisir ?

- Thermocouples sont robustes et à des prix abordables. Ils ont un temps de réponse rapide mais sont les moins précis et les moins stables et sensibles des capteurs. En outre, ils lisent uniquement les différences relatives de températures entre l'extrémité et les conducteurs alors que les RTD et les thermistances lisent la température absolue.
- RTD sont le choix privilégié pour la répétabilité. Ils sont aussi plus stables et précis mais ayant un temps de réponse lent et comme ils requièrent une source de courant ils ont une quantité faible d'auto-échauffement.
- Thermistances ont un temps de réponse rapide et sont relativement peu onéreuses, mais elles sont fragiles et ont une gamme de mesure limitée. Elles requièrent aussi une source de courant et ont un taux d'auto-échauffement plus important que les RTD. En outre, elles sont non linéaires.

4. Capteurs à effet piézoélectrique

4.1. Effet piézoélectrique

- La piézoélectricité est un phénomène liant un champ électrique à une déformation mécanique d'un corps.
- Le matériau génère des charges électriques lorsqu'il est déformé sous l'effet d'une force
- Exemples :
 - Quartz
 - Céramique polarisée
- Applications:
 - Toutes sortes d'actionneurs
 - Capteurs de déformation
 - Transformateurs



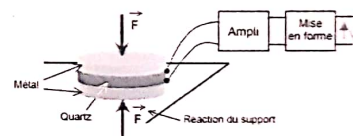
4. Capteurs à effet piézoélectrique

4.2. Capteur de force

La tension VS de sortie sera proportionnelle à la force F :

$$V_S = k.(F+F) = 2k.F$$

avec k constante.



Attention: c'est une estimation valable uniquement dans un certain domaine sous certaines conditions

4. Capteurs à effet piézoélectrique

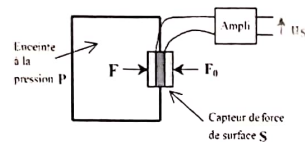
4.3. Capteur de pression

Lorsqu'un corps (gaz, liquide ou solide) exerce une force F sur une paroi S (surface), on peut définir la pression P exercée par ce corps avec la relation ci-dessous:

$$P = \frac{F}{S} \quad \text{avec les unités : } 1 \text{ Pascal} = \frac{1 \text{ Newton}}{\text{m}^2} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{\text{m}^2}$$

Unités : $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100\,000 \text{ N/m}^2 \approx 10\,000 \text{ kg/m}^2 \approx 1 \text{ kg/cm}^2$

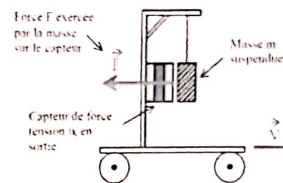
Le capteur de force est inséré dans la paroi d'une enceinte où règne une pression P . Une face du capteur est soumise à la force F (pression P) et l'autre face est soumise à la force F_0 (pression extérieure P_0).



$$F_0 = P_0 \cdot S \text{ et } u_s = k \cdot (F + F_0) \\ \text{Donc } u_s = k \cdot S \cdot (P + P_0) = k' \cdot (P + P_0)$$

4. Capteurs à effet piézoélectrique

4.4. Capteur d'accélération



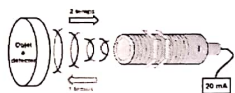
L'augmentation de vitesse V du véhicule donne une accélération a qui induit une force F exercée par la masse sur le capteur.

$$\text{On a donc } F = m \cdot a \quad \text{mais } u_s = 2k \cdot F$$

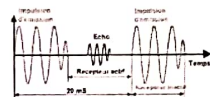
$$\text{donc } u_s = 2k \cdot m \cdot a$$

2. Capteurs à effet piézoélectrique

2.5. Autre application : Capteur ultrasonique



L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. L'émetteur (quartz piézo-électrique) envoie un train d'ondes et ensuite le capteur passe en mode réception et attend le retour du signal.



3. Capteurs à effet Hall

3.1. Effet Hall

Un barreau de semi-conducteur soumis à un champ magnétique uniforme B et traversé par un courant I , est le siège d'une force électromotrice U_H sur deux de ses faces.

La tension de Hall U_H est définie par:

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{e}$$

R_H : constante de Hall (dépend du semi-conducteur)
 I : intensité de la source de courant (A)
 B : intensité du champ magnétique (T)
 e : épaisseur du barreau de silicium.

