

Instrumentation

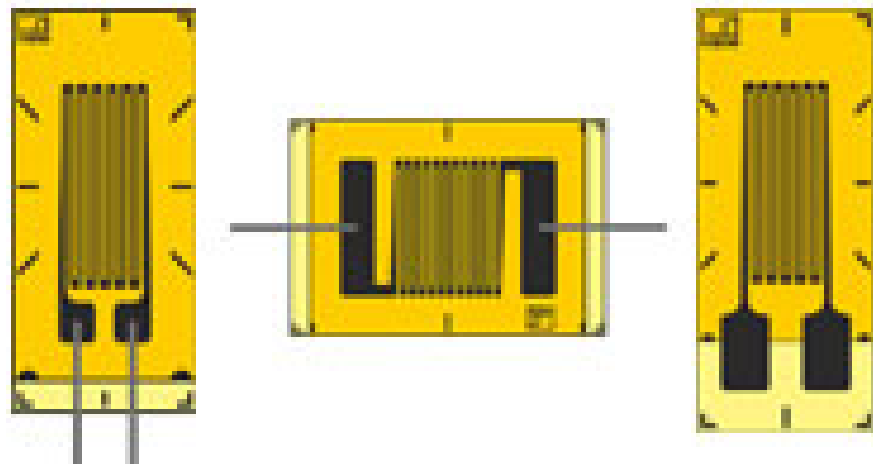
Joseph Moerschell, Marc Nicollrat

8 Capteurs de force et de couple

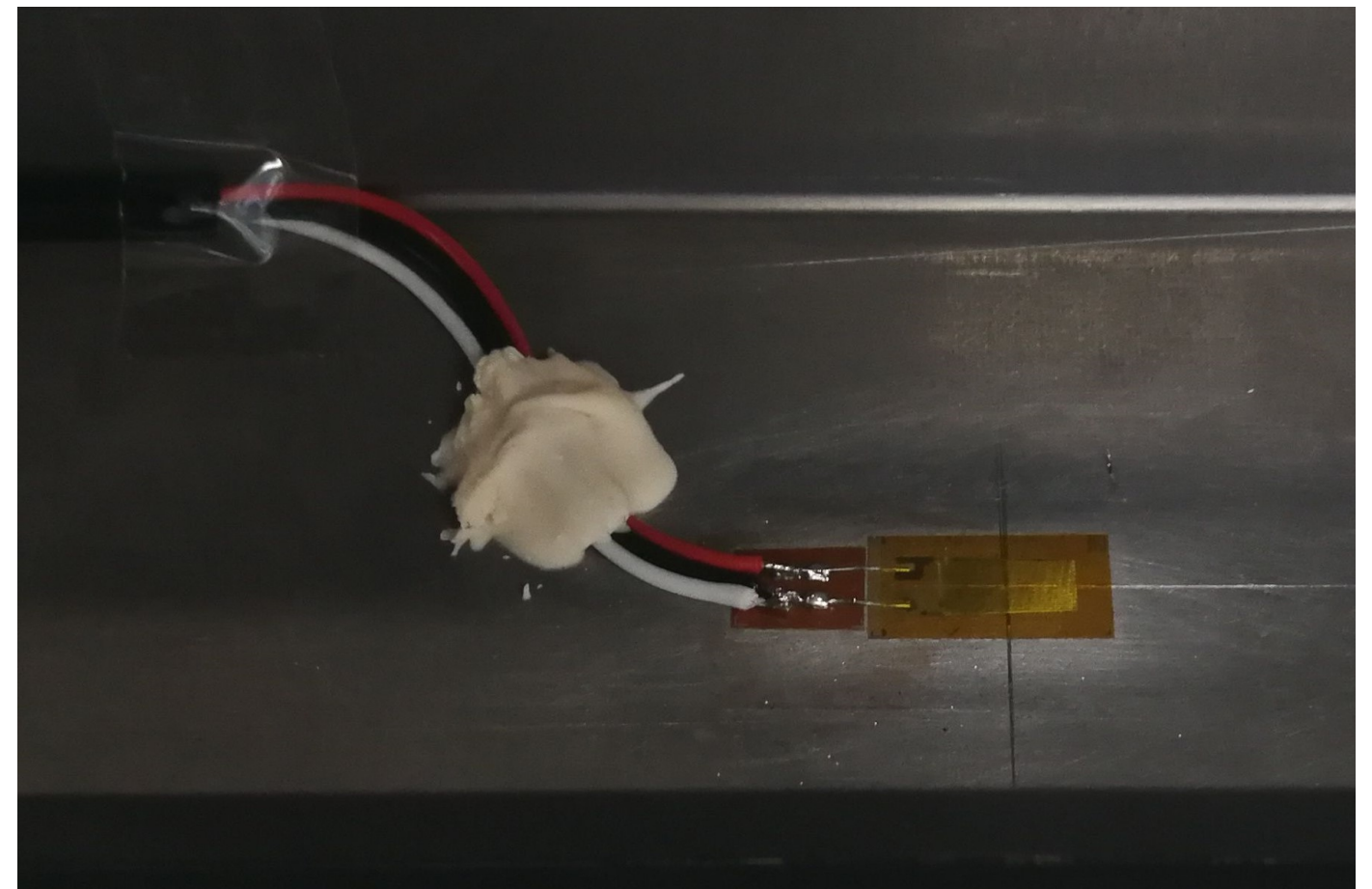
- Jauge de contrainte
 - Principe de mesure, équations
 - variantes bi. tri-axiales
- Capteur de force, cellule de charge
 - Mesure de déformation d'une cellule de charge
 - Mesure par jauge de contrainte ou capteur piézo-électrique
- Capteur de pression
 - Principe
 - Mesure de débit
 - Microphone
- Capteur de couple

8.1 Jauge de contrainte

Principe : La jauge permet la mesure de la déformation d'un système élastique. Une très faible déformation peut être mesurée par ce principe.



Exemple de jauge de contrainte



Installation d'une jauge sur un profilé

8.2 Equations pour la mesure de contrainte

- Relations liées à la mesure de force. On compose entre la relation de la jauge et les équations de déformation du support.

$$\begin{array}{l} \text{Relation de la jauge} \quad \frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta L}{L} \\ \hline \text{Relation du matériau} \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{F}{E \cdot S} = \frac{\sigma}{E} \end{array}$$

Paramètres des équations

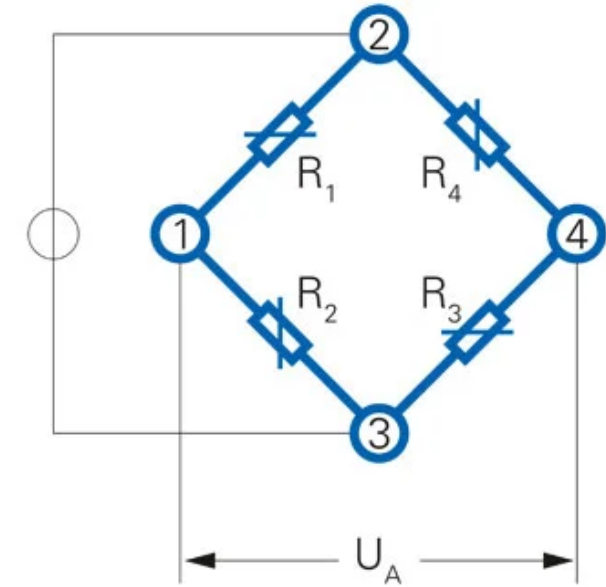
$R, \Delta R$	$[\Omega]$	Résistance nominale, variation de résistance
K	$[1]$	Une constante caractéristique de la jauge
ϵ	$[1]$	Élongation relative
$L, \Delta L$	$[m]$	Longueur de la jauge, variation de longueur due à la contrainte
F	$[N]$	Force appliquée
E	$[N/m^2]$	Module d'élasticité
S	$[m^2]$	Surface du matériau
σ	$[P], [N/m^2]$	Contrainte

8.3 Pont de mesure

On utilise un montage en pont de Wheatstone pour améliorer la précision de mesure.

Par construction, pour une contrainte donnée, certaines jauges ont leur résistance qui diminue, et d'autres leur résistance qui augmente.

L'influence de la température ΔR_T sur la jauge peut être minimisée par l'usage de plusieurs jauges montées en pont.



Pont de wheatstone

La tension de sortie est de cette forme :

Pont complet

$$U_A = \frac{U_0 \Delta R_F}{R_0 + \Delta R_T}$$

Jauge simple

$$U_A = \frac{U_0 (\Delta R_F + \Delta R_T)}{2 \cdot (2R_0 + \Delta R_F + \Delta R_T)}$$

Demi-pont

$$U_A = \frac{U_0 \Delta R_F}{2 (R_0 + \Delta R_T)}$$

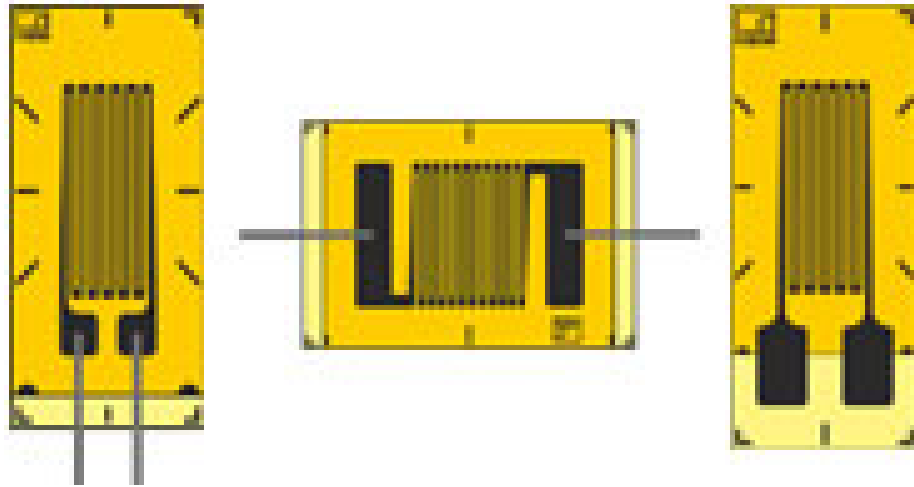


Tip

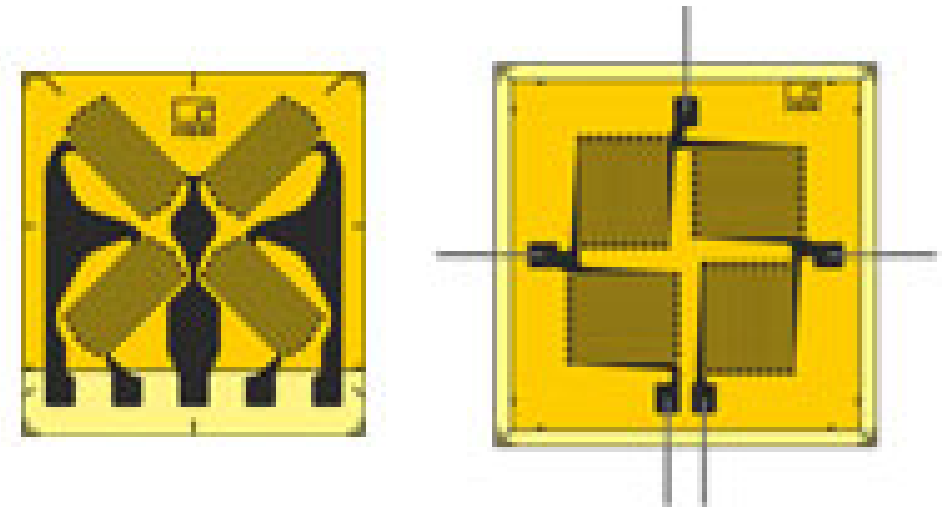
Le jupyter notebook `dev_8.1_pont_wheatstone.pynb` montre le détail du calcul.

8.4 Types de jauges de contrainte

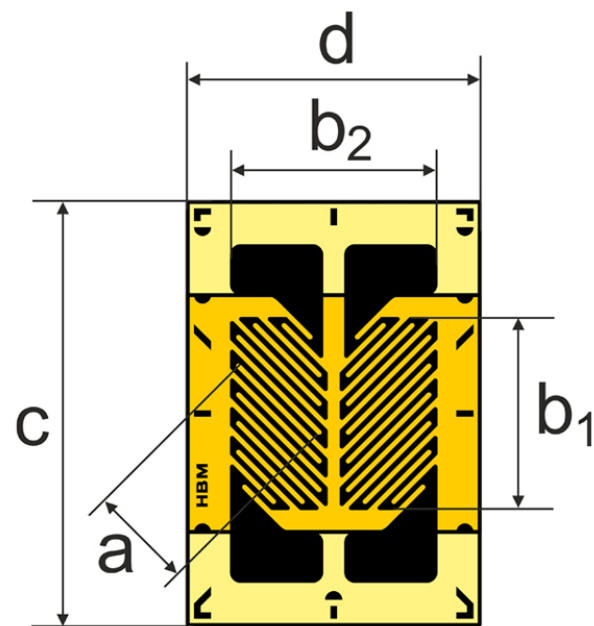
Différentes exécutions des jauges de contrainte sont disponible pour certaines variantes de mesure.



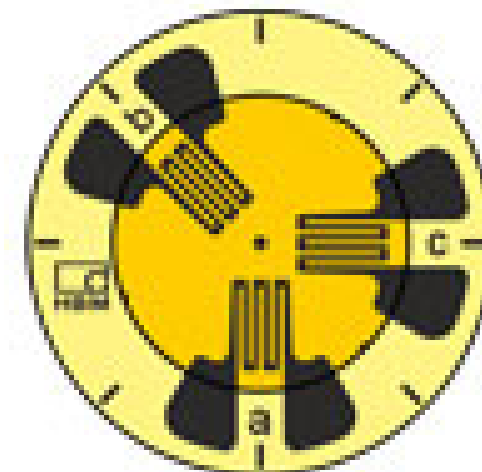
Jauge simple



Jauge full bridge



Jauge cisaillement



Jauge en rosette

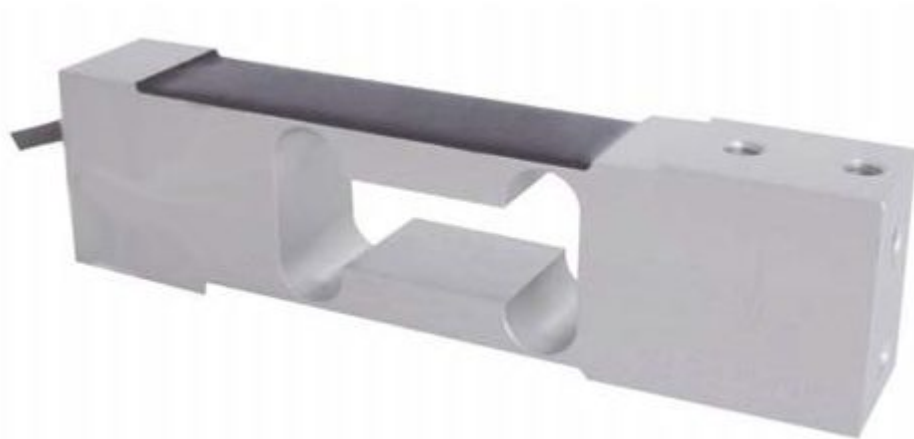
8.5 Capteurs de force : cellule de charge

- Déformation d'un matériau connu

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

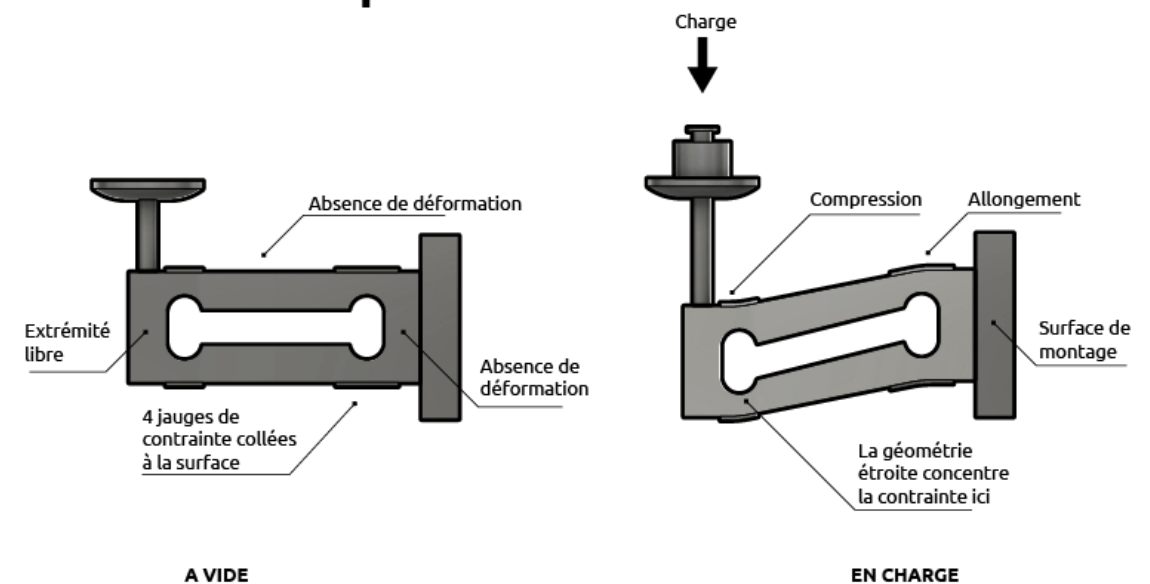
où on a σ une contrainte, E le module d'élasticité, ϵ l'élongation, ν le coefficient de Poisson, ϵ_x, ϵ_y les élongations longitudinale et perpendiculaire.

- Mesure de la déformation avec une jauge de contrainte



Cellule de charge

Flexion d'un capteur



Principe de fonctionnement

8.6 Capteur de force Piézo-électrique

- La force à mesure déforme un cristal
- Le principe est similaire à l'accéléromètre

Relation entre charge et tension : $Q = C \cdot U$

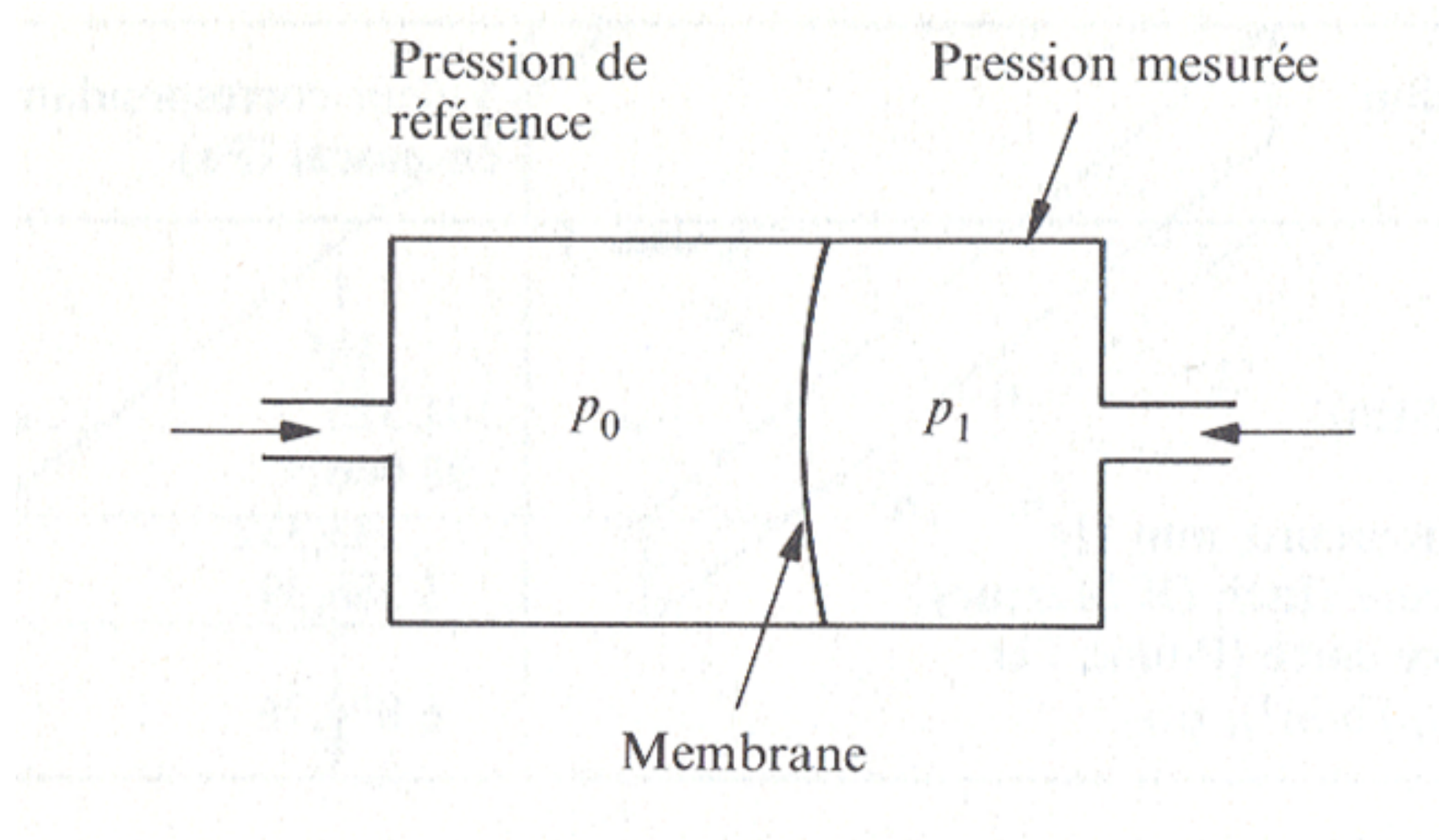
Relation entre force et charge : $Q = \beta \cdot F$

 Réciproque : le capteur piézo peut servir d'actuateur

- Haut-parleur HF
- Vanne (imprimante à jet d'encre)

8.7 Capteur de pression

Il y a différentes variantes du capteur de pression. Le principe est de mesurer la force exercée sur une *membrane* de surface connue par la pression.



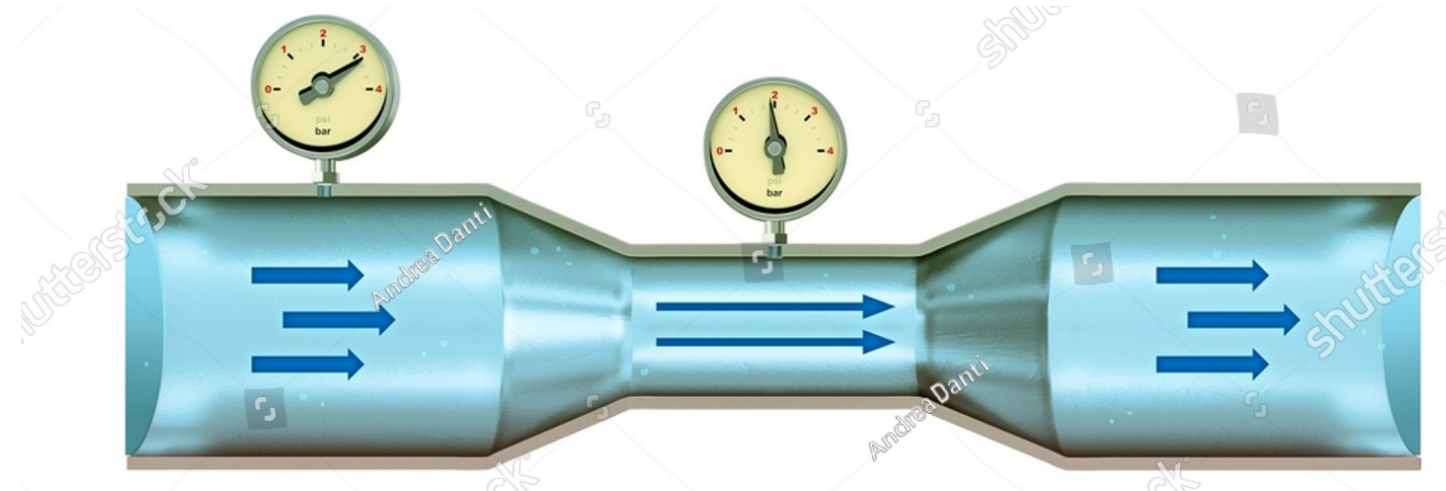
Principe du capteur de pression

$$Force = Pressure \cdot Surface$$

8.8 Mesure de débit avec la pression

Un fluide en mouvement peut être modélisé par l'équation de Bernoulli

$$v^2/2 + gz + p/\rho = \text{constante}$$



Tube Venturi

Avec p la pression au point d'étude, ρ la masse volumique du fluide, v la vitesse au point d'étude, g l'accélération de la pesanteur, z l'altitude du point d'étude.

$v^2/2$	énergie cinétique
---------	-------------------

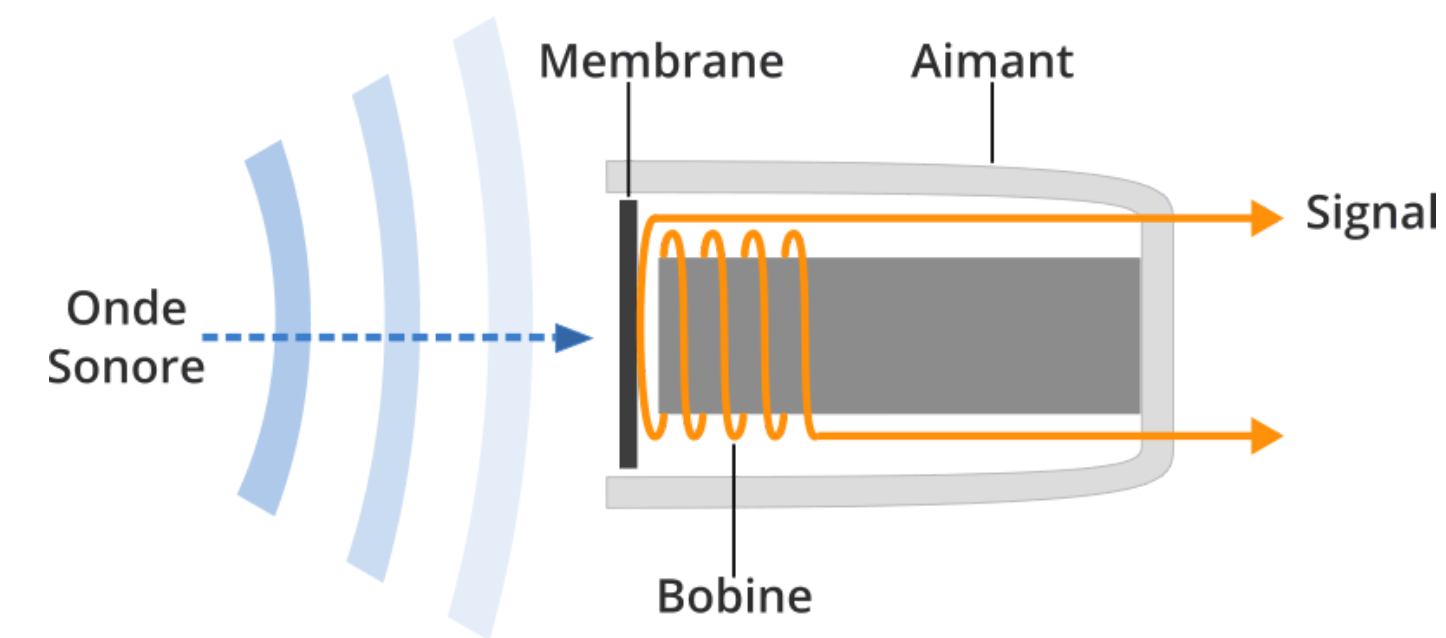
gz	énergie potentielle gravitationnelle
------	--------------------------------------

p/ρ	énergie potentielle volumique
----------	-------------------------------

8.9 Microphone

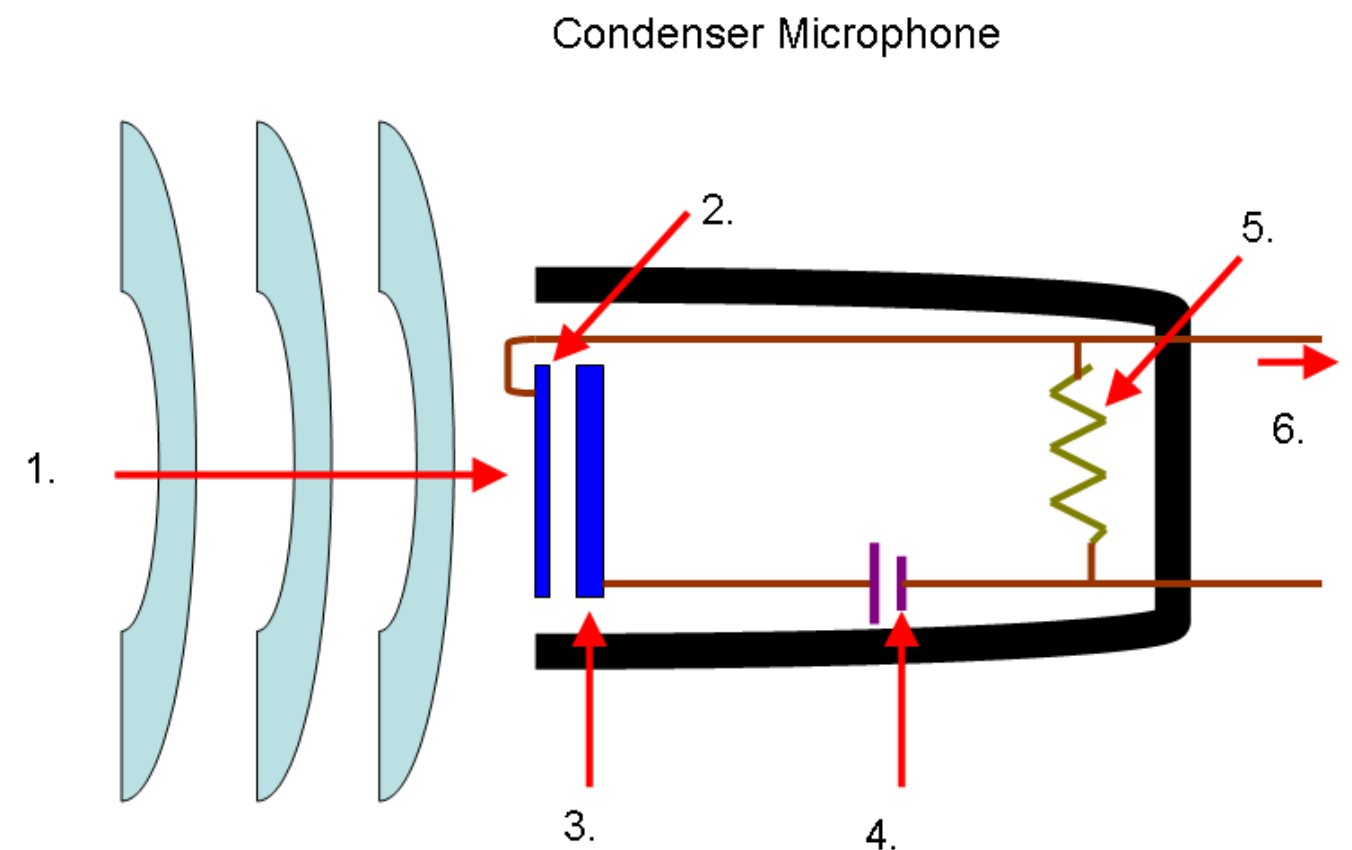
Le microphone est un capteur de pression différentielle... ou pas

Le micro à capsule dynamique est composé d'une bobine solidaire de la membrane placée dans le champ d'un aimant.



Principe microphone dynamique

Le micro à électret ou micro à condensateur est composé d'une membrane qui est une des plaques d'un condensateur. Il doit être alimenté (*l'alimentation phantôme* est fournie comme tension DC par le câble)



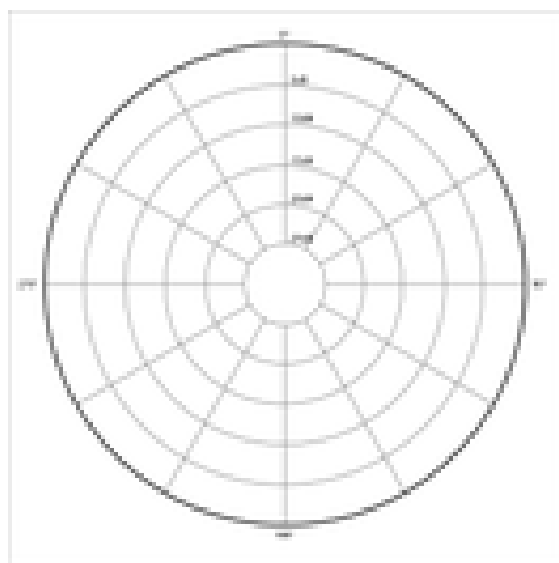
principe microphone à électret

8.10 Caractéristique des microphones

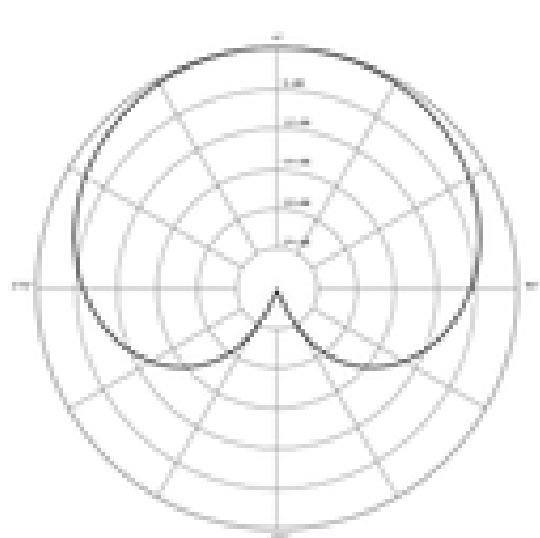
Un micro est caractérisé par une directivité. La directivité dépend de la construction et de la membrane.

Table 1: Caractéristiques théoriques de directivité de cellules

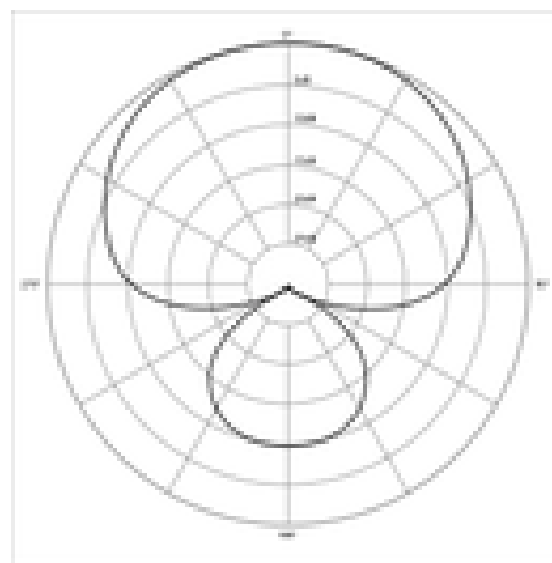
Capsule	formule
omnidirectionnelle	$U = 1$
cardioïde	$U = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta)$
supercardioïde	$U = \frac{1}{3}(1 + 2\cos\theta)$
hypercardioïde	$U = \frac{1}{4}(1 + 3\cos\theta)$
bidirectionnelle	$U = \cos\theta$



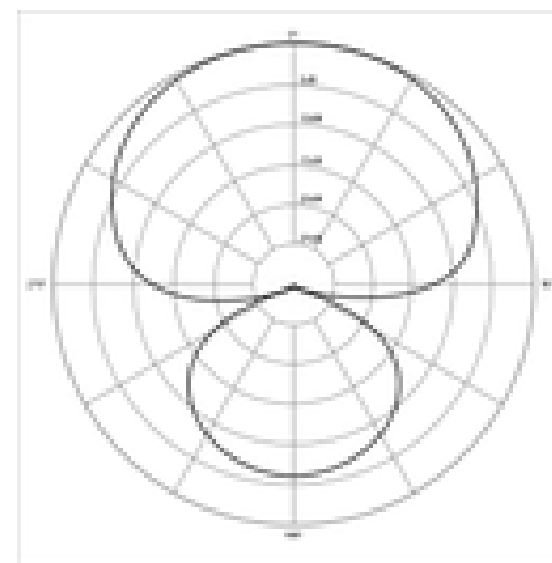
omnidirectionnelle



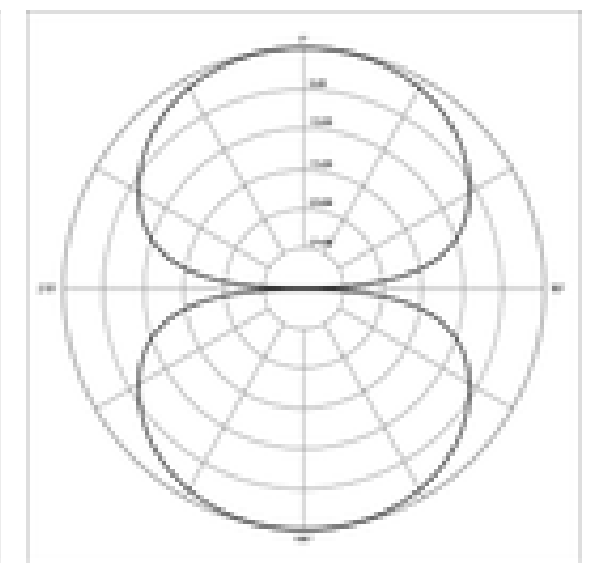
cardioïde



supercardioïde



hypercardioïde



bidirectionnelle

Diagrammes de directivité des différentes capsules

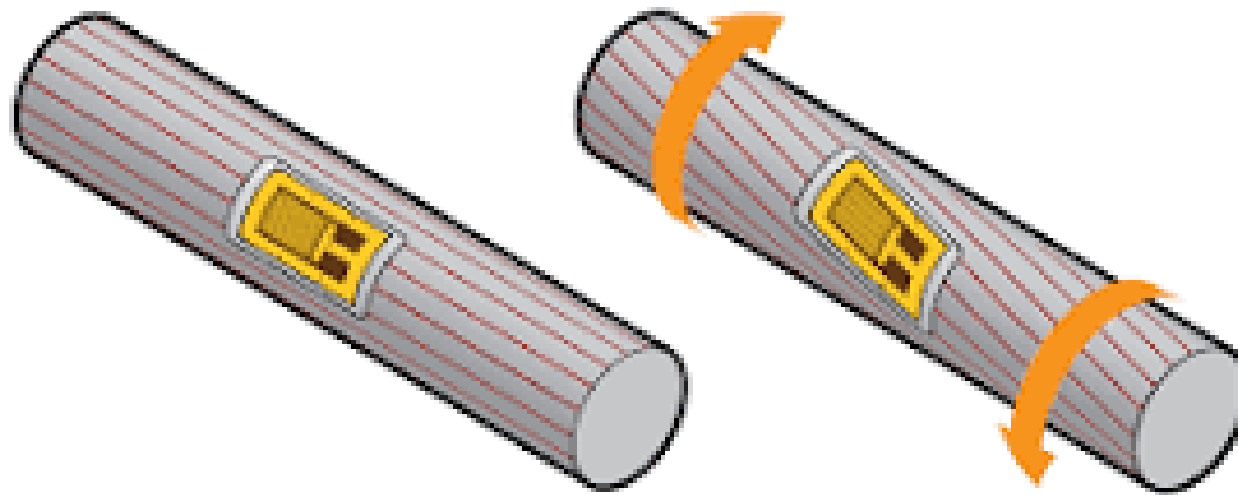
8.11 Mesure de couple

- La mesure de couple suit le principe de la mesure de force. On mesure la déformation d'un arbre. L'angle α de déformation suit une relation similaire à celle du ressort :

$$\Delta\alpha = K \cdot T$$

où K est une constante de déformation élastique, et T le couple en [N/m].

- Une mesure de la déformation sur un système statique est possible avec une jauge de contrainte.



Principe avec jauge de contrainte

- Sur un arbre tournant, il existe des solutions sans contact.

8.12 Capteur de vélo électrique

Un capteur de couple pour vélo électrique peut se faire comme illustré sur la [Figure 1](#).

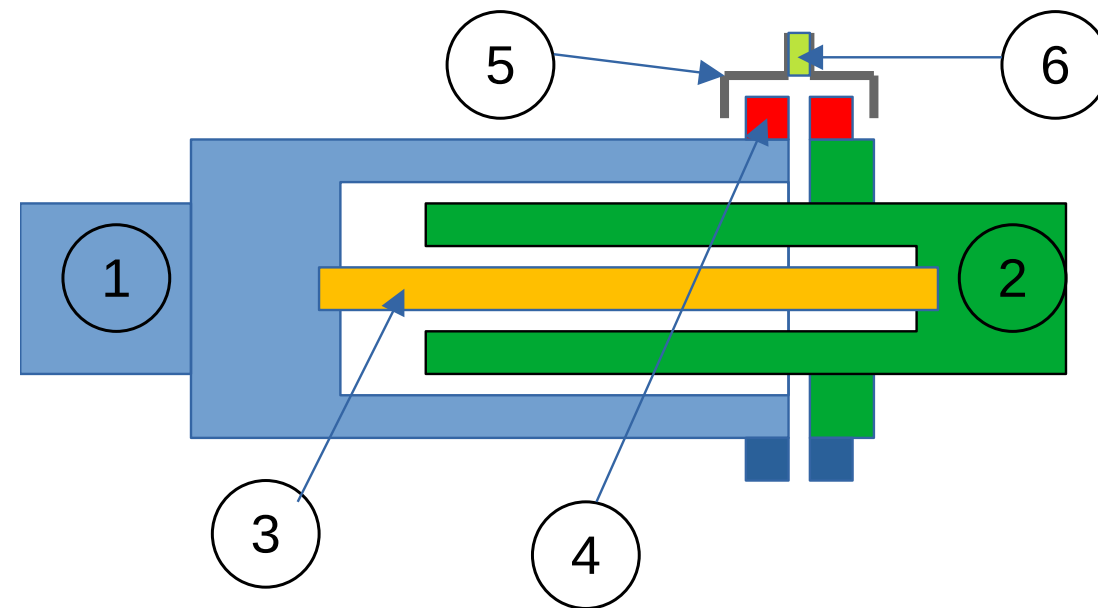


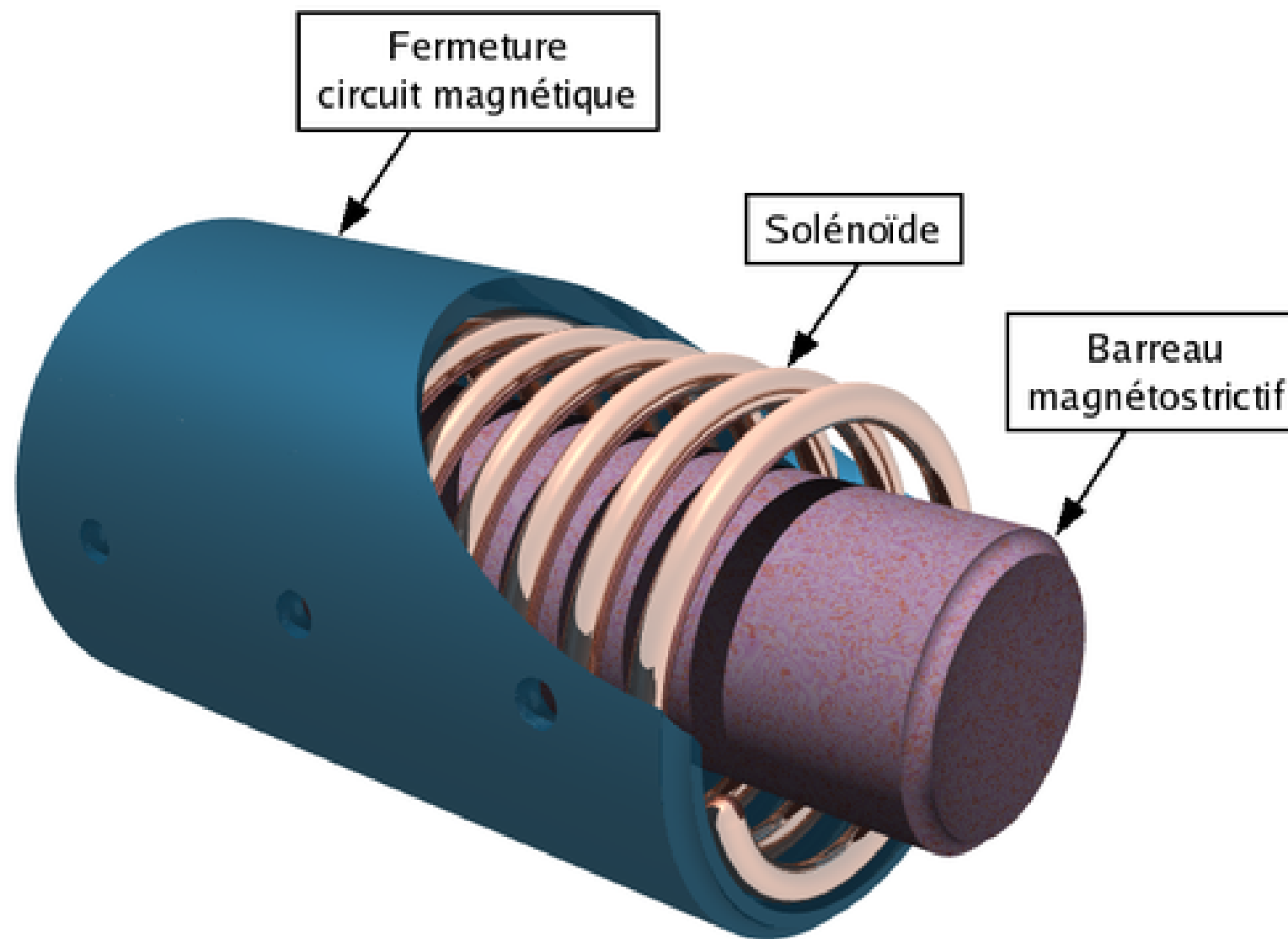
Figure 1: Capteur de couple pour vélo

1. Arbre d'entrée
2. Arbre de sortie
3. Arbre de torsion
4. Aimants alignés entre l'arbre d'entrée et l'arbre de sortie
5. Circuit magnétique
6. Capteur magnétique (magnétostrictif)

Le champ magnétique que le capteur mesure est modifié par la rotation de l'arbre de sortie par rapport à l'arbre d'entrée. La rotation est proportionnelle au couple appliqué sur l'arbre de torsion.

8.13 Capteur magnétostrictif

- Le champ magnétique ou les propriétés magnétiques sont influencées par une contrainte mécanique.



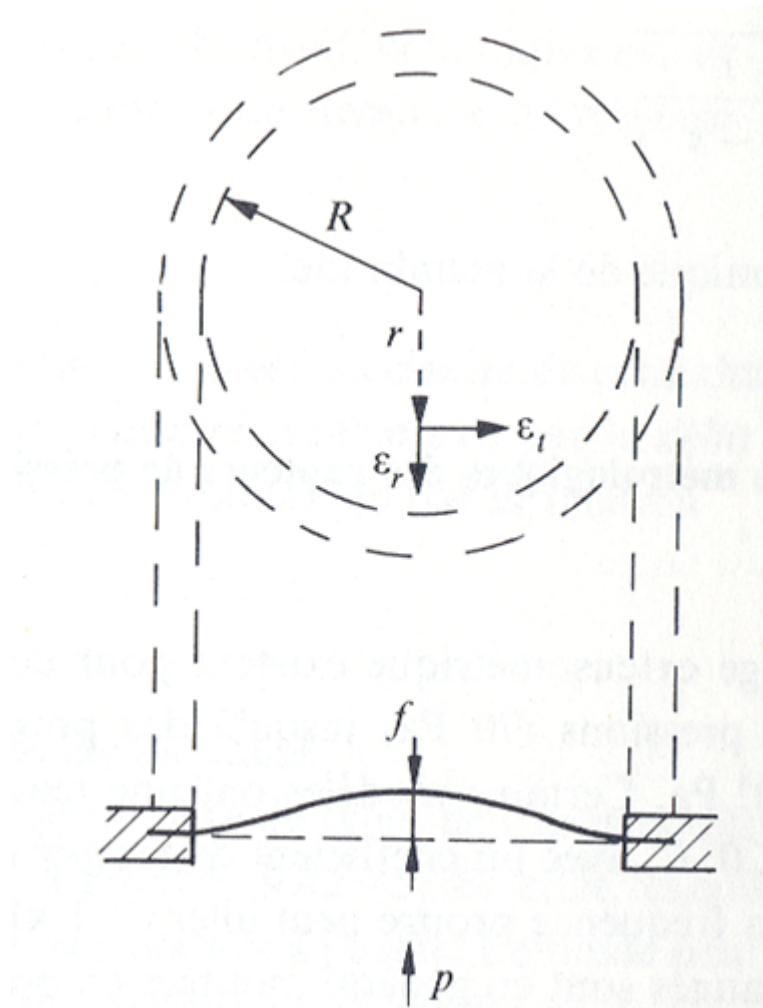
Principe du capteur magnétostrictif

- Un courant constant permet de polariser le barreau
- Un courant alternatif permet de mesurer les variations des propriétés magnétiques
- Une contrainte sur le barreau peut ainsi être mesurée sans contact.

produit

8.14 Corps d'épreuve

Le principe du corps d'épreuve est d'avoir une membrane qui se déforme sous la pression.



Déformation radiale	$\epsilon_r = \frac{3}{8} \cdot (1 - \nu^2) \frac{R^2 - 3r^2}{E \cdot e^2} \cdot p$
---------------------	---

Déformation tangentielle	$\epsilon_t = \frac{3}{8} \frac{R^2 - r^2}{E \cdot e^2} \cdot p$
--------------------------	--

Flèche	$f = \frac{3}{16} \cdot (1 - \nu^2) \frac{R^4}{E \cdot e^3} \cdot p$
--------	--



Tip

Quelle soit la mesure, la déformation est toujours proportionnelle à la pression !

- Mesure de déformation
 - Jauge de contrainte qui mesure ϵ_r ou ϵ_t
 - Mesure de la *flèche* f

8.15 Exercices

- Exercice 8.1 : Déformation d'une pièce en acier
- Exercice 8.2 : Déformation d'un quartz piézoélectrique

