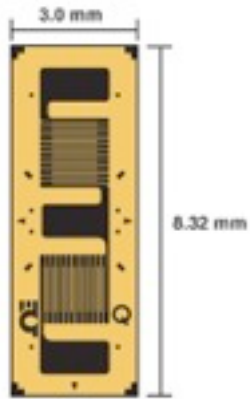
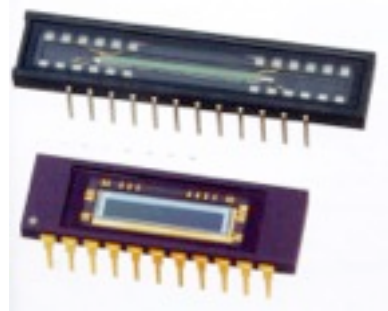
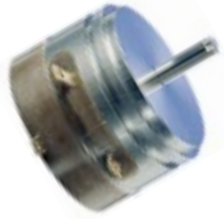


Transducteurs et capteurs I

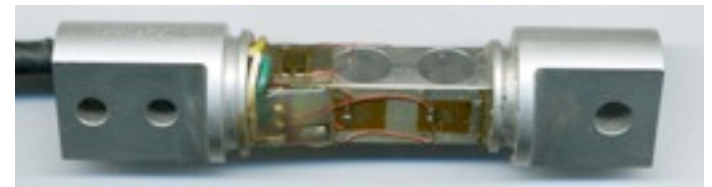
D. Mari



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

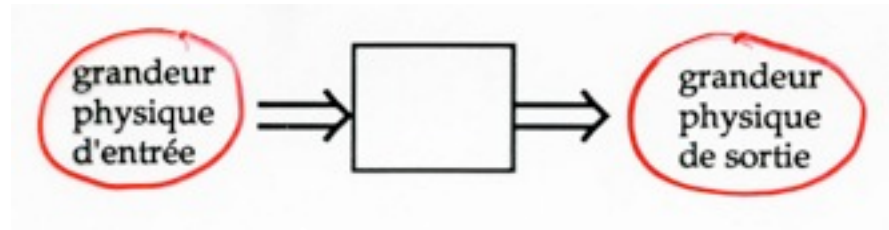


SGT-1/175-XY11



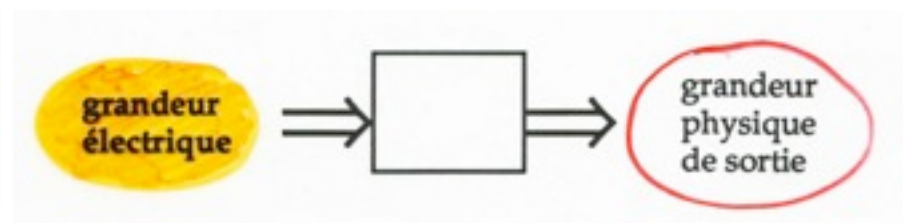
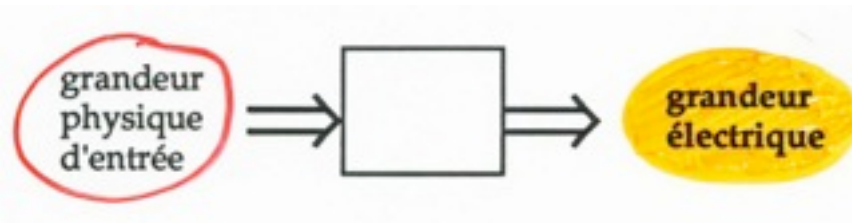
Terminologie

On appellera **transducteurs** un composant qui fournit comme signal de sortie une grandeur physique utilisable en réponse à une autre grandeur physique spécifiée comme signal d'entrée :



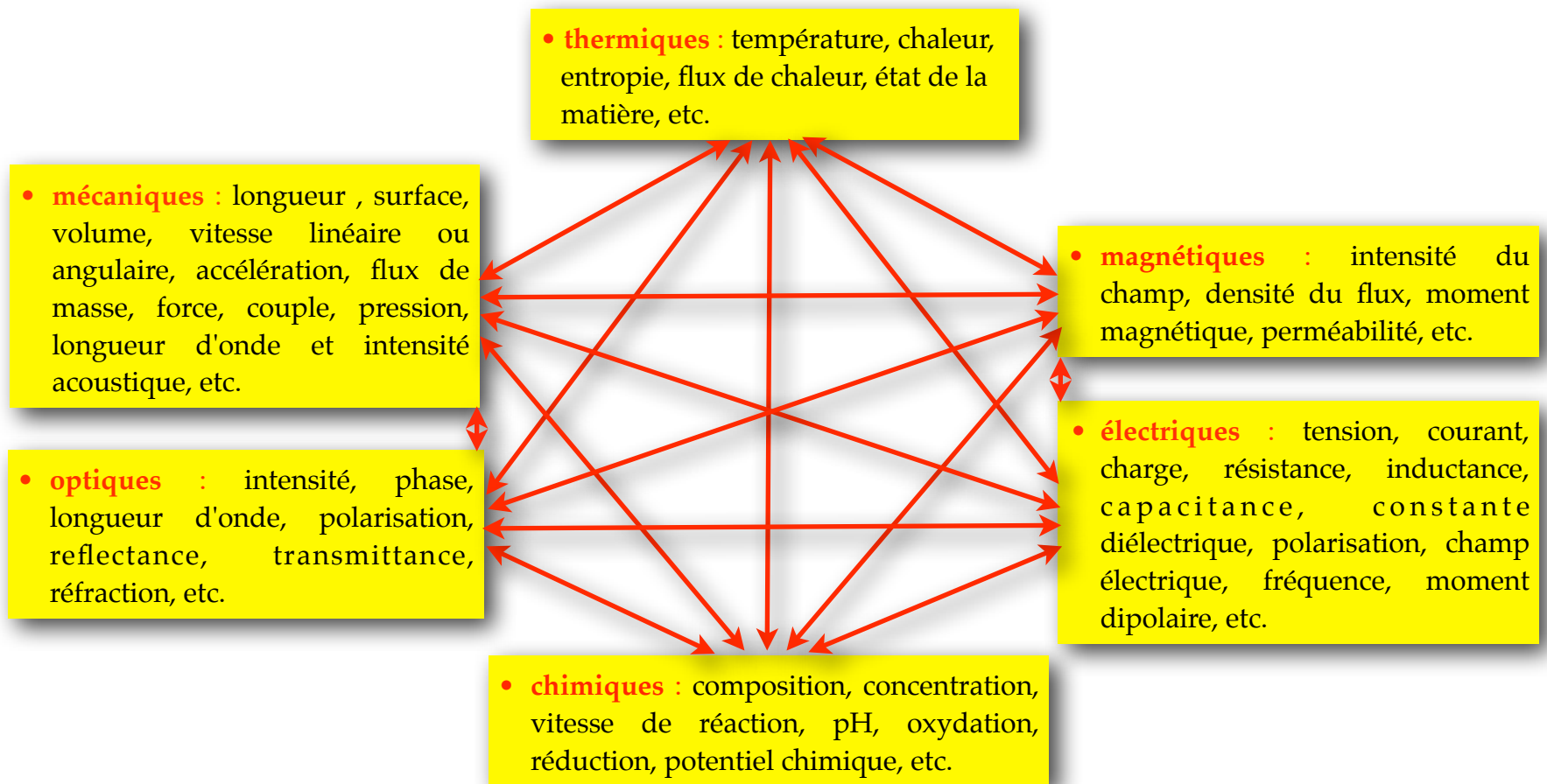
- les **capteurs, senseurs ou détecteurs** qui fournissent comme signal de sortie une quantité électrique utilisable en réponse à une grandeur, une propriété ou une condition physique à mesurer

- les **actuateurs, moteurs ou générateurs** qui fournissent comme signal de sortie une grandeur ou une condition physique à modifier en réponse à une quantité électrique fournie à l'entrée.



Principes physiques de transduction

De par sa définition, un transducteur est un composant capable de fournir une grandeur physique en réponse à une autre grandeur physique. Les principes de cette transduction sont basés sur l'existence de divers **effets physiques ou chimiques**. On peut distinguer six grandes classes de signaux :



Principes physiques de transduction

		Secondary Signal					
		Mechanical	Thermal	Electrical	Magnetic	Radiant	Chemical
Primary Signal	Mechanical	(Fluid) Mechanical and Acoustic Effects: eg. Diaphragm Gravity Balance Echo Sounder	Friction Effects (eg. Friction Calorimeter) Coolings Effects (eg. Thermal Flow Meters)	Piezoelectricity Piezoresistivity Resistive, Capacitive and Inductive Effects	Magnetomechanical Effects: eg. Piezomagnetic Effect	Photoelastic Systems (Stress-induced Birefringence) Interferometers Sagnac Effect Doppler Effect	
	Thermal	Thermal Expansion (Bimetaloc Strip, Liquid-in-Glass and Gas Thermometers, Resonant Frequency) Radiometer Effect (Light Mill)		Seebeck Effect Thermoresistance Pyroelectricity Thermal (Johnsen) Noise		Thermooptical Effects (eg. in Liquid Crystals) Radiant Emission	Reaction Activation eg. Thermal Dissociation
	Electrical	Electrokinetic and Electromechanical Effects: eg. Piezoelectricity Electrometer Ampere's Law	Joule (Resistive) Heating Peltier Effect	Charge Collectors Langmuir Probe	Biot-Savart's Law	Electrooptical Effects: eg. Kerr Effect Pockels Effect Electroluminescence	Electrolysis Electromigration
	Magnetic	Magnetomechanical Effects: eg. Magnetostriction Magnetometer	Thermomagnetic Effects: eg. Righi-Leduc Effect Galvanomagnetic Effects eg. Ettingshausen Effect	Thermomagnetic Effects: eg. Ettingshausen-Nernst Effect Galvanomagnetic Effects: eg. Hall Effect, Magnetoresistance		Magnetooptical Effects: eg. Faraday Effect Cotton-Mouton Effect	
	Radiant	Radiation Pressure	Bolometer Thermopile	Photoelectric Effects: eg. Photovoltaic Effect Photoconductive Effect		Photorefractive Effects Optical Bistability	Photosynthesis, dissociation
	Chemical	Hygrometer Electrodeposition Cell Photoacoustic Effect	Calorimeter Thermal Conductivity Cell	Potentiometry, Conductimetry, Amperometry Flame Ionization Volta Effect Gas Sensitive Field Effect	Nuclear Magnetic Resonance	(Emission and Absorption) Spectroscopy Chemiluminescence	

Classification et caractérisation des transducteurs

• La classification des transducteurs :

- la grandeur physique mesurée
- le principe de la transduction
- la technologie de la chaîne de mesure
- le domaine d'application
- le coût de la mesure
- la précision de la mesure

• Les caractéristiques statiques

- précision absolue du transducteur (accuracy)
- précision de la mesure (precision)
- résolution (resolution)
- sensibilité de la transduction (sensitivity)
- sélectivité à la grandeur mesurée (selectivity)
- signal minimum détectable (MDS)
- seuil (threshold)
- non-linéarité (nonlinearity)
- distorsion (distortion)
- conformité (conformity)
- hystérèse (hysteresis)
- répétitivité (repeatability)
- plage de mesure (span)
- bruit
- instabilités et dérives temporelles

• Les caractéristiques environnementales

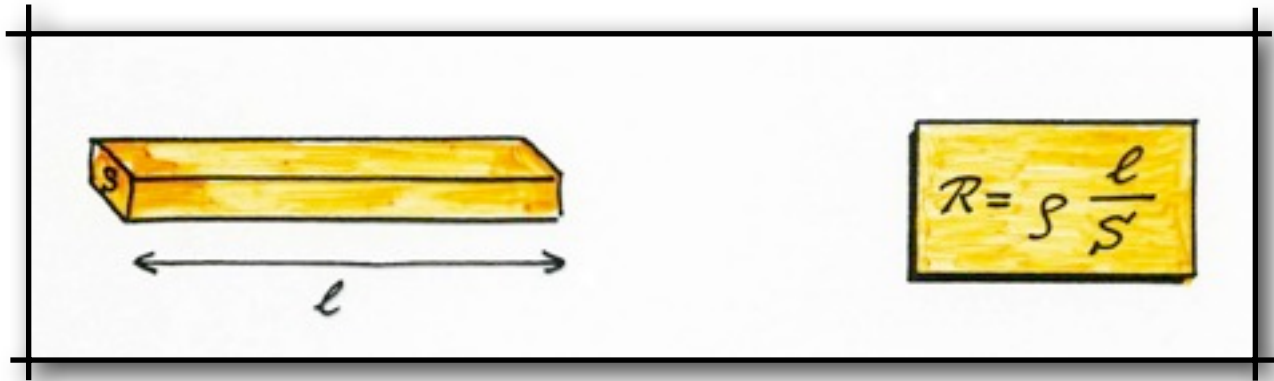
- conditions d'environnement (température, humidité, accélération, etc.)
- conditions de stockage
- tests de fiabilité
- tests de stabilité au vieillissement
- durée de vie et pannes (MTBF = mean time between failure)

• Les caractéristiques dynamiques

- fonction de transfert (transfer function)
- réponse fréquentielle (frequency response)
- réponse impulsionnelle (impulse response)
- réponse indicelle (step response)
- saturation et temps de rétablissement

Effets résistifs

La résistance électrique R d'un barreau de matière conductrice de longueur l et de section S est donnée par :

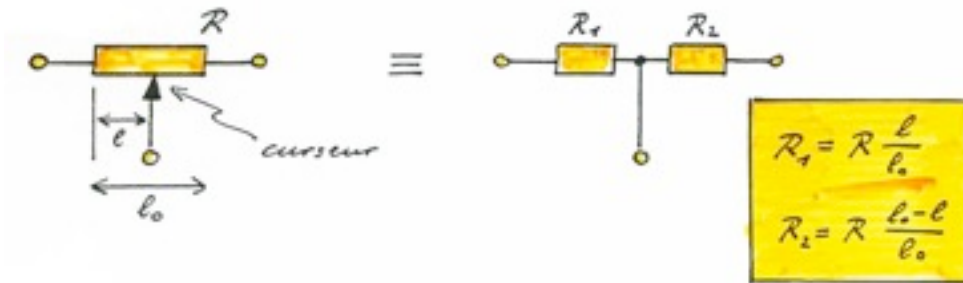


où ρ est *la résistivité du matériau utilisé*

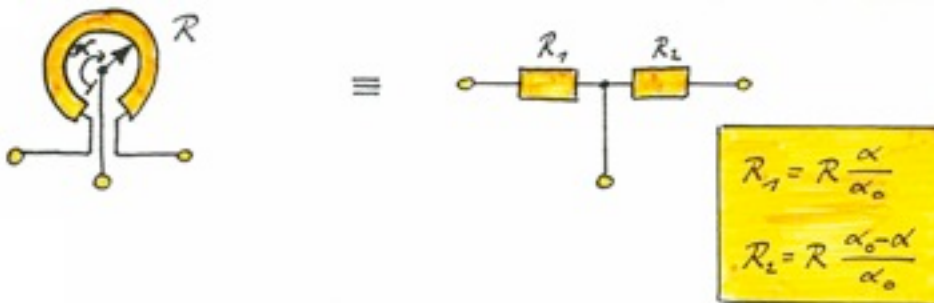
Effets potentiométriques

En déplaçant un curseur conducteur sur un barreau de matière conductrice, on obtient **un potentiomètre**, élément électrique à trois bornes dont on peut varier continûment la résistance par le déplacement mécanique du curseur. On fabrique des potentiomètres:

- des capteurs de déplacements linéaires



- des capteurs de déplacements angulaires



Les potentiomètres permettent de réaliser *des capteurs simples pour la mesure de déplacements mécaniques ou de variations d'angle macroscopiques*, en asservissant le déplacement du curseur avec le déplacement ou l'angle à mesurer. Ils peuvent aussi être construits de sorte que la réponse R_1 ne soit pas linéaire en fonction de l .



Effets thermorésistifs

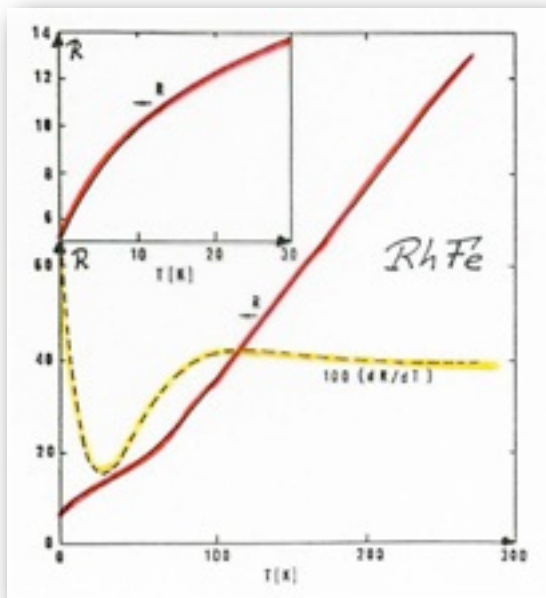
La résistivité ρ des matériaux dépend de la température T :

$$\rho = \rho(T)$$

C'est l'**effet thermorésistif** qui peut être utilisé pour réaliser *des capteurs de température*. Suivant la nature du matériau utilisé, il peut y avoir deux comportements différents de la résistivité en fonction de la température:

Résistivité PTC (positive temperature coefficient)

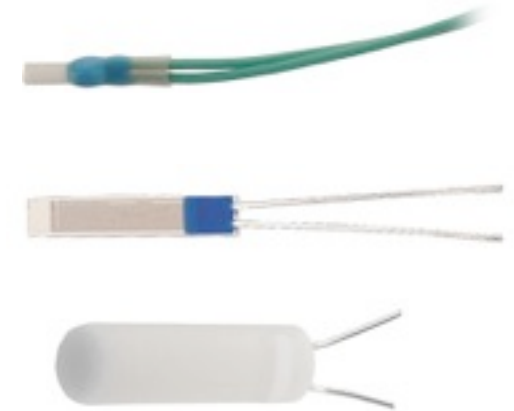
Ce sont par exemple **les métaux (Pt, RhFe, etc.)**. Leur résistivité en fonction de T peut être décrite par une approximation polynomiale :



$$\rho(T) = \rho_0 (1 + AT + BT^2 + CT^3 + \dots)$$

Exemple: *les sondes Pt 100*, constituées d'une résistance électrique en platine valant 100Ω à $0^\circ C$, sont des capteurs très utilisés entre $-200^\circ C$ et $+600^\circ C$.

Capteurs de température PTC: la sonde Pt100



Résistances PTC



Effets thermorésistifs

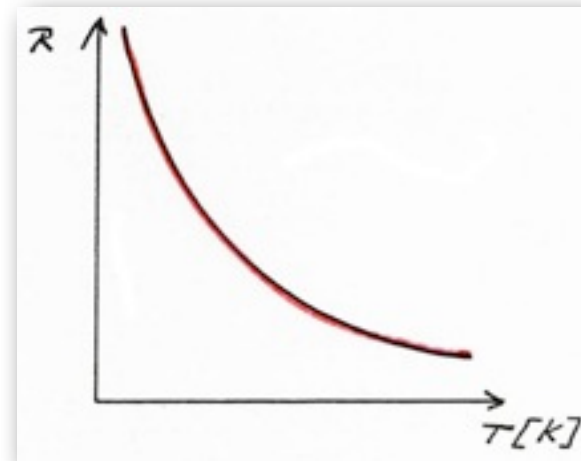
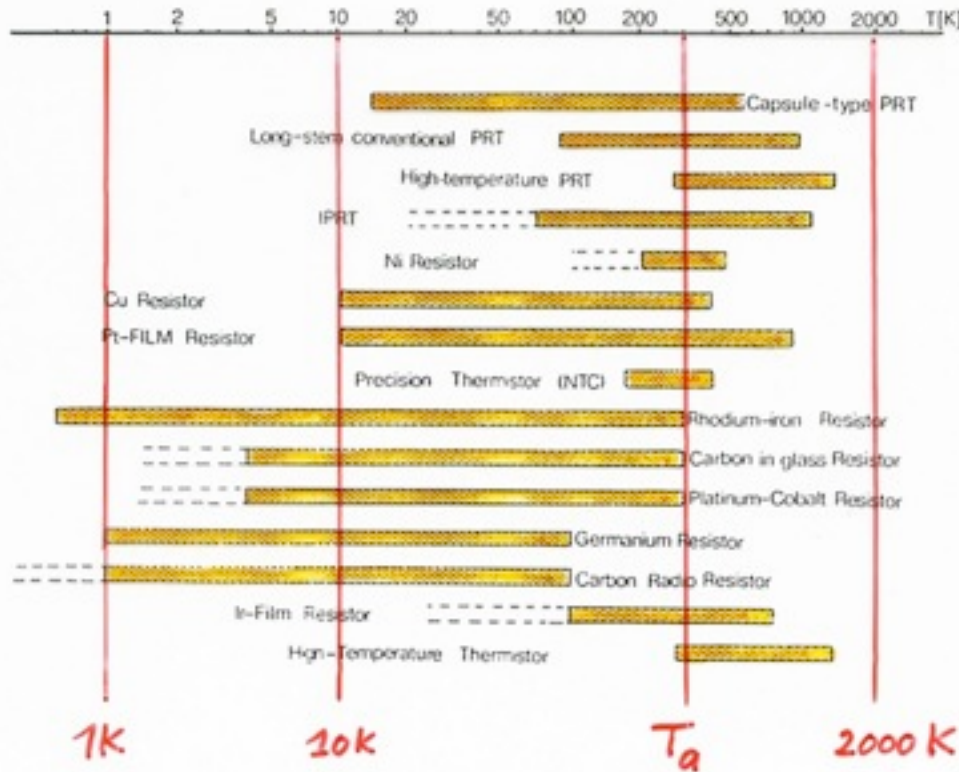
Résistances PTC

Résistivité NTC (negative temperature coefficient)

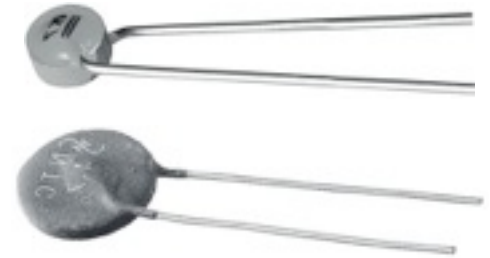
Ce sont par exemple les semi-conducteurs (C, Si, Ge, oxydes de métaux, etc.). Leur résistivité présente un comportement exponentiel :

$$\rho(T) = \rho_0 e^{\frac{\beta}{kT}}$$

Gammes de températures pour sondes PTC et NTC

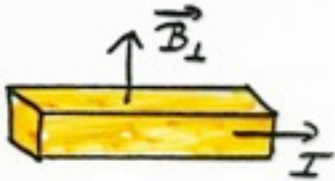


Capteurs de température cryogénique:
la sonde au carbone



Effets magnétorésistifs

Dans certains matériaux, la résistivité ρ dépend du champ magnétique appliqué transversalement à la direction de circulation du courant électrique :

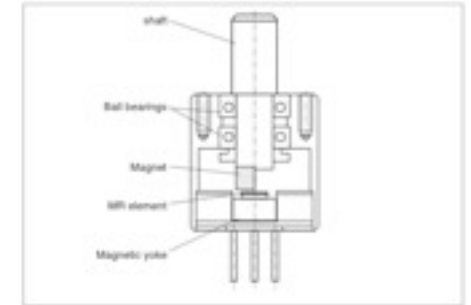
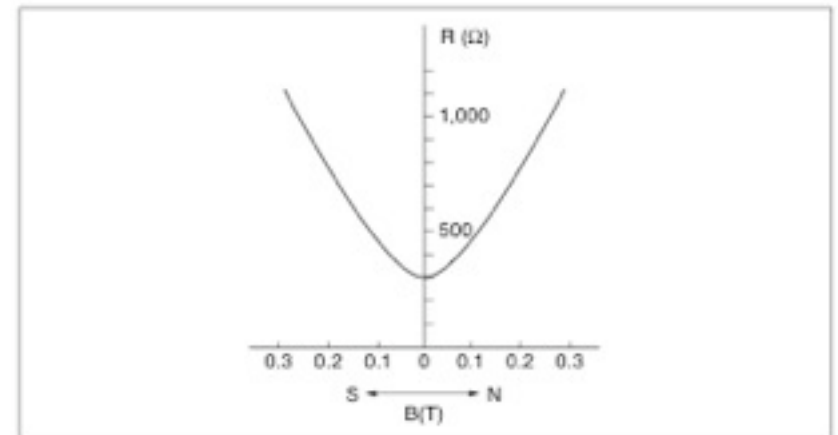
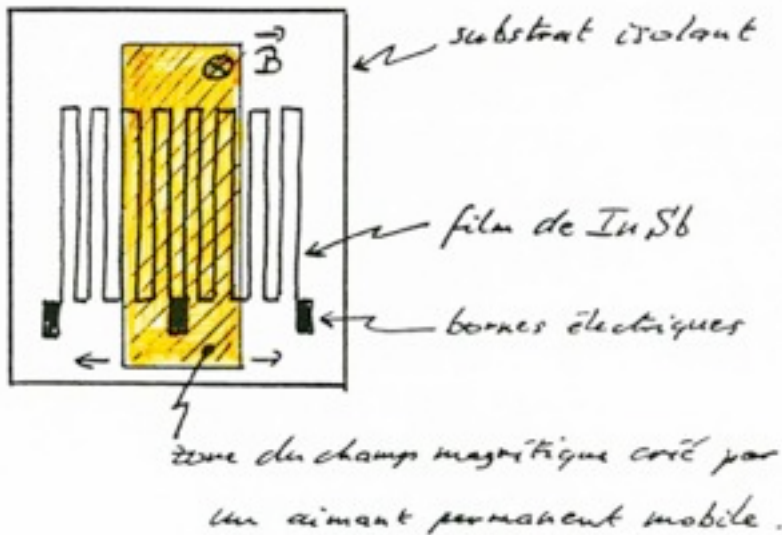


$$\rho = \rho(B_{\perp})$$

C'est l'**effet magnétorésistif** (par exemple dans **InSb** et dans certains semi-conducteurs), qui permet de réaliser *des capteurs pour la mesure des champs magnétiques*, et surtout *des capteurs potentiométriques sans frottement*, pour la mesure de déplacement mécanique sans frottement. En général, on a une loi de variation de la magnétorésistivité du type suivant:

Potentiomètre sans frottement

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha B_{\perp}^2)$$

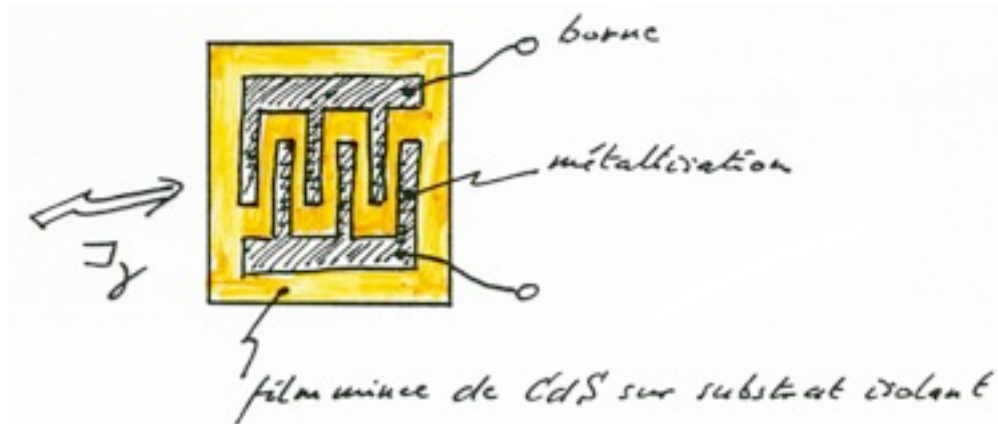


Effets photorésistifs

Pour certains matériaux, la résistivité électrique ρ dépend du flux lumineux J_γ incident sur le matériau :

$$\rho = \rho(J_\gamma)$$

C'est l'**effet photorésistif** qui permet de réaliser *des capteurs de mesure de flux lumineux*.

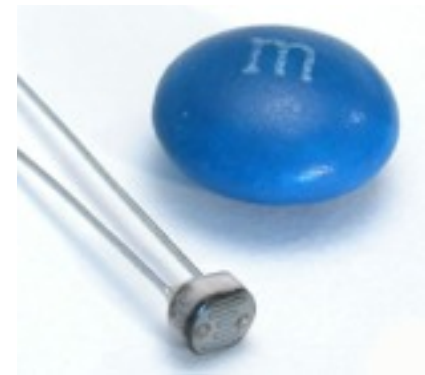
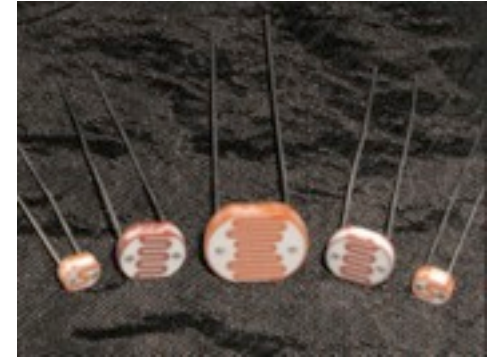


$$R_{\text{obscurité}} > 10 \text{ M}\Omega$$

$$R_{\text{écl.}} (1000 \text{ lux}) \approx 100 \Omega$$

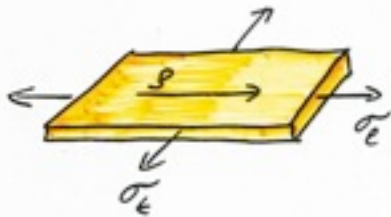
$$v_R \approx 200 \text{ k}\Omega / \text{s} \text{ (cellules lentes!)}$$

Photocellule CdS



Effets piézorésistifs

Certains matériaux présentent une dépendance de leur résistivité électrique ρ en les contraintes mécaniques qui leur sont appliquées, respectivement longitudinalement σ_e et transversalement σ_t à la direction de circulation du courant électrique. La variation relative de résistivité s'écrit:



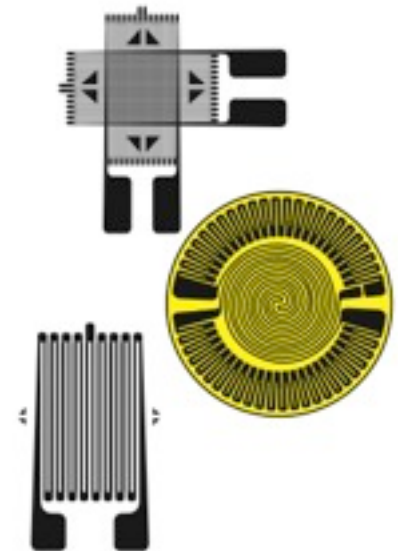
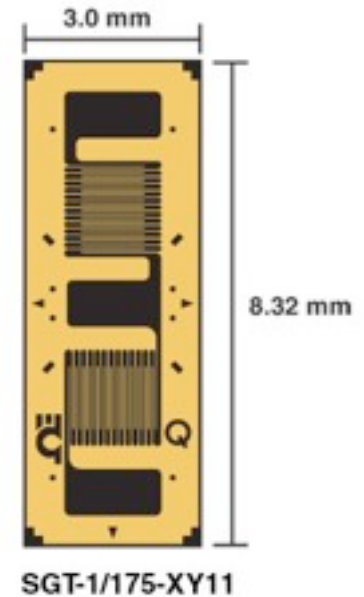
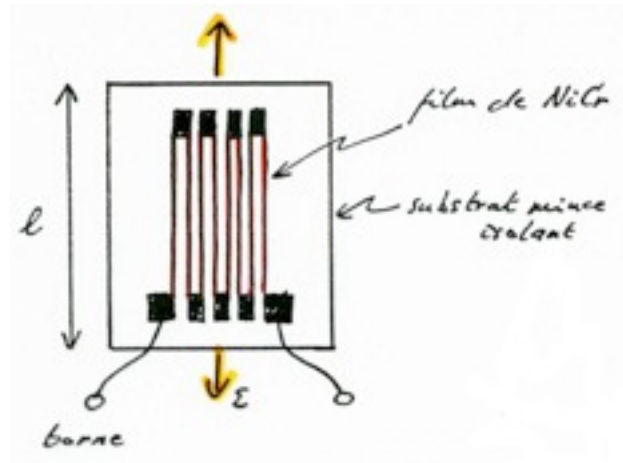
$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_e \sigma_e + \pi_t \sigma_t$$

avec les constantes de piézorésistivité π_e et π_t

Jauge de déformation piézorésistive (Strain gage)

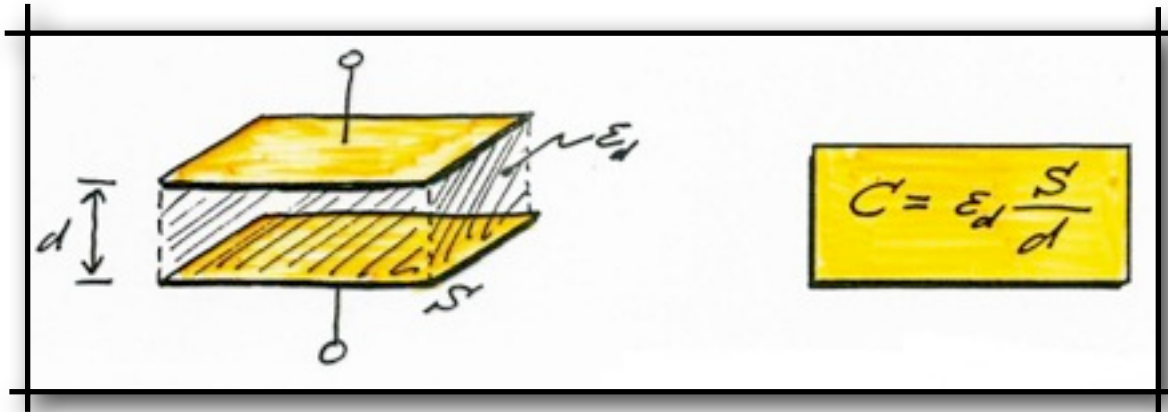
De par la configuration géométrique du film piézorésistif, une telle jauge n'est sensible qu'aux déformations du substrat dans la direction parallèle aux fils minces. La variation relative de résistance sous l'effet d'une déformation s'écrit (G est une constante):

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta l}{l} = G \epsilon$$



Effets capacitifs et diélectriques

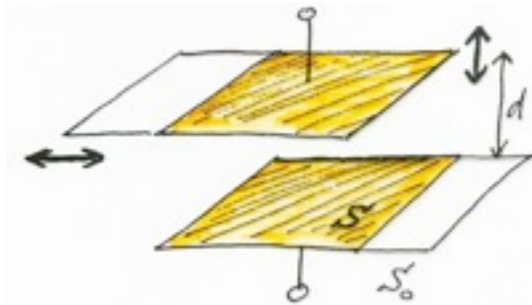
La capacité électrique C d'un condensateur composé de deux plaques de surface S distantes de d est donnée par :



où ϵ_d est *la perméabilité diélectrique de la substance* placée entre les plaques (électrodes).

Effets capacitifs mécaniques

Le déplacement longitudinal ou transversal d'une des électrodes par rapport à l'autre modifie la capacité du condensateur:

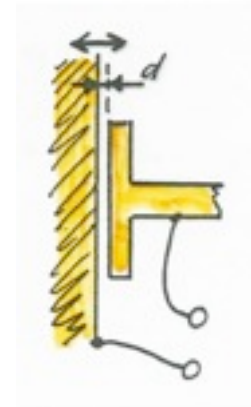


$$C = C_0 \frac{d_0}{d} + C_p$$
$$C = C_0 \frac{S}{S_0} + C_p$$

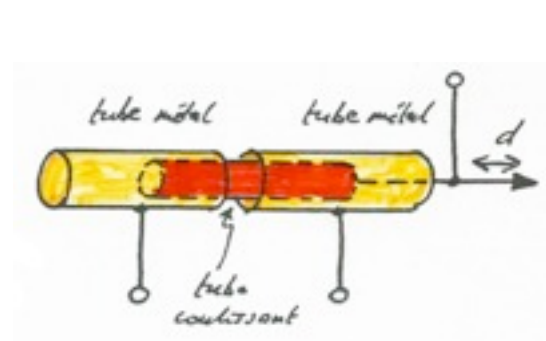
où C_p est la capacité parasite

- les capteurs capacitifs basés sur la mesure de d permettent *des mesures extrêmement sensibles de déplacement*, si d_0 est assez petit. Ils sont utilisés pour la mesure de très faibles déplacements (dynamiques), ainsi que dans les microphones à condensateurs.
- les capteurs capacitifs basés sur la mesure de S sont utilisés pour *des mesures précises de plus grands déplacements* (micromètres capacitifs).

Nanomètre capacitif

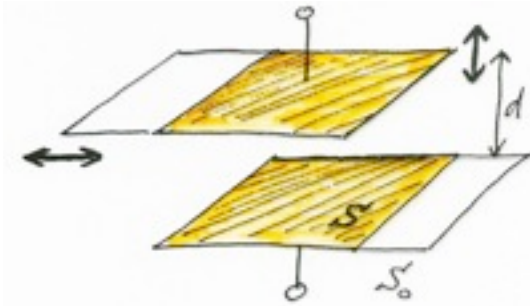


Micromètre différentiel capacitif



Effets capacitifs mécaniques

Le déplacement longitudinal ou transversal d'une des électrodes par rapport à l'autre modifie la capacité du condensateur:



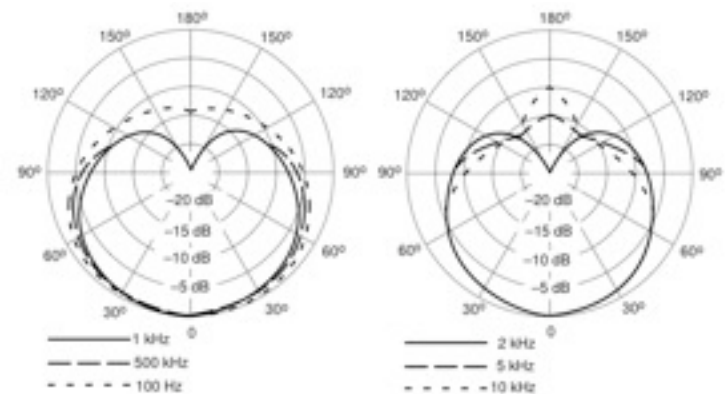
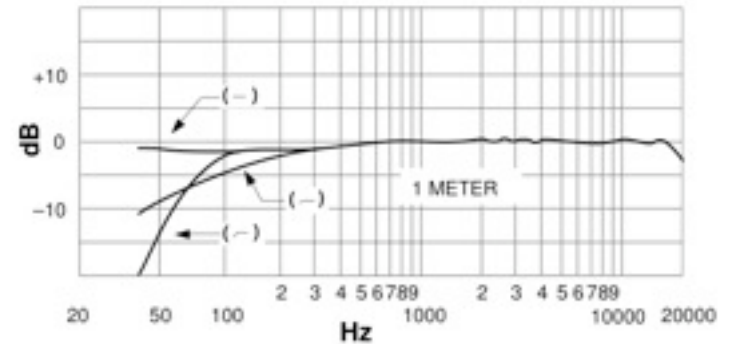
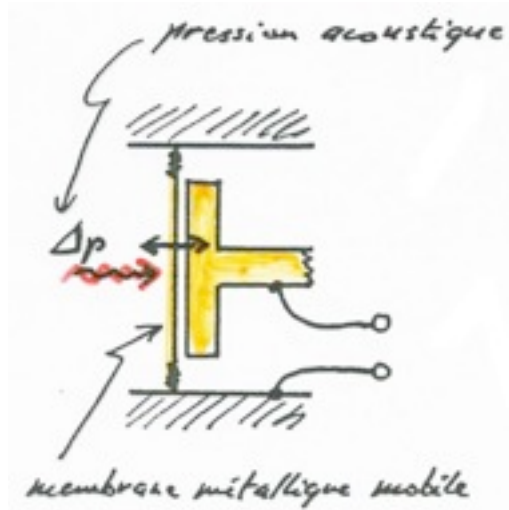
$$C = C_0 \frac{d_0}{d} + C_p$$

$$C = C_0 \frac{S}{S_0} + C_p$$

où C_p est la capacité parasite



Microphone capacitif

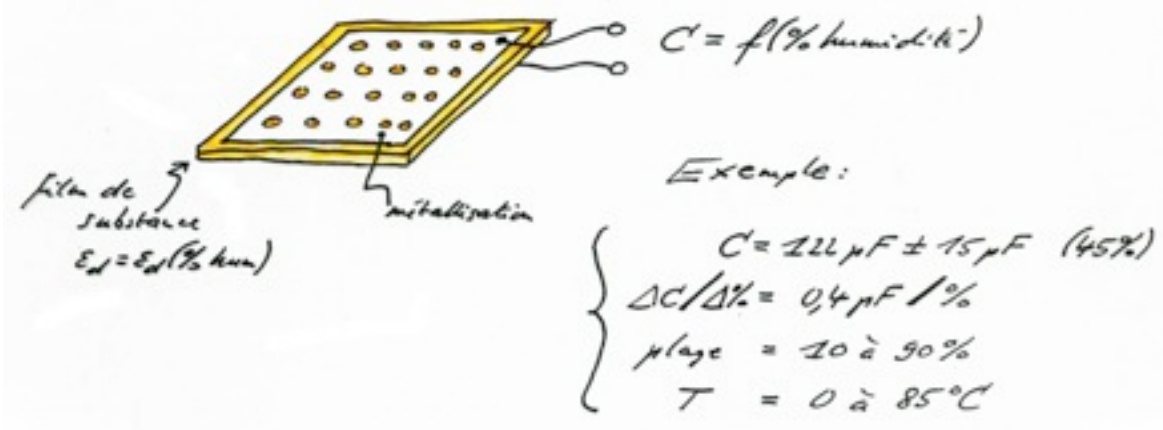


Effets diélectriques

La **perméabilité diélectrique** ϵ_d d'une substance peut dépendre de divers paramètres physiques, comme la température. Un effet intéressant pour la fabrication de capteurs est la dépendance de ϵ_d , pour certaines céramiques, du **taux hygrométrique de l'air** (% d'humidité dans l'air) :

$$\epsilon_d = \epsilon_d(\% \text{ humidité})$$

Cette dépendance permet de réaliser des **capteurs capacitifs pour la mesure du taux hygrométrique** dans l'air.



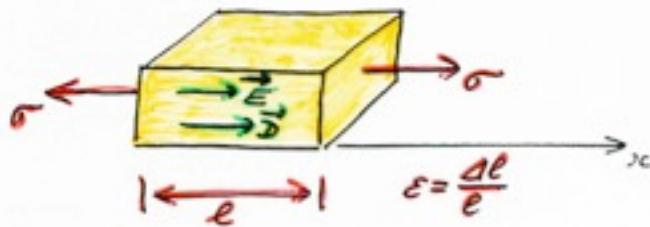
Sonde capacitive de mesure du taux hygrométrique



Effets piézoélectriques

Certains matériaux, dits *piézoélectriques*, possèdent un fort couplage entre les champs de nature électrique E et D et les champs de nature élastique ϵ et σ (champs de déformation et champs de contrainte respectivement). Par exemple, dans la direction x d'un cristal piézoélectrique, ce couplage se traduit par les équations phénoménologiques suivantes:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= \epsilon_d E_x + \gamma \sigma_{xx} \\ \epsilon_{xx} &= J \sigma_{xx} + \gamma E_x \end{aligned}$$

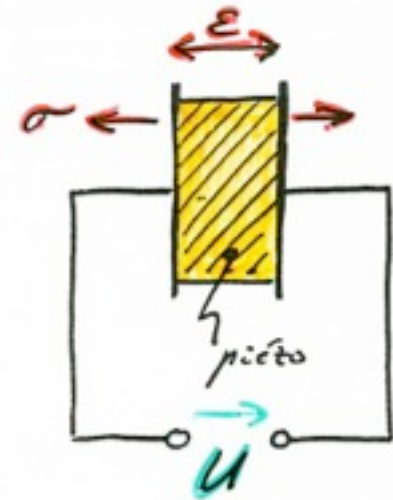


ϵ_d = perméabilité diélectrique
 J = compléance élastique
 γ = constante piézoélectrique

Ce couplage implique qu'un matériau piézoélectrique placé dans un condensateur permet de transformer une déformation mécanique ϵ en un signal électrique U et vice versa :



Capteur-actuateur piézoélectrique



$$\begin{cases} \epsilon \frac{e t}{0 u} \sigma \Rightarrow U \text{ (capteur)} \\ U \Rightarrow \epsilon \frac{e t}{0 u} \sigma \text{ (actuateur)} \end{cases}$$

Effets piézoélectriques

L'effet piézoélectrique dans les monocristaux (quartz, NbLi, etc.), dans les céramiques (PZT) et dans certains polymères (PVDF) est à la base de la technologie de nombreux transducteurs :

Transformateurs électro-acoustiques

Tweeter (haut-parleurs pour les aigus), microphone, et surtout émetteur et récepteur d'ultrasons



Capteurs de force, de pression et d'accélération



Effets piézoélectriques

L'effet piézoélectrique dans les monocristaux (quartz, NbLi, etc.), dans les céramiques (PZT) et dans certains polymères (PVDF) est à la base de la technologie de nombreux transducteurs :

Actuateurs divers

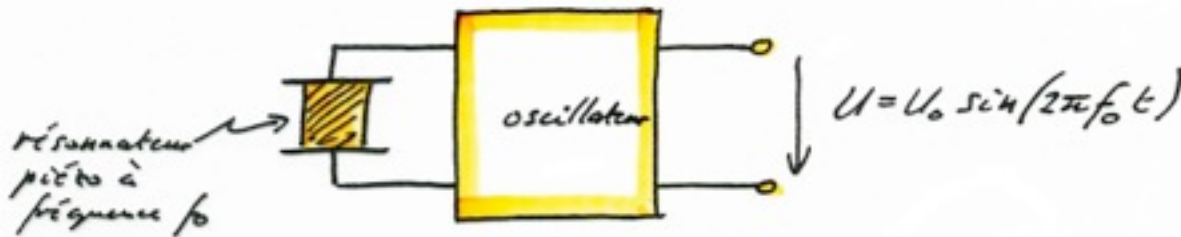
Moteurs à ultrasons (auto-focus d'objectifs d'appareils photo), miroirs déformables (téléscopes), scanners pour microscopes (à effet tunnel, à force atomique, etc.), électrooptique (commutateurs et modulateurs optiques, filtres de couleur, affichage et stockage optique, holographie, guide d'ondes), etc..



Effets de résonateurs piézoélectriques

Bases de temps des horloges à quartz

Le système constitué de l'élément piézo avec ses électrodes possède une fréquence propre mécanique très précise. Cette fréquence propre peut être excitée électriquement, et utilisée pour stabiliser un oscillateur électronique



Capteur de température à quartz

La dépendance de f_0 en la température est extrêmement précise. Comme l'on sait mesurer les fréquences avec une très haute précision, un résonateur piézo peut donc servir de thermomètre haute précision, pour lequel seule l'hystérèse de la réponse $f_0(T)$ limite la précision et la résolution.

$$f_0 = f_0(T)$$

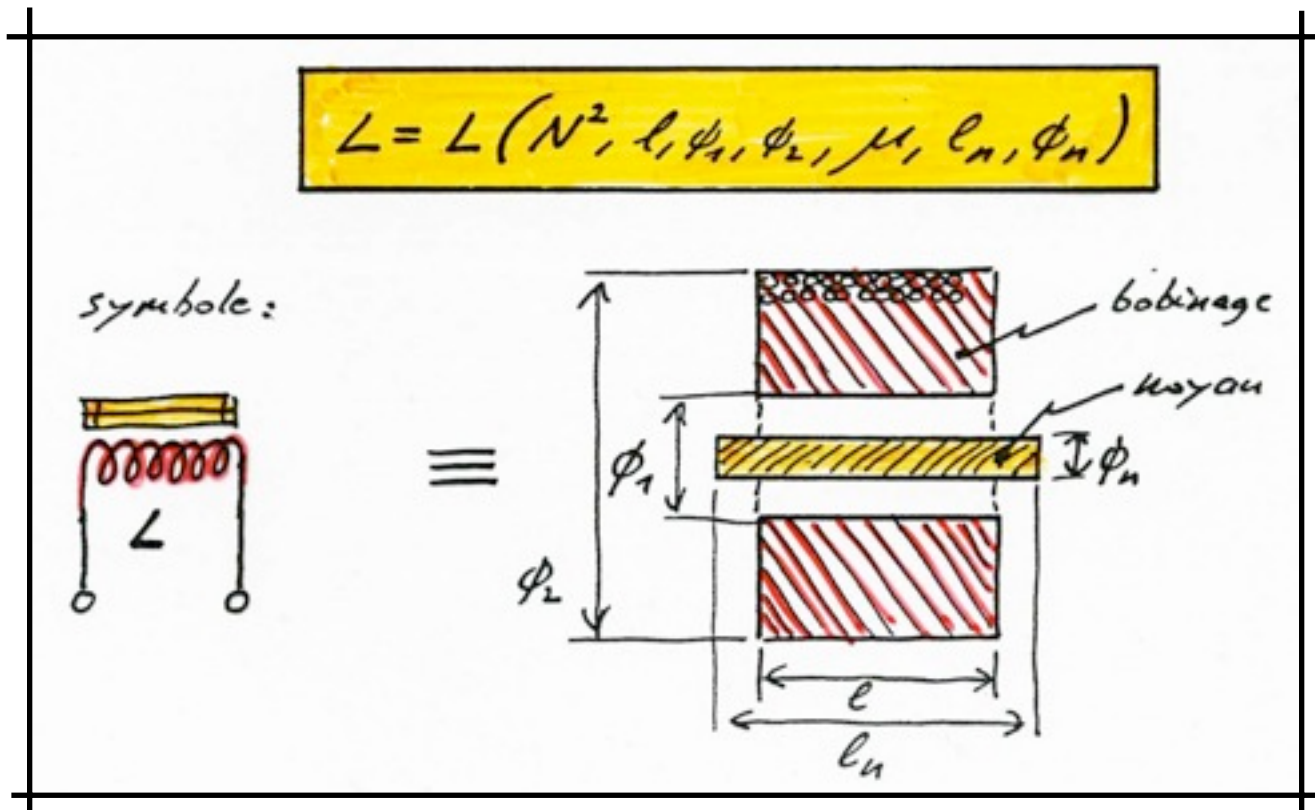
Exemple : sonde de température à base d'un résonateur piézo avec sensibilité de 1 kHz/K

résolution $\left\{ \begin{array}{l} \text{de } 10\text{mK sur une plage de } 100\text{K} \\ \text{de } 1\text{mK sur une plage de } 10\text{K} \end{array} \right.$



Effets inductifs et magnétiques

L'inductance L d'une self à noyau ferromagnétique est une fonction du nombre de spires N de la bobine, de ses dimensions géométriques (longueur l , diamètres interne et externe), de la **perméabilité magnétique** μ du noyau et des dimensions géométriques du noyau (longueur l_n et diamètre ϕ):

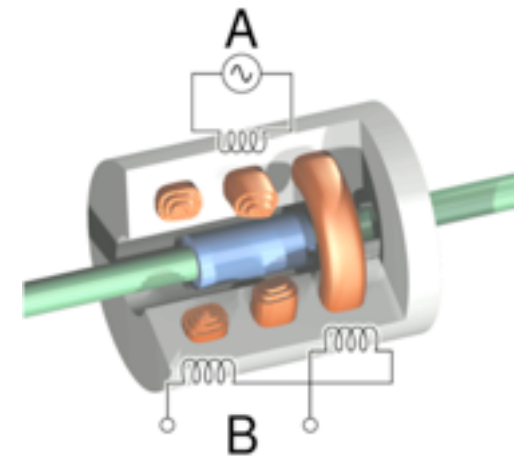


Effet d'inductance mutuelle variable

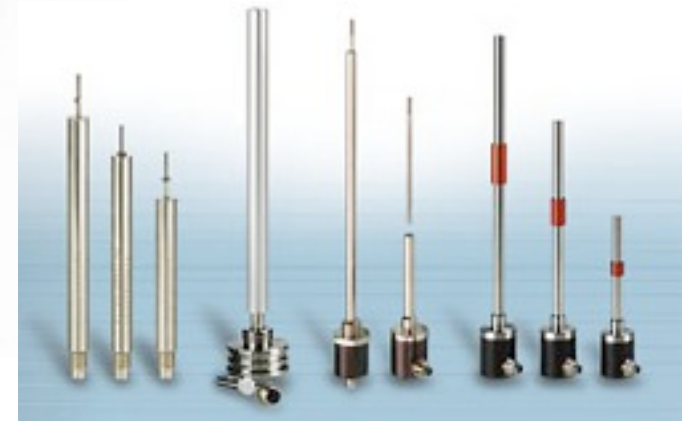
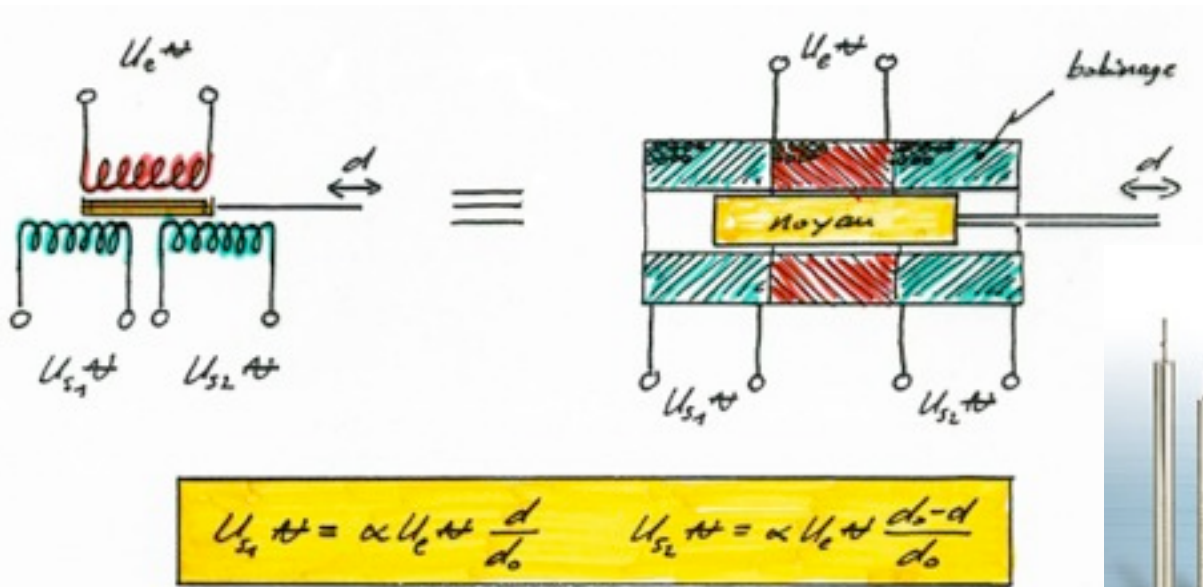
L'*inductance mutuelle*, ou couplage magnétique, entre deux selfs peut être modifiée en changeant la géométrie du noyau ferromagnétique doux.

Cet effet peut être utilisé pour réaliser des **capteurs différentiels de déplacement**. Ces capteurs sont très couramment utilisés pour les mesures de déplacement dans les gammes du μm au cm.

On les trouve avec toute l'électronique de traitement des données déjà intégrée dans le capteur (DC/DC transducers).



Capteur différentiel de déplacement LVDT
(Linear Variable Differential Transformer)



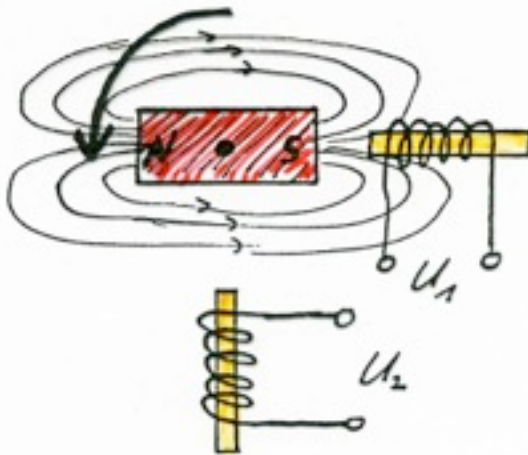
Effet de réluctance variable

Si, dans le noyau de ferrite douce d'une self, on ajoute un aimant permanent (ferrite dure), un *flux magnétique* Φ va circuler dans le circuit magnétique du noyau. Toute variation de la géométrie du noyau va modifier ce flux magnétique, de sorte qu'une *tension induite* U va être générée aux bornes du bobinage de la self, de par *la loi de Faraday* :

$$U = -N \frac{d\Phi(d)}{dt}$$

Cet effet, qui est à la base de toutes les génératrices de courant électrique, permet aussi de réaliser des **capteurs d'angle et de vitesse de rotation** (dynamo tachymétrique)

Capteur d'angle ou de vitesse de rotation
(dynamo tachymétrique)



$$\Phi_1(t) = \Phi_0 \sin \omega t \Rightarrow$$

$$U_1 = N \Phi_0 \omega \cos \omega t$$

$$U_2 = N \Phi_0 \omega \sin \omega t$$

Les amplitudes de U_1 et U_2 sont proportionnelles à la vitesse de rotation ω (dynamo tachymétrique).

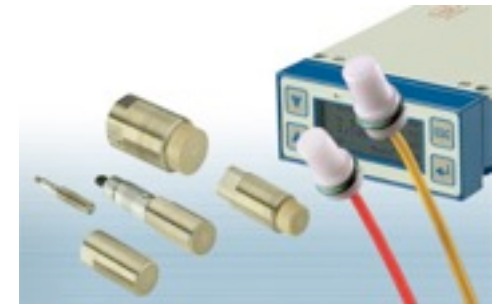
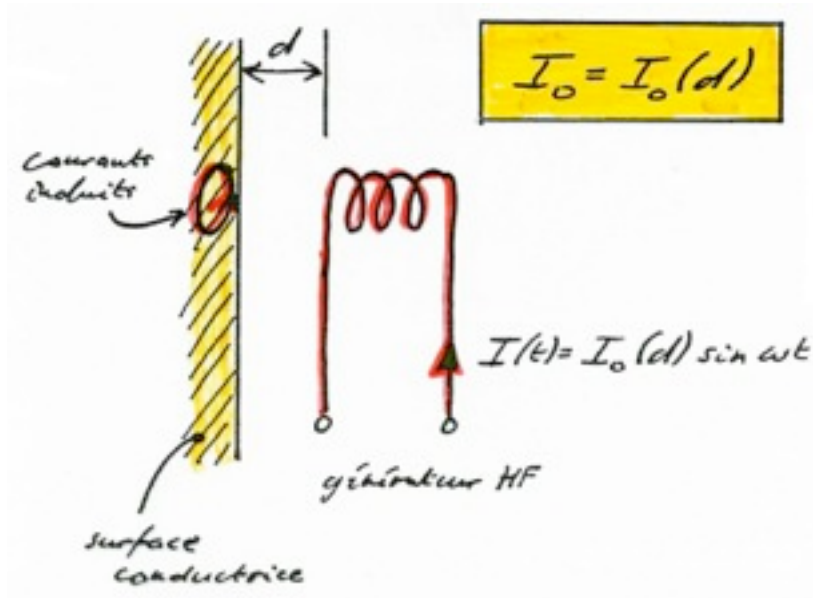


Effet Foucault

Une bobine à air parcourue par un courant haute fréquence $I = I_0 \sin \omega t$ crée un champ magnétique oscillant dans son voisinage. Si un élément conducteur pénètre dans ce champ, il s'y formera des **courants induits** (*courant de Foucault / Eddy currents*) qui dissipent de l'énergie par effet Joule. L'amplitude I_0 du courant alimentant la bobine va alors dépendre de ces courants de Foucault induits.

On peut utiliser cet effet pour construire des **capteurs de déplacement à effet Foucault**:

Capteur de déplacement à effet Foucault



Effets Lorentz et Faraday

La *force de Lorentz* \vec{f} qui s'applique sur une charge q se mouvant à vitesse \vec{v} dans un champ magnétique \vec{B} est à la base de la réalisation de tous les **moteurs électriques**. La force de Lorentz est aussi à la base de toute sorte de **transducteurs et d'actuateurs** (haut-parleurs en électroacoustique par exemple).

La plupart de ces moteurs, transducteurs et actuateurs qui transforment de l'énergie mécanique par l'intermédiaire de la force de Lorentz **peuvent fonctionner dans le sens inverse, en capteurs** qui transforment de l'énergie mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire de *la loi de Faraday* (par exemple, un microphone électrodynamique correspond à un montage tout-à-fait similaire au haut-parleur électro-dynamique représenté ci-dessous).

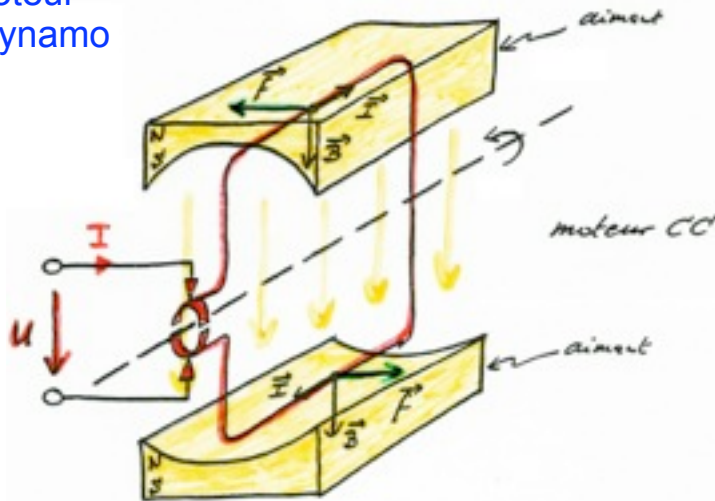
Actuateur
force de Lorentz

Transducteur
loi de Faraday

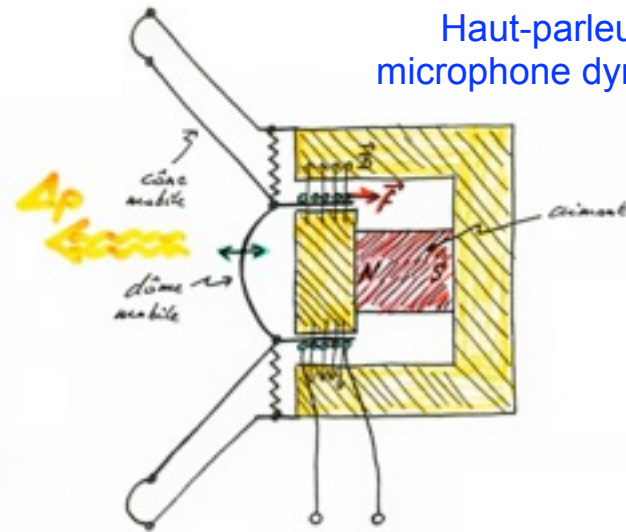
$$\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

$$U = -N \frac{d\Phi(d)}{dt}$$

Moteur
ou dynamo



Haut-parleur ou
microphone dynamique



Effet magnétostrictif

Dans les corps ferromagnétiques, il existe un couplage plus ou moins fort entre les champs élastiques (déformation et contrainte respectivement) et la magnétisation M . Pour un cristal cubique, on peut écrire ce couplage, appelé *magnétostriction*, sous la forme :

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx} &= k_1 \sigma_{xx} + k_2 (\sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \lambda_1 M_x^2 \\ \epsilon_{xy} &= k_3 \sigma_{xy} + \lambda_2 M_x M_y \end{aligned}$$

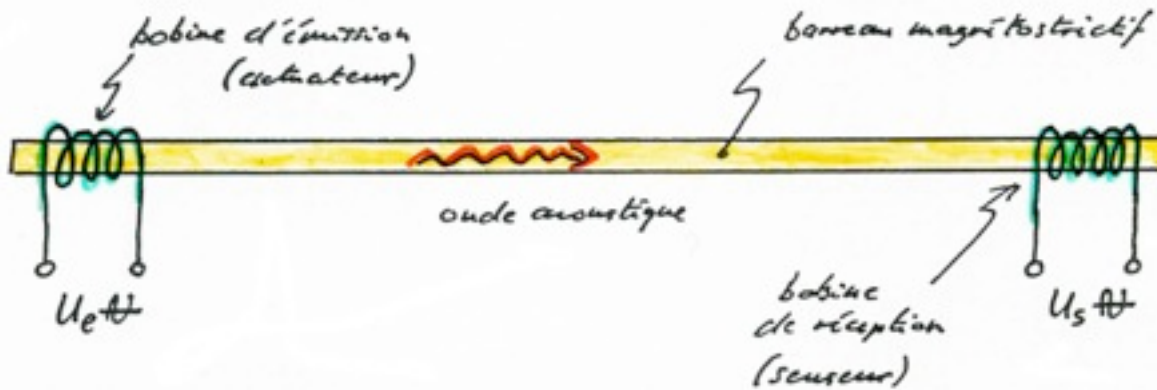
Capteurs de déplacement magnétostrictifs



où k_1 , k_2 et k_3 sont les *complaisances élastiques*, et λ_1 et λ_2 sont les *coefficients de magnétostriction*





Cet effet magnétostrictif permet de réaliser des transducteurs et des senseurs, notamment **des émetteurs et récepteurs d'ondes acoustiques**. Par exemple, on peut réaliser *une ligne à retard* par le système simple suivant:

Ligne à retard avec émetteur et récepteur d'ultrasons magnétostrictifs



Effets de transductions multiples

Les divers effets que nous avons vus jusque là permettent **une transduction directe** :

- *mécanique*  *électrique* : - déplacements, positions, angles
- vitesses linéaires et angulaires
- déformations
- *thermique*  *électrique* : - température
- flux de chaleur
- *magnétique*  *électrique* : - intensité et flux magnétiques
- *rayonnements*  *électrique* : - intensité lumineuse

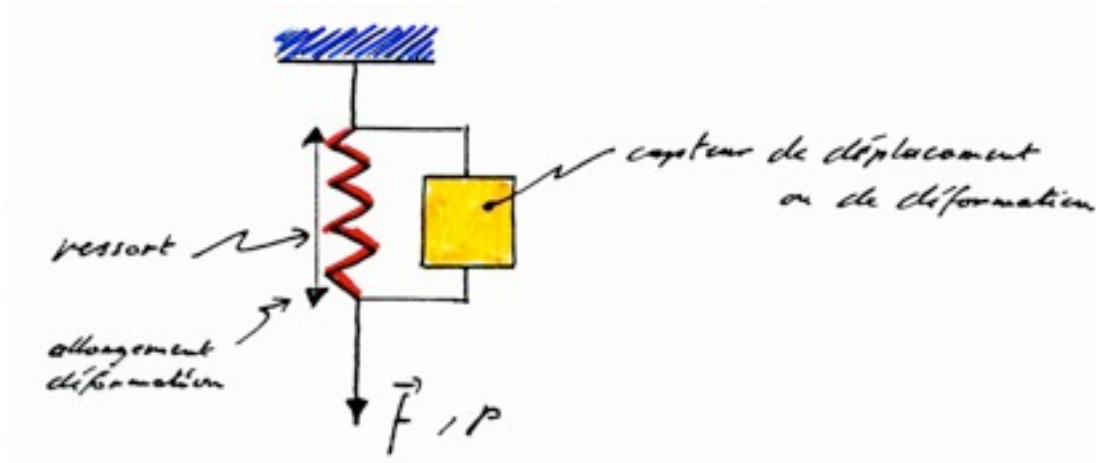
Cependant, pour certaines grandeurs physiques, il est très difficile de faire appel à des effets de transduction directe. On doit alors trouver **des effets de transductions multiples**.

Capteurs de force et de pression

La plupart des **capteurs de force** font appel à la transduction suivante :



On transforme tout d'abord la force en un déplacement ou une déformation par *un ressort* ou *un élément mécanique élastique*, puis on mesure ce déplacement ou cette déformation par *un capteur de déplacement* ou *une jauge de déformation* :



En général, on s'arrange pour que, sur la plage de mesure de la force f ou de la pression p du capteur, le déplacement ou la déformation de l'élément élastique reste très faible : on parle de "**capteur dur**", se déformant très peu.

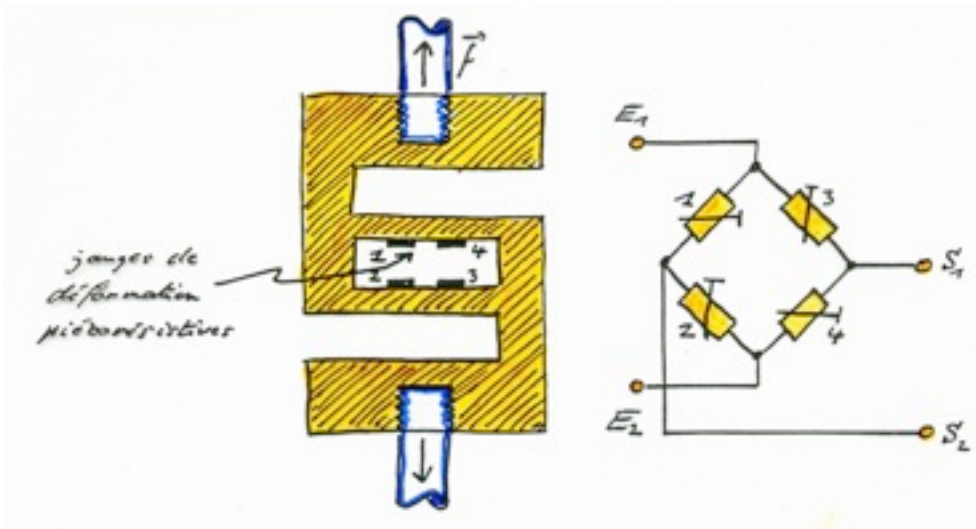


Capteurs de force et de pression

Capteurs (ou cellules) de force à jauges de déformation

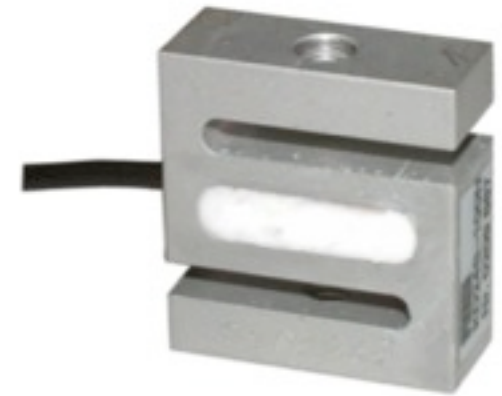
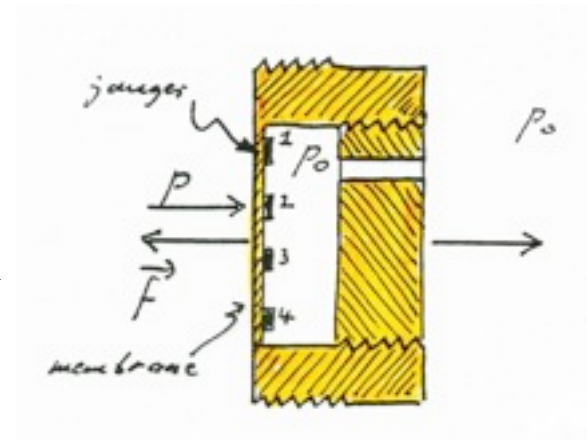
Les jauges de déformation piézo-résistives sont montées en pont, de sorte que les jauges 1 et 4 travaillent en opposition aux jauges 2 et 3 (allongement-rétrécissement). Ce montage en pont a deux avantages essentiels:

- augmentation de la sensibilité de la cellule
- diminution drastique des effets de température (l'effet thermorésistif des jauges est compensé par le montage en pont)

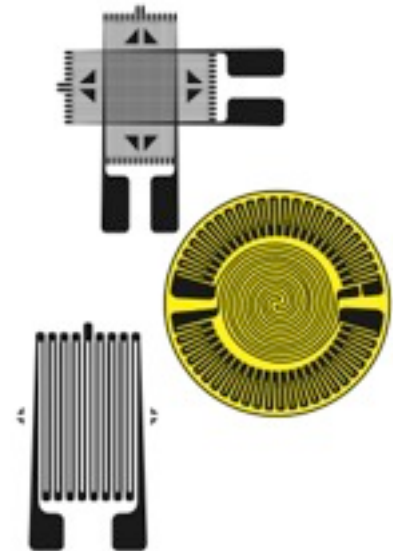
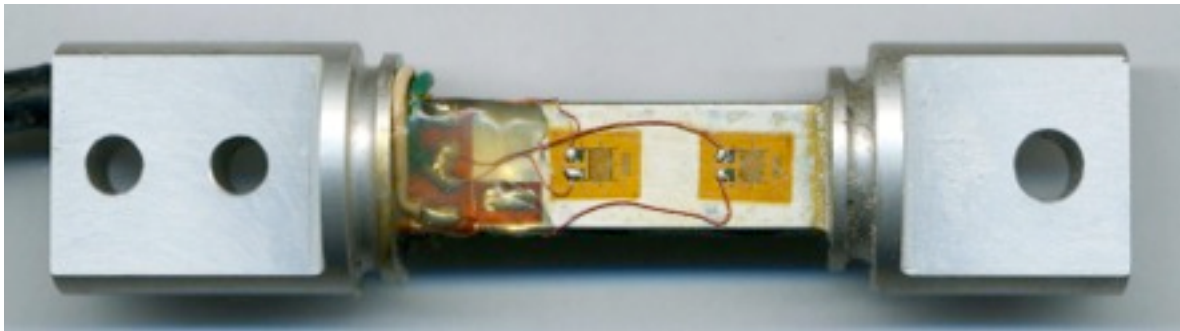
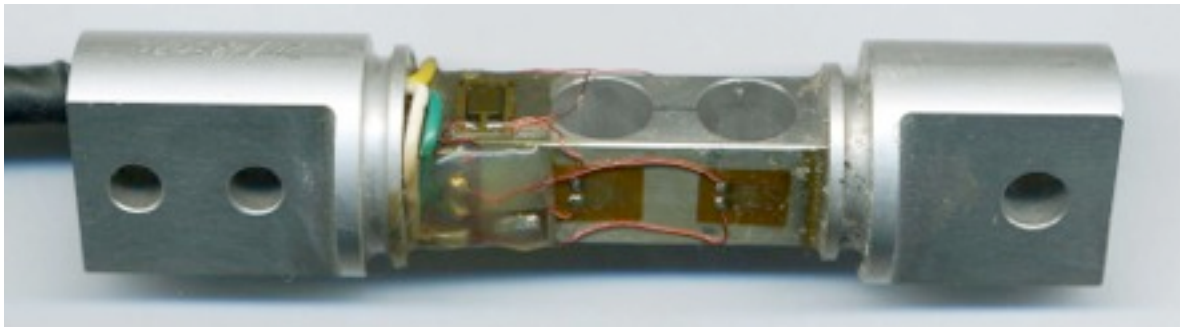


Capteurs (ou cellules) de force ou de pression à membrane

Sous l'effet de la force f ou de la différence de pression $\Delta p = p - p_0$, la membrane se déforme et agit sur le pont de jauges de déformation piézorésistives travaillant en opposition

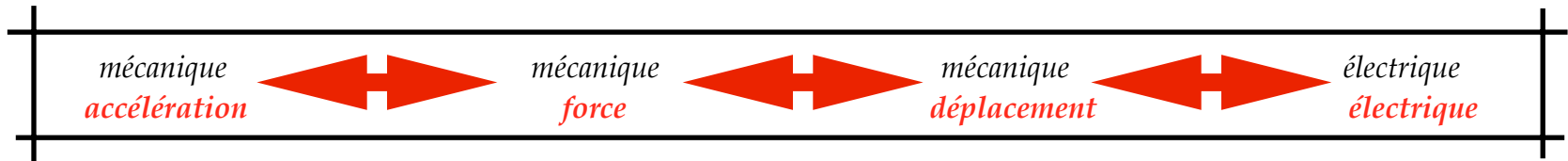


Exemple de montage d'un capteur de force à jauges de déformation



Capteurs d'accélération

Pour mesurer des accélérations, on fait appel à une triple transduction :



On utilise une masse m attachée à un élément élastique. En-dessous de la fréquence de résonance de ce système, on a

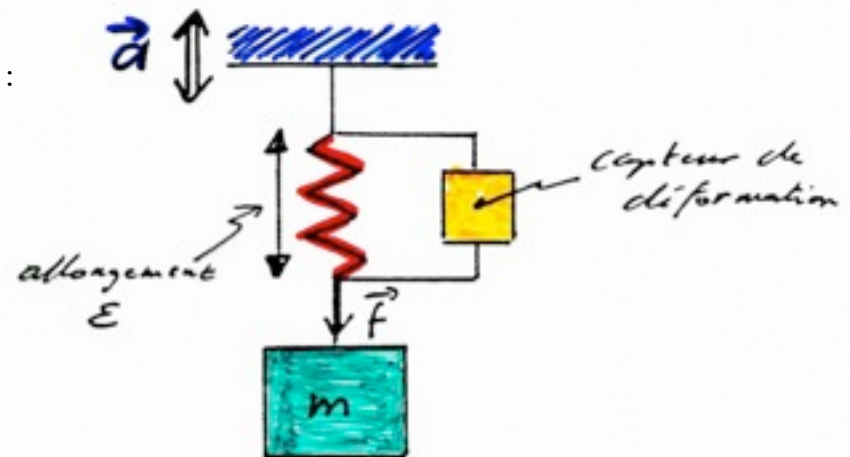
$$\vec{f} = m \vec{a}$$

L'élément élastique se déforme sous l'effet de la force d'inertie f :

$$\epsilon = J \sigma = J \frac{|\vec{f}|}{S} = \frac{Jm}{S} |\vec{a}|$$

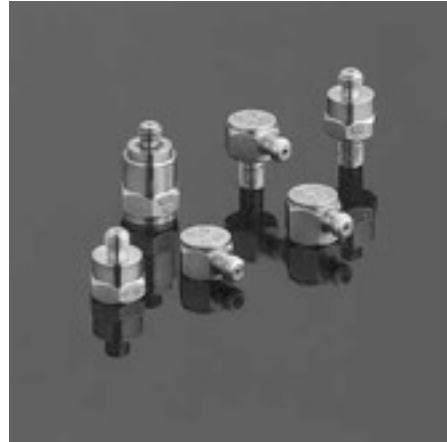
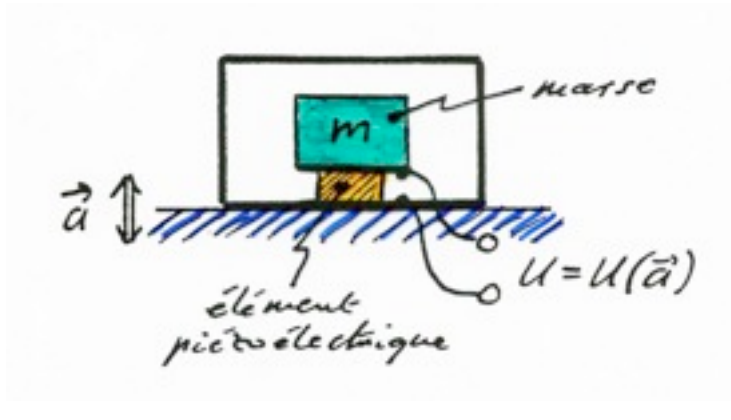
où a est l'accélération du support.

Il suffit alors de mesurer la déformation de l'élément élastique à l'aide d'un capteur sensible à la déformation



Capteurs d'accélération

Accéléromètre à élément piézo-électrique



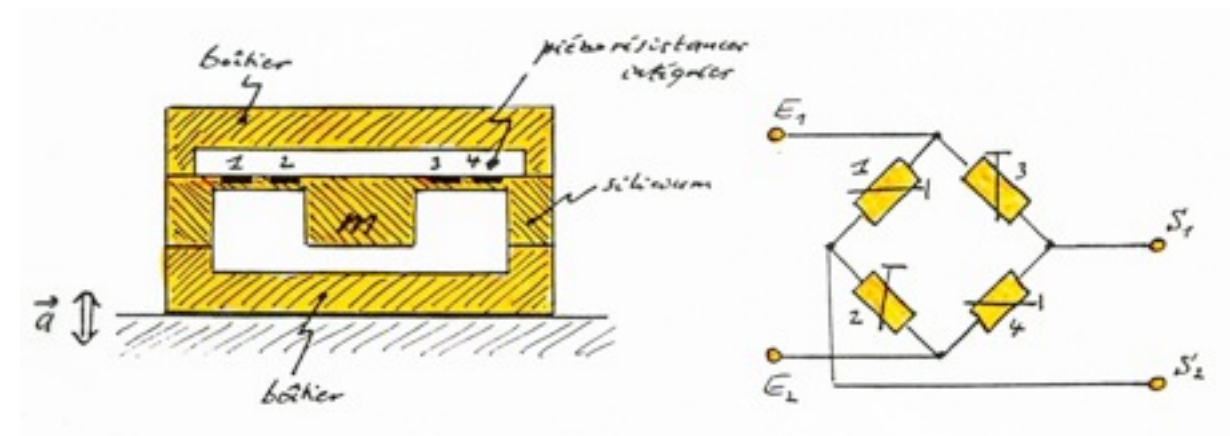
Accéléromètre 3 axes



Gyroscope 2 axes



Accéléromètre en technologie électronique intégrée

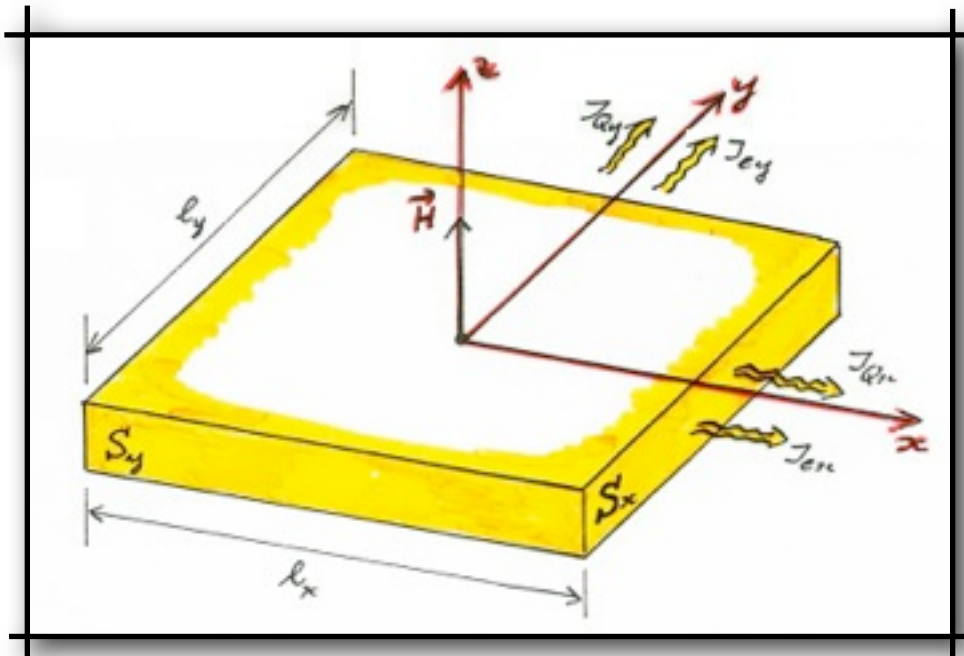


Accéléromètre 3 axes avec gyroscope 2 axes



Effets thermogalvanomagnétiques

La **thermodynamique des processus irréversibles** permet d'écrire les relations de couplage pouvant exister entre les *densités de courant électrique* J_{ex} et J_{ey} et les *densités de flux de chaleur* J_{Qx} et J_{Qy} dans un certain matériau soumis localement à un *potentiel électrique* U , à une *température* T et à un *champ magnétique* H selon l'axe z :



$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho & R_H H & \varepsilon & \nu H \\ -R_H H & \rho & -\nu H & \varepsilon \\ \varepsilon T & \nu H T & -\alpha & -\alpha H \\ -\nu H T & \varepsilon T & \alpha H & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{ex} \\ J_{ey} \\ \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{pmatrix}$$

Dans cette matrice (4x4) des coefficients, on constate que tous les termes contenant le champ H assurent un couplage entre la direction x et la direction y , alors que les autres termes assurent un couplage dans la même direction x ou y .

Effets indépendants de H

Résistivité électrique

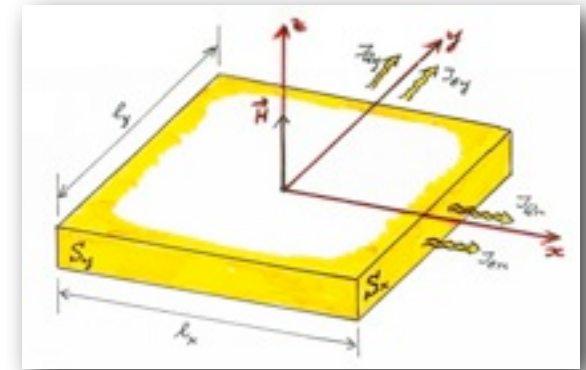
$$J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \Rightarrow \boxed{\frac{\partial U}{\partial x} = \rho J_{ex}}$$

$\rho =$ résistivité électrique

On retrouve ici la *loi d'Ohm*. En effet, dans la direction x:

$$\frac{\Delta U_x}{l_x} = \rho J_{ex} = \rho \frac{S_x J_{ex}}{S_x} = \rho \frac{I_{ex}}{S_x} \Rightarrow \Delta U_x = \underbrace{\left(\frac{\rho l_x}{S_x} \right)}_{R_x} I_{ex}$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho & \alpha H & \epsilon & \alpha H \\ -\alpha H & \rho & -\alpha H & \epsilon \\ \epsilon T & \alpha HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\alpha HT & \epsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{ex} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Conductibilité thermique

$$J_{ex} = J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \Rightarrow \boxed{J_{Qx} = -\alpha \frac{\partial T}{\partial x}}$$

$\alpha =$ coef. de conductibilité thermique

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho & \alpha H & \epsilon & \alpha H \\ -\alpha H & \rho & -\alpha H & \epsilon \\ \epsilon T & \alpha HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\alpha HT & \epsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix}$$

La densité de flux de chaleur dans la direction x est proportionnelle au gradient de température selon x (*processus de thermoconduction*).

Effets indépendants de H

Effet Seebeck

$$J_{ex} = J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

⇒

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial T}{\partial x}$$

$\varepsilon =$ puissance thermoelectrique

Cet effet, qui intervient à courant I_x nul, donne naissance dans la direction x à une différence de potentiel ΔU_x proportionnelle à la différence de température ΔT_x dans la direction x :

$$\Delta U_{T_x} = \varepsilon \Delta T_x$$

Effet Peltier

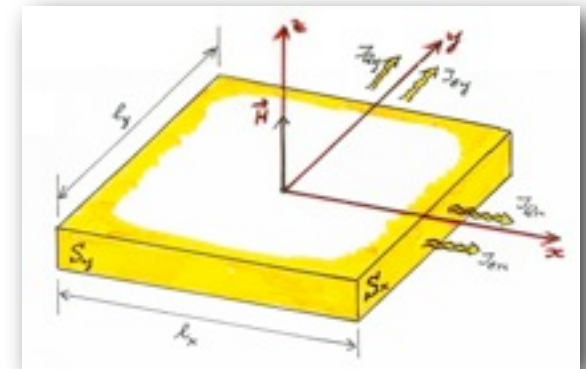
$$J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

⇒

$$J_{Q_{se}} = \varepsilon T J_{ex}$$

Cet effet, proportionnel à température T du système, donne naissance dans la direction x à un flux de chaleur proportionnel au flux de courant électrique dans la même direction.

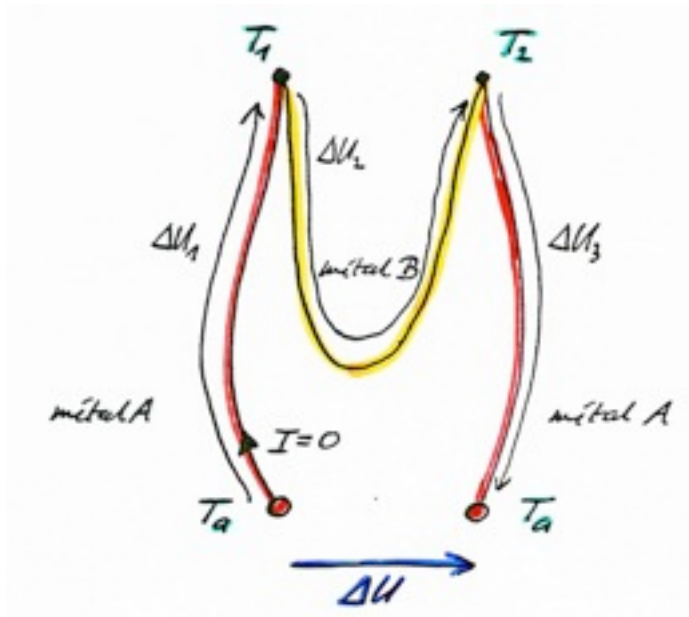
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S & R_H & \varepsilon & \nu H \\ -R_H & S & -\nu H & \varepsilon \\ \varepsilon T & \nu HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\nu HT & \varepsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S & R_H & \varepsilon & \nu H \\ -R_H & S & -\nu H & \varepsilon \\ \varepsilon T & \nu HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\nu HT & \varepsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Effet Seebeck: les thermocouples

Considérons le système suivant: un fils conducteur électrique composé de trois fils, de deux matières différentes, avec deux soudures placées à des températures différentes



Si le courant traversant ce circuit est nul ($I = 0$), l'effet Seebeck décrit précédemment permet d'écrire :

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = \varepsilon_A (T_1 - T_a) + \varepsilon_B (T_2 - T_1) + \varepsilon_A (T_a - T_2)$$

$$\Delta U = (\varepsilon_B - \varepsilon_A) (T_2 - T_1)$$

C'est le principe du **thermocouple**, qui est très couramment utilisé comme **capteur de température**.



Effet Seebeck: les thermocouples

Type E: Chromel (alliage nickel+chrome(10%)) / Constantan (alliage nickel+cuivre(45%))

* Ce thermocouple est intéressant pour la mesure de températures basses. Il a également l'avantage de ne pas avoir de réponse magnétique.

Type J: Fer / Constantan (alliage nickel+cuivre)

* Fonctionne bien dans le vide et dans une plage de température de 0 à 750°C, mais n'est pas recommandé pour les basses températures, à cause de problèmes d'oxydation du fer.

Type K: Chromel (alliage nickel + chrome) / Alumel (alliage nickel + aluminium(5%) + silicium)

* thermocouple standard. Il permet une mesure dans une gamme de température large : -200 °C à 1250°C. Il est également bon marché.

Type N: Nicrosil (alliage nickel + chrome(14%) + silicium(1.5%)) / Nisil (alliage nickel + silicium(4.5% + magnésium(0.1%))

* sa bonne stabilité et sa bonne résistance aux températures élevées (-270 à 1300°C) et à l'oxydation rendent ce thermocouple intéressant pour les mesures à hautes températures et dans le vide.

Type T: Cuivre / Constantan (alliage cuivre + nickel)

* Ce thermocouple est particulièrement adapté pour une utilisation à basse température (-200 à 350°C) comme pour des applications cryogéniques.

Type R: Platine-Rhodium(13%) / Platine

* adapté aux températures élevées (0 à 1650°C).

Type S: Platine-Rhodium(10%) / Platine

* adapté aux températures élevées (0 à 1650°C).

Type B: Platine-Rhodium(30%) / Platine-Rhodium(6%)

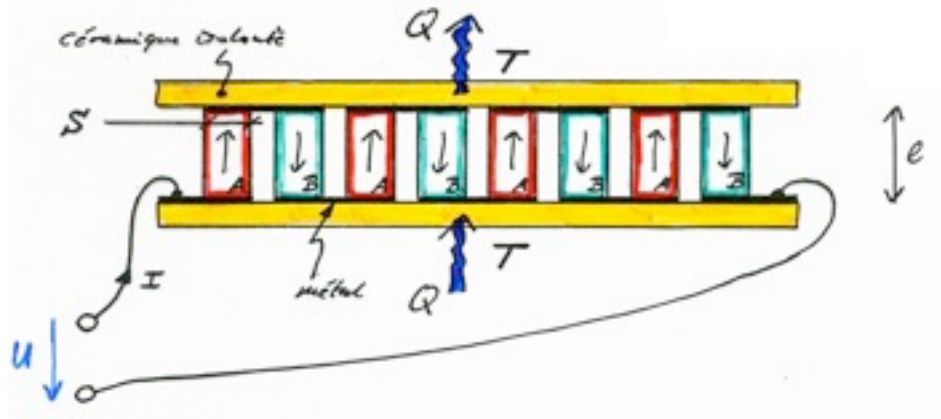
* adapté aux températures élevées (0 à 1700°C), utilisé en grande partie en verrerie industrielle.

Type C: Tungstène-Rhénium(5%) / Tungstène-Rhénium(26%)

* adapté aux températures très élevées (0 à 2320°C). Prix élevé, difficile à fabriquer, fragile. Ne doit pas être utilisé en présence d'oxygène en dessous de 500°F.

Effet Peltier: les cellules Peltier

Considérons le système suivant, appelé **cellule Peltier**, composé de barreaux métalliques ou semi-conducteurs de matériaux A et B différents, fixés entre deux plaques isolantes et connectés électriquement de telle sorte qu'un courant électrique puisse circuler en sens opposé dans les barreaux de chacune des substances A et B :



Si la température T est identique de chaque côté de la cellule et qu'il passe un courant I dans la cellule, il vient un flux de chaleur Q global et non nul entre les deux extrémités de la cellule, lié à l'**effet Peltier**, valant:

$$Q = N(\epsilon_A - \epsilon_B) T \cdot I$$

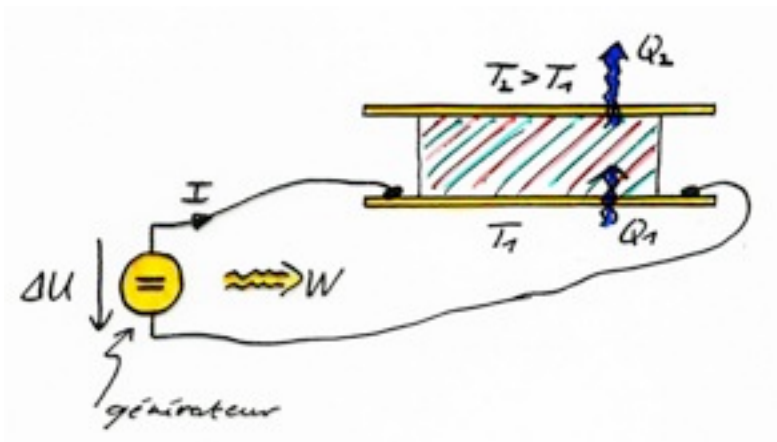
où N est le nombre total de barreaux de substance A ou B.

Ainsi, de façon isotherme, l'effet Peltier permet de construire **des cellules pompe à chaleur**. Dans le cas où la température est différente de chaque côté de la cellule, celle-ci peut fonctionner en différents modes:

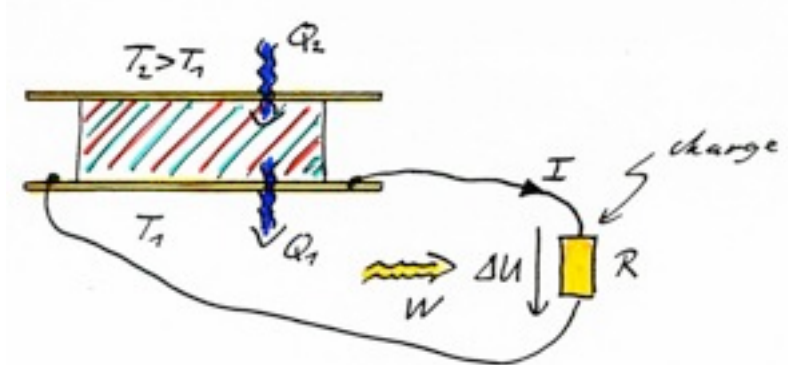
Effet Peltier: les cellules Peltier

Les cellules Peltier sont utilisées en **réfrigérateur** pour refroidir de petits objets. On peut facilement obtenir des températures de 60°C au-dessous de l'ambiante. Ce sont aussi des cellules Peltier qui sont utilisées en **thermogénérateurs** dans les générateurs nucléaires pour satellites.

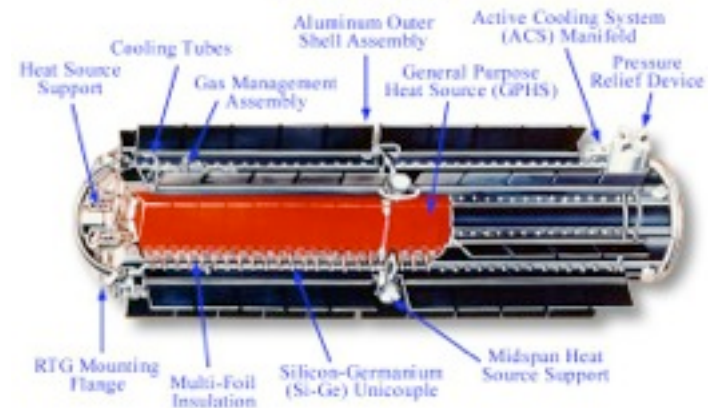
En pompe à chaleur ou réfrigérateur



En thermopile ou thermogénérateur



GPHS-RTG



Effets dépendants de H

Effet Hall

$$J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

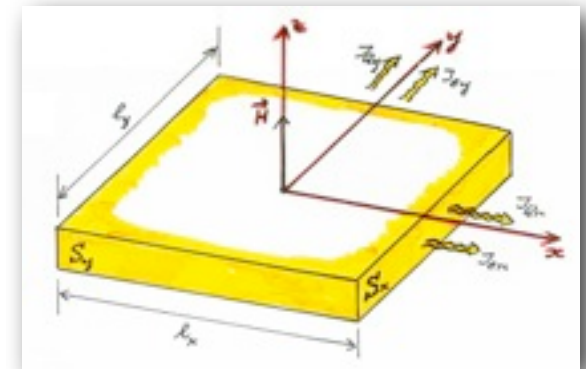
$$\Rightarrow \frac{\partial U}{\partial y} = -R_h H J_{ex}$$

$R_h =$ coefficient Hall

Cet effet donne naissance à une différence de potentiel ΔU_y selon l'axe y lorsqu'un courant circule selon l'axe x , et qui est proportionnelle au champ magnétique H :

$$\frac{\Delta U_y}{l_y} = -R_h H \frac{S_x J_{ex}}{S_x} \Rightarrow \Delta U_y = -R_h \frac{l_y}{S_x} H \cdot I_x$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S & R_h H & \varepsilon & \nu H \\ -R_h H & S & -\nu H & \varepsilon \\ \varepsilon T & \nu HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\nu HT & \varepsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} J_{ex} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



Effet Nernst

$$J_{ex} = J_{ey} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\partial U}{\partial y} = -\nu H \frac{\partial T}{\partial x}$$

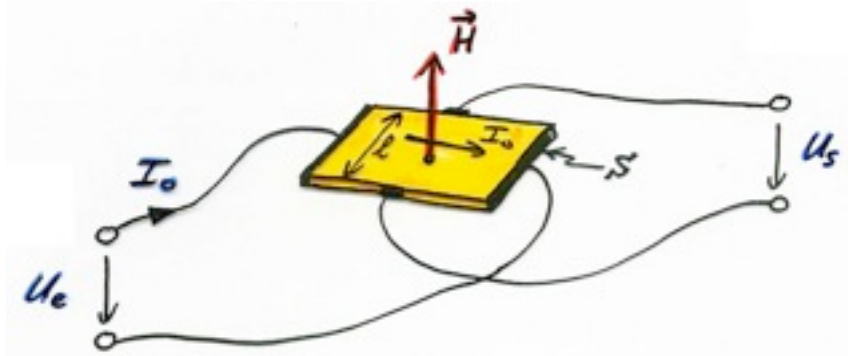
$\nu =$ coefficient Nernst

Cet effet donne naissance à une différence de potentiel ΔU_y selon l'axe y , proportionnelle au champ magnétique H , en présence d'un gradient de température selon l'axe x

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ J_{ex} \\ J_{ey} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S & R_h H & \varepsilon & \nu H \\ -R_h H & S & -\nu H & \varepsilon \\ \varepsilon T & \nu HT & -\alpha & -\alpha KH \\ -\nu HT & \varepsilon T & \alpha KH & -\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Effet Hall: les cellules Hall

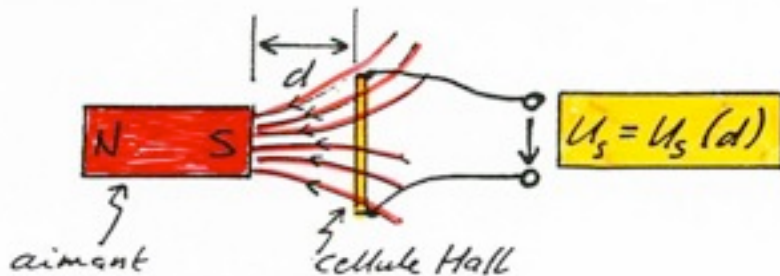
Considérons le système, appelé **cellule à effet Hall**, composé d'un barreau conducteur ou semi-conducteur configuré de la façon suivante:



En appliquant un courant constant aux bornes d'entrée, il vient, dans la direction transversale à la direction du courant appliqué, et en présence d'un champ magnétique non nul, une tension à la sortie, due à l'effet Hall, et qui vaut :

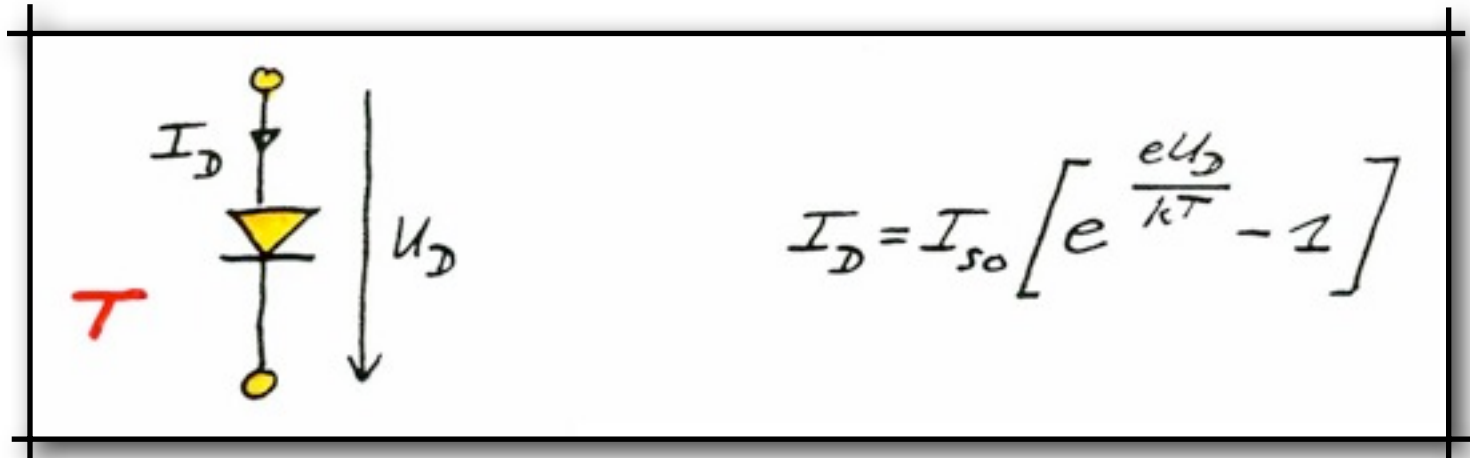
$$U_s = R_H \frac{l}{s} H \cdot I_0 = \alpha H \cdot I_0$$

La cellule à effet Hall peut donc être utilisée comme **un capteur pour la mesure des champs magnétiques**. En utilisant un aimant permanent, on peut aussi en faire **un capteur de distance** ou **un détecteur de proximité** :



Effets de jonctions semi-conductrices

Les *jonctions semi-conductrices pn* que l'on trouve dans les diodes et les transistors présentent plusieurs effets que l'on peut utiliser pour réaliser des *capteurs* (effets thermiques, photovoltaïques, magnétiques, etc.) .



Effets photovoltaïque et photoconductif

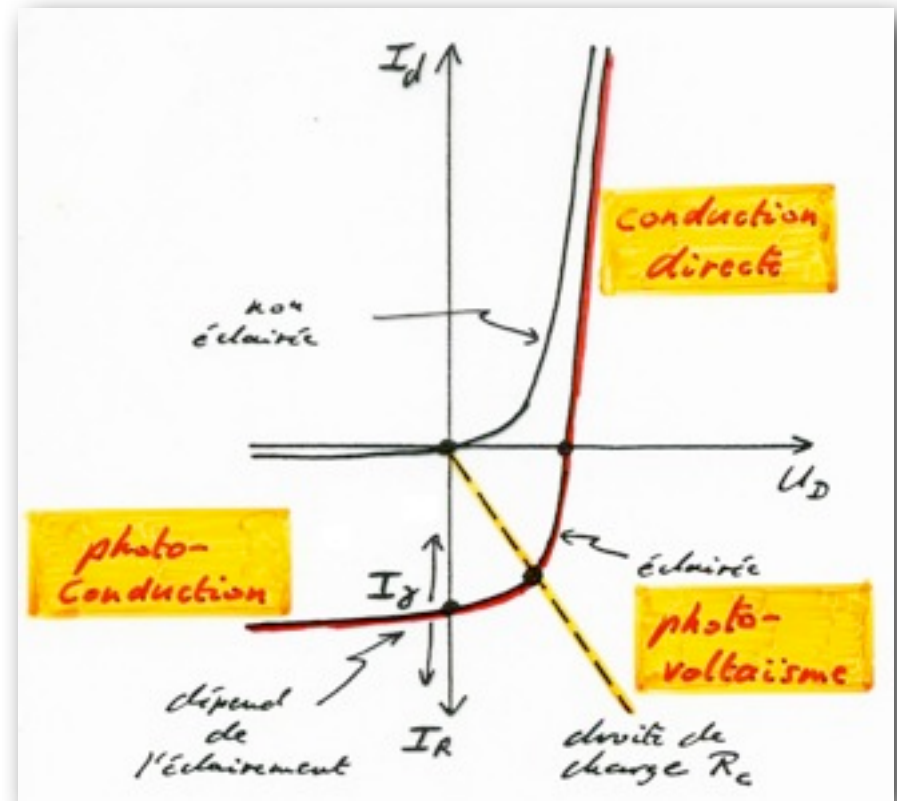
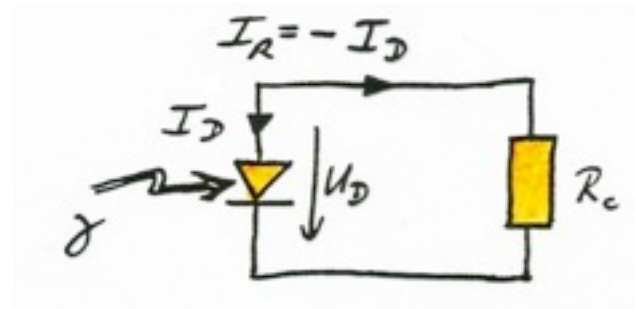
Lorsqu'une jonction semi-conductrice est soumise à un éclairage, le courant dans cette jonction s'écrit :

$$I_D = I_{s0} \left[e^{\frac{eU_D}{kT}} - 1 \right] - I_\gamma$$

Il apparaît un courant I_γ proportionnel à l'intensité lumineuse qui tombe sur la jonction.

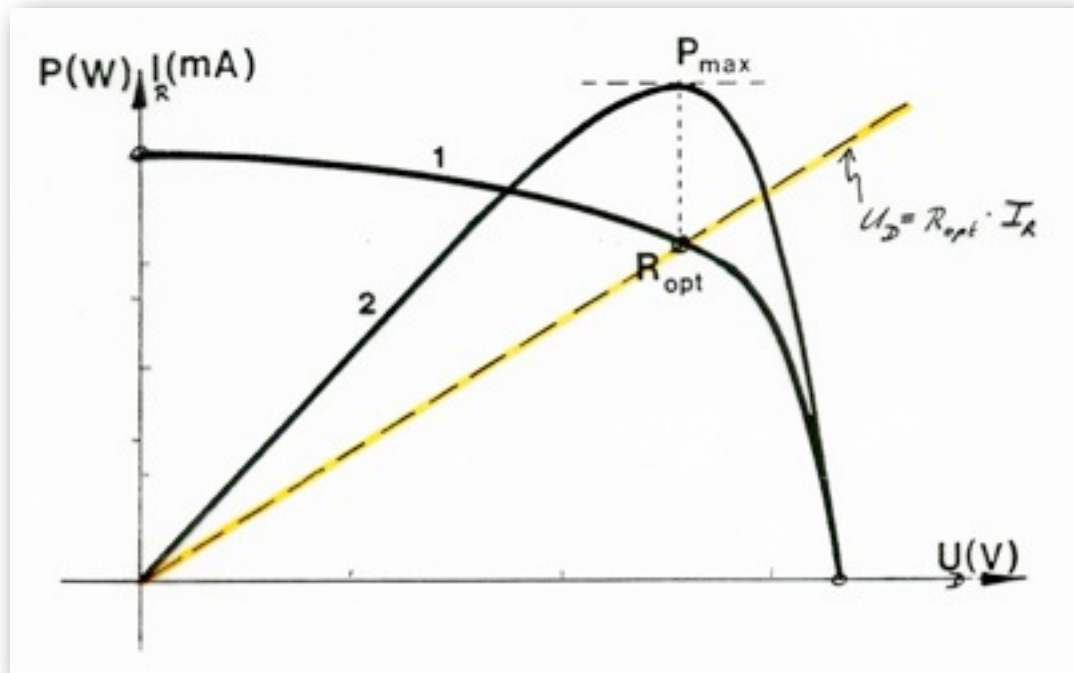
La jonction se comporte alors comme une source de courant : c'est une cellule photovoltaïque, ou générateur solaire, qui peut être utilisé comme capteur pour la mesure de l'intensité lumineuse.

Le point de fonctionnement d'un circuit composé d'une cellule photovoltaïque et d'une charge R_c alimentée par celle-ci est donné par l'intersection de la caractéristique de la diode $I_R = I_R(U_D)$ avec la droite de charge $U_D = R_c I_R$.



Effet photovoltaïque: générateur solaire

Pour un éclairement donné, il existe une valeur optimale de la charge R_c qui maximise **la puissance fournie** ($P = I_R U_D$) par la cellule voltaïque:



Cellule monocristalline



Cellule polycristalline



Cellule amorphe

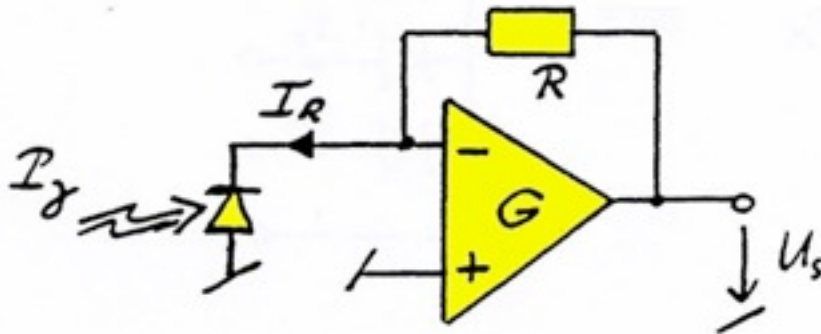
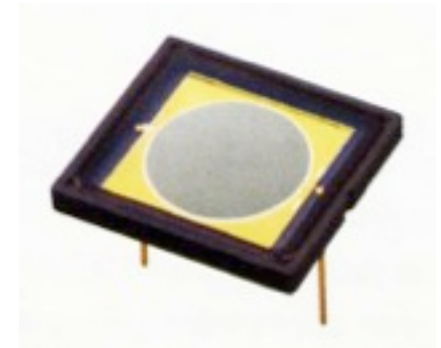
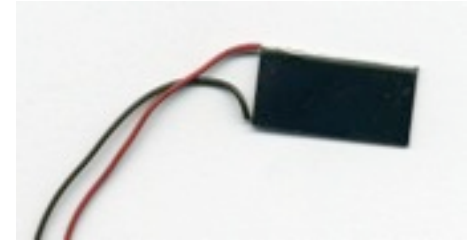


Effet photovoltaïque: capteur d'intensité lumineuse

Si on veut utiliser l'effet photovoltaïque pour mesurer l'intensité lumineuse, il est judicieux de choisir une résistance de charge très petite, car le courant I_R est alors proportionnel à la puissance lumineuse P_γ fournie par la diode :

$$I_R = \alpha P_\gamma$$

Le montage électronique capable de mesurer le courant I_R en assurant une résistance de charge R_c très petite est évidemment l'ampli courant :

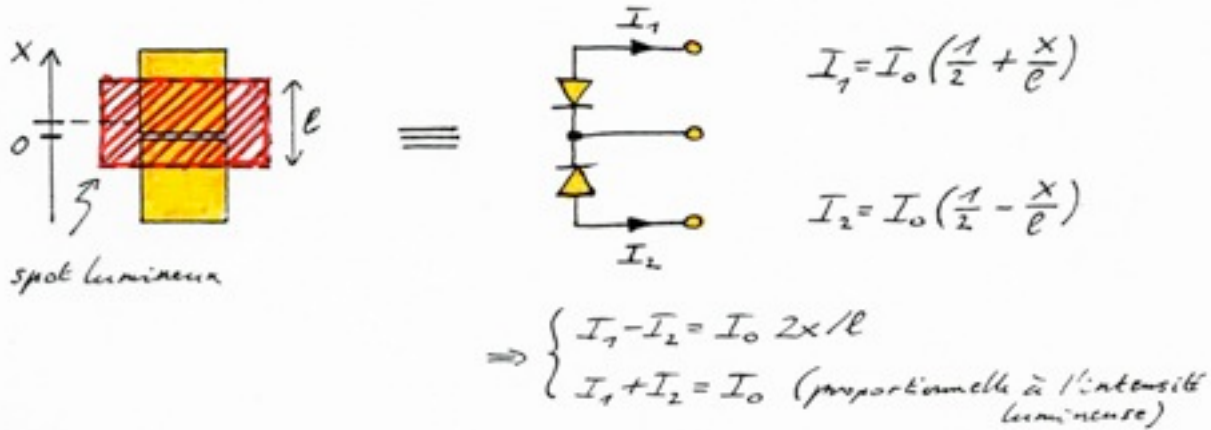


$$U_s = R I_R = \alpha' P_\gamma$$

$$R_c \equiv R/G$$

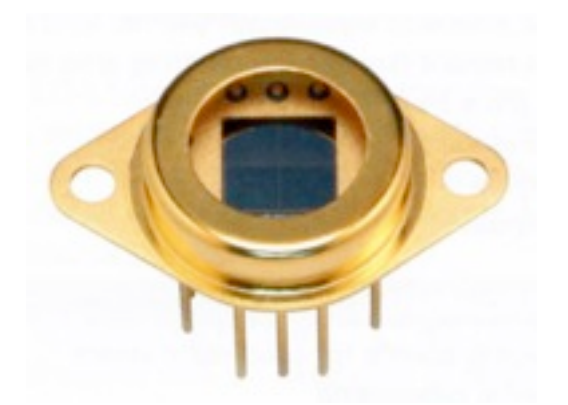
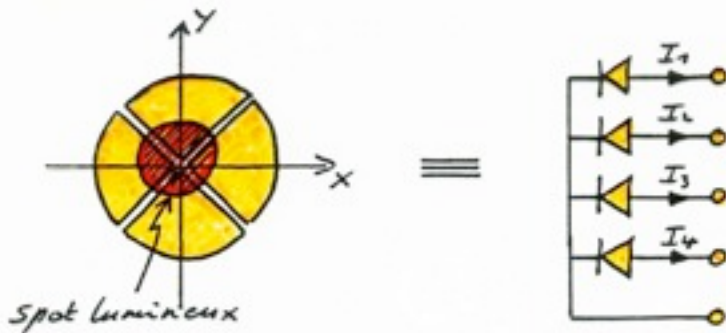
Effet photovoltaïque: capteur différentiel de position

Les cellules photovoltaïques sont souvent utilisées en mode différentiel, comme **capteur de position d'un spot lumineux** (en général spot laser réfléchi par une surface mobile) :



Un tel système différentiel ne sera linéaire que si les résistances de charge aux bornes de sortie I_1 et I_2 sont très faibles, d'où la **nécessité d'utiliser des amplis courant pour mesurer I_1 et I_2** .

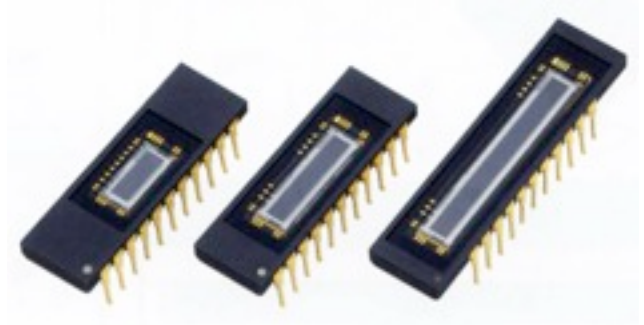
On utilise aussi des **cellules photovoltaïques différentielles à quatre quadrants** permettant la mesure de la position d'un spot lumineux sur un plan, dans les directions x et y :



Optoélectronique intégrée: senseur d'images

On fabrique des **capteurs d'images** qui se caractérisent par:

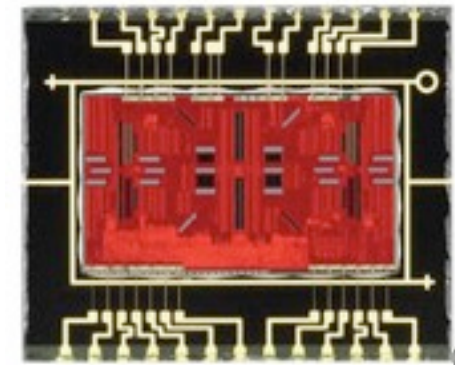
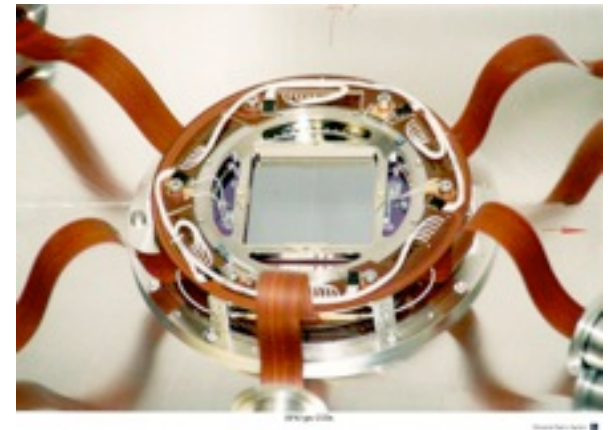
- leur domaine d'applications (photographie, caméra, scanner, recherche, astronomie, etc.)
- leur géométrie (1D, 2D) et leur résolution spatiale (nombres de pixels)
- leur sensibilité lumineuse et spectrale (visible, IR, UV, RX, etc.)
- leur technologie (CCD, CMOS, JFET, LBCAST, etc.)
- leur vitesse de réponse (on trouve des caméras digitales à $>20'000$ im./s)
- etc.



Canon CMOS
sensor,
EOS 400D

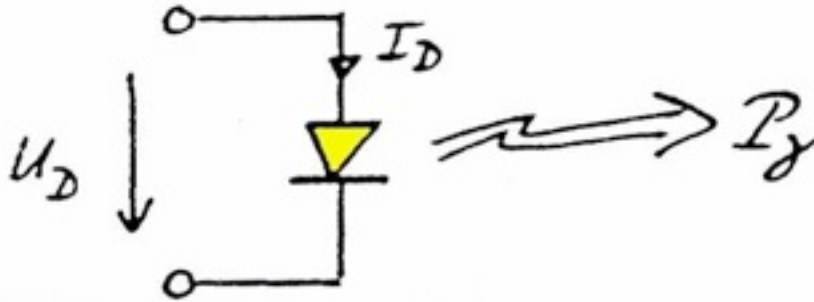
Sony CCD
sensor,
Nikon D2X

Foveon X3
sensor,
Sigma SD14



Effet photo-émissif: diodes LED et diodes LASER

Suivant la technologie utilisée pour réaliser la jonction semi-conductrice d'une diode, cette jonction peut émettre de la lumière lorsqu'elle est traversée par un courant direct.



En optoélectronique, on fabrique des **diodes LED** (light emitting diode) capables d'émettre de la lumière dans différentes bandes de fréquence (infra-rouge, rouge, orange, vert, bleu, etc.).

Par une réalisation géométrique spéciale, on sait aussi réaliser des cavités résonnantes conduisant à des diodes qui émettent de la lumière cohérente à une fréquence donnée : ce sont les **diodes LASER**



Effets de transport de charges

Ce principe est à la base de nombreux capteurs, comme, par exemple :

- **les capteurs de pression alphanon** : un gaz dont on veut mesurer la pression (1000 à 10^{-4} torr) est ionisé par des particules alpha émises par une couche de radium déposée sur une des électrodes.
- **les capteurs de pression Penning** : un gaz très raréfié entre les électrodes est sujet à une décharge froide dépendante de la pression (10^{-3} à 10^{-13} torr).
- **les capteurs Geiger-Müller** : un tube contenant des électrodes est rempli d'un gaz à basse pression, qui peut être ionisé par l'arrivée de particules extérieures énergétiques (rayonnements α, β, γ) : c'est un capteur de mesure des radiations ionisantes.
- **les tubes à rayons X** : des électrons sont accélérés vers une anode. Il y a émission de rayons X par freinage des électrons et par excitation des atomes de l'anode.
- **les photomultiplicateurs** : un tube contenant des électrodes est mis sous vide. L'arrivée d'un photon sur la cathode arrache des électrons à celle-ci (*effet photoélectrique*). Un dispositif astucieux d'électrodes placées à des potentiels croissants permet de multiplier ce nombre d'électrons de sorte à augmenter la sensibilité du dispositif.

Photomultiplicateur avec résolution spatiale



Photomultiplicateurs

