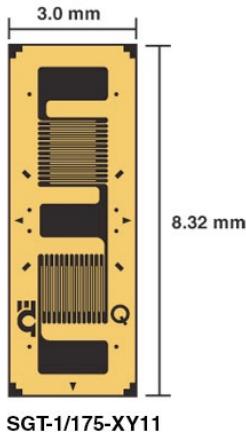
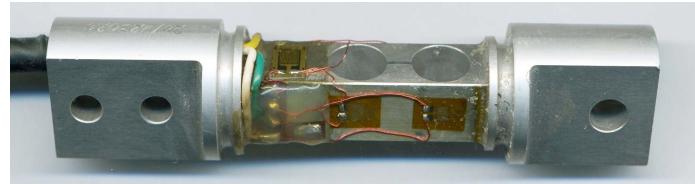
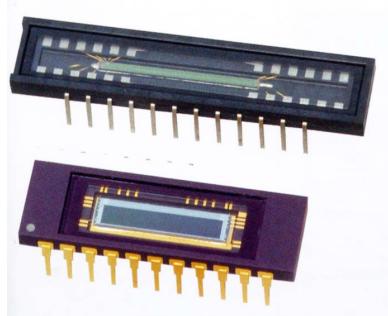


## Transducteurs et capteurs I

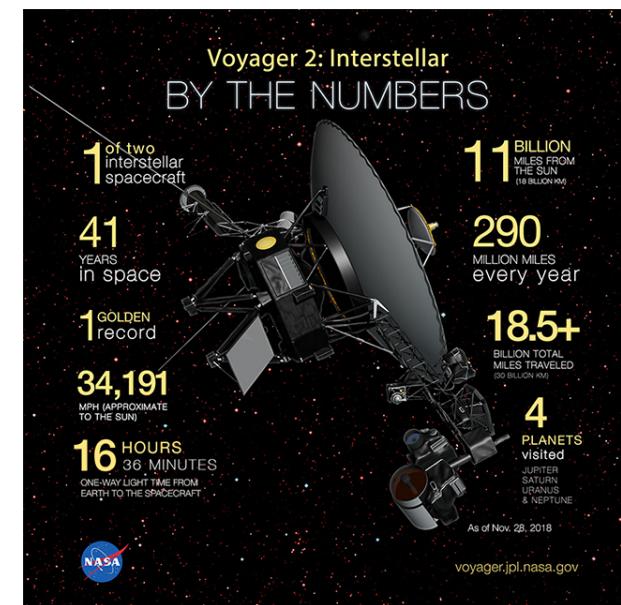
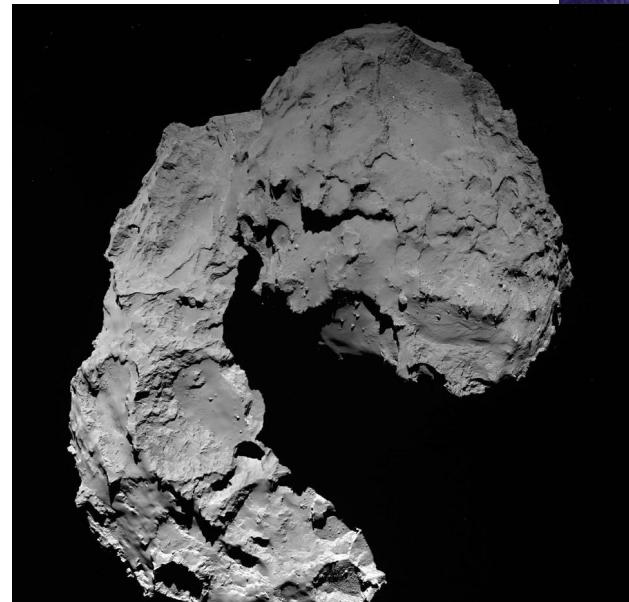
D. Mari



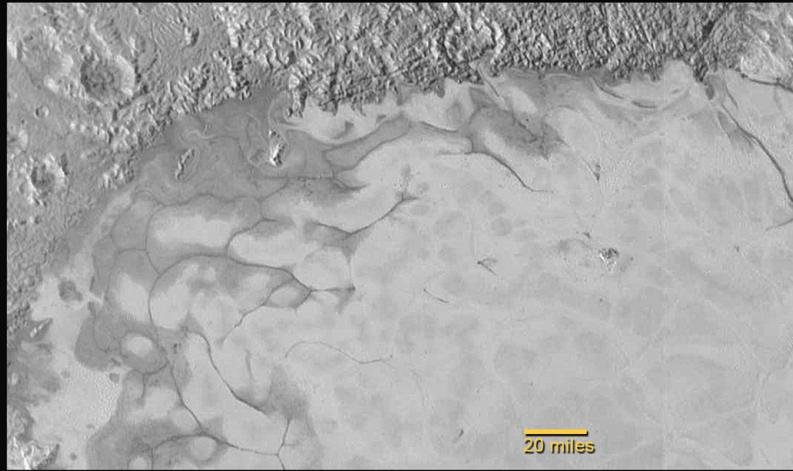
SGT-1/175-XY11



# Le monde a changé !



# New Horizons

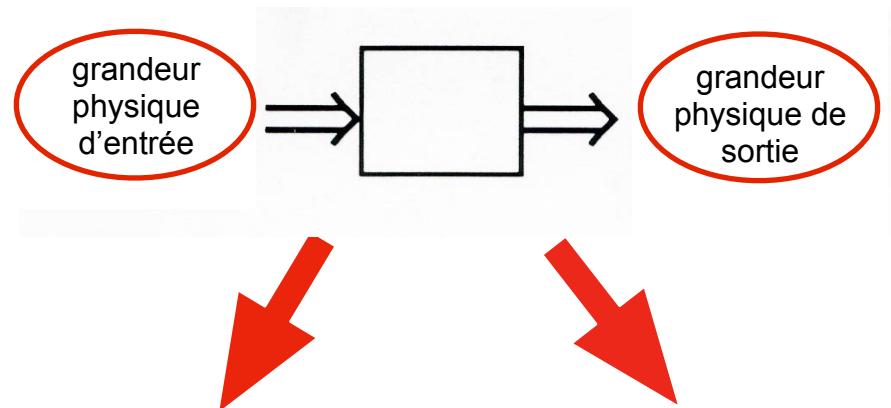


Link NASA



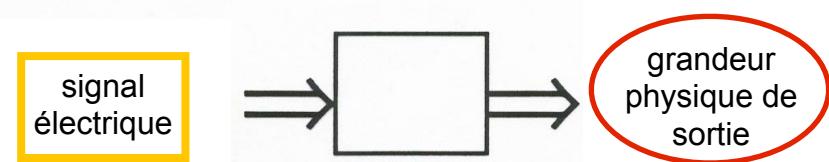
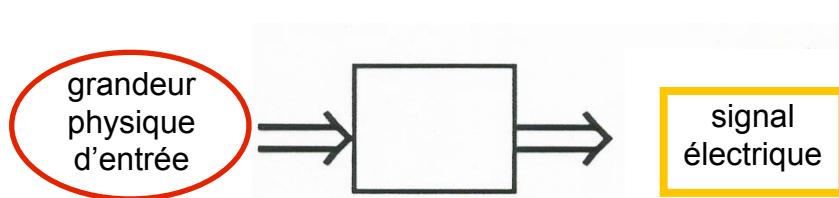
# Terminologie

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 :



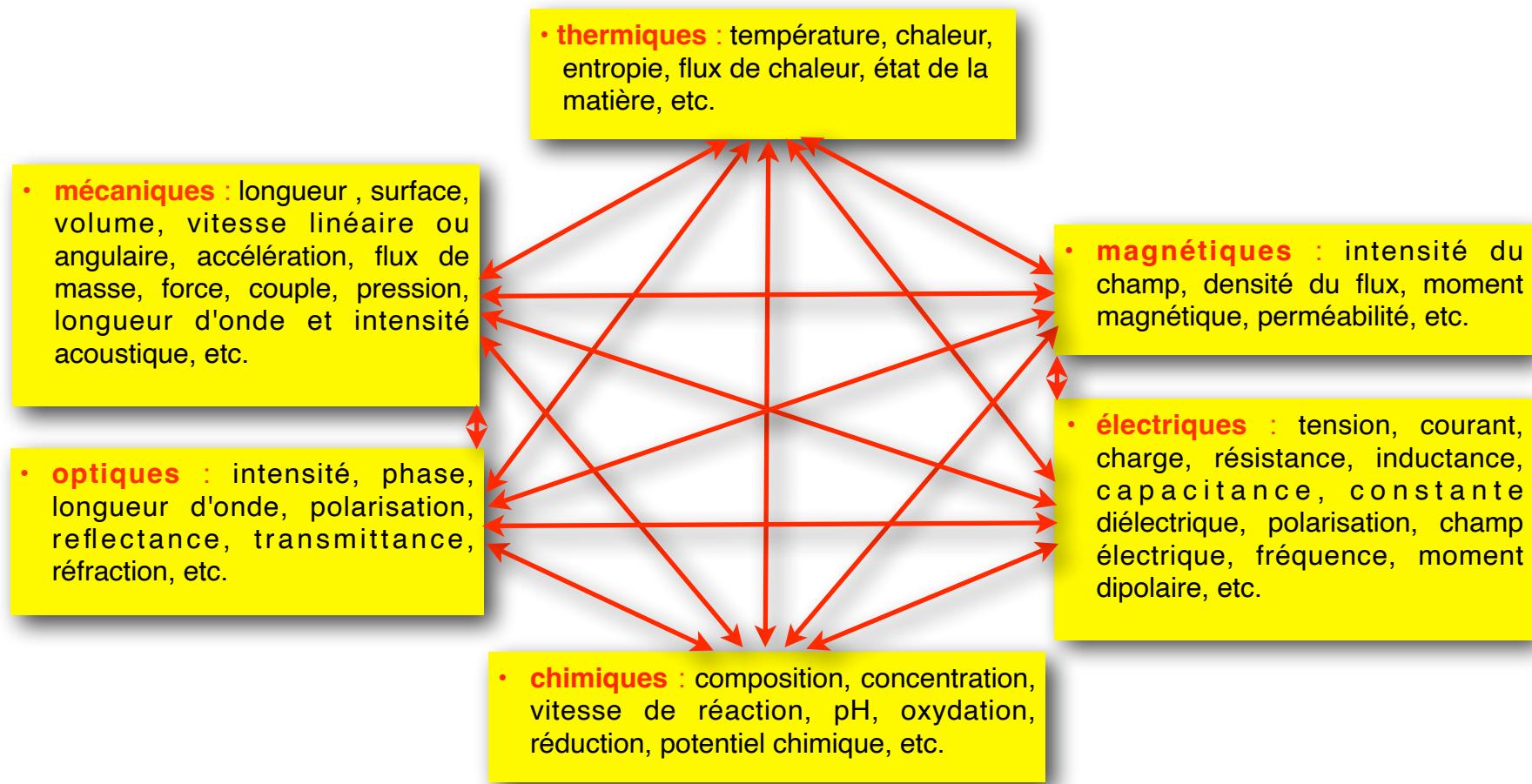
- **les capteurs, senseurs ou détecteurs** qui fournissent comme signal de sortie une quantité électrique utilisable en réponse à une grandeur, une propriété ou une condition physique à mesurer

- **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.



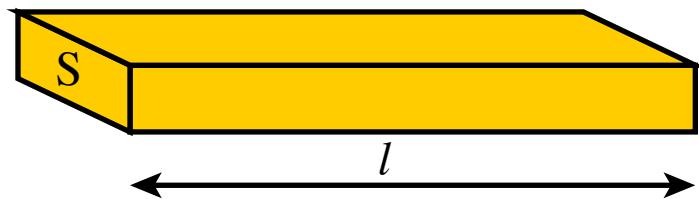
# Principes physiques de transduction

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 :



# Effets résistifs

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



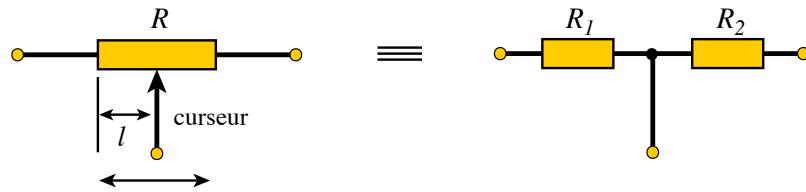
$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

où  $\rho$  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

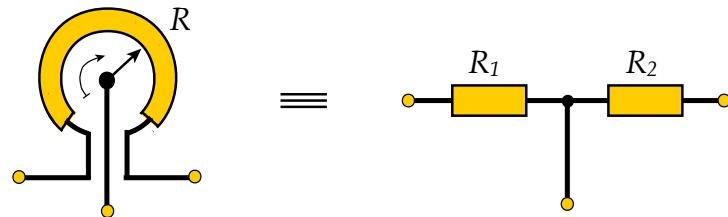


$$R_1 = R \frac{l}{l_0}$$

$$R_2 = R \frac{l_0 - l}{l_0}$$



- des capteurs de déplacements angulaires



$$R_1 = R \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

$$R_2 = R \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0}$$



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.

# Effets thermorésistifs

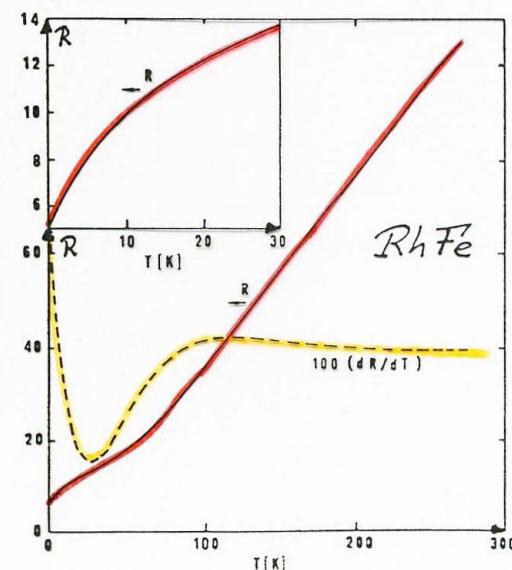
La résistivité  $\rho$  des matériaux dépend de la température  $T$  :

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

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)

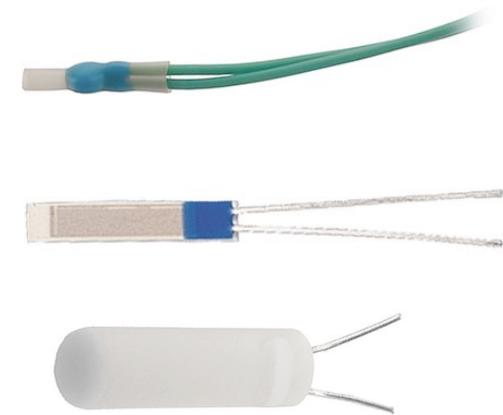
Ce sont par exemple **les métaux** (Pt, RhFe, etc.). Leur résistivité en fonction de  $T$  peut être décrite par une approximation polynomiale :



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

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

Capteurs de température PTC:  
la sonde Pt100

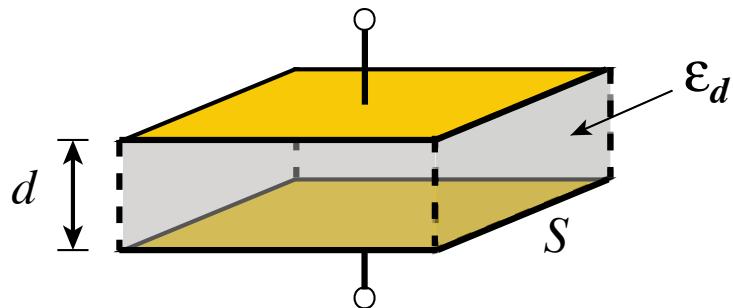


Résistances PTC



# Effets capacitifs et diélectriques

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

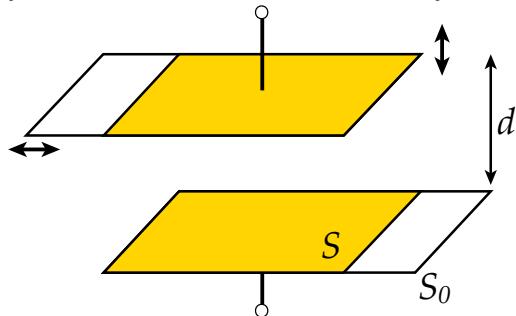


$$C = \epsilon_d \frac{S}{d}$$

où  $\epsilon_d$  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:

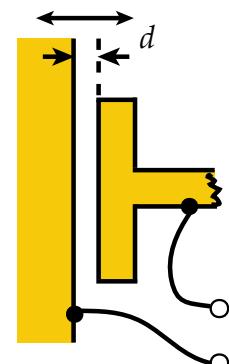


$$C = C_0 + \frac{d_0}{d} C_p$$

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

$C_p$  capacité parasite

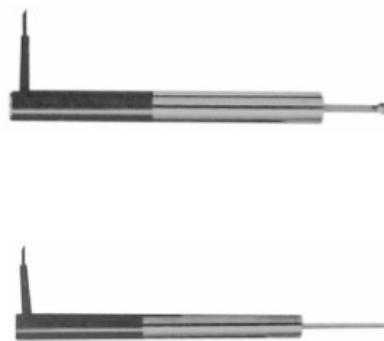
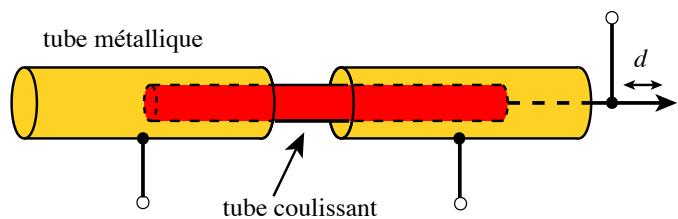
Nanomètre capacitif



- 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.

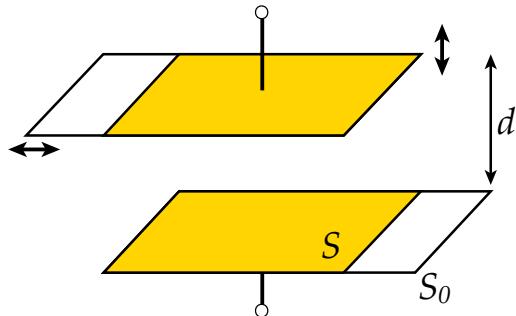
- les capteurs capacitifs basés sur la mesure de  $S$  sont utilisés pour *des mesures précises de plus grands déplacements* (micromètres capacitifs).

## 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:



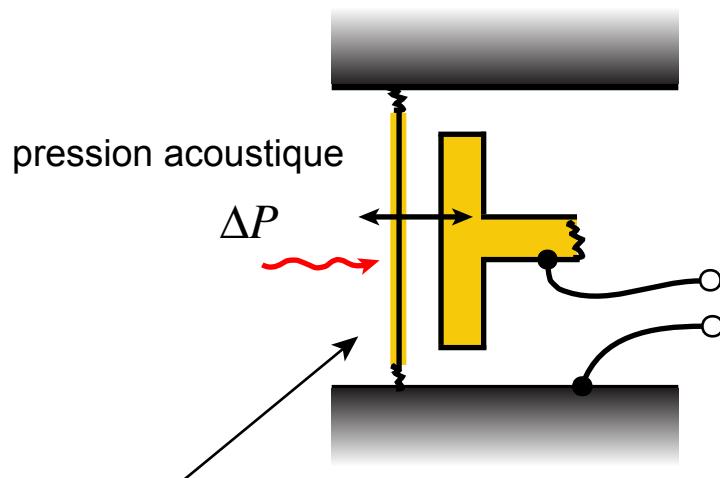
$$C = C_0 + \frac{d_0}{d} C_p$$

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

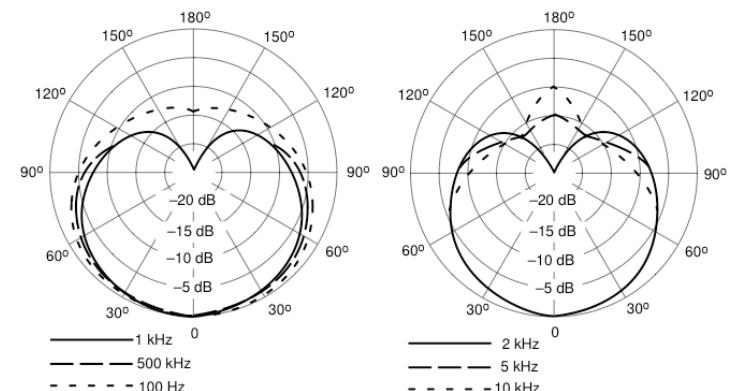
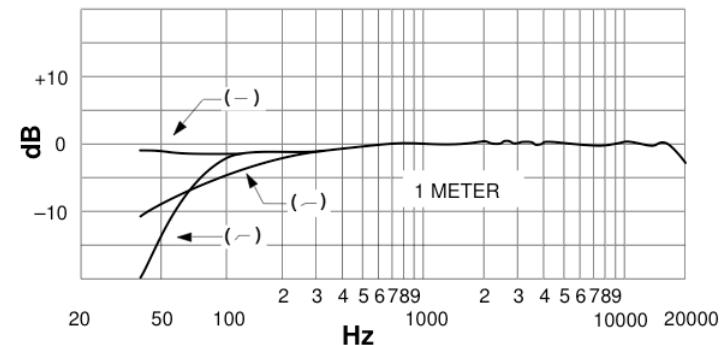
$C_p$  capacité parasite



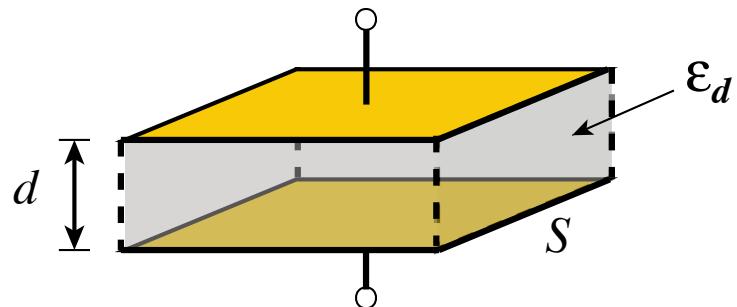
## Microphone capacitif



membrane métallique mobile



# Effets diélectriques

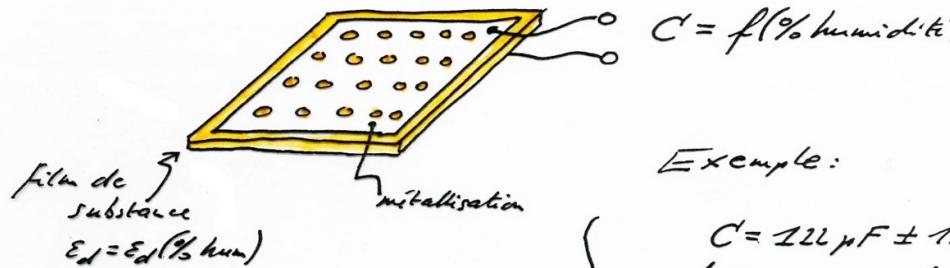


$$C = \epsilon_d \frac{S}{d}$$

Sonde capacitive de mesure du taux hygrométrique



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



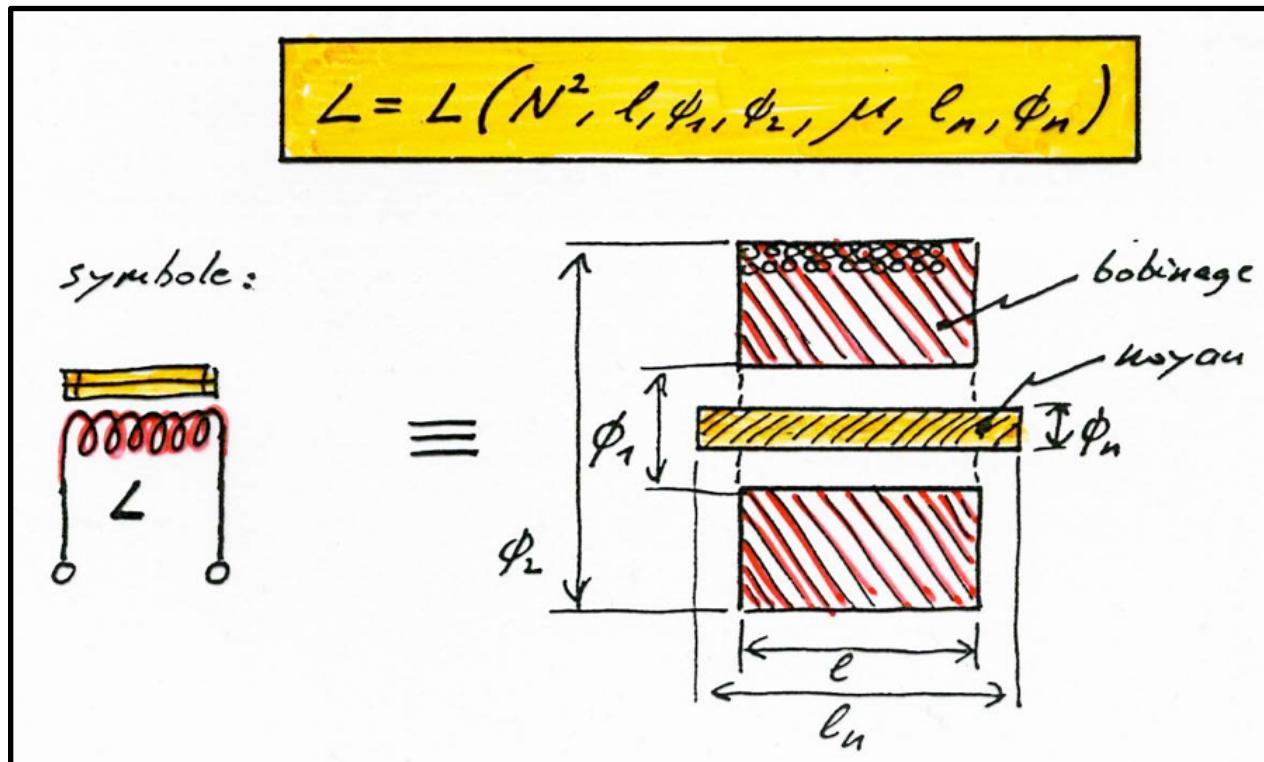
Example:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = 220 \mu F \pm 15 \mu F \ (45\%) \\ \Delta C / \Delta \% = 0,4 \mu F / \% \\ \text{plage} = 10 \text{ à } 90 \% \\ T = 0 \text{ à } 85^\circ C \end{array} \right.$$



# 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  $\mu$**  du noyau et des dimensions géométriques du noyau (longueur  $l_n$  et diamètre  $\phi$ ):

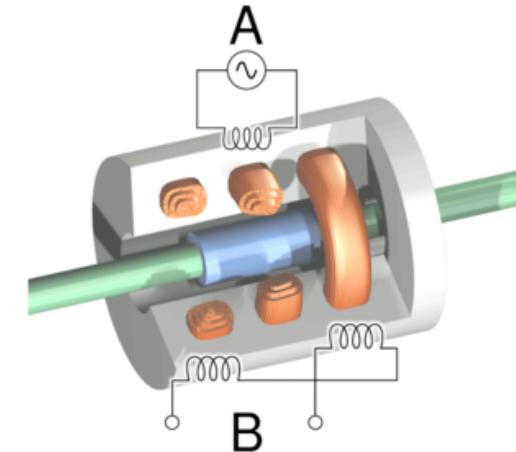


# Effet d'inductance mutuelle variable

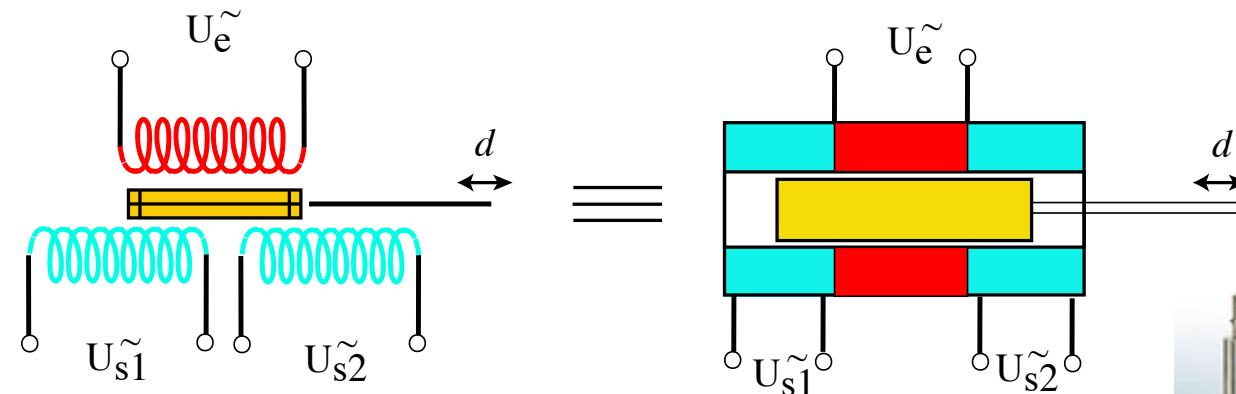
*L'inductance mutuelle*, ou couplage magnétique, entre deux selfs peut être modifiée en changeant la géométrie du noyau ferromagnétique doux.

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  $\mu\text{m}$  au  $\text{cm}$ .

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)



$$U_s^{\sim} = \alpha U_i \quad \& \quad U_s^{\sim} = \alpha \cdot U_i \cdot \frac{d_0 - d}{d_0}$$



# 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

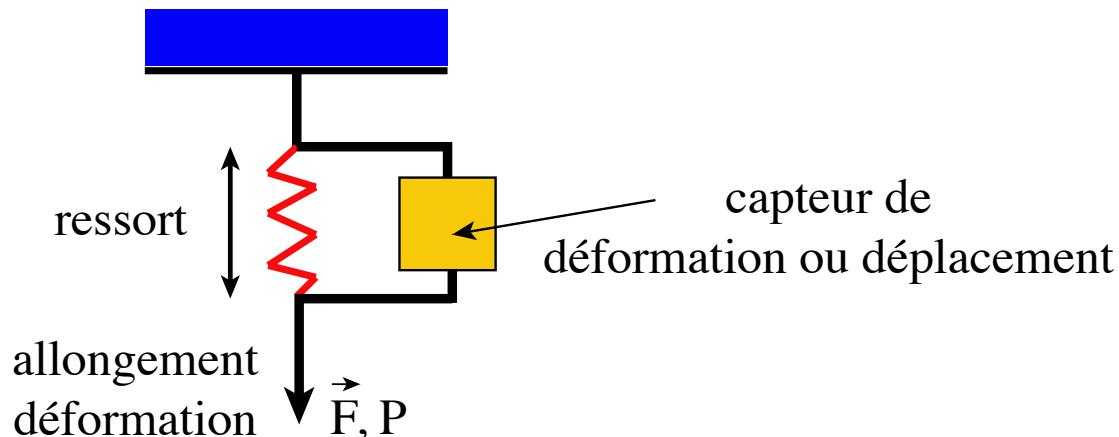
Cependant, pour certaines grandeurs physiques, il est très difficile de faire appel à des effets de transduction directe. On doit alors trouver **des effets de transductions multiples**.

# 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** :

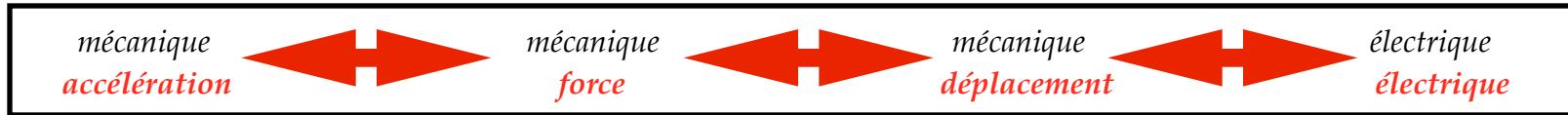


En général, on s'arrange pour que, sur la plage de mesure de la force  $f$  ou de la pression  $p$  du capteur, le déplacement ou la déformation de l'élément élastique reste très faible : on parle de "**capteur dur**", se déformant très peu.



# Capteurs d'accélération

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



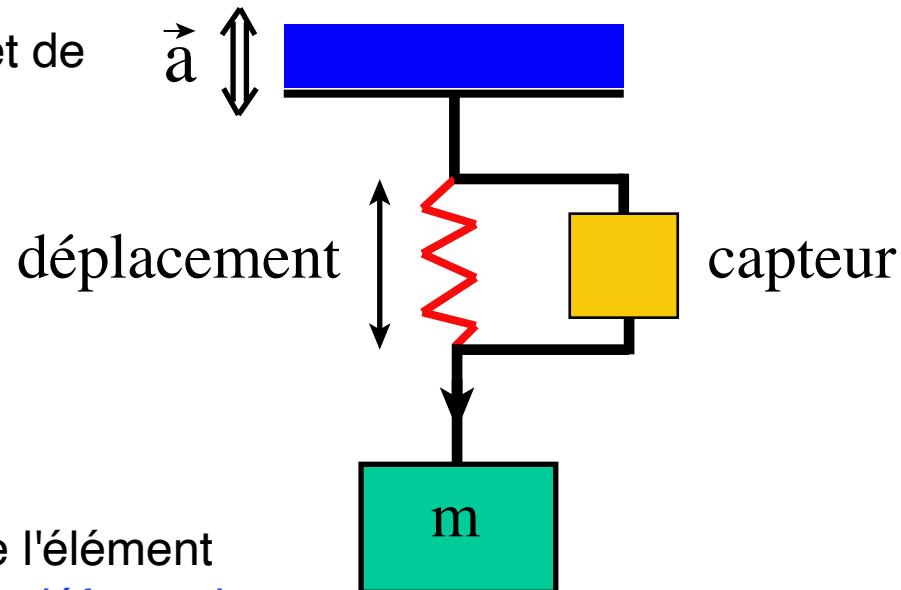
On utilise une masse  $m$  attachée à un élément élastique. En-dessous de la fréquence de résonance de ce système, on a

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

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

$$\varepsilon = J\sigma, = J \frac{|\vec{F}|}{S} = \frac{Jm}{S} |\vec{a}|$$

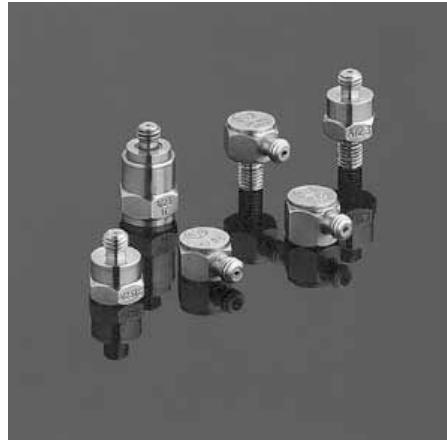
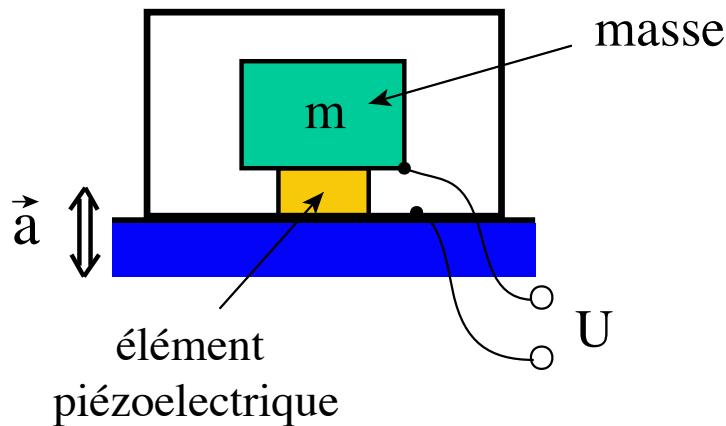
où  $a$  est l'accélération du support.



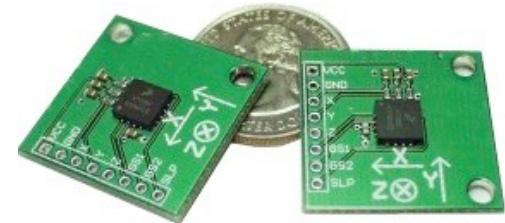
Il suffit alors de mesurer la déformation de l'élément élastique à l'aide d'un capteur sensible à la déformation

# Capteurs d'accélération

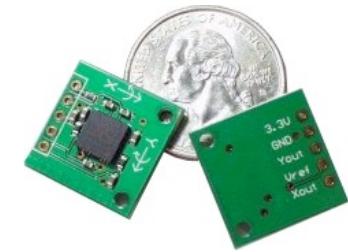
## Accéléromètre à élément piézo-électrique



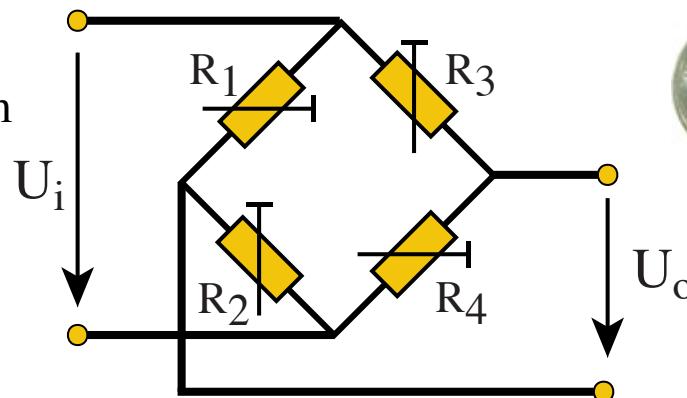
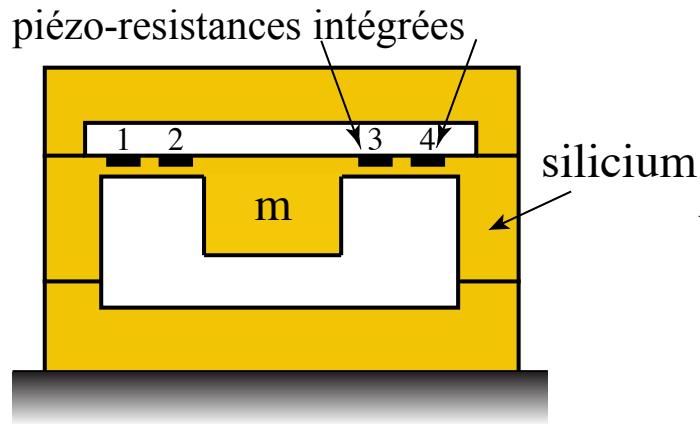
Accéléromètre 3 axes



Gyroscope 2 axes



## Accéléromètre en technologie électronique intégrée



Accéléromètre 3 axes  
avec gyroscope 2 axes

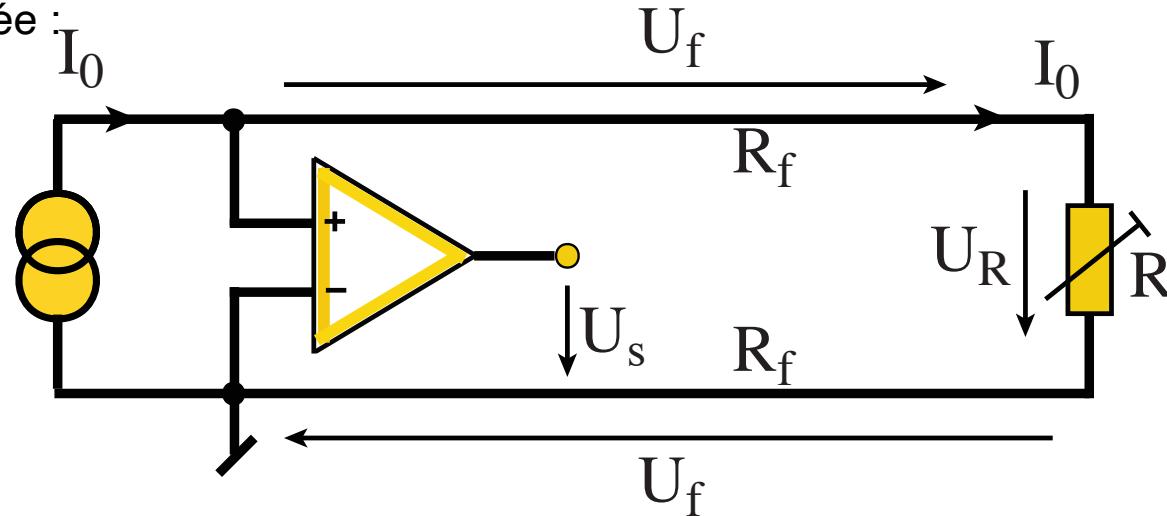


# Montage électrique des capteurs

## Montage d'un capteur résistif

Pour les capteurs dont l'effet de transduction conduit à *une variation de la résistance* (thermorésistance, piézorésistance, diode thermique, etc.), il s'agit de mesurer leur résistance avec précision, à l'aide d'une source de courant et d'un ampli différentiel à très haute impédance d'entrée :

Montage à deux fils



Dans **le montage à 2 fils** ci-dessus, il apparaît une différence de potentiel  $U_f$  due à la résistance des fils, de sorte que la tension  $U_s$  s'écrit :

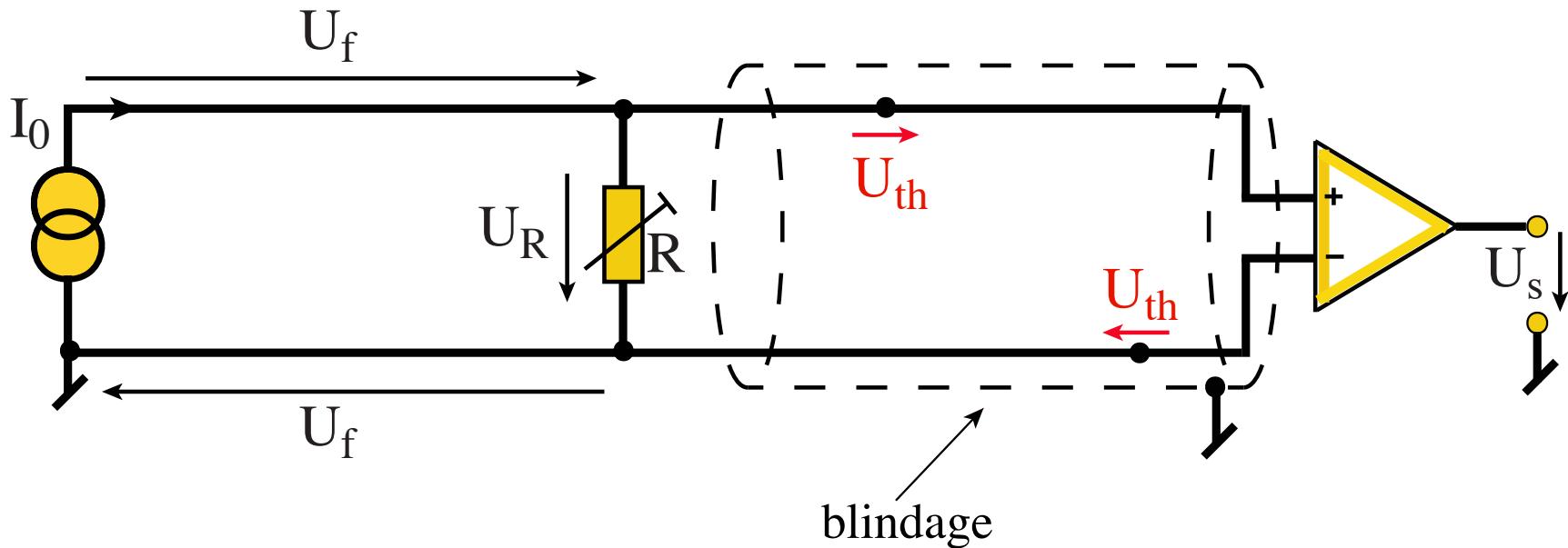
$$U_s = G(2U_f + U_R) = G(2R_f + R)I_0$$

Si la résistance des fils  $R_f$  est du même ordre de grandeur que la résistance  $R_c$  du capteur, la sensibilité du système est diminuée, et il peut apparaître des erreurs dues à la dépendance thermique de  $R_f$ .

# Montage d'un capteur résistif

## Montage à quatre fils simple

Pour pallier à cet inconvénient (éliminer différence de potentiel  $U_f$  due à la résistance des fils), on préfère généralement **le montage à 4 fils** suivant :

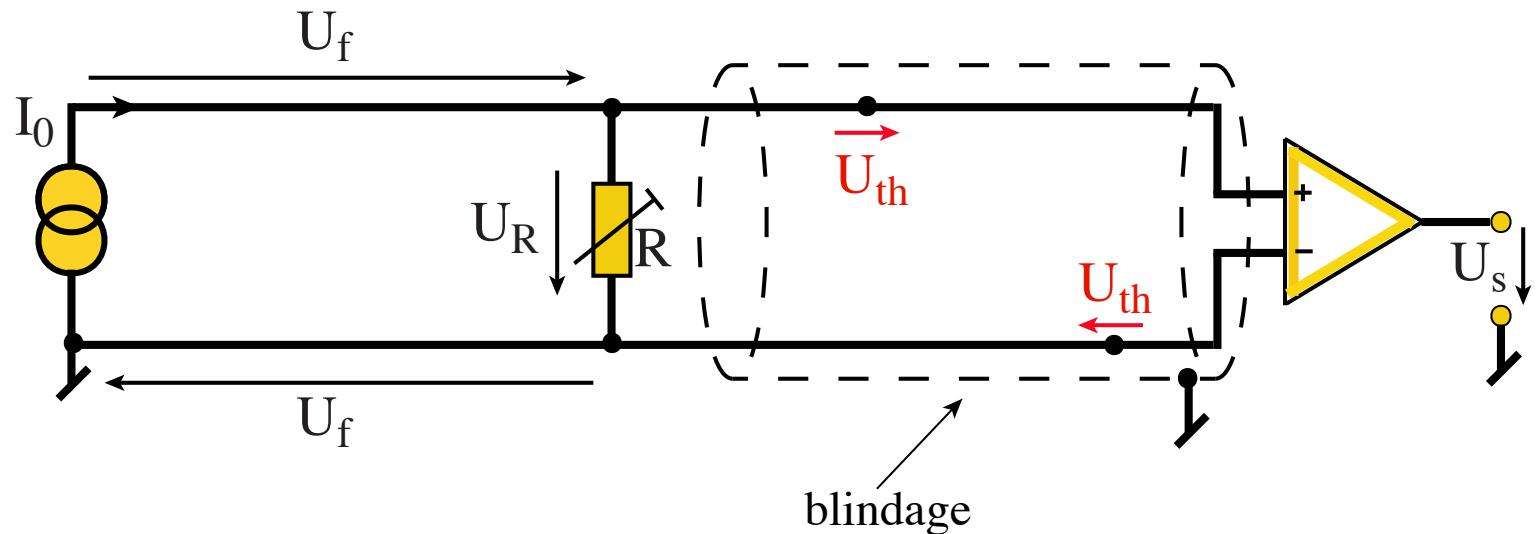


$$U_s = GRI_0 + G \sum U_{th}$$

Comme l'impédance d'entrée de l'ampli différentiel est très élevée, le courant dans les fils de mesure est très faible et il n'y apparaît plus de tension  $U_f$ . Par contre, il peut encore y apparaître des tensions parasites provenant d'effet électromagnétiques perturbateurs; c'est pourquoi on utilisera généralement des fils blindés pour ce circuit.

Si les fils de mesure sont longs, composés de différents métaux, et qu'ils traversent des zones à différentes températures, il peut encore y apparaître **des tensions dues à des effets thermocouples**.

# Montage d'un capteur résistif



$$U_s = GRI_0 + G \sum U_{th}$$

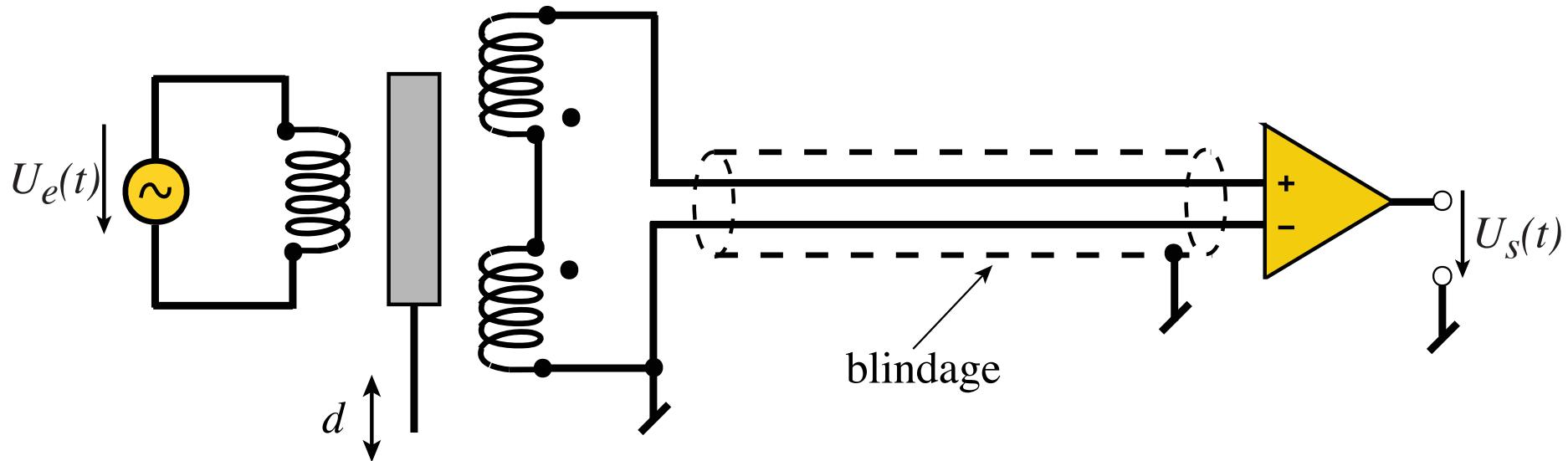
Si les tensions thermocouples  $U_{th}$  sont du même ordre de grandeur que  $I_0 \cdot R$  , ce qui peut arriver si  $R_C$  à mesurer est très faible, on peut éliminer l'effet de  $U_{th}$  en effectuant deux mesures en inversant le sens du courant: une mesure avec un courant  $I_0$  et l'autre avec un courant  $-I_0$  , de sorte que:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 \Rightarrow U_{s1} = GRI_0 + G \sum U_{th} \\ -I_0 \Rightarrow U_{s2} = -GRI_0 + G \sum U_{th} \end{array} \right.$$

$$U_{s1} - U_{s2} = 2GRI_0$$

# Montage d'un capteur inductif différentiel

Les capteurs de déplacement utilisant *un transformateur différentiel à noyau mobile* se montent ainsi:



$$U_e(t) = U_{e0} \sin \omega t \rightarrow U_s(t) = \alpha \cdot U_{e0} \cdot G \cdot d \cdot \sin \omega t$$