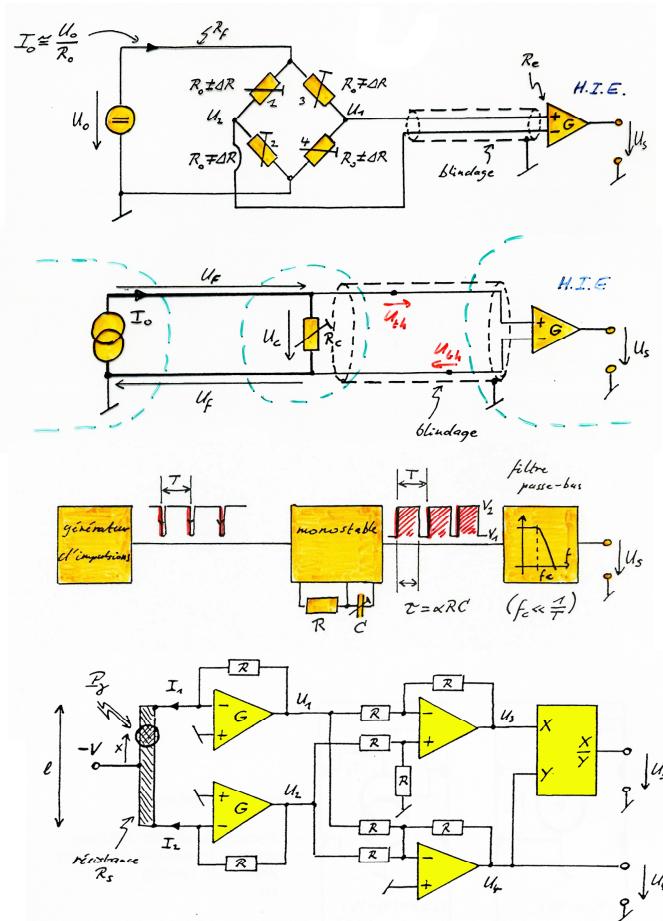


## Transducteurs et capteurs II

D. Mari

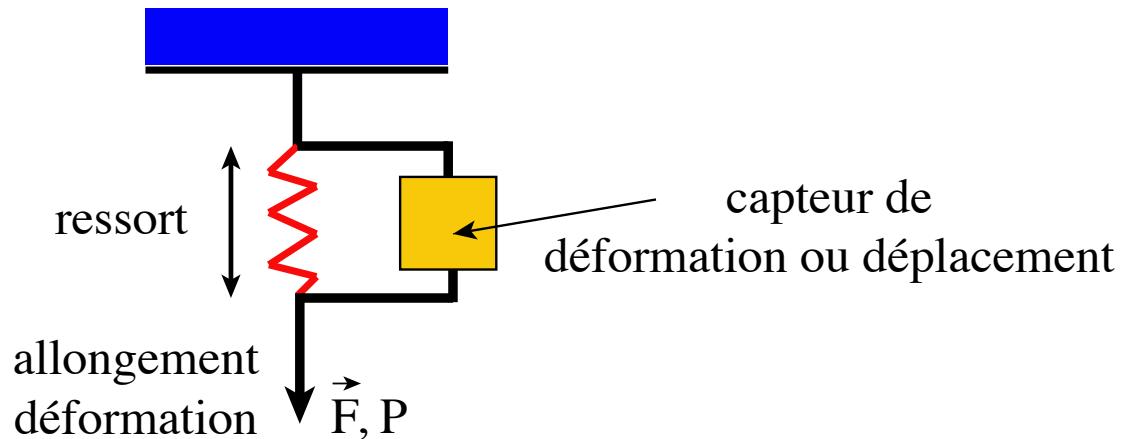


# Capteurs de force et de pression

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** :



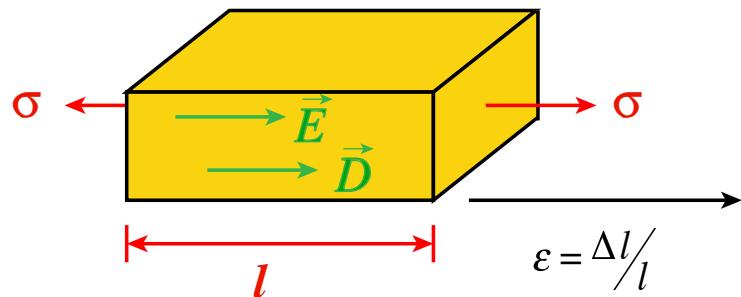
En général, on s'arrange pour que, sur la plage de mesure de la force  $f$  ou de la pression  $p$  du capteur, le déplacement ou la déformation de l'élément élastique reste très faible : on parle de "**capteur dur**", se déformant très peu.

# Effets piézoélectriques: capteur de force direct

Certains matériaux, dits *piézoélectriques*, possèdent un fort couplage entre les champs de nature électrique  $E$  et  $D$  et les champs de nature élastique  $\varepsilon$  et  $\sigma$  (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:

$$D_x = \epsilon_d E_x + \gamma \sigma_{xx}$$
$$\epsilon_{xx} = J \sigma_{xx} + \gamma' E_x$$

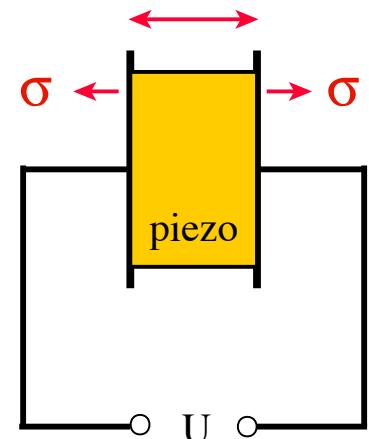
$\epsilon_d$  constante diélectrique  
 $J$  complaisance ( $1/E$ )  
 $\gamma$  constante piézoélectrique



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



Capteur-actuateur  
piézoélectrique  
 $\varepsilon$



$\varepsilon$  et / ou  $\sigma \Rightarrow U$  (capteur)  
 $U \Rightarrow \sigma$  et / ou  $\varepsilon$  (actuateur)

# Effets piézoélectriques

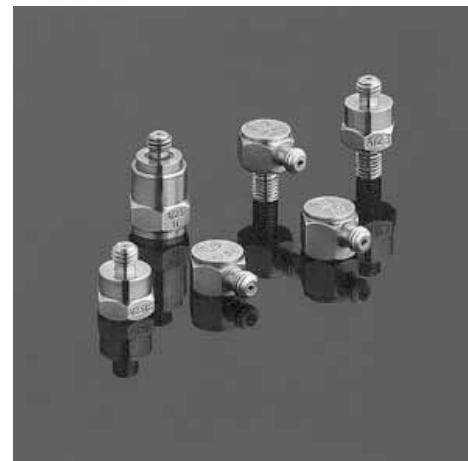
L'effet piézoélectrique dans les monocristaux (quartz, NbLi, etc.), dans les céramiques (PZT) et dans certains polymères (PVDF) est à la base de la technologie de nombreux transducteurs :



## Transformateurs électro-acoustiques



## Capteurs de force, de pression et d'accélération

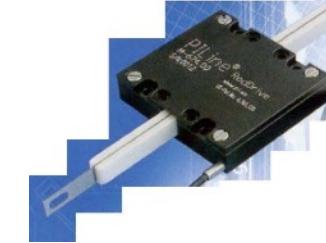


# Effets piézoélectriques

## Actuateurs divers

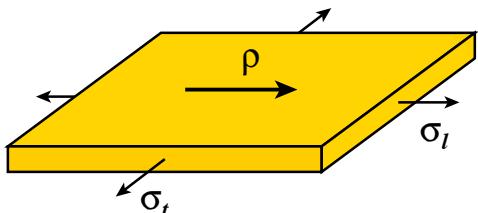
Moteurs à ultrasons (auto-focus d'objectifs d'appareils photo), miroirs déformables (téléscopes), scanners pour microscopes (à effet tunnel, à force atomique, etc.), électrooptique (commutateurs et modulateurs optiques, filtres de couleur, affichage et stockage optique, holographie, guide d'ondes), etc..

## Haptic



# Effets piézorésistifs

Certains matériaux présentent une dépendance de leur résistivité électrique  $\rho$  en les contraintes mécaniques qui leur sont appliquées, respectivement longitudinalement  $\sigma_l$  et transversalement  $\sigma_t$  à la direction du courant électrique. La variation relative de résistivité s'écrit:



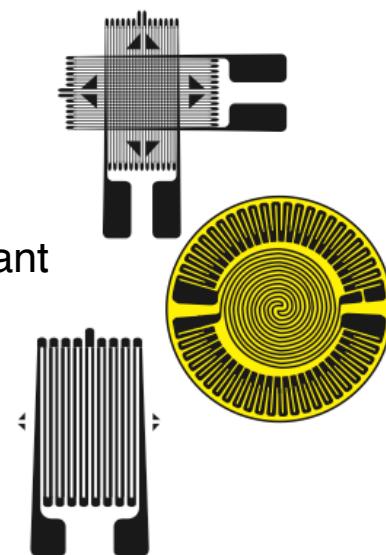
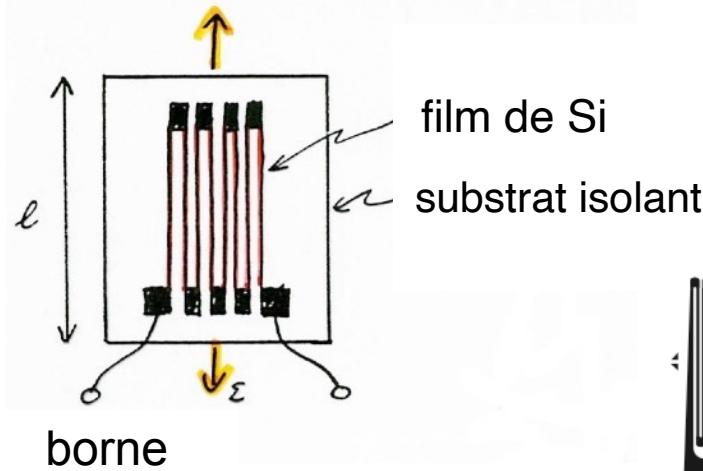
$$\frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t$$

avec *les constantes de piézorésistivité*  
 $\pi_l$  et  $\pi_t$

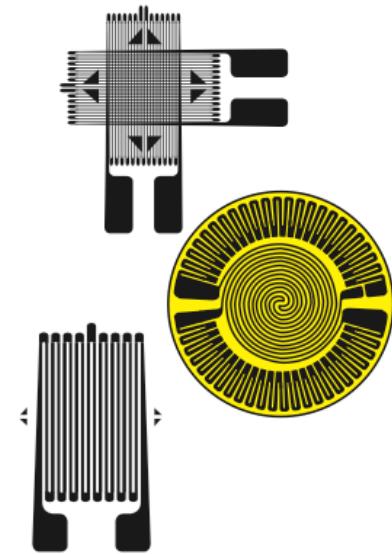
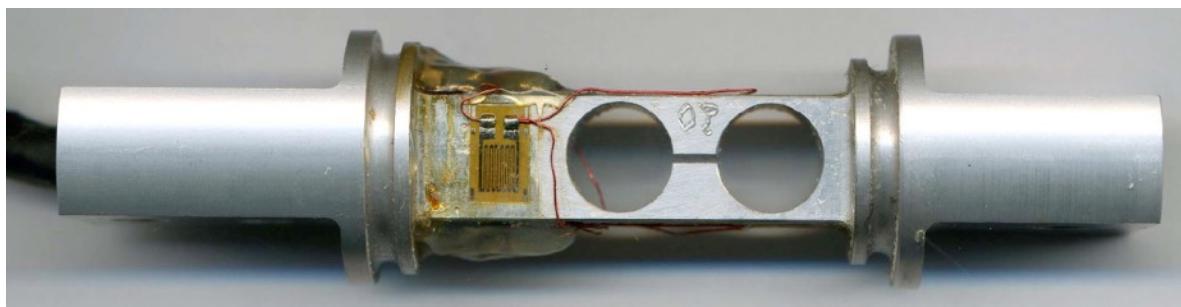
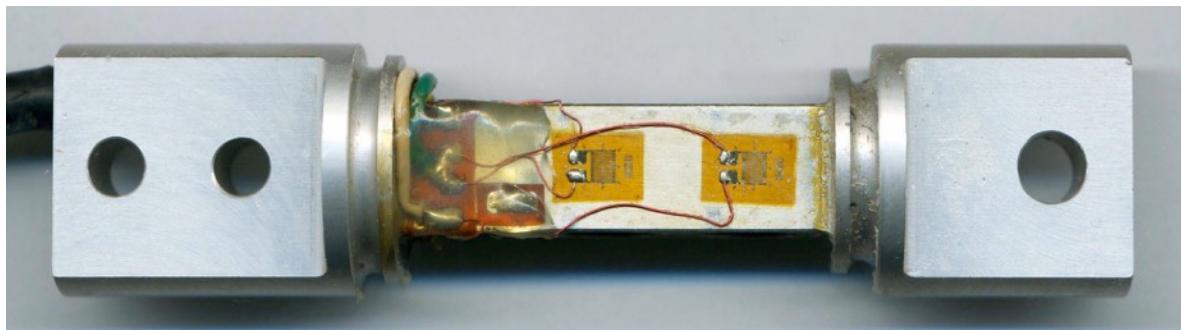
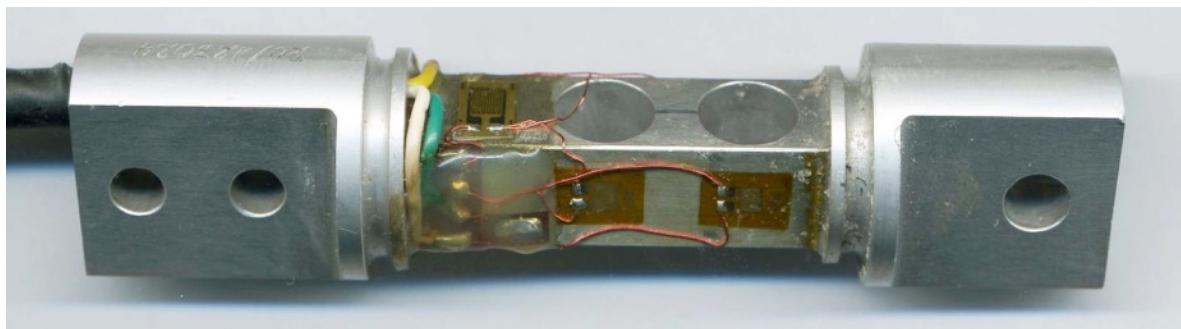
## Jauge de déformation piézorésistive (Strain gauge)

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):

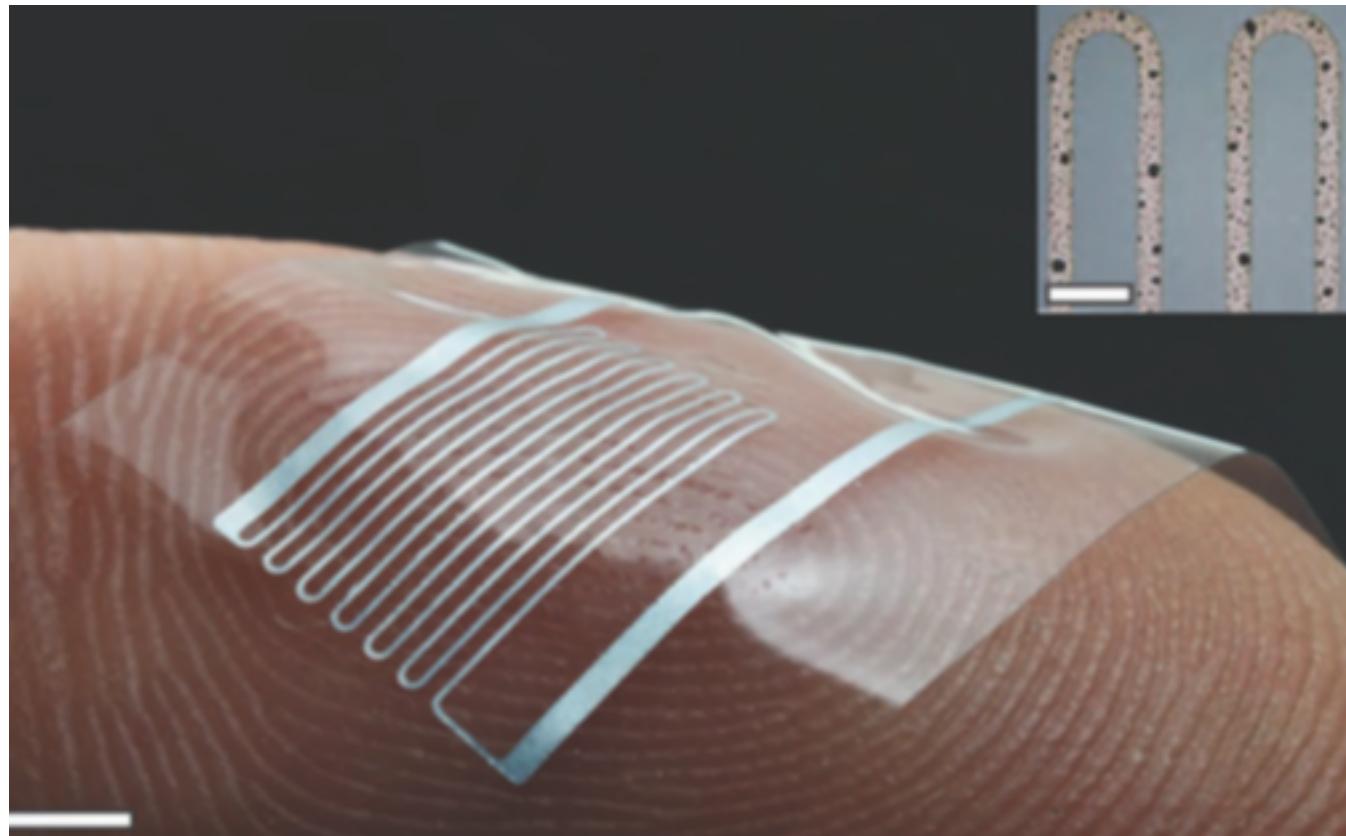
$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta l}{l} = G \varepsilon$$



## Exemple de montage d'un capteur de force à jauge de déformation



# Capteurs pour NeuroProthèses



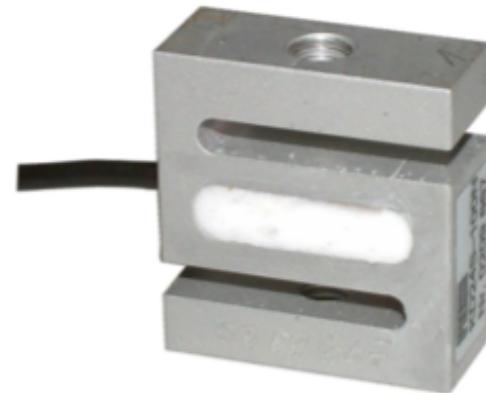
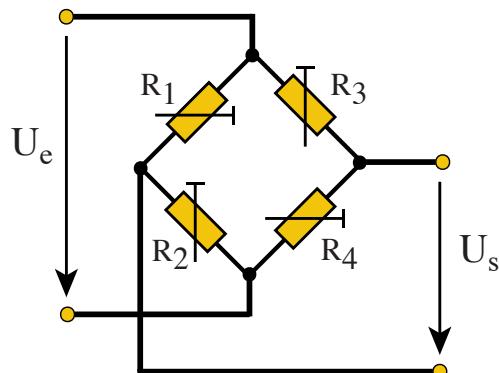
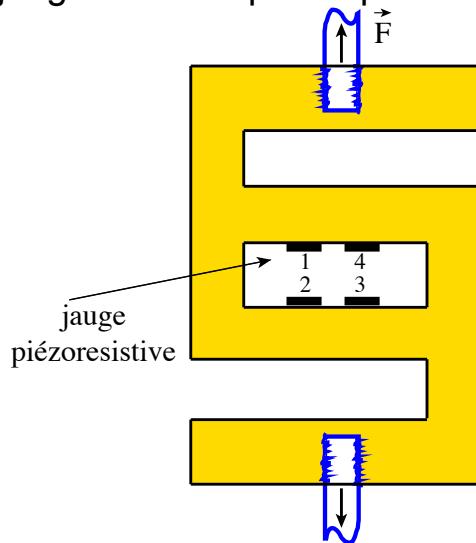
**LABORATORY FOR SOFT BIOELECTRONIC INTERFACES LSBI**

# Capteurs de force et de pression

## Capteurs (ou cellules) de force à jauge de déformation

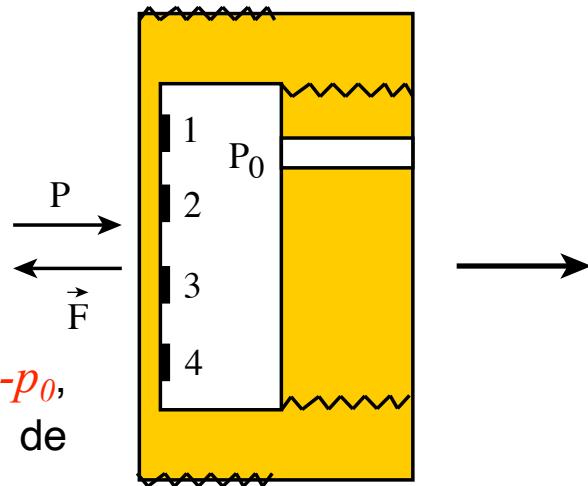
Les jauge de déformation piézo-résistives sont montées en pont, de sorte que les jauge 1 et 4 travaillent en opposition aux jauge 2 et 3 (allongement-rétrécissement). Ce montage en pont a deux avantages essentiels:

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



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

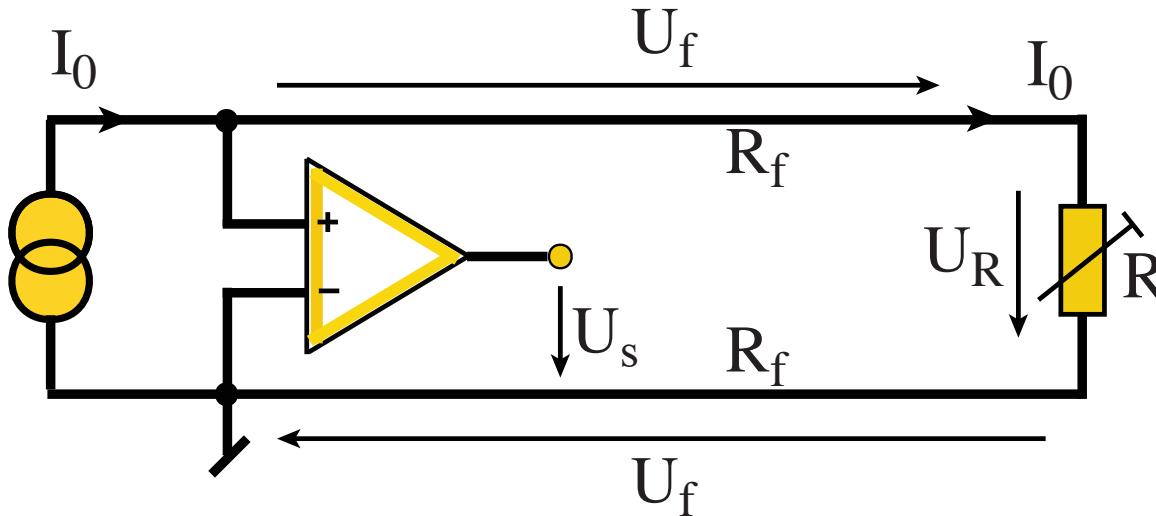
Sous l'effet de la force  $f$  ou de la différence de pression  $\Delta p = p - p_0$ , la membrane se déforme et agit sur le pont de jauge de déformation piézorésistives travaillant en opposition



# Montage électrique des capteurs

## Montage d'un capteur résistif

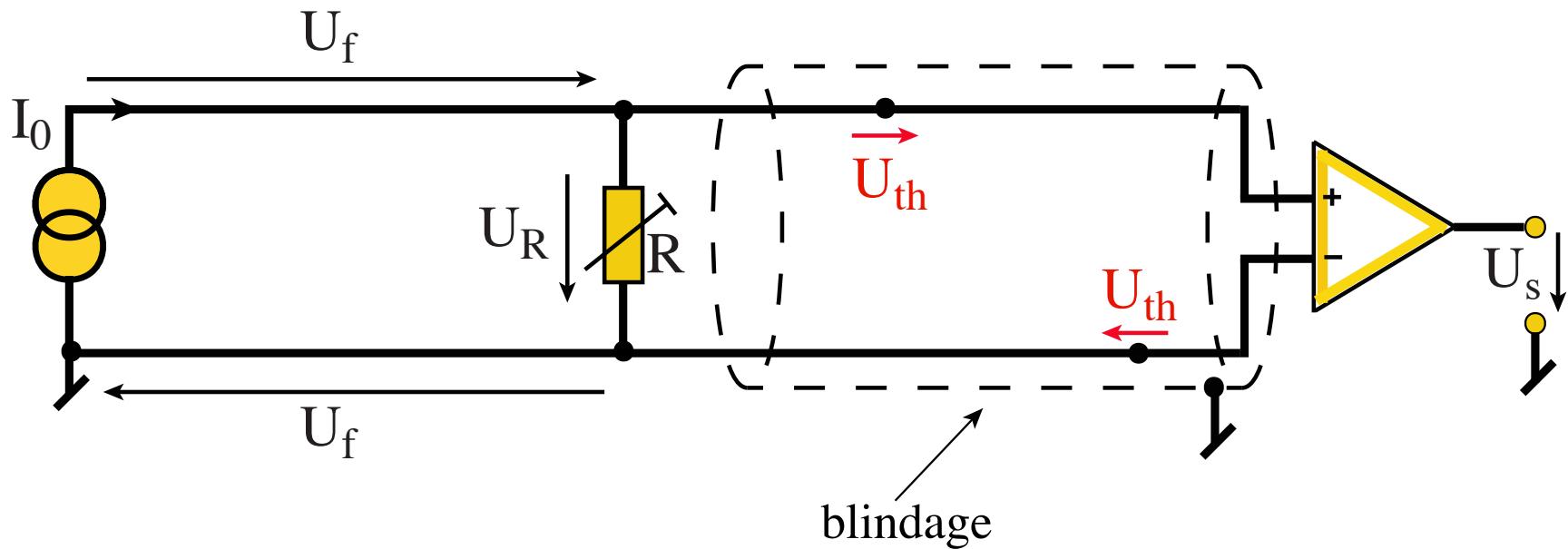
Montage à deux fils



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

# Montage d'un capteur résistif

## Montage à quatre fils

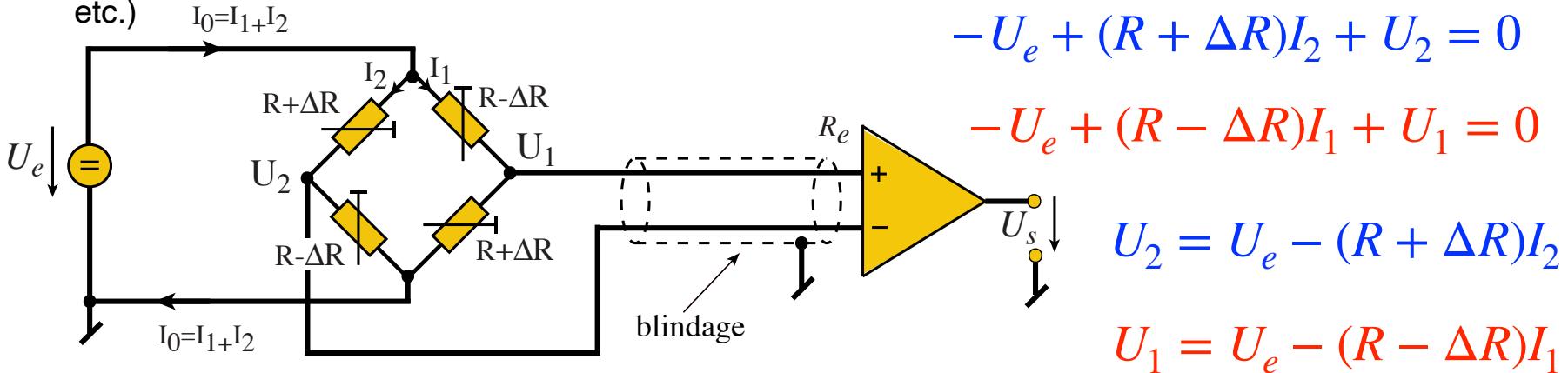


Haute impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel:

$$U_s = G \left( \cancel{2U_f} + U_R \right) = GRI_0$$

# Montage en pont de capteurs résistifs

Souvent, il est avantageux de monter les capteurs résistifs *en pont à quatre branches* dans lesquelles les capteurs 1 et 4 travaillent à l'opposé des capteurs 2 et 3 (capteurs de force, de pression, d'accélération, etc.)



$$-U_e + (R + \Delta R)I_2 + U_2 = 0$$

$$-U_e + (R - \Delta R)I_1 + U_1 = 0$$

$$\begin{aligned} U_2 &= U_e - (R + \Delta R)I_2 \\ U_1 &= U_e - (R - \Delta R)I_1 \end{aligned}$$

$$U_s = G(U_1 - U_2) = G(I_1 + I_2) \Delta R = U_e G \frac{\Delta R}{R} (I_1 + I_2) = \frac{U_e}{R}$$

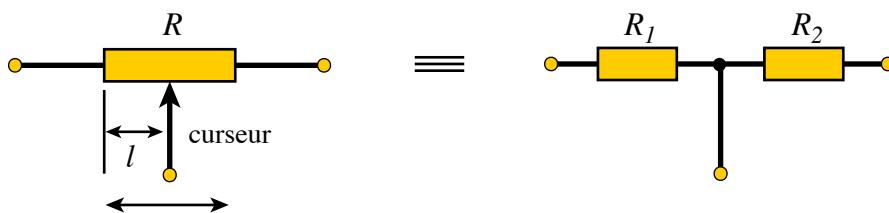
Le montage en pont présente un avantage essentiel lorsqu'on utilise des jauge piézorésistives, magnétorésistives, etc. En effet, toute jauge résistive dépend de la température (*effet thermorésistif*). Le montage en pont permet d'éliminer au premier ordre cette dépendance en température, puisque :

$$\frac{\Delta R(T)}{R(T)} = \frac{\Delta R_0(1 + \alpha T + \dots)}{R_0(1 + \alpha T + \dots)} = \frac{\Delta R_0}{R_0}$$

# 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:

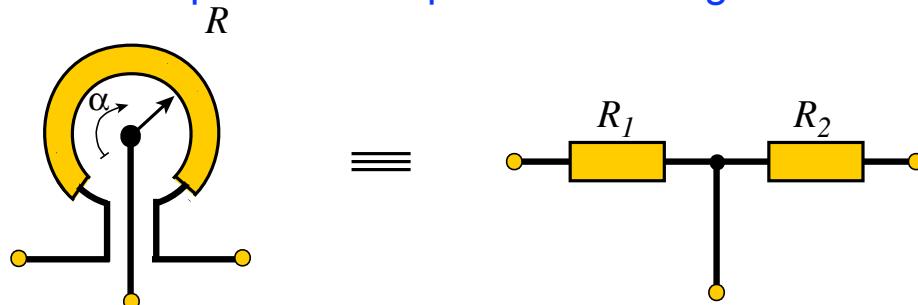
- des capteurs de déplacements linéaires



$$R_1 = R_0 \frac{l}{l_0}$$
$$R_2 = R_0 \frac{l_0 - l}{l_0}$$



- des capteurs de déplacements angulaires



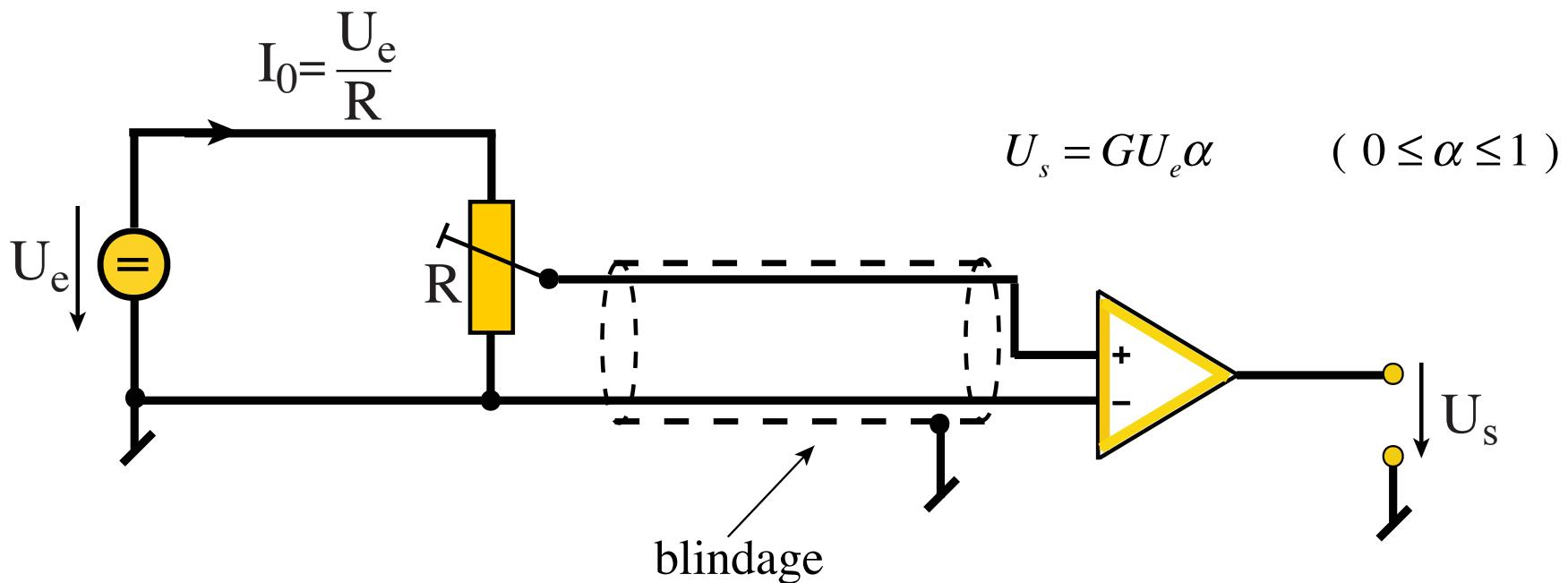
$$R_1 = R_0 \frac{\alpha}{\alpha_0}$$
$$R_2 = R_0 \frac{\alpha_0 - \alpha}{\alpha_0}$$



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. Ils peuvent aussi être construits de sorte que la réponse  $R_1$  ne soit pas linéaire en fonction de  $l$ .

# Montage d'un capteur potentiométrique

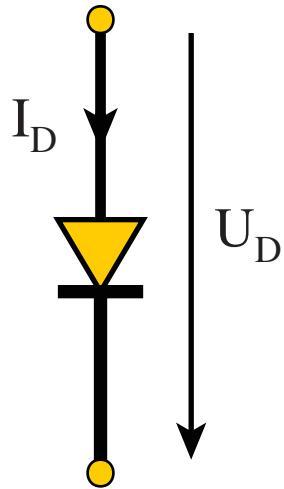
Pour les transducteurs *de type potentiométrique*, le montage électrique consiste en une source de tension constante qui alimente le potentiomètre et un ampli différentiel pour la mesure de la tension :



La résistance  $R$  du potentiomètre est choisie de sorte qu'elle soit beaucoup plus élevée que celle des fils provenant de la source de tension, de sorte à pouvoir négliger la chute de potentiel dans ces fils. Mais elle doit aussi être beaucoup plus basse que l'impédance d'entrée de l'ampli différentiel, de sorte que celui-ci ne modifie pas la linéarité du potentiomètre.

# 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..) .



$$I_D = I_{s0} \left( e^{\frac{eU_D}{kT}} - 1 \right)$$

$$U_D = \frac{k}{e} \ln \left( \frac{I_0}{I_{s0}} + 1 \right) T$$

# Effets photovoltaïque et photoconductif

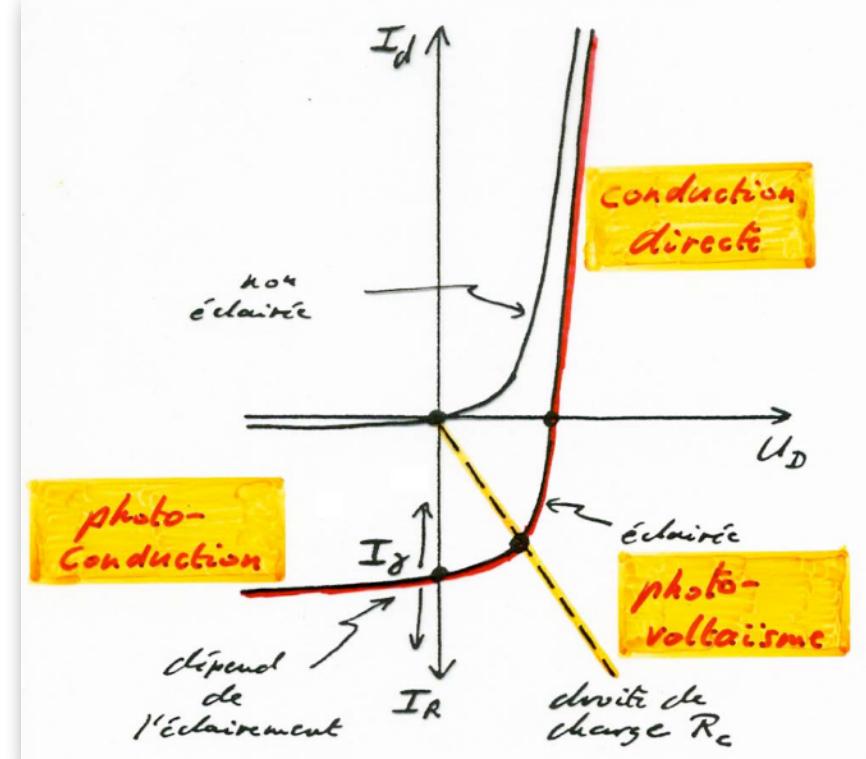
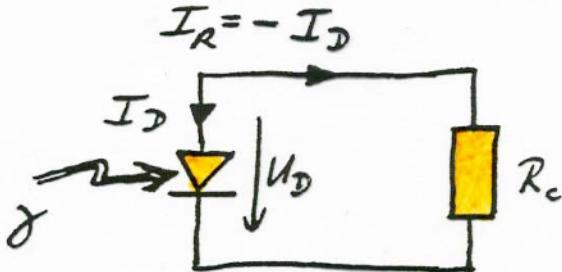
Lorsqu'une jonction semi-conductrice est soumise à un éclairement, le courant dans cette jonction s'écrit :

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

Il apparaît un courant  $I_\gamma$  proportionnel à l'intensité lumineuse qui tombe sur la jonction.

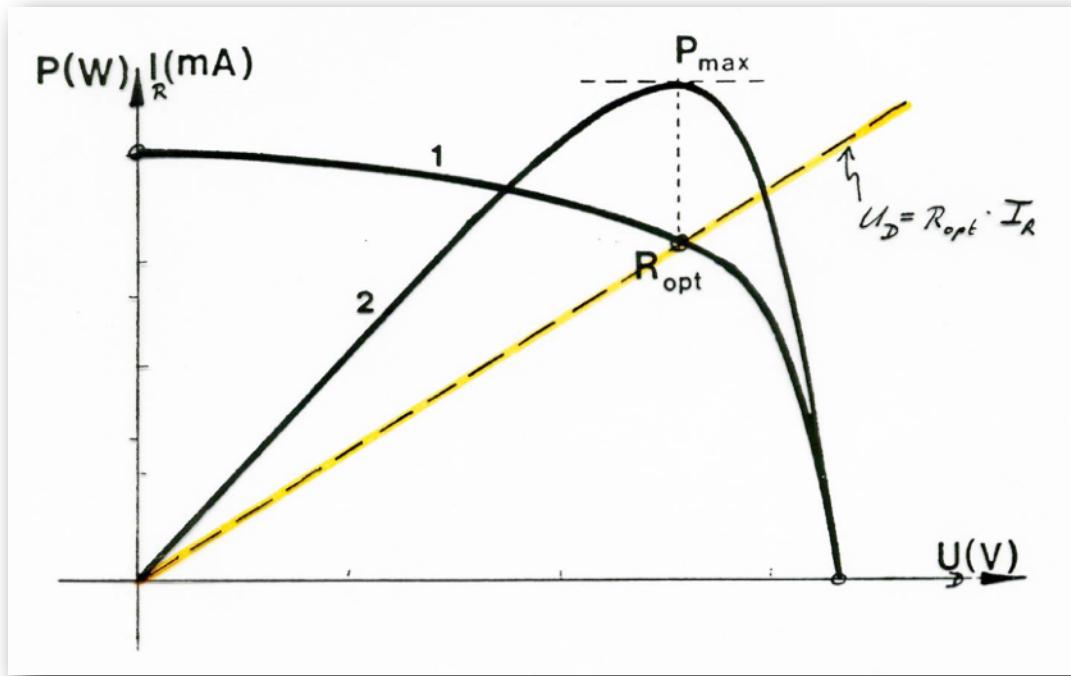
La jonction se comporte alors comme une source de courant : c'est une *cellule photovoltaïque*, ou *générateur solaire*, qui peut être utilisé comme **capteur pour la mesure de l'intensité lumineuse**.

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  $I_R = I_D (U_D)$  avec la droite de charge  $U_D = R_c I_R$ .



# Effet photovoltaïque: générateur solaire

Pour un éclairage donné, il existe une valeur optimale de la charge  $R_c$  qui maximise **la puissance fournie** ( $P = IR UD$ ) par la cellule photovoltaïque:



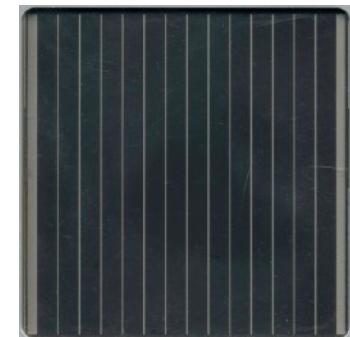
Cellule monocristalline



Cellule polycristalline



Cellule amorphe

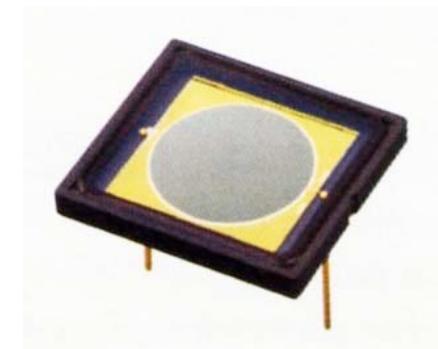
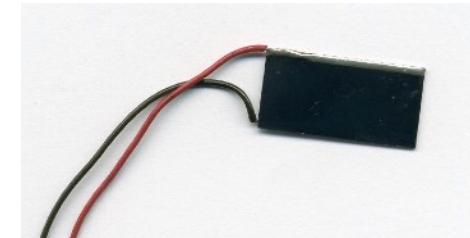
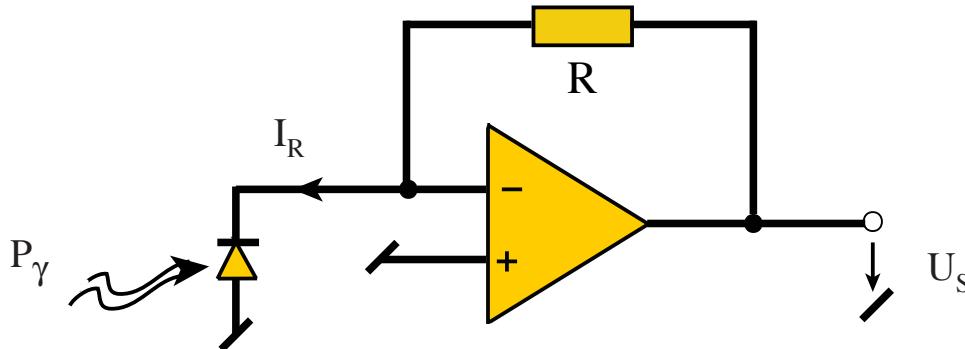


# Effet photovoltaïque: capteur d'intensité lumineuse

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  $P_\gamma$  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](#) :

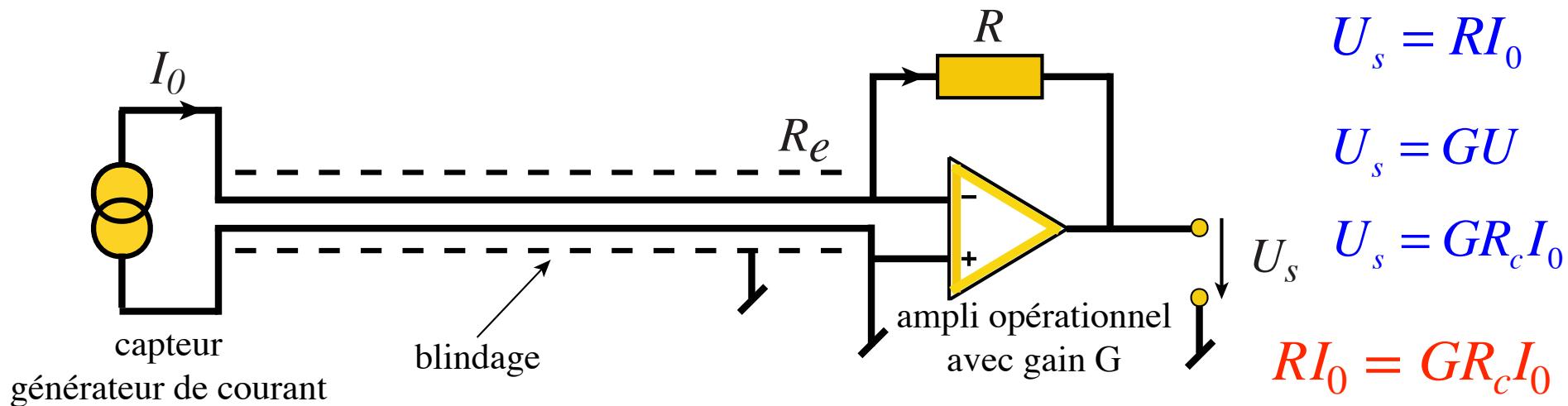


$$u_s = RI_R = \alpha' P_\gamma$$

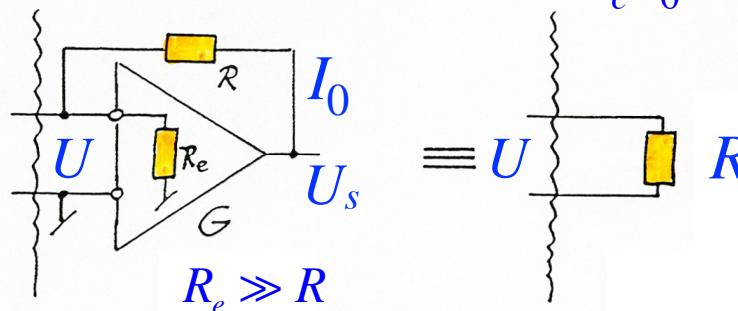
$$R_c \approx R / G$$

# Montage d'un capteur en source de courant

Certains capteurs font appel à *un effet physique de transduction générateur d'un courant électrique* (effet photovoltaïque, effet photoconductif, etc.). Ces effets ne sont en général linéaires que si la résistance de charge branchée aux bornes de la source de courant que représente le capteur est très faible. C'est pourquoi les capteurs se comportant en source de courant doivent en général être branché sur **un ampli courant à très faible impédance d'entrée équivalente  $R_e$**  :

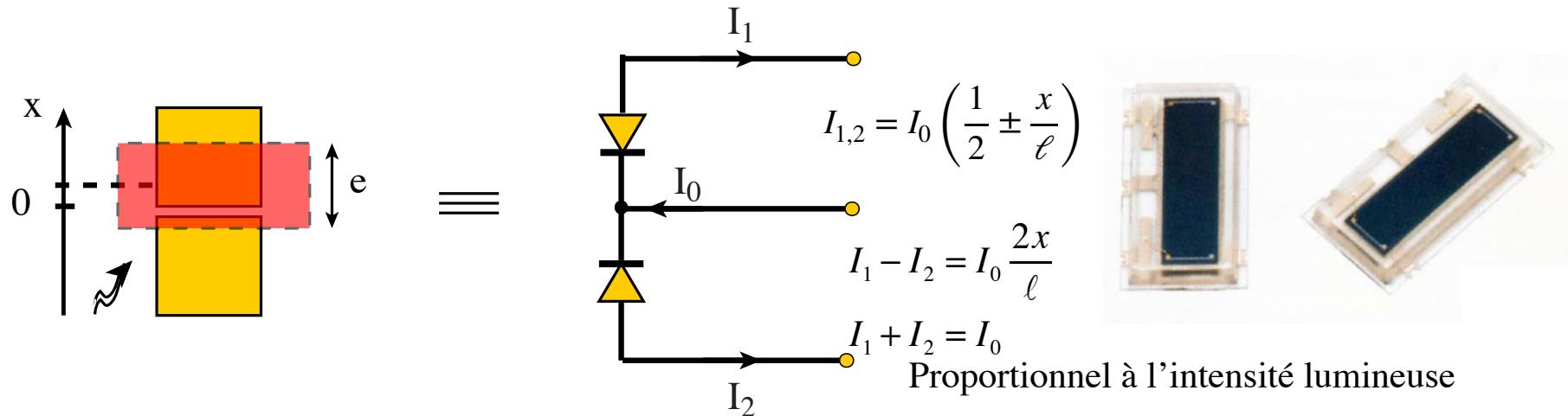


A noter que l'impédance d'entrée équivalente  $R_c$ , qui doit être la plus faible possible, ne doit pas être confondue avec l'impédance d'entrée  $R_e$  de l'ampli opérationnel, qui doit être la plus élevée possible :



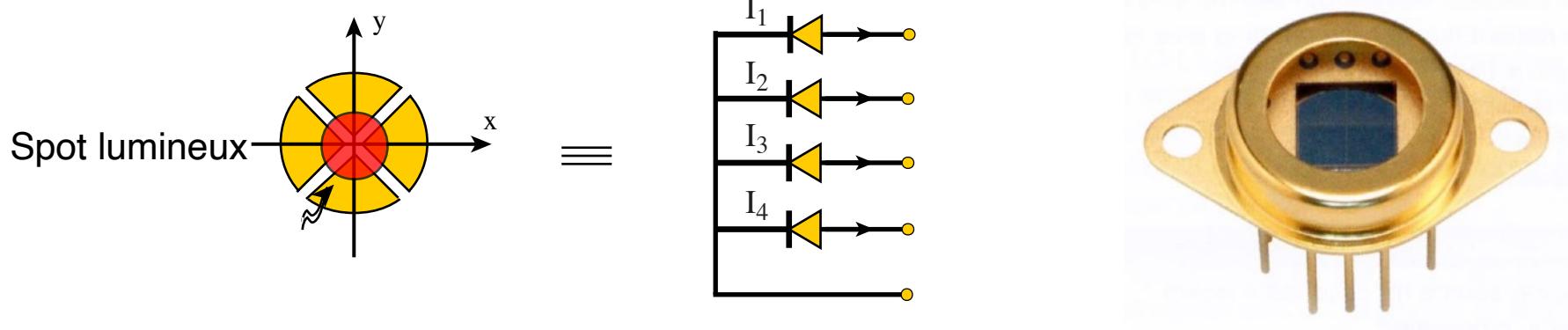
# Effet photovoltaïque: capteur différentiel de position

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  $y$  :



# Effet photoconductif: capteur différentiel de position (PSD)

On fabrique des photodiodes linéaires assez longues sur des substrats résistifs, qui permettent de suivre avec une très haute résolution des déplacements importants d'un spot lumineux (spot laser) :

