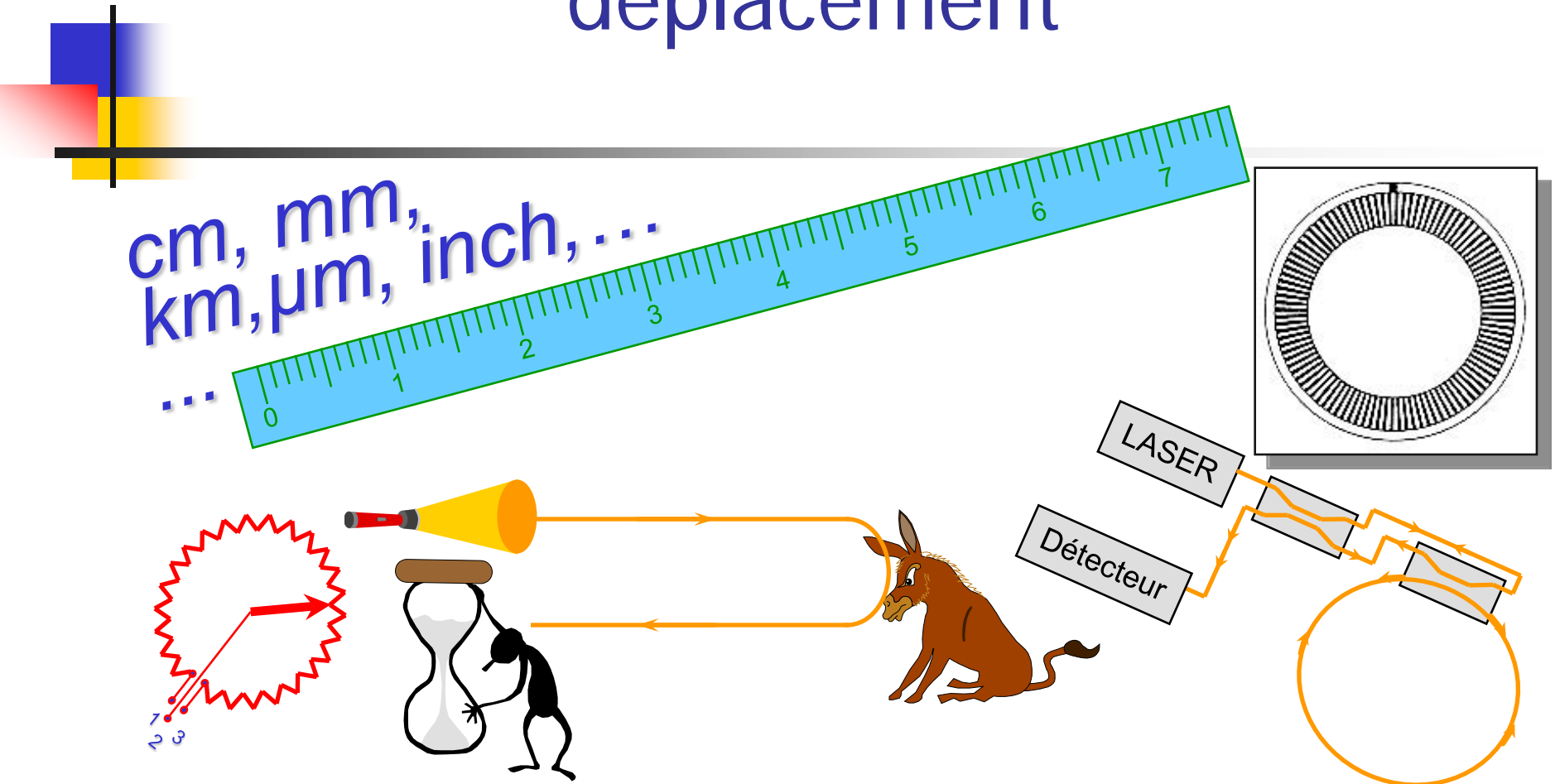


# CHAPITRE 3

## Capteurs de position et de déplacement





## Plan du chapitre 3

---

- 3.1 Notions générales
- 3.2 Capteurs potentiométriques
- 3.3 Capteurs inductifs
- 3.4 Capteurs capacitifs
- 3.5 Codeurs optiques
- 3.6 Capteurs à triangulation
- 3.7 Capteurs optiques
- 3.8 Capteurs à propagation d'ondes
- 3.9 Capteurs à effet Hall
- 3.10 Capteurs inertiels : accéléromètre et gyroscopes

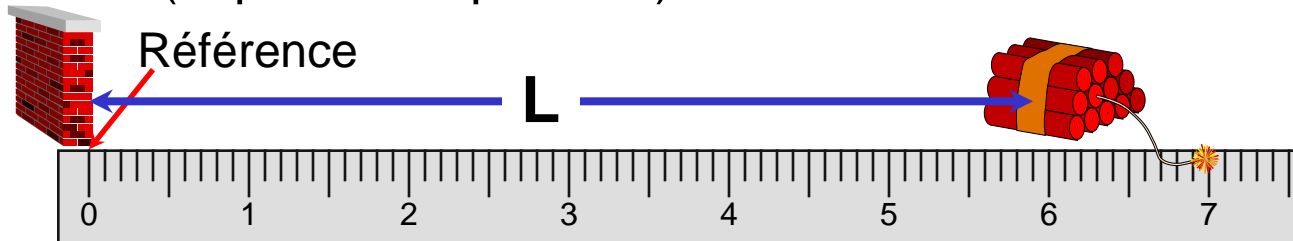
## 3.1 Notions générales

La position ou le déplacement d'un objet est une donnée souvent indispensable dans bon nombre de situations industriels :

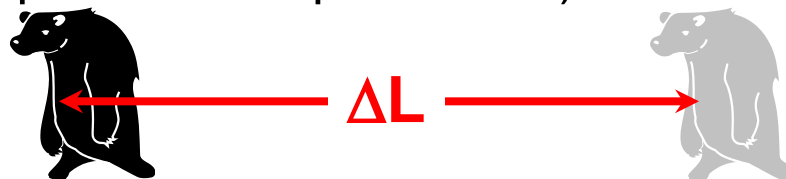
- robotique (automatisation de systèmes)
- contrôle de dimensions
- machinerie-outils
- mesures d'autres grandeurs physiques, ...

Ce type de capteurs se divise en 2 catégories :

- absolus (capteurs de position)



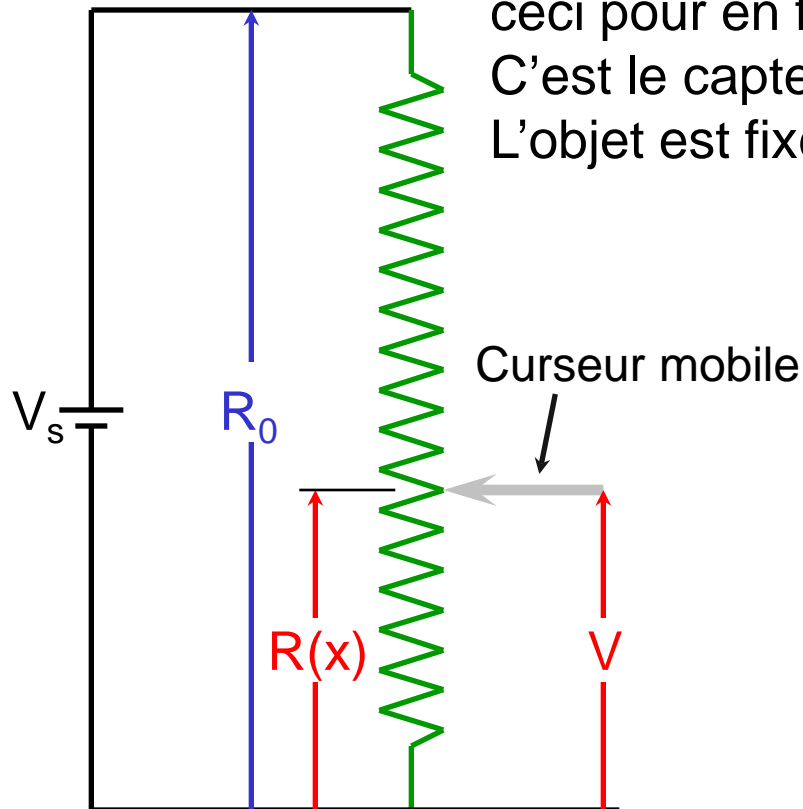
- relatifs (capteurs de déplacement)



## 3.2 Capteurs potentiométriques (1)

### 3.2.1 Principe

On sait que la résistance électrique d'un matériau est directement proportionnelle à la longueur de celui-ci. On peut donc exploiter ceci pour en faire un capteur de déplacement. C'est le capteur potentiométrique. L'objet est fixé à un curseur mobile :



$$V = V_s \frac{x}{D}$$

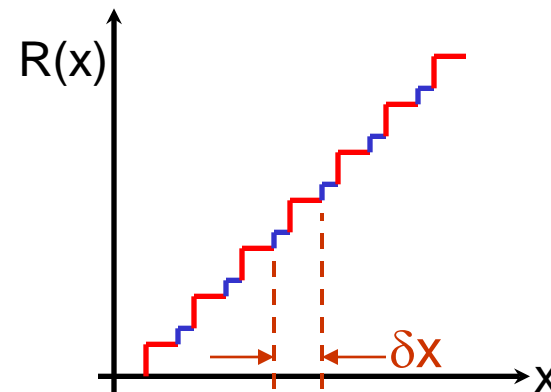
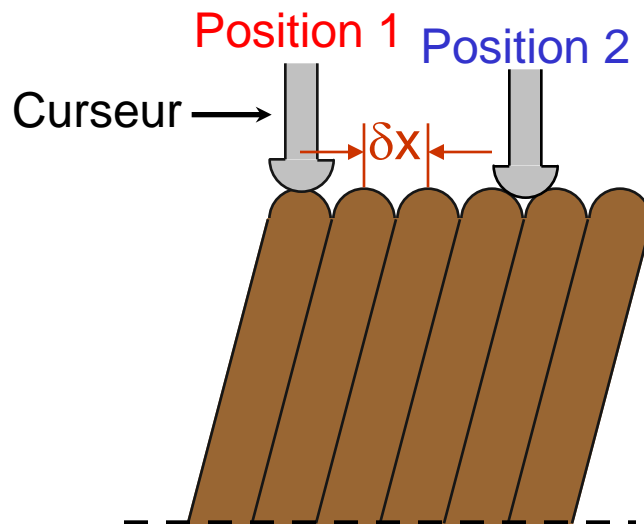
où : -  $x$  : position du curseur  
 -  $D$  : longueur totale de la résistance

## 3.2 Capteurs potentiométriques (2)

### 3.2.2 Potentiomètre bobiné

Le premier type de potentiomètre est constitué d'un long fil conducteur enroulé autour d'un support. Des curseurs mobiles se déplacent contre cet enroulement et assurent un contact électrique avec ceux-ci.

- **Résolution :** Dans ce cas de figure, la variation de  $R$  n'est pas une fonction linéaire de  $x$

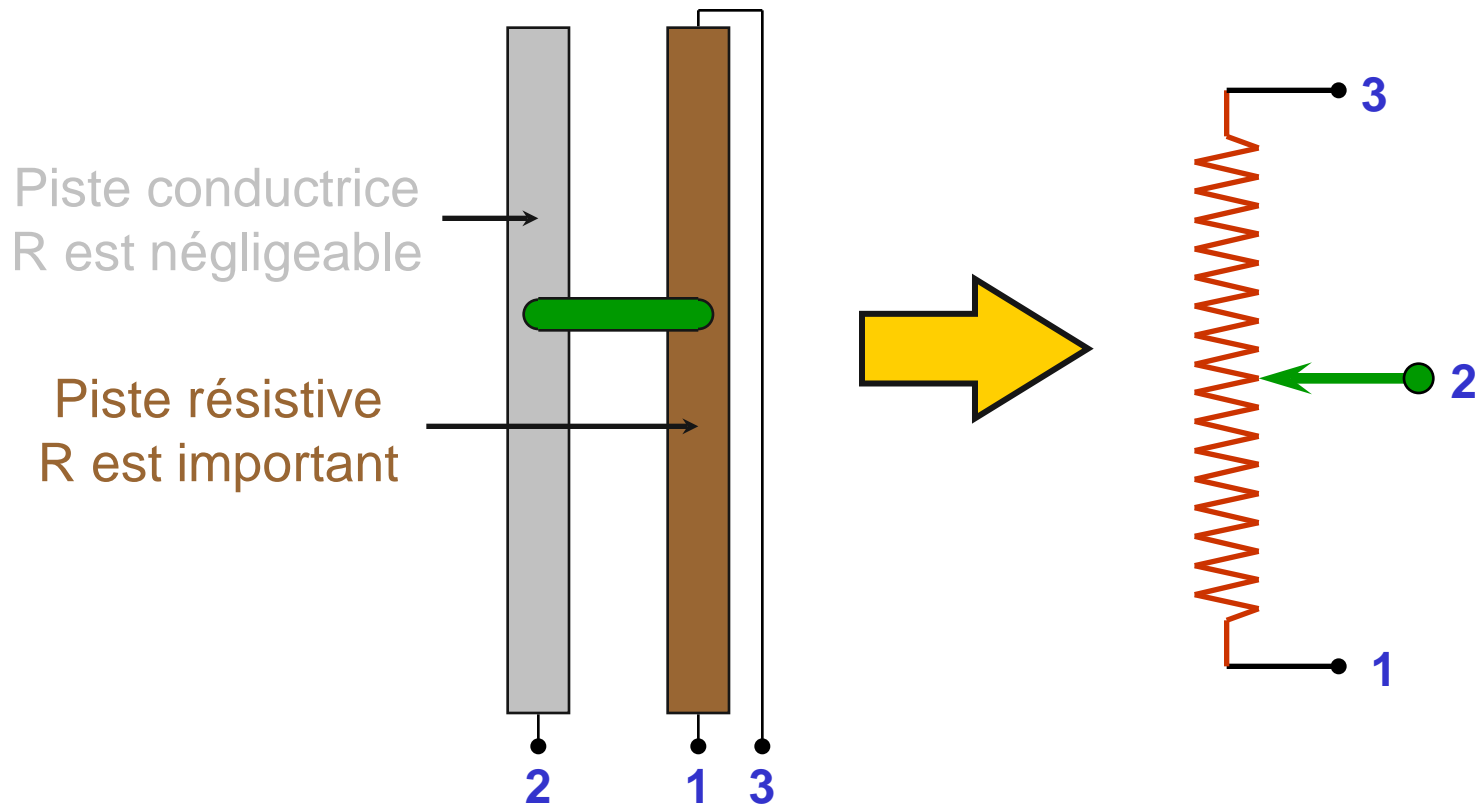


$\delta x$  : plus petite variation de  $x$  détectable  
(Valeur typique : 10  $\mu\text{m}$ )

## 3.2 Capteurs potentiométriques (3)

### 3.2.3 Potentiomètre à piste conductrice

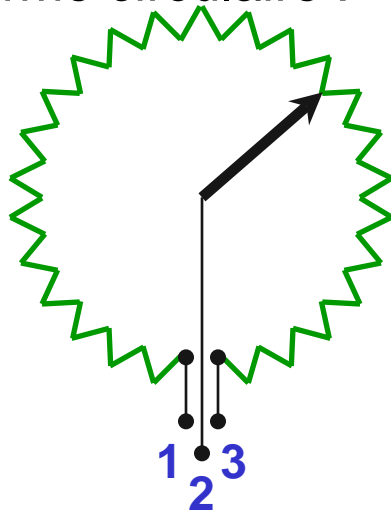
Une autre réalisation de ce capteur est faite avec une piste résistive en parallèle avec une piste conductrice :



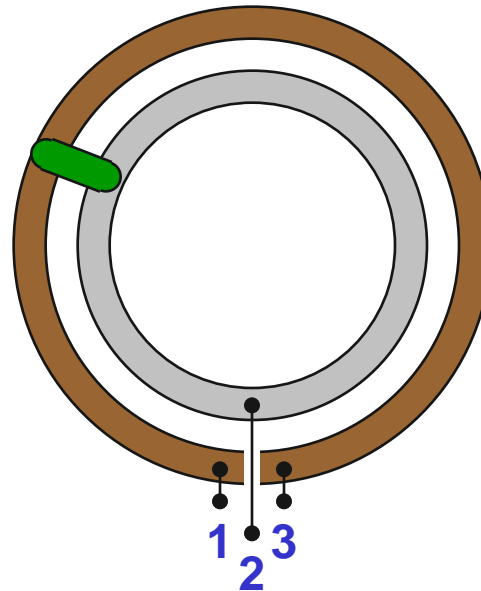
## 3.1 Capteurs potentiométriques (4)

### 3.2.4 Forme circulaire et caractéristiques

- Les potentiomètres existent bien évidemment sous une forme circulaire :



ou



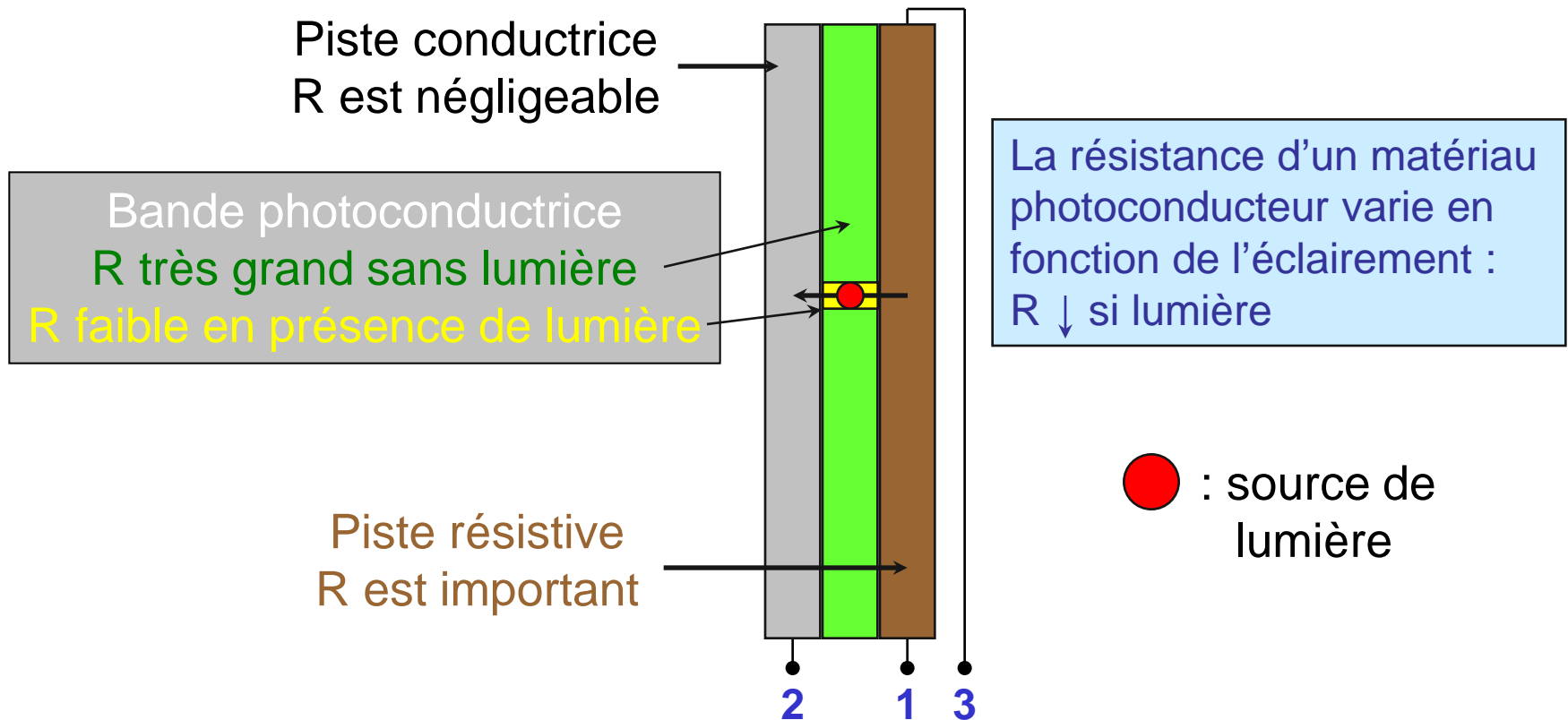
On mesure dans ce cas  $\theta$  au lieu de  $x$

- Principe très simple  $\longrightarrow$  coût faible à modéré
- Amplitude du signal électrique peut être importante
- Friction  $\longrightarrow$  erreurs de finesse, usure (modification des performances)
- Nombre maximal de manœuvre :  $\sim 10^6$
- Sensible à l'environnement : poussières, humidité, ...

## 3.2 Capteurs potentiométriques (5)

### 3.2.5 Potentiomètre sans contact

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

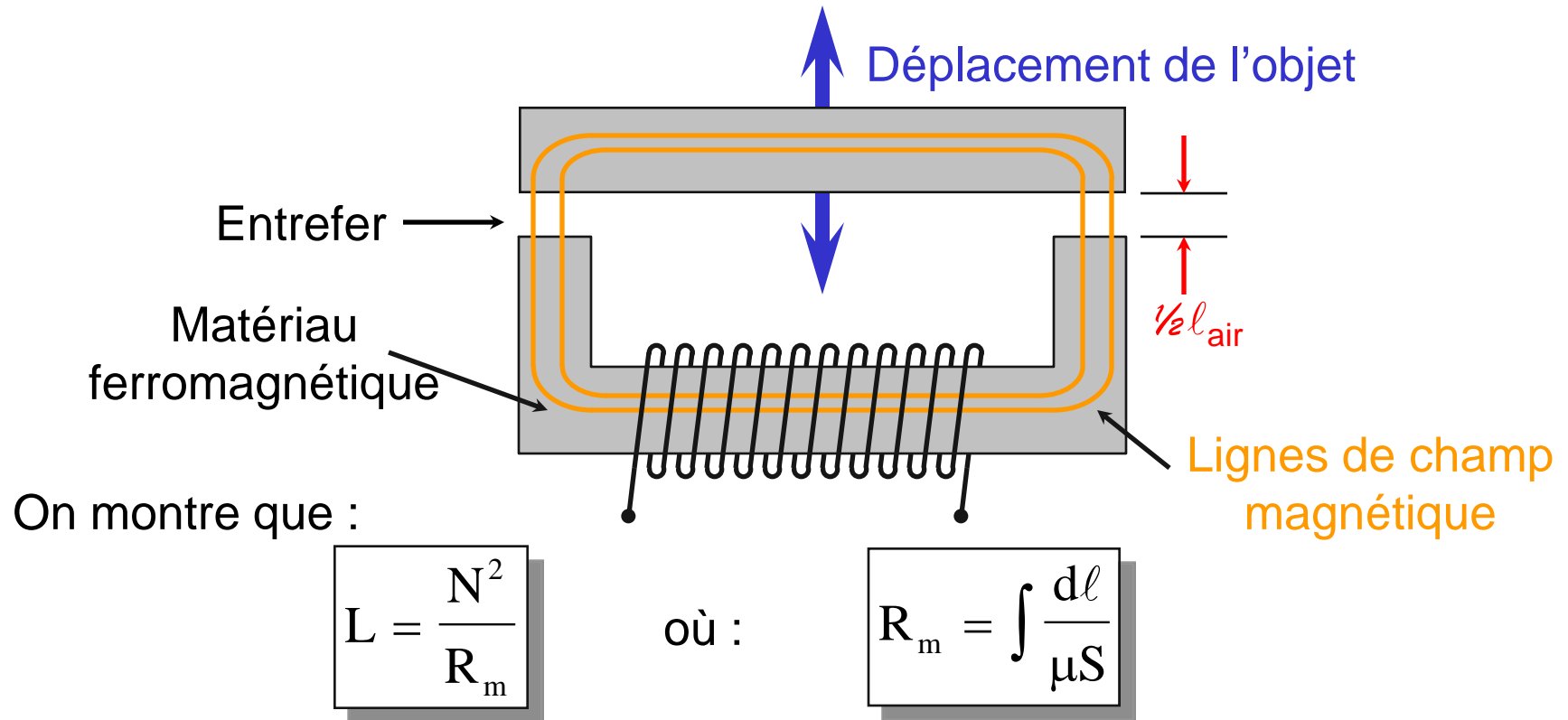




## 3.3 Capteurs inductifs (1)

### 3.3.1 Principe physique (I)

Regardons l'inductance électrique suivante :



N : Nombre de tours du conducteur  
 $\mu$  : Perméabilité magnétique

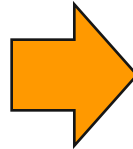
$\ell$  : Longueur parcourue par une ligne de flux  
 S : Section du circuit magnétique

## 3.3 Capteurs inductifs (2)

### 3.3.1 Principe physique (II)

Dans le cas précédent, on trouve :

$$R = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\ell_{\text{fer}}}{\mu_{\text{fer}} S} + \frac{\ell_{\text{air}}}{S} \right)$$



$$L = \mu_0 N^2 S \frac{1}{\ell_{\text{air}} + \frac{\ell_{\text{fer}}}{\mu_{\text{fer}}}}$$

$\ell_{\text{fer}}$  : Longueur moyenne du flux dans le fer

$\ell_{\text{air}}$  : Longueur moyenne du flux dans l'air

$\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide

$\mu_{\text{fer}}$  : perméabilité relative du matériau ferromagnétique ( $\sim 10^3$  à  $10^4$ )

Cette dernière fonction dépend de l'entrefer, on peut donc en déduire le déplacement d'un objet physiquement relié à la partie mobile du noyau ferromagnétique !

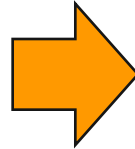
## 3.3 Capteurs inductifs (3)

### 3.3.2 Capteur à entrefer variable (I)

- **Mise en oeuvre :**

On désire mesurer la variation de  $\ell_{\text{air}}$ . On fait alors en sorte que :

$$\ell_{\text{air}} \gg \frac{\ell_{\text{fer}}}{\mu_{\text{fer}}}$$



$$L \approx \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell_{\text{air}}}$$

Si, autour d'une position moyenne  $\ell_0$ , la partie mobile de l'inductance se déplace de  $\Delta x$ , alors l'inductance se modifie de :

$$L + \Delta L = \frac{\mu_0 N^2 S}{\ell_0} \cdot \frac{1}{1 + 2\Delta x / \ell_0} \quad (\ell_{\text{air}} = \ell_0 + 2\Delta x)$$

En développant en série, on trouve :

$$\Delta L = \frac{2\mu_0 N^2 S}{\ell_0^2} \cdot \Delta x \left( 1 - \frac{2\Delta x}{\ell_0} + \left( \frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right)$$

## 3.3 Capteurs inductifs (4)

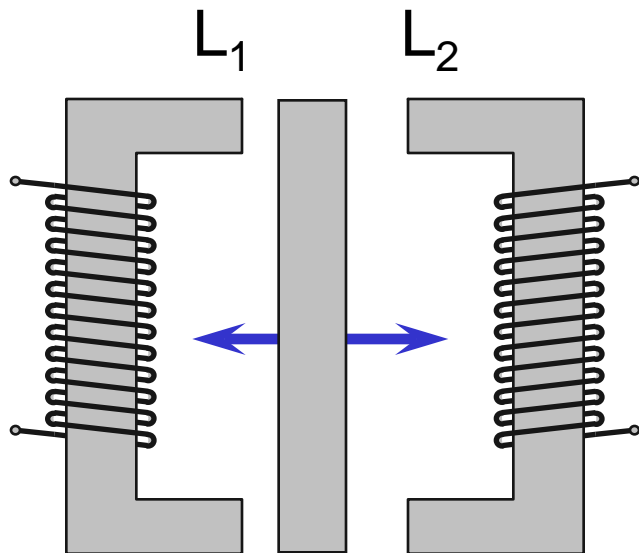
### 3.3.2 Capteur à entrefer variable (II)

On remarque que si  $\Delta x$  est petit, la relation précédente est quasiment linéaire :

L'étendue de mesure d'un tel système est de l'ordre du **mm**

La précision peut être de l'ordre du  **$\mu\text{m}$**

#### • Montage de type push-pull :



La réponse est :

$$\Delta L_2 - \Delta L_1 = \frac{4\mu_0 N^2 S}{\ell_0^2} \Delta x \left( 1 + \left( \frac{2\Delta x}{\ell_0} \right)^2 + \dots \right)$$

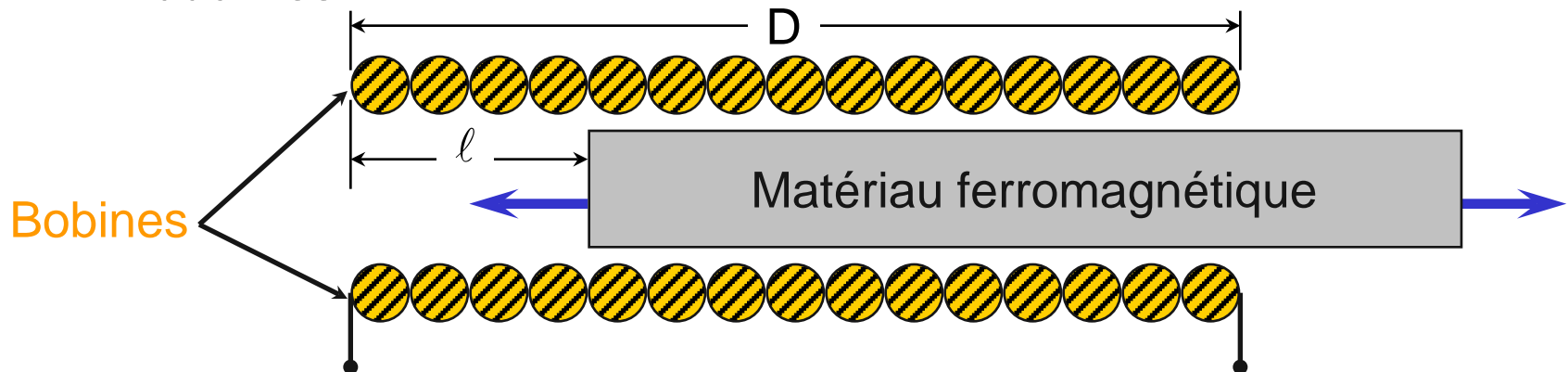
Avantages :

- Sensibilité est doublée
- Non-linéarité est réduite au 3<sup>ème</sup> ordre

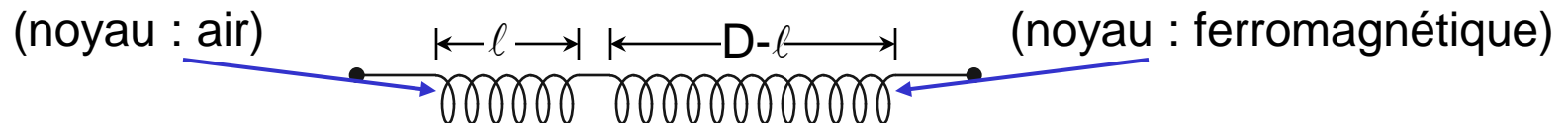
## 3.3 Capteurs inductifs (5)

### 3.3.3 Capteur à noyau plongeur (I)

Une autre configuration possible d'un capteur à déplacement inductif est :



La modèle électrique de ce capteur est le suivant :



L'inductance globale de ce capteur est donnée par :

$$L = L_{\text{air}} + L_{\text{fer}} + 2M$$

## 3.3 Capteurs inductifs (6)

### 3.3.3 Capteur à noyau plongeur (II)

où :

$$L_{\text{air}} = A \cdot \ell$$

$$L_{\text{fer}} = B \cdot (D - \ell)$$

constantes

$$M = k \sqrt{L_{\text{air}} \cdot L_{\text{fer}}}$$

constante

(M : l'induction mutuelle entre  $L_{\text{air}}$  et  $L_{\text{fer}}$ )

On trouve donc la relation suivante entre L et  $\ell$  :

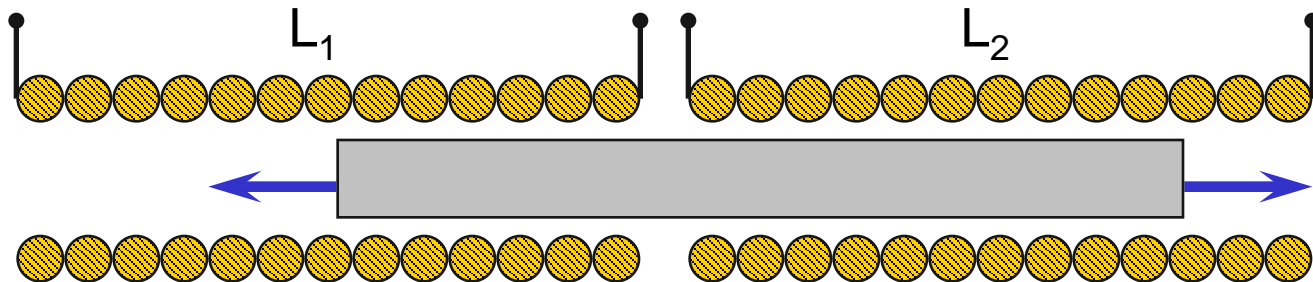
$$L = (A - B) \cdot \ell + B \cdot D + 2k \sqrt{AB (D\ell - \ell^2)}$$

- Cette relation n'est pas linéaire sauf si on ne s'intéresse qu'à des petits déplacements autour d'une position  $\ell_0$ .
- On utilise cette seconde configuration comme la première, avec une étendue de mesure et une précision comparables.

## 3.3 Capteurs inductifs (7)

### 3.3.3 Capteur à noyau plongeur (III)

- Montage de type push-pull :



La sensibilité est encore une fois doublée  
La non-linéarité est également diminuée

Remarque : Il existe un couplage entre  $L_1$  et  $L_2$  que l'on peut grandement diminuer par un design approprié.

## 3.4 Capteurs capacitifs (1)

### 3.4.1 Principe physique

La capacité d'un condensateur plan est donnée par :

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

← Surface  
← Distance entre les armatures

$\epsilon_0$  : permittivité du vide,       $\epsilon_r$  permittivité relative du diélectrique

Celle d'un condensateur cylindrique par :

$$C = 2\pi\epsilon_r\epsilon_0 \frac{\ell}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}$$

← longueur du cylindre  
← rayon de l'armature extérieure  
← rayon de l'armature intérieure

Les capacités dépendent des dimensions géométriques



Candidats potentiels pour capteurs de position/déplacement



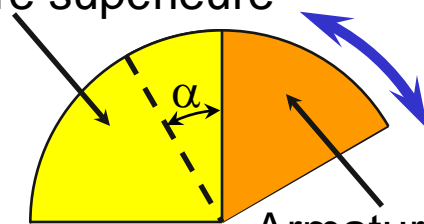
## 3.4 Capteurs capacitifs (2)

### 3.4.2 Capacités à surface variable (I)

On peut jouer sur la surface d'une capacité :

#### Montage simple

Armature supérieure

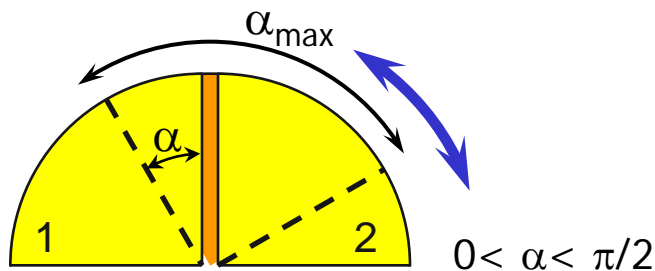


Armature inférieure

$$0 < \alpha < \pi/2$$

$$C = \epsilon_{\text{air}} \epsilon_0 \frac{r^2}{2d} \alpha$$

#### Montage push-pull



$$0 < \alpha < \pi/2$$

Réponse d'un diviseur de tension est **linéaire** :

$$C_1 = \epsilon_{\text{air}} \epsilon_0 \frac{r^2}{2d} \alpha = C_0 \alpha$$

$$C_2 = \epsilon_{\text{air}} \epsilon_0 \frac{r^2}{2d} (\alpha_{\text{max}} - \alpha) = C_0 (\alpha_{\text{max}} - \alpha)$$

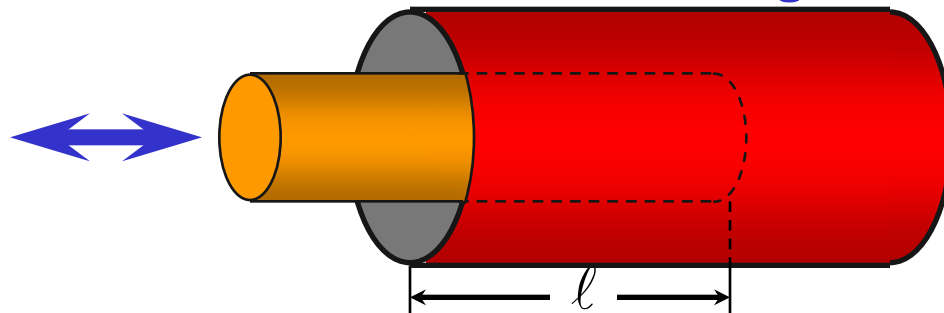
$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \left( 1 - \frac{\alpha}{\alpha_{\text{max}}} \right)$$

## 3.4 Capteurs capacitifs (3)

### 3.4.2 Capacités à surface variable (II)

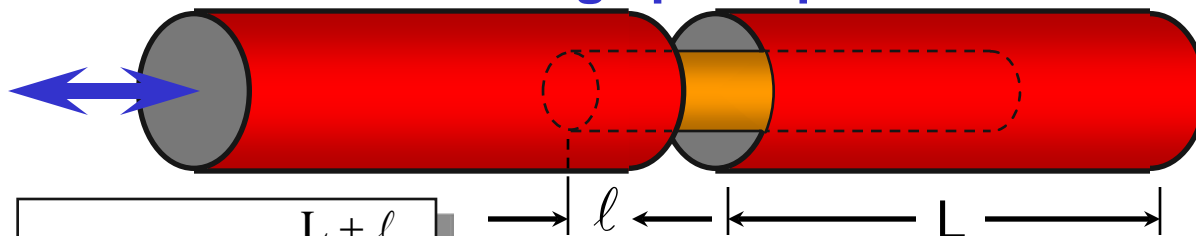
Pour des déplacements linéaires :

**Montage simple**



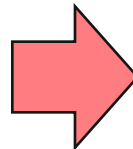
$$C = 2\pi\epsilon_{\text{air}}\epsilon_0 \frac{\ell}{\ln(r_1/r_2)}$$

**Montage push-pull**



$$C_1 = 2\pi\epsilon_{\text{air}}\epsilon_0 \frac{L + \ell}{\ln(r_1/r_2)}$$

$$C_2 = 2\pi\epsilon_{\text{air}}\epsilon_0 \frac{L - \ell}{\ln(r_1/r_2)}$$

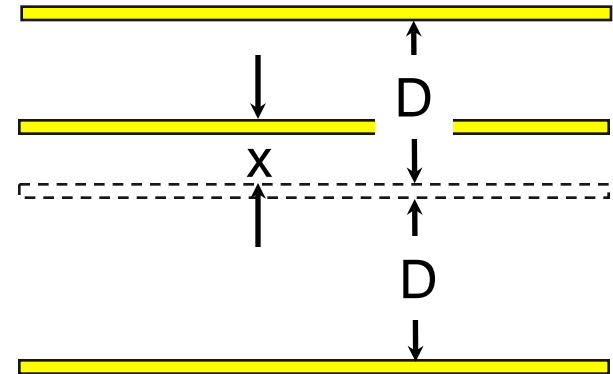
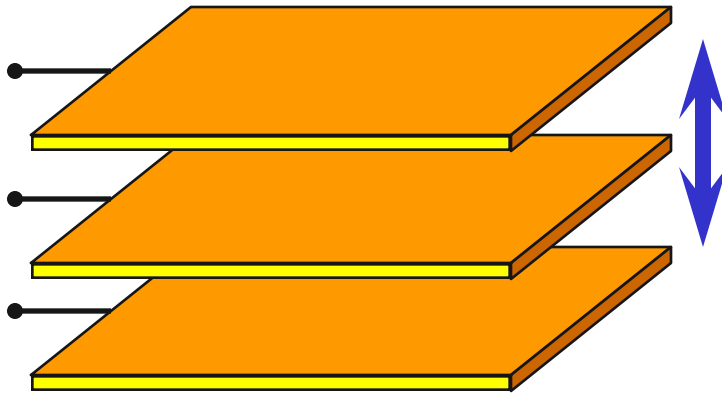


$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{\ell}{L} \right)$$

## 3.4 Capteurs capacitifs (4)

### 3.4.3 Capacités à écartement variable

On peut également jouer sur la distance entre les 2 armatures d'un condensateur plan :



$$C_1 = \epsilon_{\text{air}} \epsilon_0 \frac{S}{D - x} = C_0 \frac{1}{1 - x/D}$$

$$C_2 = \epsilon_{\text{air}} \epsilon_0 \frac{S}{D + x} = C_0 \frac{1}{1 + x/D}$$

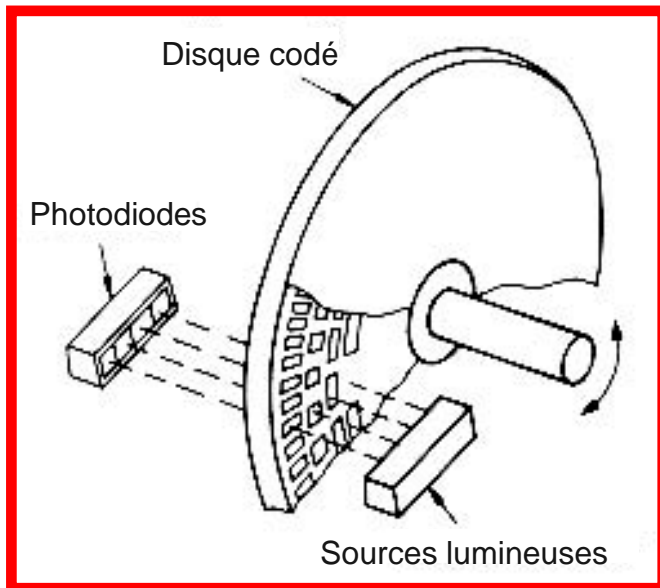
Montage potentiométrique :

$$\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{x}{D} \right)$$

L'étendue de mesure : ~ mm      Précision : ~  $\mu\text{m}$

## 3.5 Codeurs optiques (1)

### 3.5.1 Principe



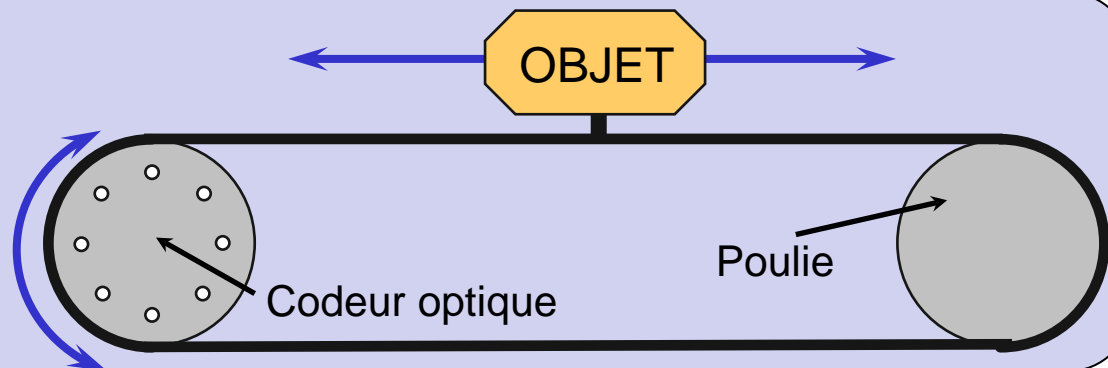
Les codeurs optiques mesurent un déplacement angulaire (i.e. une rotation) ou une position angulaire définie.

**Signaux numériques**

{ Position relative  
Position absolue

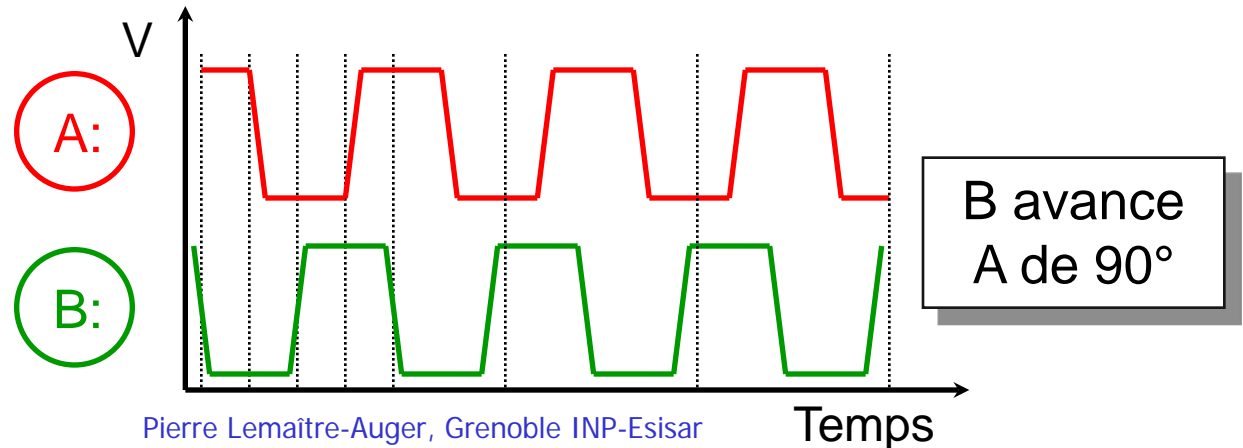
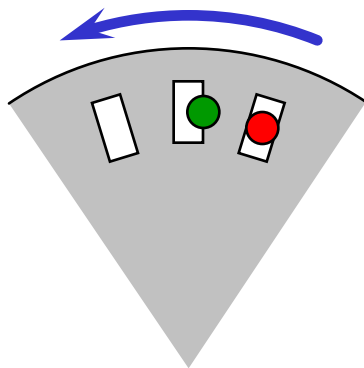
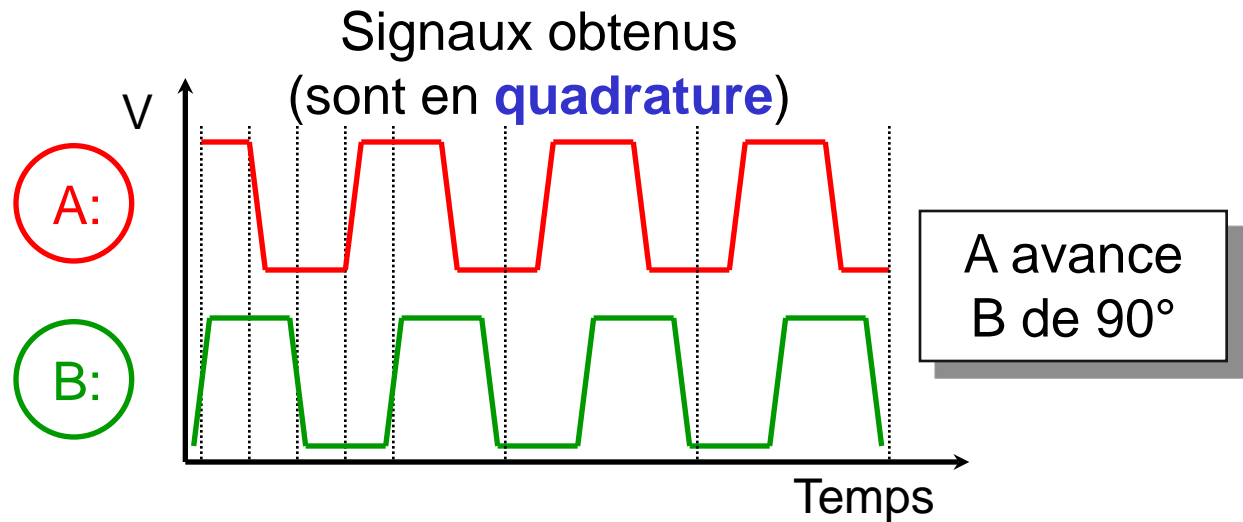
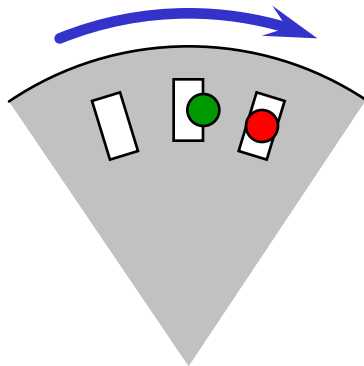
Mouvement linéaire

↳ Mouvement de rotation



## 3.5 Codeurs optiques (2)

### 3.5.2 Codeur incrémental (I)



## 3.5 Codeurs optiques (3)

### 3.5.2 Codeur incrémental (II)

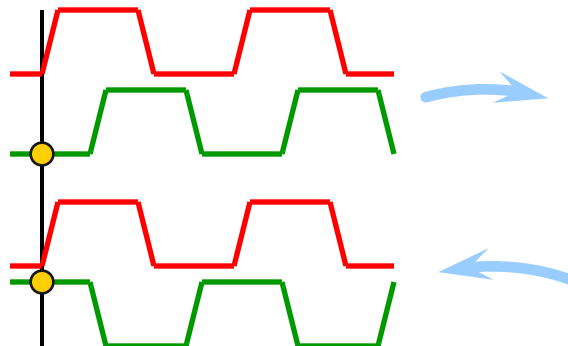
- **Codeur incrémental :**

- On peut donc connaître le déplacement de l'objet en comptant le nombre d'impulsions du signal **A**.
- On compare le signal **A** avec le signal **B** pour connaître le sens du déplacement.

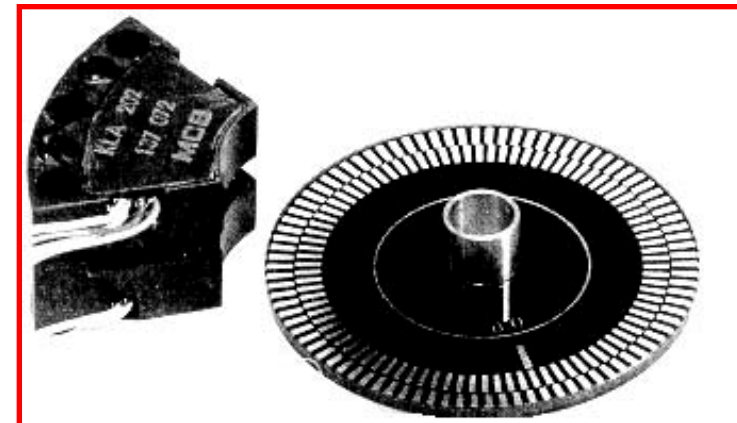
- **Selon l'exemple précédent :**

Lors d'une transition de **A** ( $0 \rightarrow 1$ ) :

- **B** = 0  $\longrightarrow$  sens anti-trigo
- **B** = 1  $\longrightarrow$  sens trigo



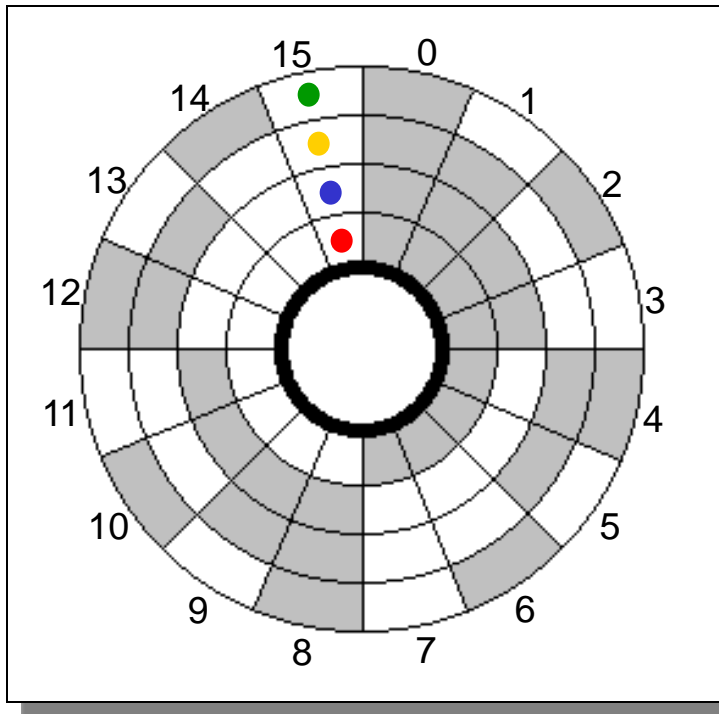
#### Exemple de disque



## 3.5 Codeurs optiques (4)

### 3.5.3 Codeur absolu (I)

On peut également mesurer la position absolue avec ce type de capteur. On utilise plusieurs couples «source-détecteur», chacun donnant l'information d'un bit du signal total.



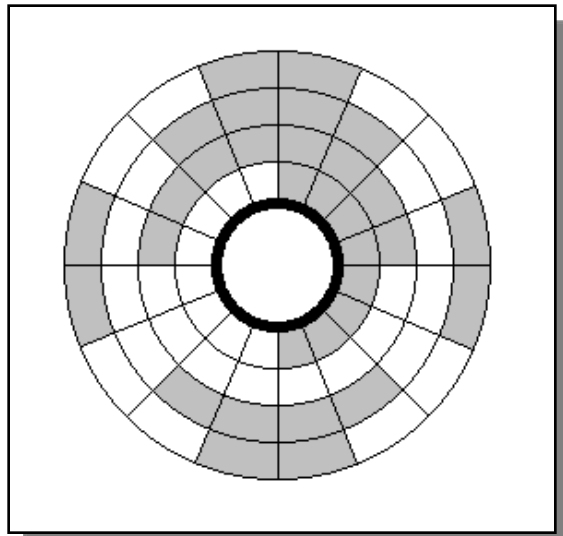
Valeur décimale	Red	Blue	Yellow	Green
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
...			...	
9	1	0	0	1
...			...	
15	1	1	1	1

## 3.5 Codeurs optiques (5)

### 3.5.3 Codeur absolu (II)

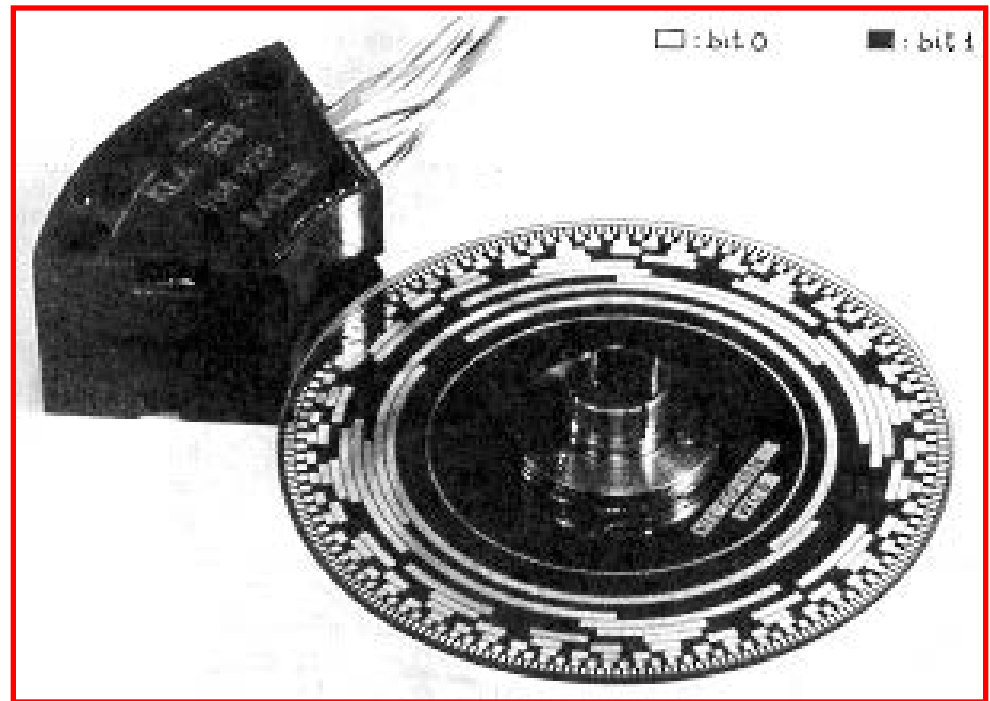
En pratique, on retrouvera un codage de type Gray plutôt que le codage binaire classique.

Code Gray :



1 seul bit change d'état par changement de position

Exemple de disque (code Gray)



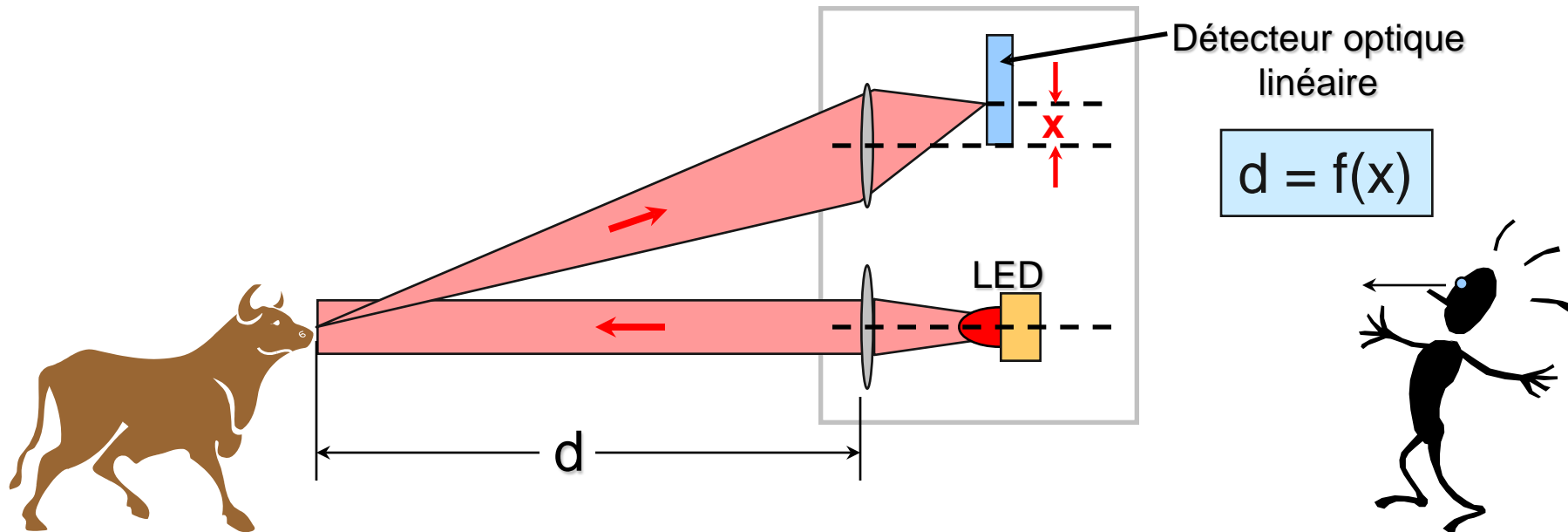


## 3.6 Capteurs à triangulation (1)

### 3.6.1 Principe (I)

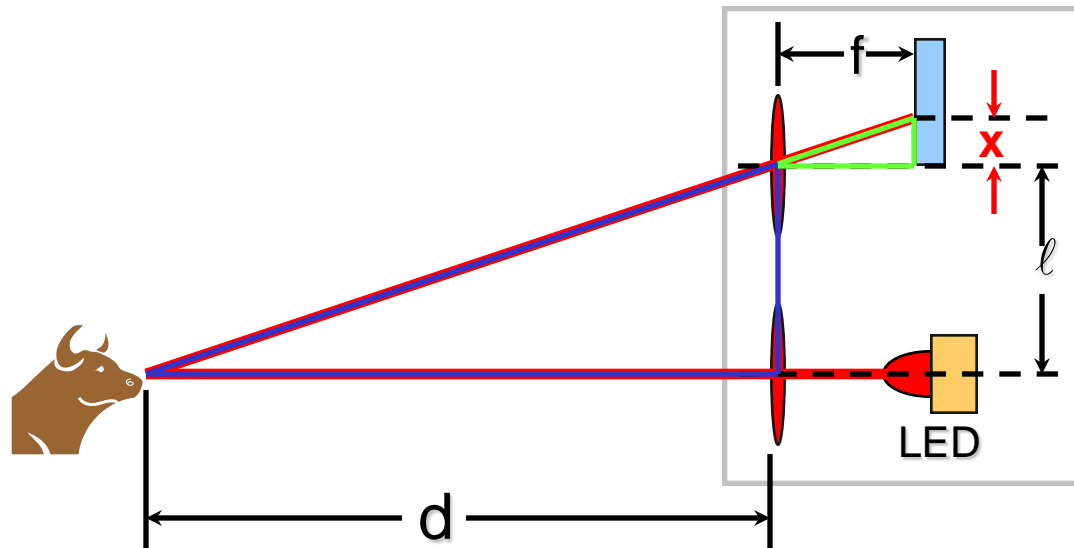
Une autre technique de mesure de déplacement est basée sur le principe de la triangulation.

On utilise pour cela une source optique infra-rouge ( $0,8 \mu\text{m}$ ) et un détecteur optique linéaire disposés comme suit :



## 3.6 Capteurs à triangulation (2)

### 3.6.1 Principe (II)



Thalès :

$$\frac{\ell}{d} = \frac{x}{f}$$

$$d = \frac{f \ell}{x}$$

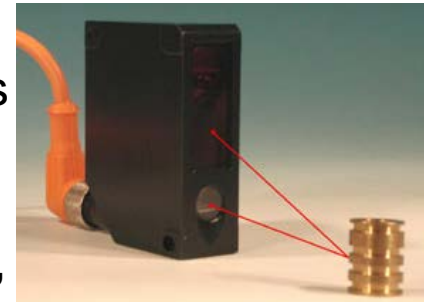
La question qui demeure est : «Comment déterminer  $x$  ?».

## 3.6 Capteurs à triangulation (3)

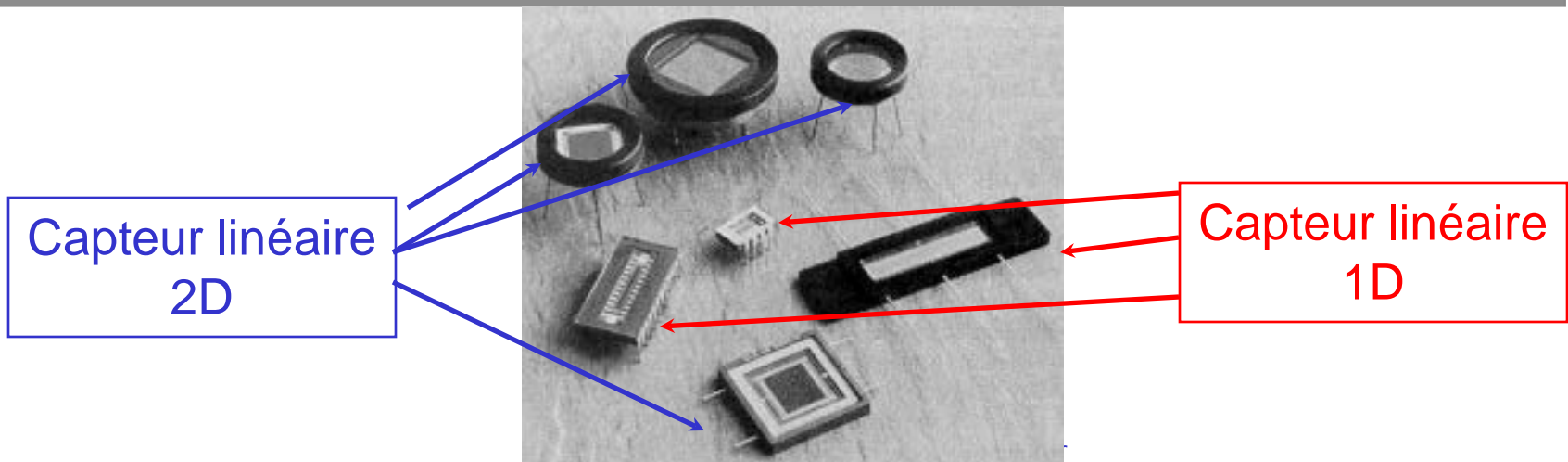
### 3.6.2 Utilisation - Caractéristiques

- **Utilisations de ce type de détecteur :**

- Fonction auto-focus des appareils photo et des caméras
- Mesure précise de déplacement,
- Mesure de la hauteur d'un objet,
- Mesure de l'excentricité d'un objet circulaire en rotation,
- Détection de présence d'un objet, ...



Idéal pour la mesure de petits déplacements ( $0,1 \mu\text{m}$ ) avec une bonne précision à une distance d'une dizaine de cm.

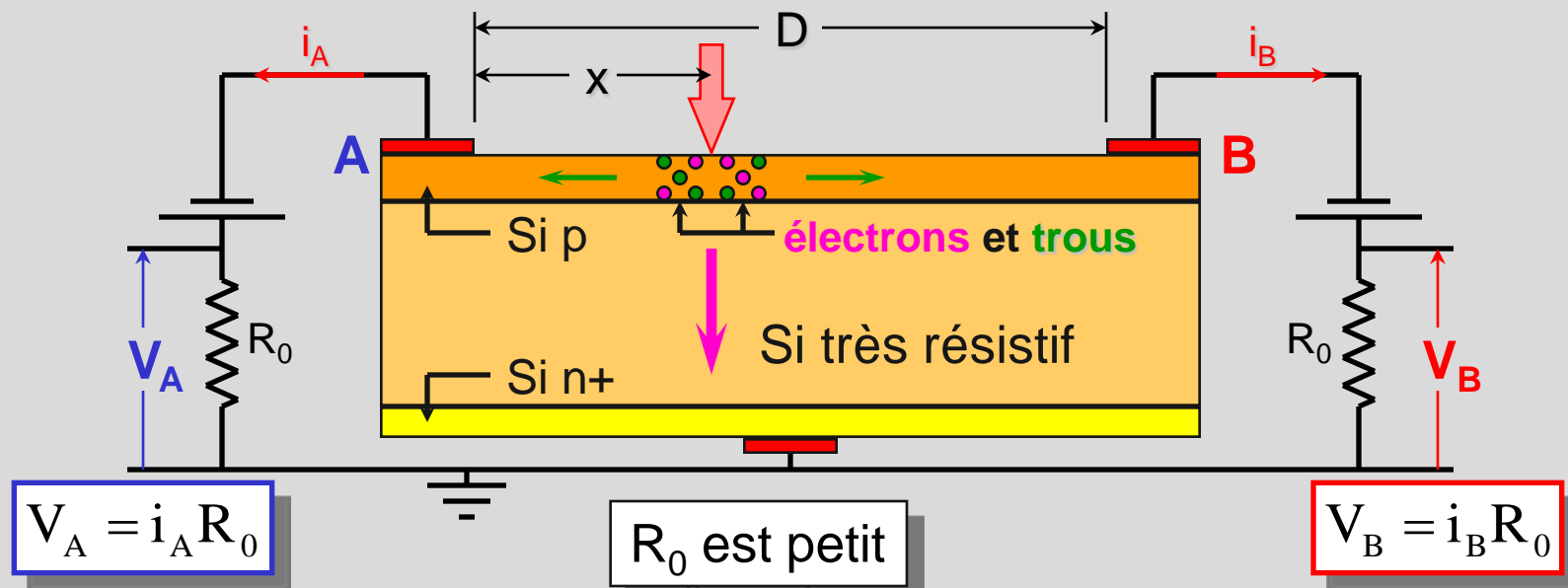


## 3.6 Capteurs à triangulation (4)

Culture personnelle

### 3.6.2 Détecteur optique linéaire (I)

Le faisceau optique va créer des paires électrons-trous dans un semi-conducteur :

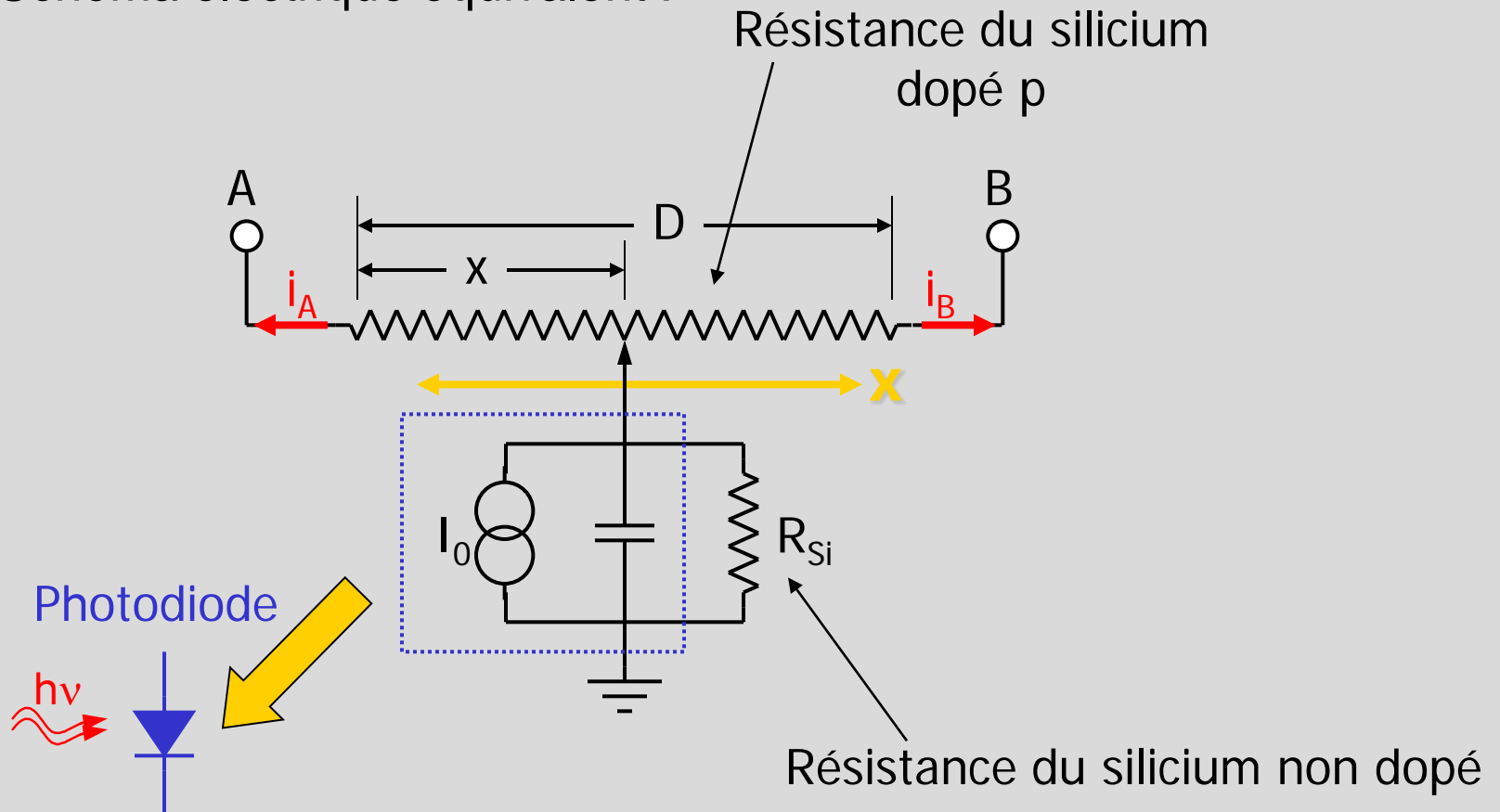


## 3.6 Capteurs à triangulation (5)

Culture personnelle

### 3.6.2 Détecteur optique linéaire (II)

Schéma électrique équivalent :



## 3.6 Capteurs à triangulation (6)

Culture personnelle

### 3.6.2 Détecteur optique linéaire (III)

En ce qui concerne les trous produits par le flux lumineux, ils vont se scinder en 2 parties selon le principe d'un diviseur de courant :

$$i_A = i_0 \frac{R_D - R_x}{R_D}$$

$$i_B = i_0 \frac{R_x}{R_D}$$

où : -  $i_0$  est le courant total produit par le flux lumineux

- $R_D$  est la résistance électrique du Si-p entre les points A et B
- $R_D$  est la résistance électrique du Si-p entre le point d'impact du flux lumineux et l'électrode A

Comme on a que  $R_D \propto D$  et  $R_x \propto x$ , alors :

$$i_A = i_0 \frac{D - x}{D}$$

$$i_B = i_0 \frac{x}{D}$$

## 3.6 Capteurs à triangulation (7)

Culture personnelle

### 3.6.2 Détecteur optique linéaire (IV)

En ce qui concerne les trous produits par le flux lumineux, ils vont se scinder en 2 parties selon le principe d'un diviseur de tension :

$$\eta = \frac{i_A}{i_B} = \frac{D - x}{x} = \frac{D}{x} - 1$$

$$x = \frac{D}{\eta + 1}$$

On trouve donc la relation voulue en fonction des paramètres du capteur et de la mesure du rapport de 2 courants :

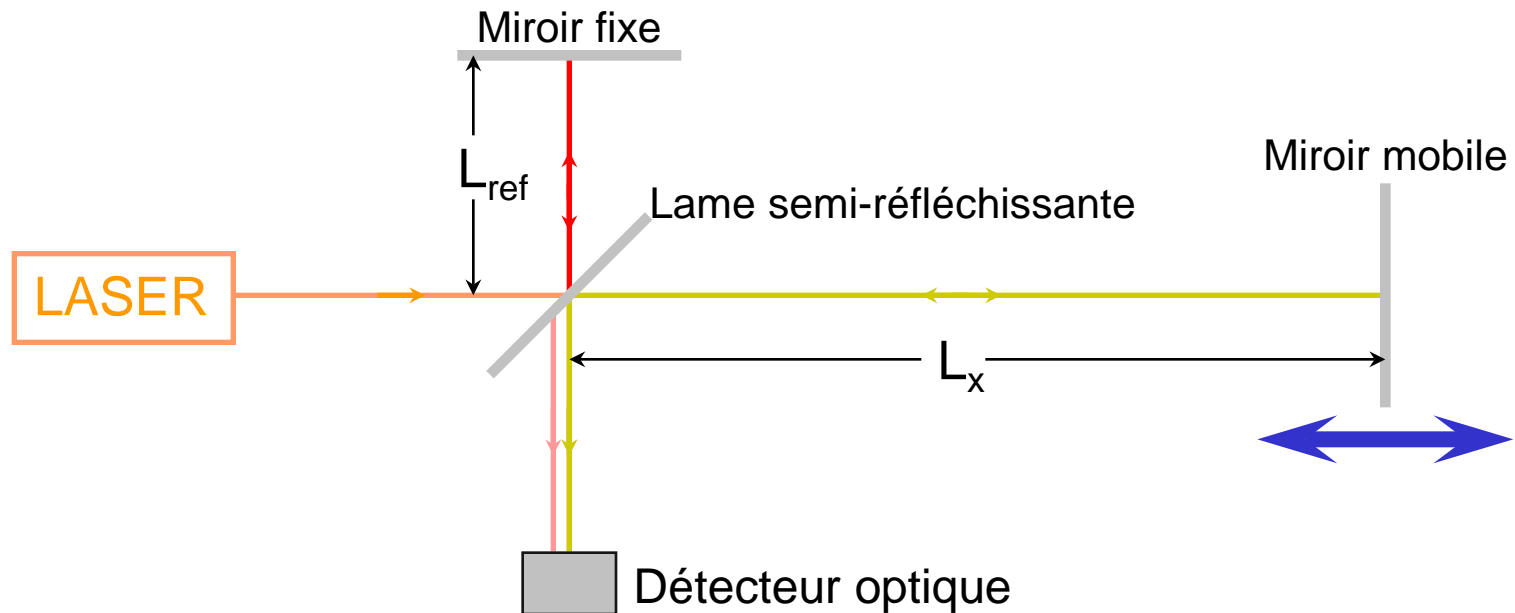
$$d = \frac{f\ell}{D}(\eta + 1)$$

Notons que cette mesure ne dépend presque pas de l'intensité lumineuse reçue !

## 3.7 Capteurs optiques (1)

### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (I)

- Schéma de principe :



L'intensité optique mesurée par le détecteur sera donc :

$$I = I_{\text{ref}} + I_x + 2\sqrt{I_{\text{ref}} I_x} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} 2(L_x - L_{\text{ref}})\right)$$

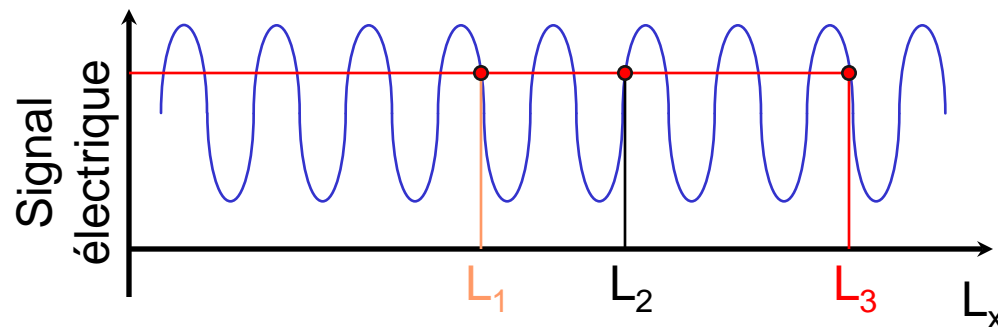


## 3.7 Capteurs optiques (2)

### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (II)

#### • Principe (suite) :

Il est par contre impossible de déterminer  $L_x$  :



Ce type de capteur ne peut vous donner une information que sur un **déplacement** de l'objet par rapport à une référence inconnue.

Par rapport à une position initiale  $L_0$ , ce capteur vous donne une information sur la quantité  $\Delta L$  :

$$L_x = L_0 + \Delta L$$

## 3.7 Capteurs optiques (3)

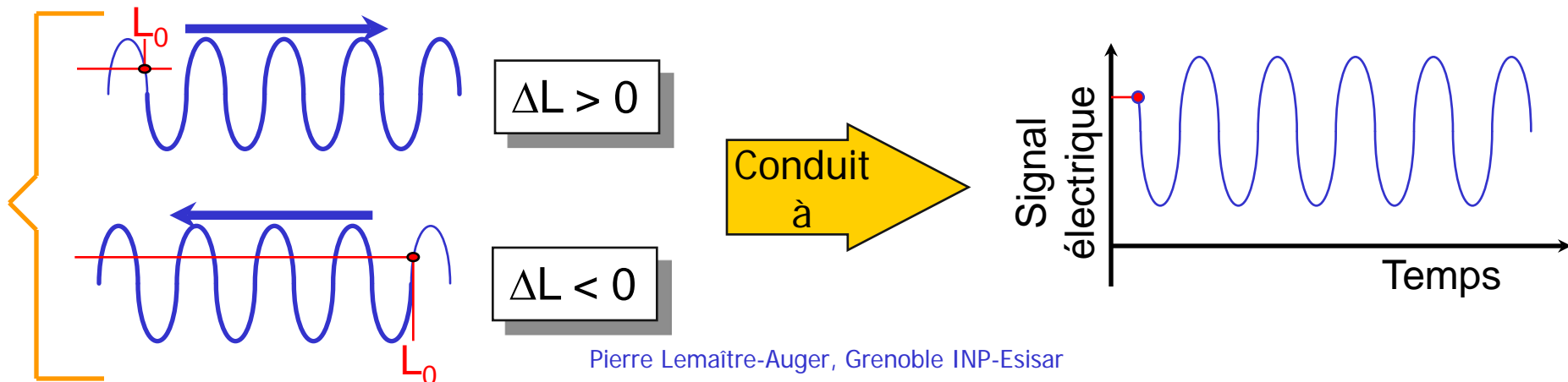
### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (III)

#### • Principe (suite) :

$$I = I_{\text{ref}} + I_x + 2\sqrt{I_{\text{ref}} I_x} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0} (L_0 + \Delta L - L_{\text{ref}})\right)$$

$$I = I_{\text{ref}} + I_x + 2\sqrt{I_{\text{ref}} I_x} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0} \Delta L + \varphi_0\right)$$

Avec la mesure d'un seul signal, il est impossible de connaître le sens du déplacement :



## 3.7 Capteurs optiques (4)

### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (IV)

#### • Principe (suite) :

Il faut nécessairement la présence d'un second signal en quadrature avec le premier (décalé de  $90^\circ$ ) : comme dans le cas du codeur optique :

Pour mieux comprendre, regardons le cas où  $\varphi_0 = 0$  :

$$I_1 = I_{ref} + I_x + 2\sqrt{I_{ref}I_x} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(\pm\Delta L)\right)$$

$$I_2 = I_{ref} + I_x + 2\sqrt{I_{ref}I_x} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(\pm\Delta L) + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$I_2 = I_{ref} + I_x - 2\sqrt{I_{ref}I_x} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(\pm\Delta L)\right)$$

$$I_1 = I_{ref} + I_x + 2\sqrt{I_{ref}I_x} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(\Delta L)\right)$$

$$I_2 = I_{ref} + I_x \mp 2\sqrt{I_{ref}I_x} \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}\Delta L\right)$$

Information sur le signe de  $\Delta L$

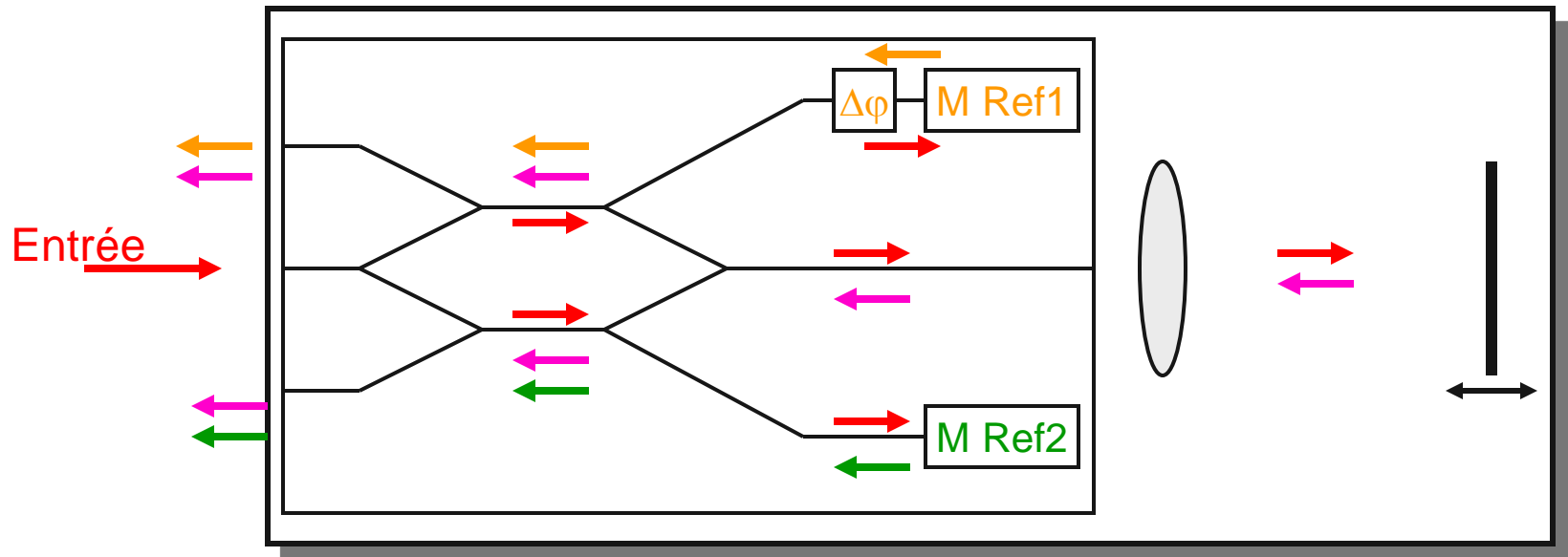
## 3.7 Capteurs optiques (5)

### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (V)

- **Réalisations concrètes :**

On peut réaliser ce type de capteur en optique de volume ou en optique intégrée (guides d'ondes fabriqués sur un seul et même substrat.)

Schéma de principe en optique intégrée :



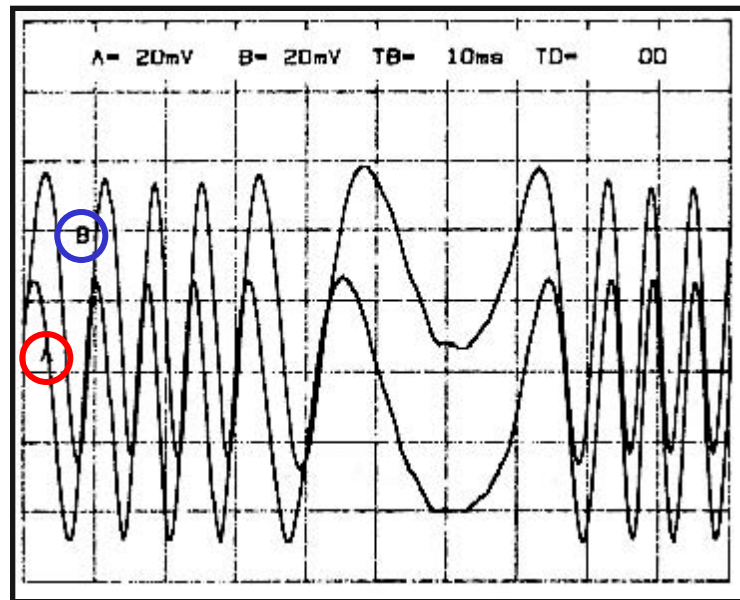
## 3.7 Capteurs optiques (6)

### 3.7.1 Capteur optique interférométrique (VI)

#### • Principe (suite) :

Exemple de signaux obtenus lors d'un changement de direction de l'objet :

- $\Delta L > 0$  lorsque le signal **A** précède le signal **B**
- $\Delta L < 0$  dans le cas contraire



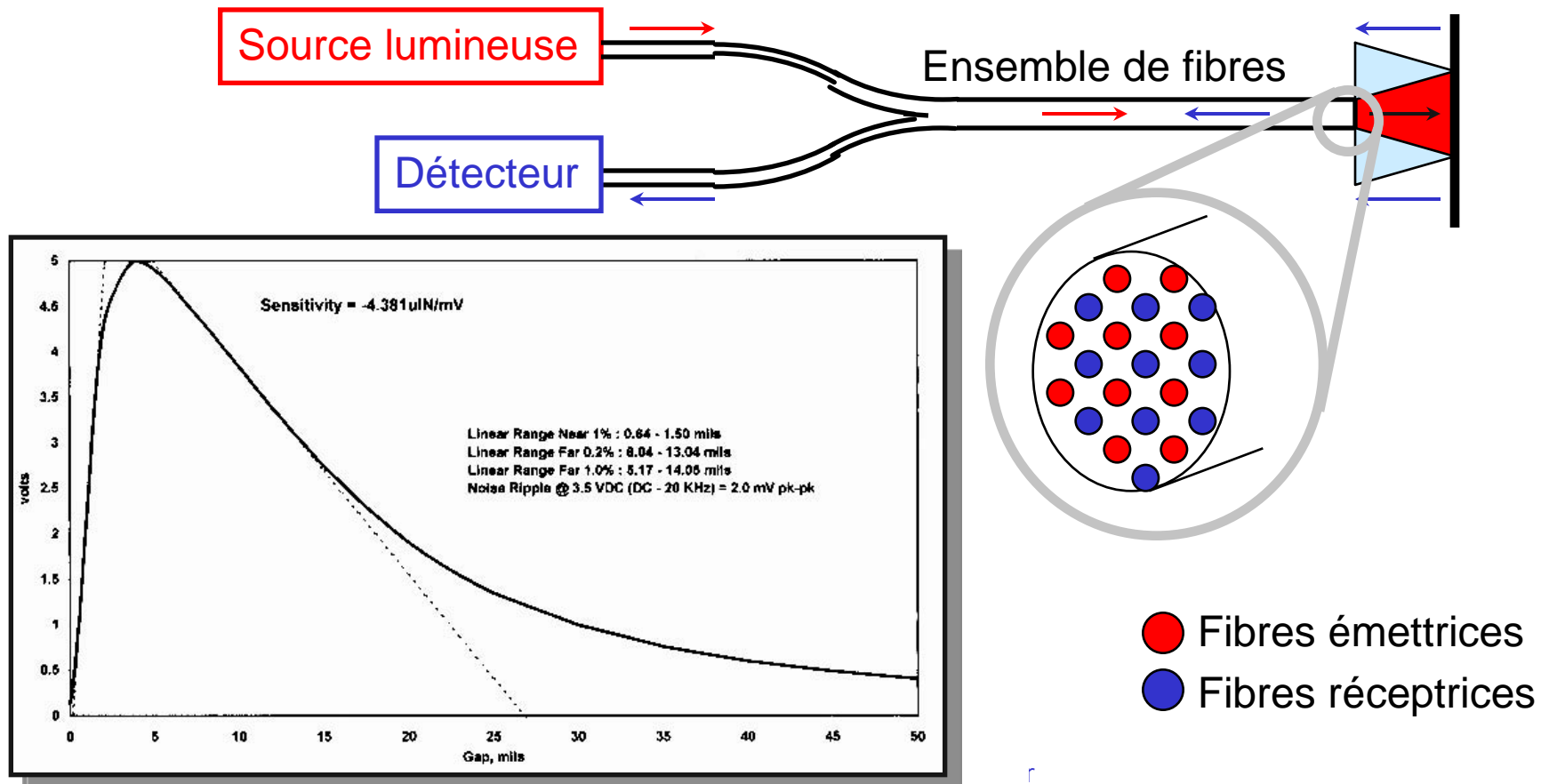
Résolution :  
< 50 nm

Distance de mesure :  
1 à 4 m

## 3.7 Capteurs optiques (7)

### 3.7.2 Capteur de déplacement à fibre optique (I)

- Principe :



## 3.7 Capteurs optiques (8)

### 3.7.2 Capteur de déplacement à fibre optique (II)

#### • Caractéristiques :

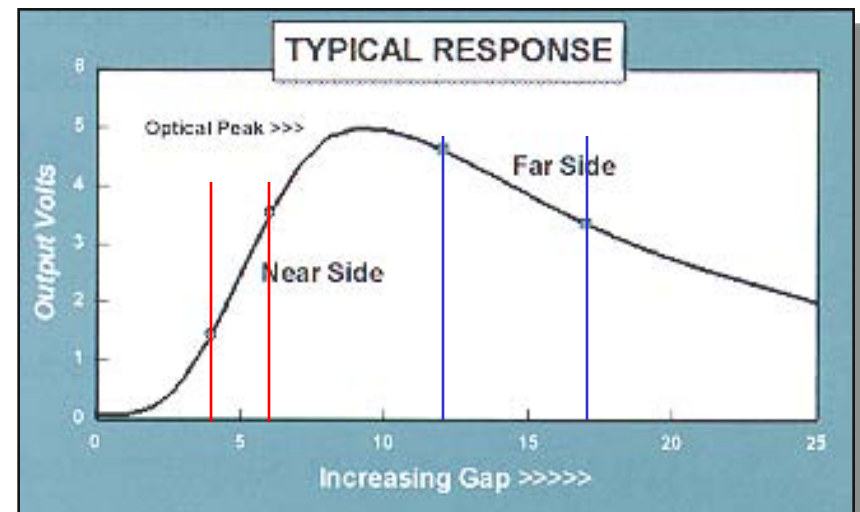
- La réponse de ce type de capteur dépend de la réflectivité de l'objet. En fonction de l'objet, on calibre l'appareil en ajustant la tension de sortie du «maximum optique» à la tension nominale donnée par le fabriquant.
- On travaille en mesurant de petits déplacement autour d'une position centrale dans le domaine «près» ou «lointain».

#### **PRES**

Sensibilité : 0,01 à 0,05  $\mu\text{m}/\text{mV}$   
 Distance de travail : 30  $\mu\text{m}$  à 120  $\mu\text{m}$   
 Etendue : 20  $\mu\text{m}$  à 80  $\mu\text{m}$

#### **LOINTAIN**

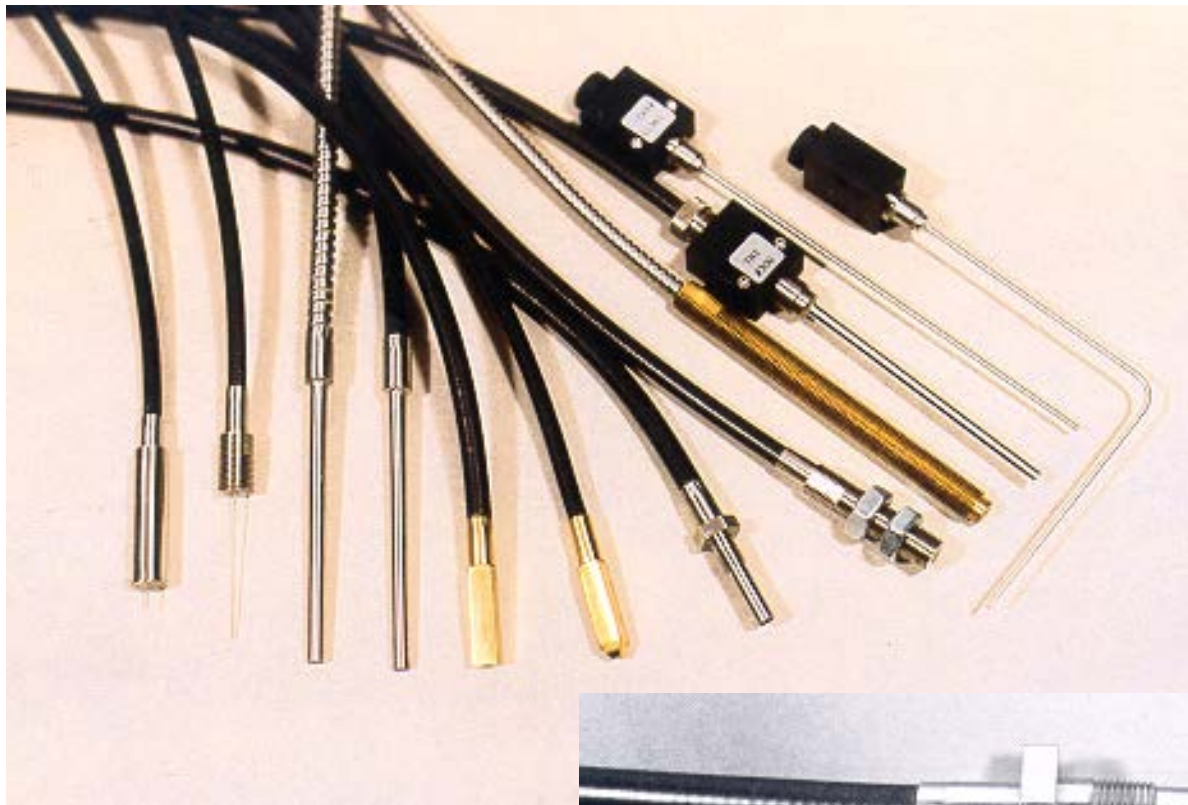
Sensibilité : 0,12 à 3  $\mu\text{m}/\text{mV}$   
 Distance de travail : 360  $\mu\text{m}$  à 4,2 mm  
 Etendue : 200  $\mu\text{m}$  à 5 mm



## 3.7 Capteurs optiques (9)

### 3.7.2 Capteur de déplacement à fibre optique (III)

- Exemples de sondes :



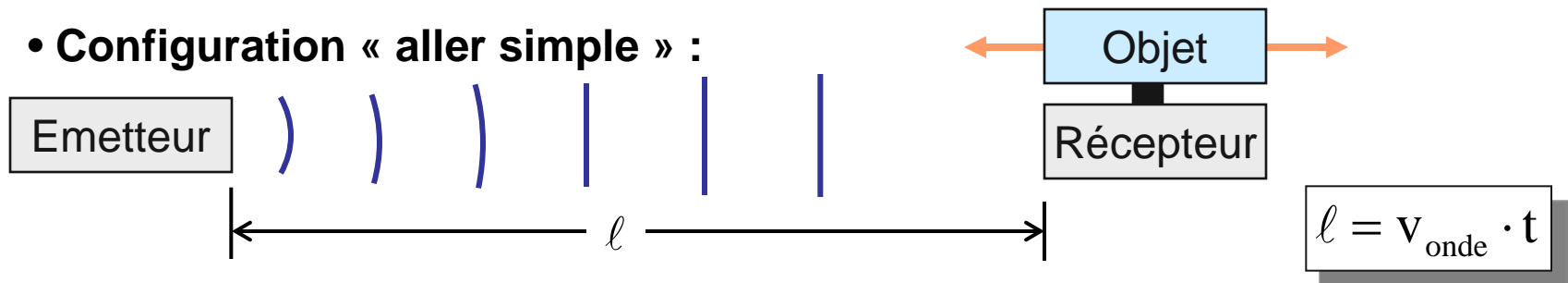


## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (1)

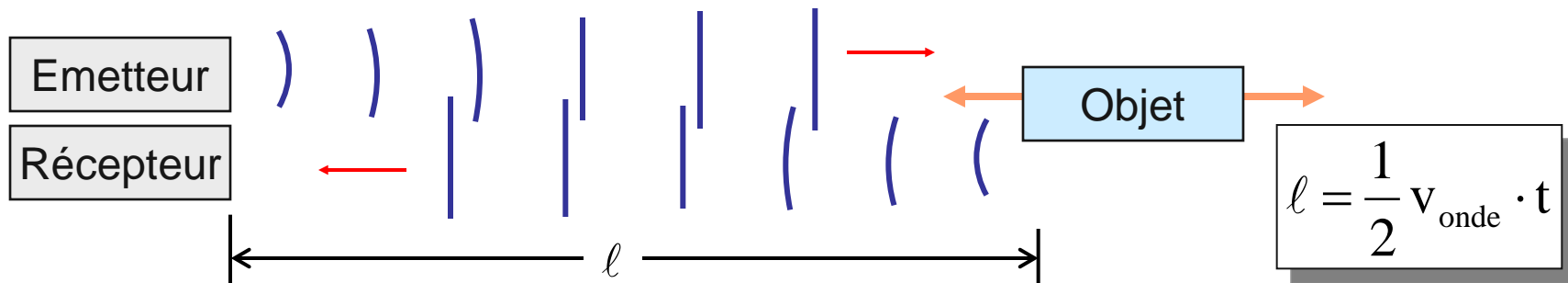
### 3.8.1 Principe physique

Une autre méthode pour la mesure de distance consiste à mesurer le temps de vol d'une onde entre un émetteur et un détecteur.

#### • Configuration « aller simple » :



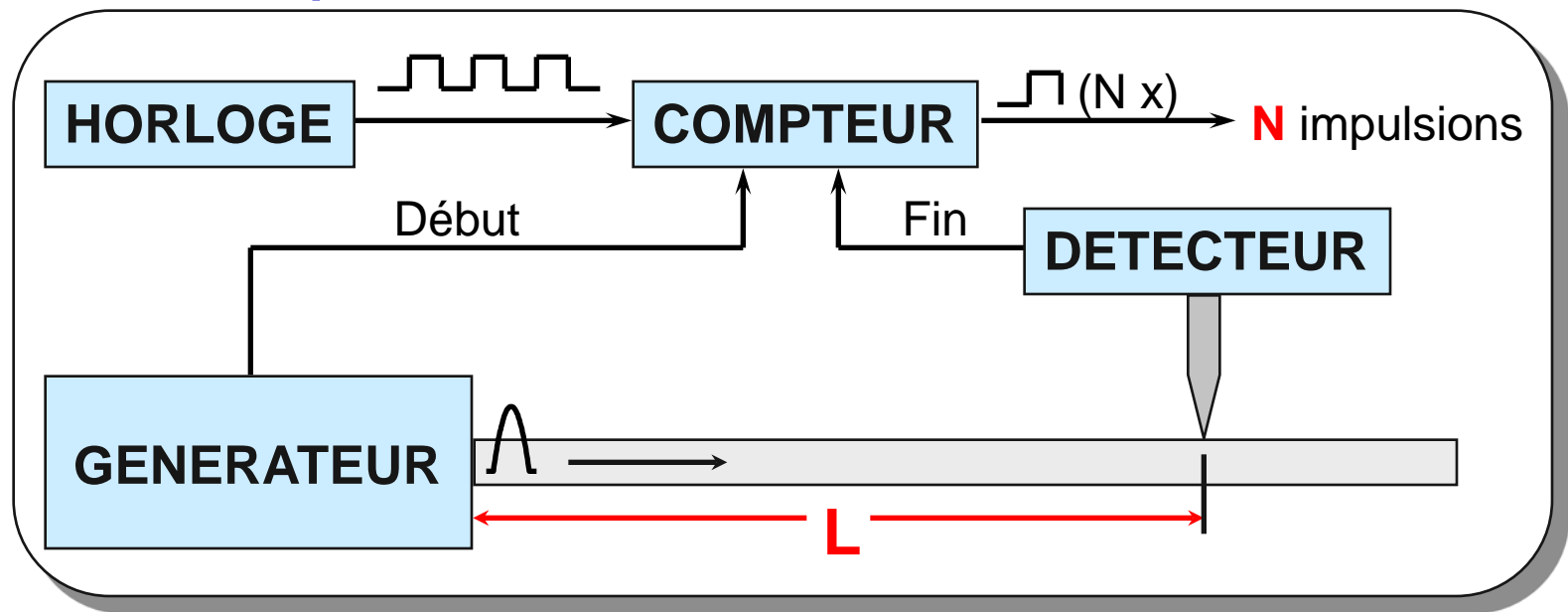
#### • Configuration « aller-retour » :



## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (2)

### 3.8.2 Stratégie de mesure du temps de vol (I)

- Grands déplacements :



$$L = v \cdot (NT_H)$$

Vitesse de propagation  
de l'onde

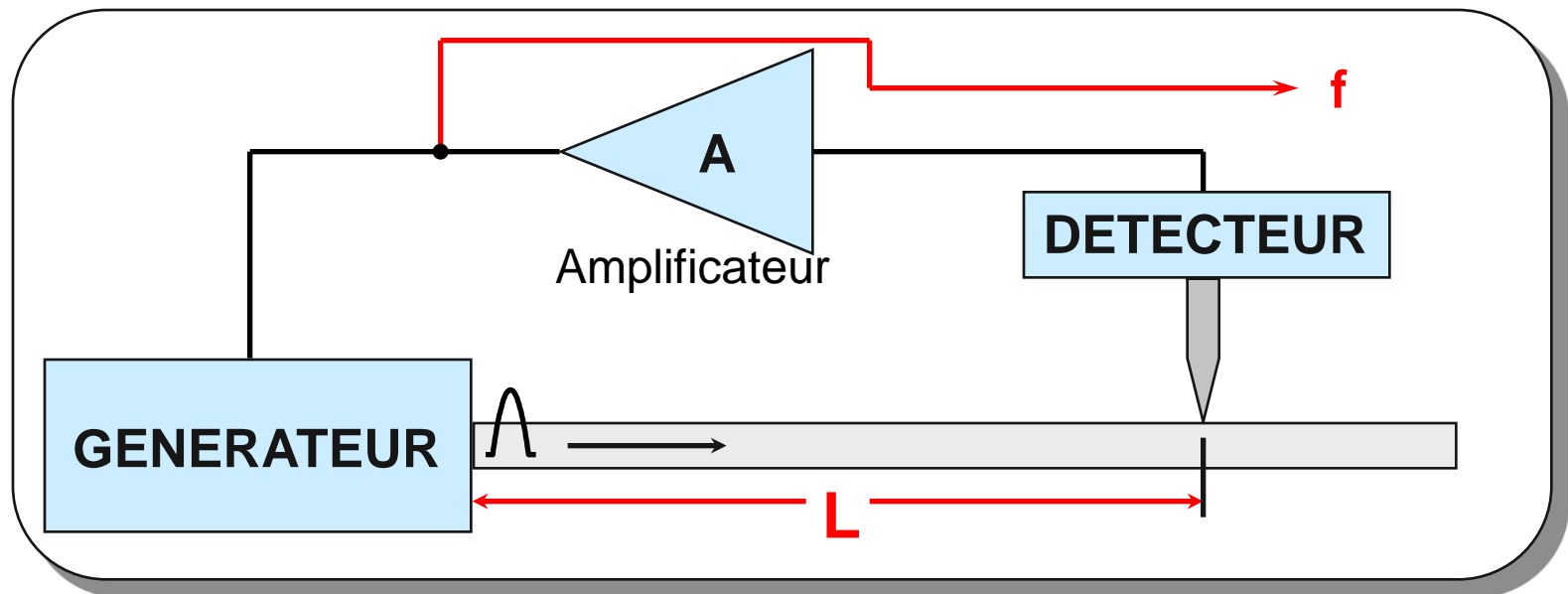
Nombre d'impulsions  
d'horloge

Période de l'horloge

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (3)

### 3.8.2 Stratégie de mesure du temps de vol (II)

- Petits déplacements :



**f** est telle que :  $\phi + \phi_A = 2m\pi$  (m est un entier)

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (4)

### 3.8.2 Stratégie de mesure du temps de vol (III)

#### • Petits déplacements : (suite)

- $\phi$  est le déphasage dû au système de mesure (ligne à retard);
- $\phi_A$  est le déphasage dû à l'amplificateur et à toute l'électronique.

$$\phi = 2\pi f \frac{L}{v}$$

Le système va osciller à une fréquence  $f_0$  correspondant à un  $m$  particulier,  $m_0$ , et à une longueur particulier,  $L_0$ .

$$2\pi f_0 \frac{L_0}{v} + \phi_A = 2m_0\pi$$

$$\Delta L \longrightarrow \Delta f$$

$$\Delta f = \frac{v}{L_0^2} \left( \frac{\phi_A}{2\pi} - m_0 \right) \Delta L$$

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (5)

### 3.8.3 Ondes élastiques (I)

#### • Génération / détection :

##### GENERATEUR

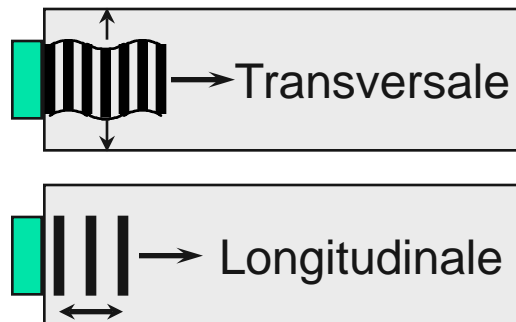
- Effet piézoélectrique
- Magnétostriction, ...

##### DETECTEUR

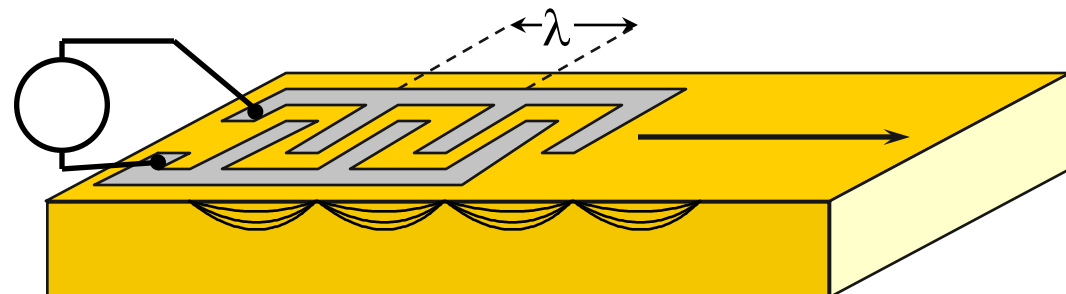
- Effet piézoélectrique
- Effet Villari
- Mesure de la déformation mécanique du support
- Mesure du champ électrique, ...

#### • Type d'ondes :

##### VOLUME



##### SURFACE

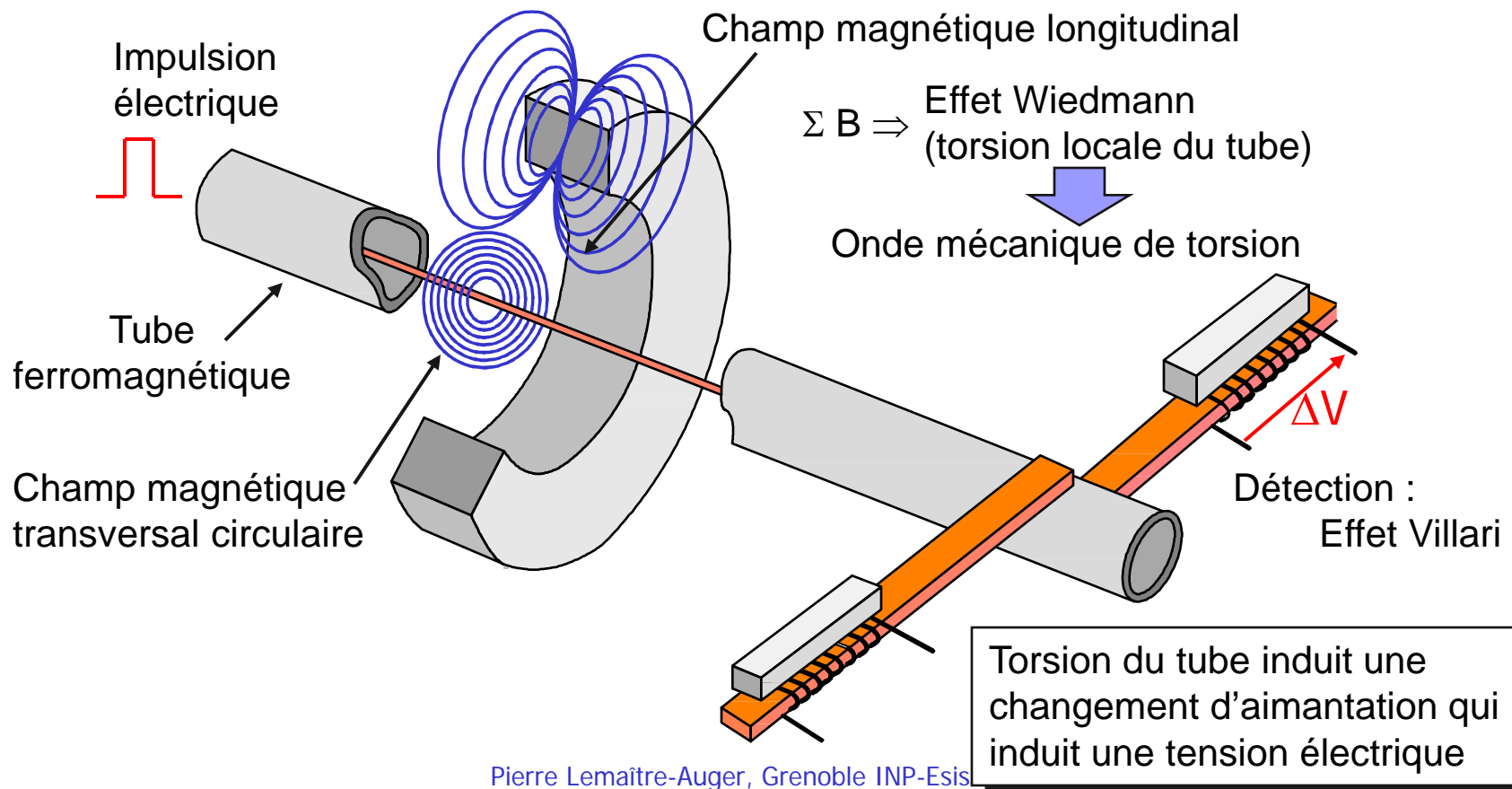


**La vitesse dépend de la nature de l'onde !**

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (6)

### 3.8.3 Ondes élastiques (II)

#### • Capteur magnétostrictif (schéma de principe) :



## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (7)

### 3.8.3 Ondes élastiques (III)

#### • Capteur magnétostrictif (réalisation concrète) :

	Capteurs de déplacement	Capteurs angulaires	Inclinomètres	Autres produits
<b>Capteurs à câble</b> <b>Capteurs à bande</b> <b>Règles magnétiques</b> <b>Magnétostrictif</b>		<b>PCQA22 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position sans contact POSICHRON, boîtier en profilé carré <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesures 0..100 à 0..5750mm</li> <li>• Sortie 0-10V, 4-20mA, SSI, Start/Stop</li> <li>• Indice de protection IP64</li> </ul>		<b>PCQA23 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position sans contact POSICHRON, boîtier en profilé carré <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesures 0..100 à 0..5750mm</li> <li>• Sortie Profibus</li> <li>• Indice de protection IP64</li> </ul>
<a href="#">Demande d'informations</a> <a href="#">Catalogue pdf POSICHRON</a> <a href="#">Manuel pdf POSICHRON</a> <a href="#">Afficheur digital</a> <a href="#">CANopen pour POSICHRON (anglais)</a> <a href="#">CAN SAE J1939 pour POSICHRON (anglais)</a>	<a href="#">information pdf PCQA22</a>		<a href="#">information pdf PCQA23</a>	
		<b>PCQA24 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position sans contact POSICHRON, boîtier en profilé carré <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesures 0..100 à 0..5750mm</li> <li>• Sortie 0-10V, 4-20mA, SSI, Start/Stop</li> <li>• Indice de protection IP67/69K</li> </ul>		<b>PCFP23 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position sans contact POSICHRON, boîtier en profilé ultra-plat <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesure 0... 100 à 0... 5750mm</li> <li>• Sortie 0-10V, 4-20mA, SSI, Start/Stop</li> <li>• Indice de protection: IP64</li> </ul>
	<a href="#">information pdf PCQA24</a>		<a href="#">information pdf PCFP23</a>	
		<b>PCFP24 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position sans contact POSICHRON, boîtier en profilé ultra-plat <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesure 0... 100 à 0... 5750mm</li> <li>• Sortie 0-10V, 4-20mA, SSI, Start/Stop</li> </ul>		<b>PCFP25 Capteur magnétostrictif</b> Capteur de position POSICHRON, boîtier en profilé ultra-plat <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plage de mesure jusqu'à 5500 mm</li> <li>• Sortie 0-10V, 4-20mA</li> </ul>

**CONTACT**

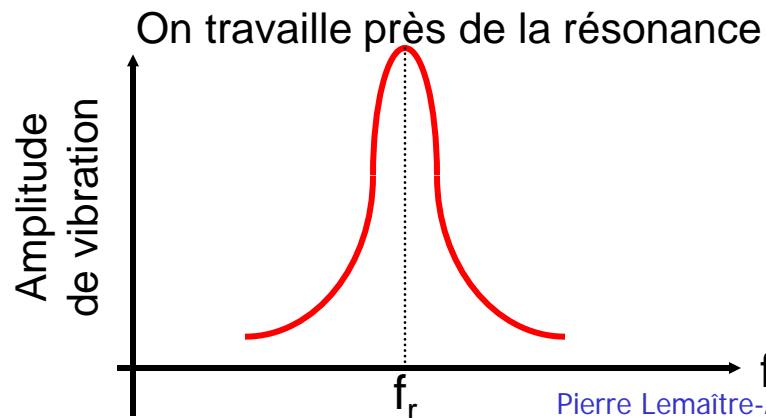
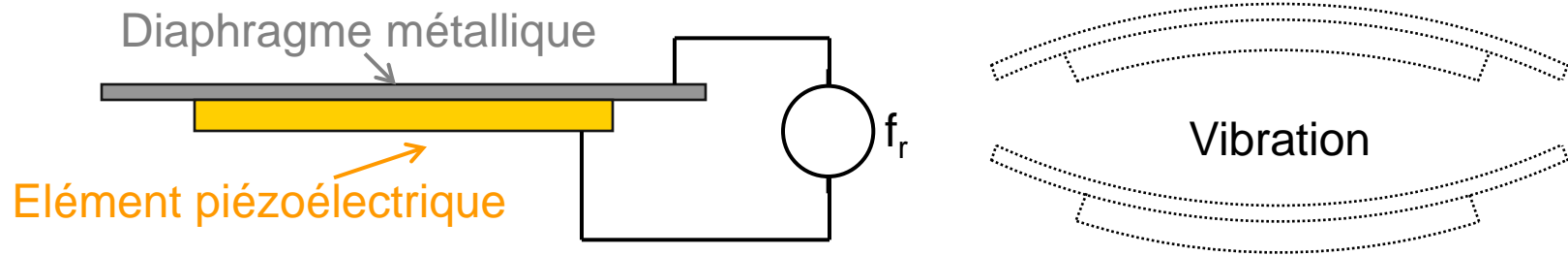
+33(0)3 88 49 25 35

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (8)

### 3.8.4 Ondes sonores

Avec un transducteur piézoélectrique, on peut aisément produire et détecter des ondes ultrasoniques ( $f > 20$  kHz).

#### Schéma de principe :



- **Avantage :**  
 $V_{\text{son}}$  ds air  $\approx 360$  m/s  $\Rightarrow$  bonne précision pour courte distance
- **Inconvénient :**  
 Nécessite une absence totale de vent



## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (9)

### 3.8.5 Ondes électromagnétiques (I)

On peut enfin travailler avec des ondes électromagnétiques dans le domaine :

- Radiofréquence (exemple le radar !),
- Optique (télémètre optique).

#### Temps de vol:

Cette technique est bien adaptée à la mesure de grandes distances.

Pour de courtes distances, les temps de vol sont très courts



Electronique précise

#### Exemple :

Plus petit temps mesurable : 1 ns

Résolution spatiale :  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \times 10^{-9} \text{ s} = 0,3 \text{ m} = \mathbf{30 \text{ cm} !}$

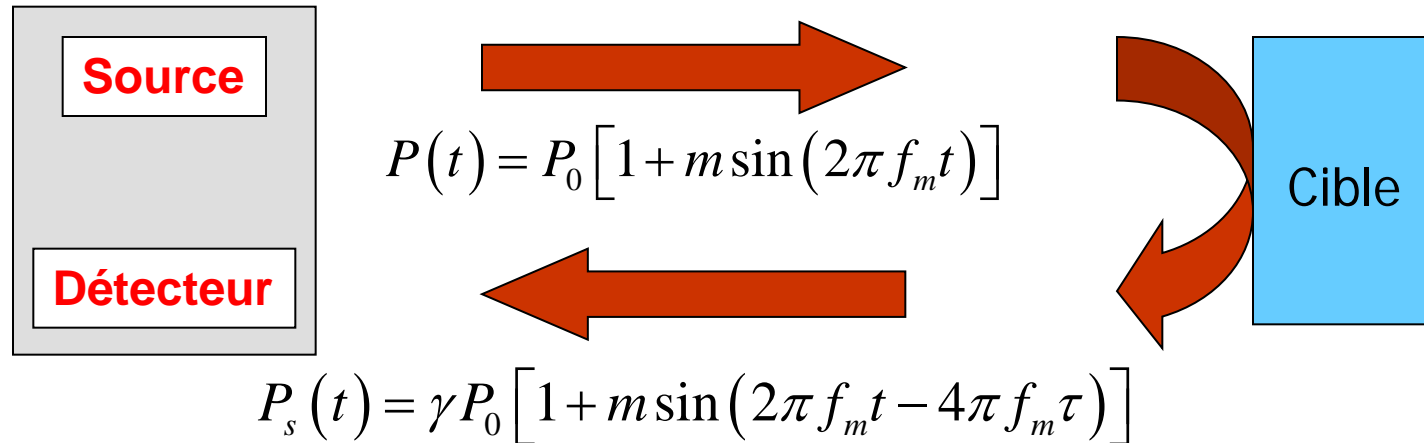


## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (10)

### 3.8.5 Ondes électromagnétiques (II)

Alternative possible :  
Techniques de modulation de phase

Principe:



$\tau = \frac{z}{c}$  : temps de vol

$P(t)$  : puissance émise

$P_0$  : puissance moyenne émise (à la fréquence  $f_{\text{porteuse}}$ )

$P_s(t)$  : puissance reçue

$m$  : facteur de modulation,  $[0,1]$

$f_m$  : fréquence modulation

$\gamma$  : fraction de  $P_0$  reçue

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (11)

### 3.8.5 Ondes électromagnétiques (III)

**Modulation de phase (suite) :**

$$P_s(t) = \gamma P_0 \left[ 1 + m \sin \left( 2\pi f_m t - \underbrace{4\pi f_m \tau}_{\phi : \text{déphasage}} \right) \right]$$

Par une électronique adéquate, on mesure  $\phi$ . Alors :

$$z = (\phi + 2n\pi) \frac{c}{4\pi f_m}$$

Il y a une ambiguïté sur la phase (le multiple de  $2\pi$ ). La plage utile est donc limitée à un déphasage compris entre 0 et  $2\pi$ . Cela limite la distance maximale d'utilisation.

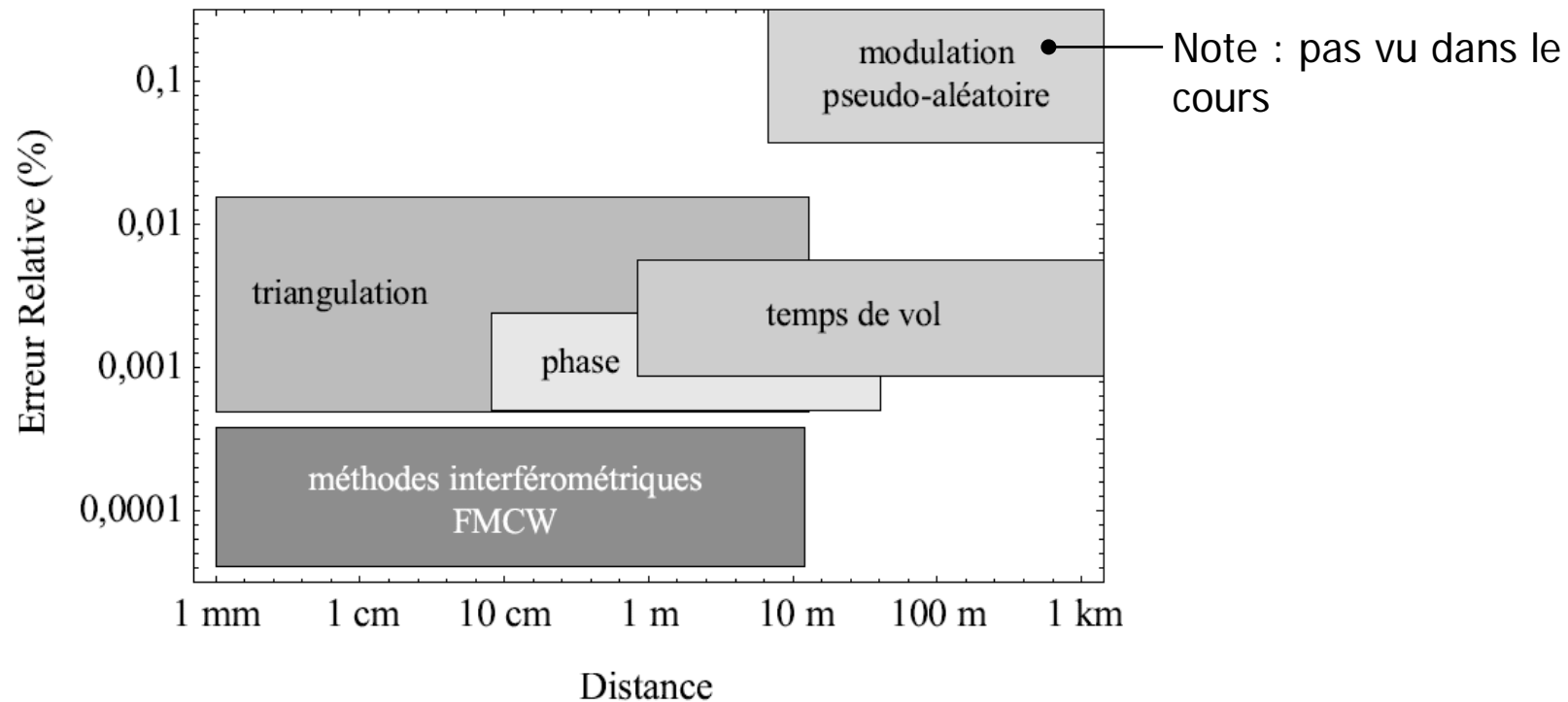
**En pratique:**

On utilise 2 fréquences de modulation:  $f_{\text{basse}}$  : détermine la portée  
 $f_{\text{haute}}$  : détermine la résolution

## 3.8 Capteurs à propagation d'ondes (12)

### 3.8.6 Synthèse

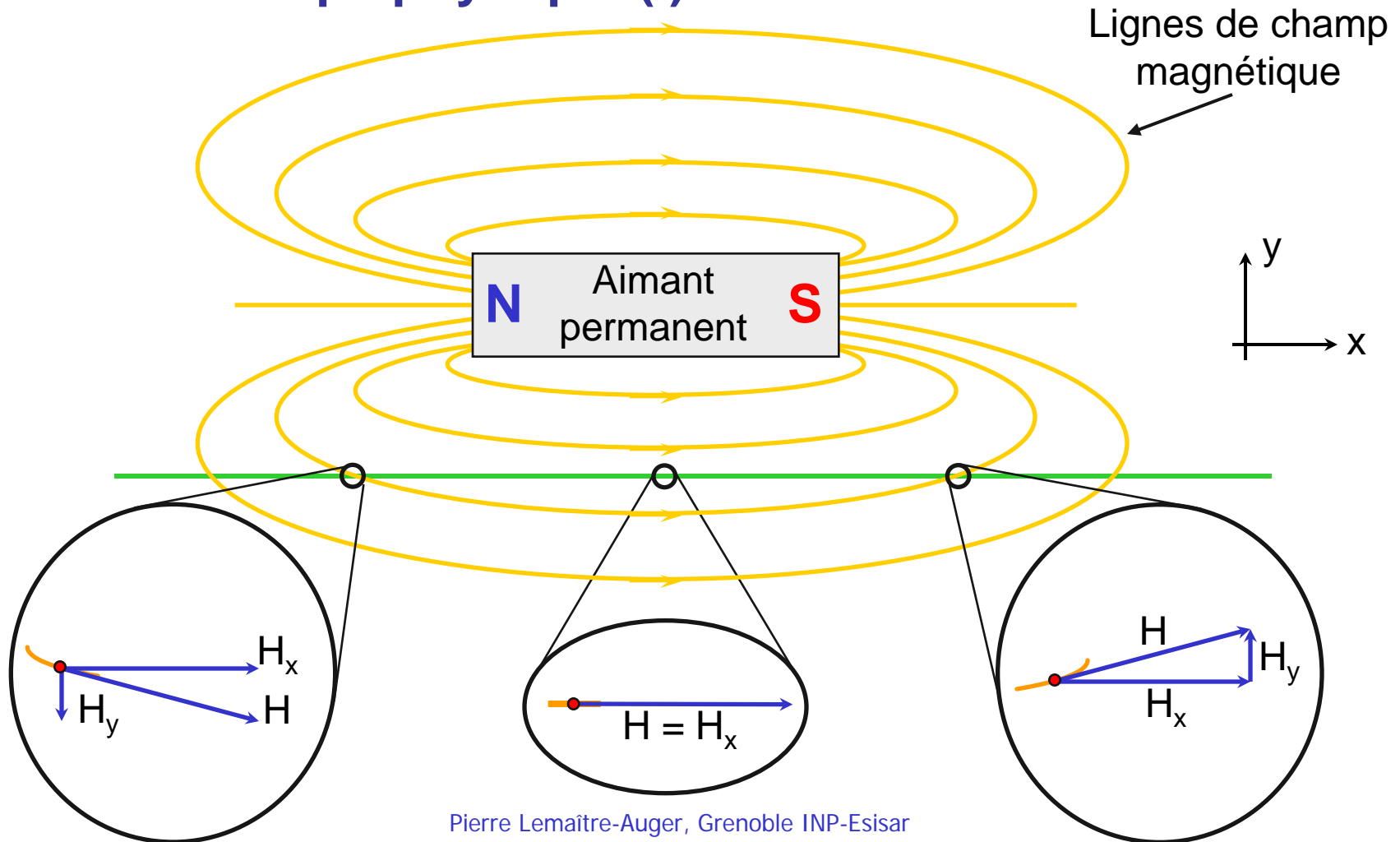
#### Portée / Technologie optique appropriée



Source : Vincent DELAYE, Etude et réalisation d'un télémètre laser par temps de vol, Grenoble INP, 2000.

## 3.9 Position par la mesure du champ magnétique<sup>245</sup> magnétique (1)

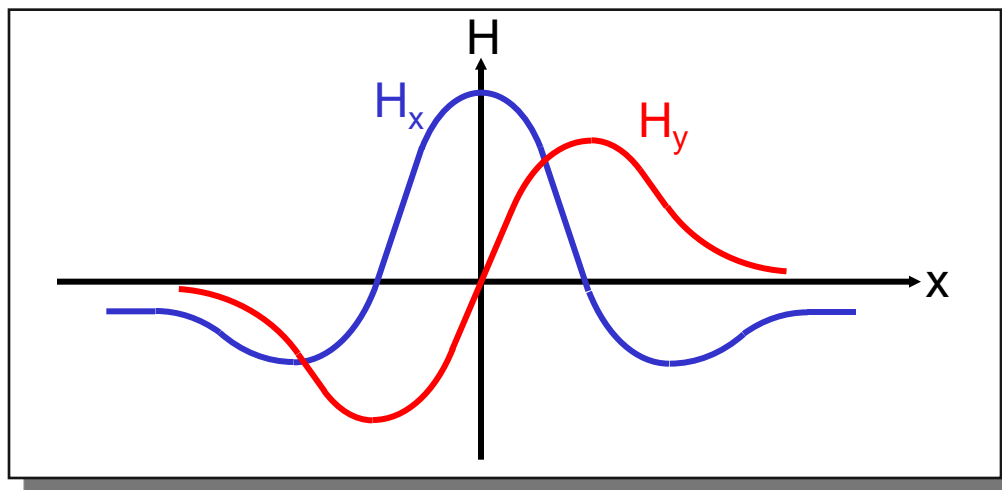
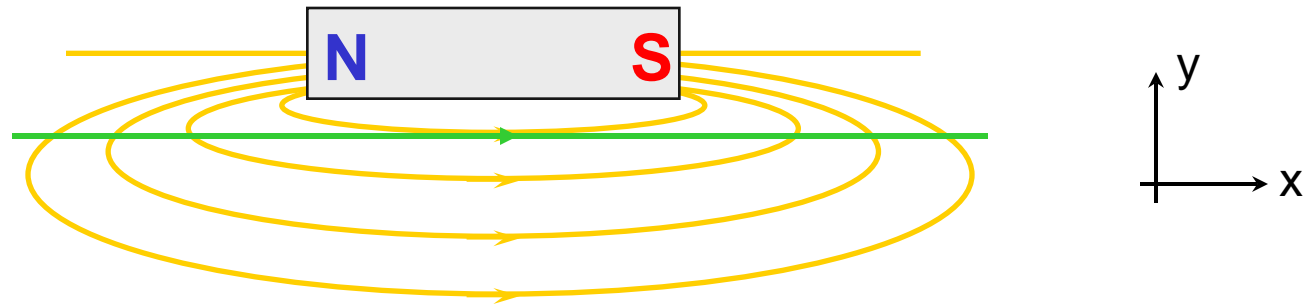
### 3.9.1 Principe physique (I)



## 3.9 Position par la mesure du champ magnétique<sup>246</sup> magnétique (2)

### 3.9.1 Principe physique (II)

Comme on vient de le voir, le champ magnétique produit par un aimant permanent varie en fonction de la position par rapport à ce dernier. **En mesurant ce champ, on peut mesurer une position.**



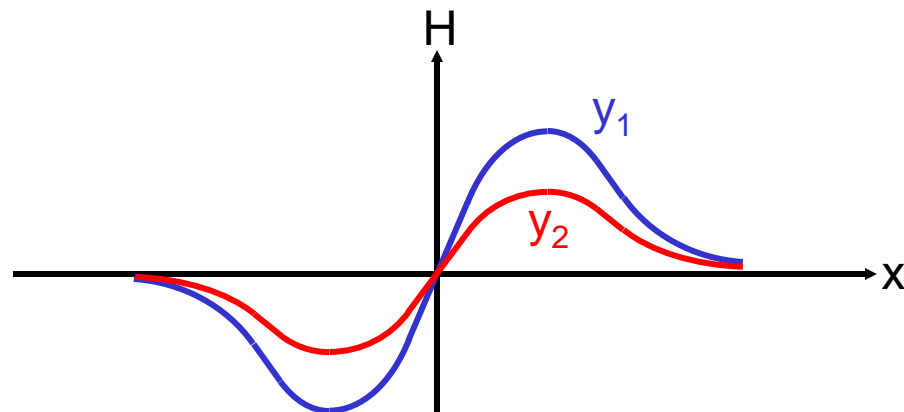
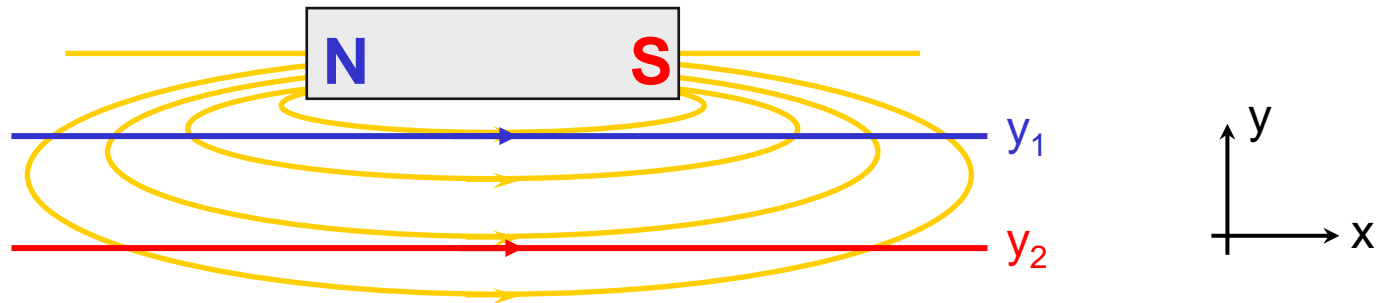
$H_y$  : signal utilisé

## 3.9 Position par la mesure du champ magnétique<sup>247</sup> magnétique (3)

### 3.9.1 Principe physique (III)

Pour un bon fonctionnement de ce type de capteur, il ne faut pas que l'aimant se déplace suivant la direction  $y$ .

**Pour des déplacement linéaires uniquement.**

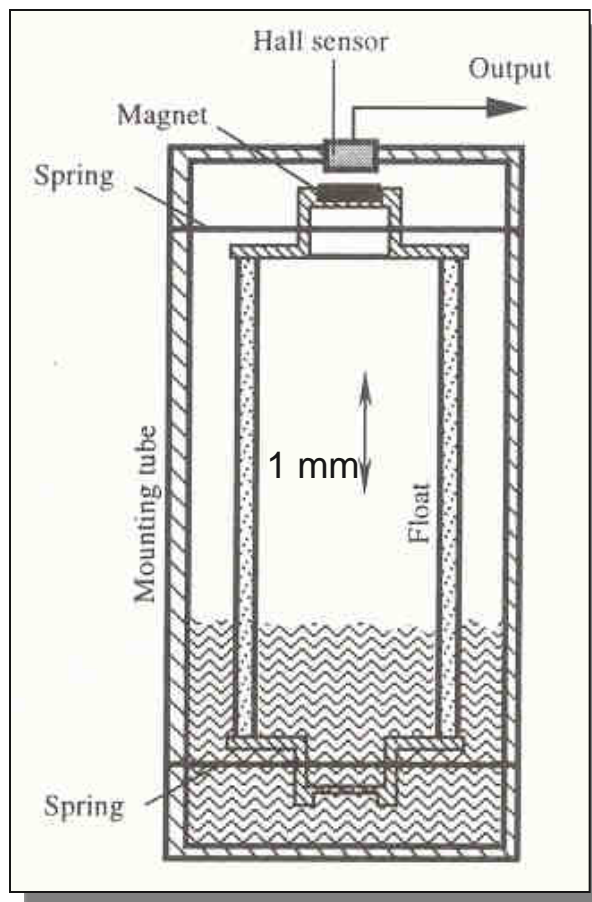


# 3.9 Position par la mesure du champ magnétique<sup>248</sup>

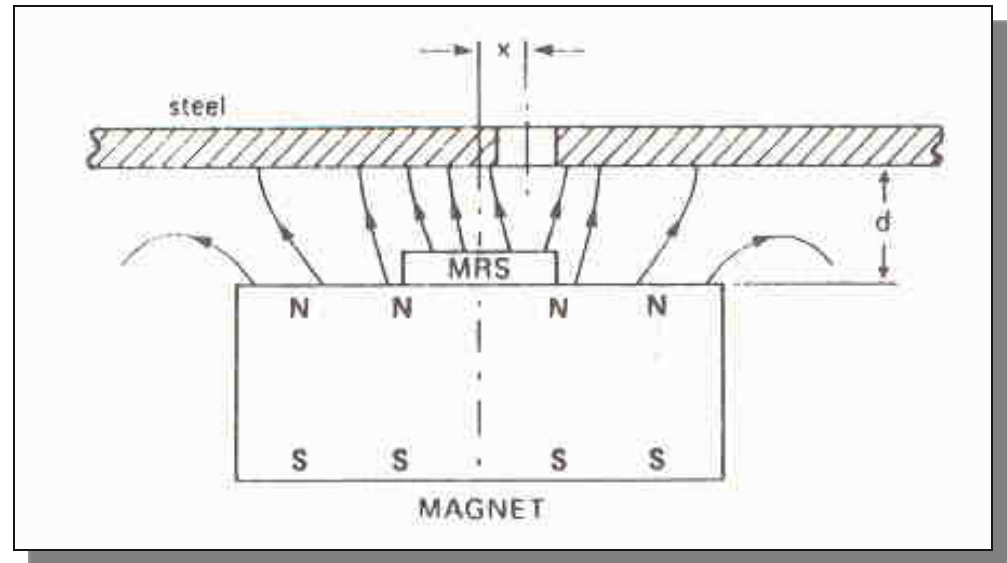
## magnétique (4)

### 3.9.2 Exemple d'application

Capteur de niveau d'essence



Déplacement d'une pièce métallique



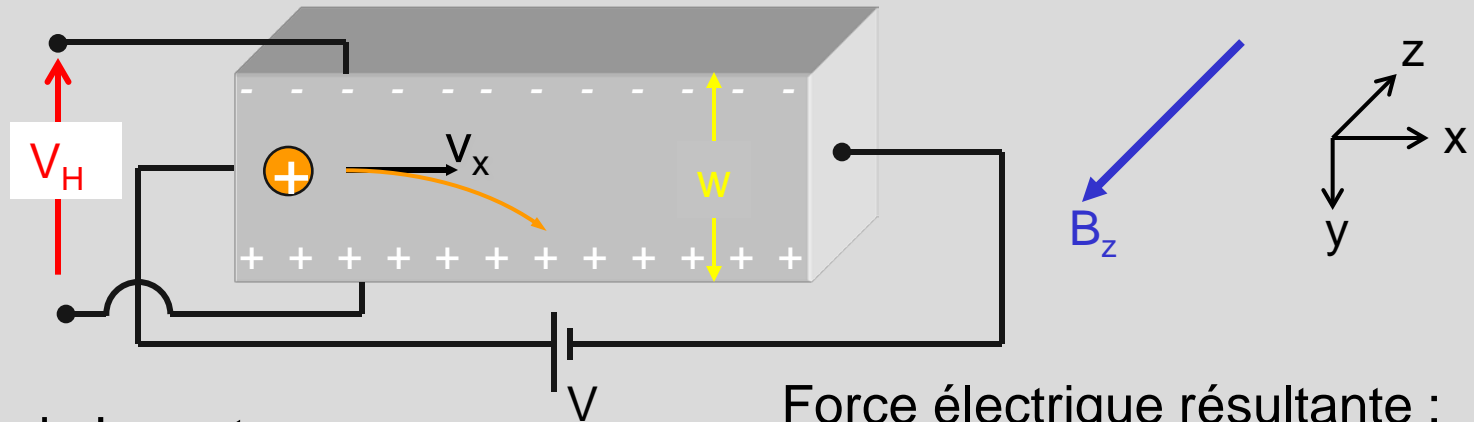


## 3.9 Position par la mesure du champ magnétique (5) <sup>249</sup>

Culture personnelle

### 3.9.3 Mesure du champ magnétique (I)

- Sondes Hall :



Force de Lorentz :

$$\vec{F} = q\vec{v} \wedge \vec{B} = e v_x B_z \vec{j}$$

Force électrique résultante :

$$\vec{F} = -eE_y \vec{j} = -e \frac{V_H}{w} \vec{j}$$

A l'équilibre  $\Sigma F=0$  :

$$e v_x B_z \vec{j} = e \frac{V_H}{w} \vec{j}$$

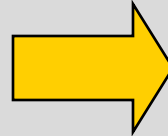
## 3.9 Position par la mesure du champ magnétique (6) <sup>250</sup>

Culture personnelle

### 3.9.3 Mesure du champ magnétique (II)

- Sondes Hall (suite) :

$$e v_x B_z \vec{j} = e \frac{V_H}{w} \vec{j}$$



$$V_H = v_x w B_z$$

Or :

$$v_x = \left( \frac{J}{qn} \right)$$

J : densité de courant  
q : charge des porteurs  
n : densité des porteurs

On trouve donc :

$$V_H = R_H J w B_z$$

où :

$$R_H = \begin{cases} \frac{1}{en_h} & \text{pour des trous} \\ -\frac{1}{en_e} & \text{pour des électrons} \end{cases}$$

## 3.10 Capteurs inertiels (1)

### 3.10.1 Principe

Dans certains cas, pour déterminer en temps réel la position d'un objet, il faut mesurer les vitesses angulaires et les accélérations subies :

$$\theta_i(t) = \int_0^t \omega_i dt + \theta_0$$

$$i(t) = \int_0^t \int_0^t a_i dt + \int_0^t a_i dt + i_0$$

$i = x, y \text{ ou } z$



C'est le cas de certains systèmes embarqués comme des avions, voitures (de luxe!), bateaux...

Problème majeur : la dérive temporelle. C'est systèmes sont donc souvent aidés par la réception du signal GPS pour corriger les mesures (filtre de Kalman).

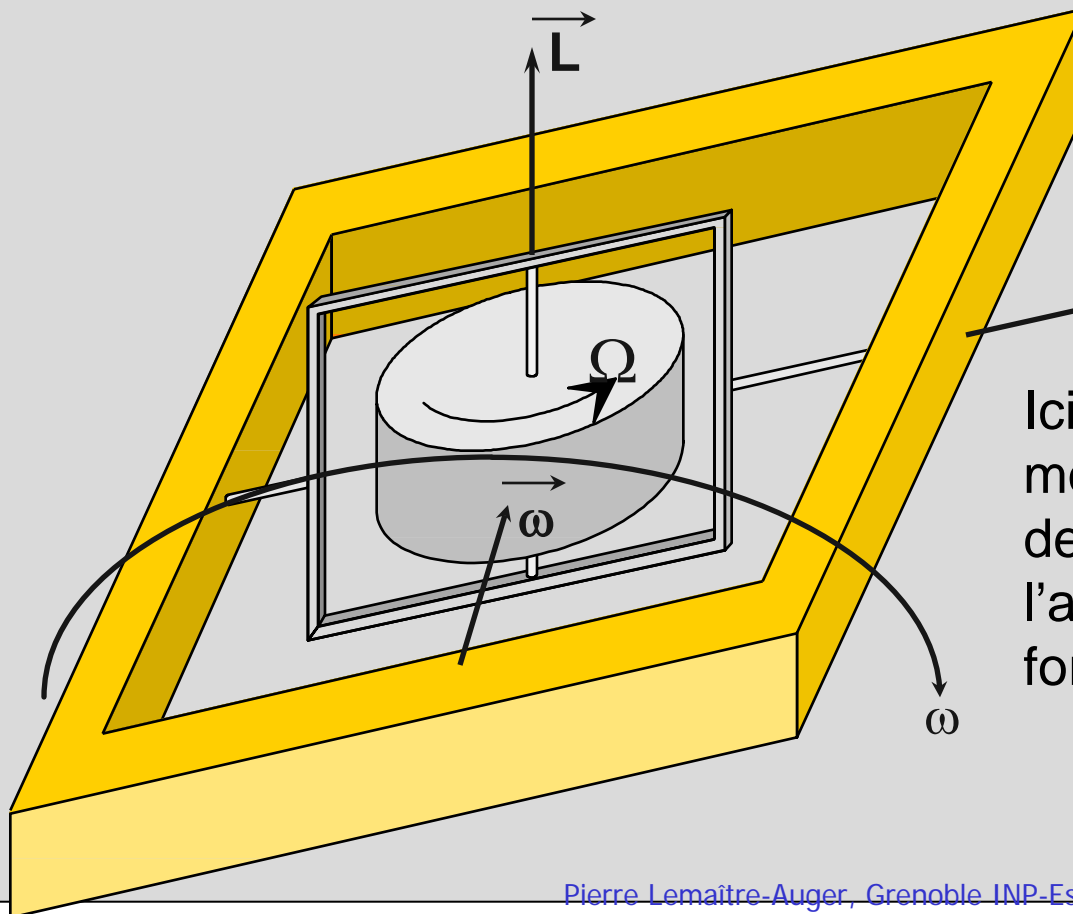
Les capteurs nécessaires sont des **gyroscopes** et des **accéléromètres**

## 3.10 Capteurs inertiels (2)

Culture personnelle

### 3.10.2 Gyroscopes mécaniques (I)

- Conservation du moment cinétique :



En l'absence de force extérieure,  $\vec{L}$  est conservé :

$$\vec{L} = I\vec{\Omega}$$

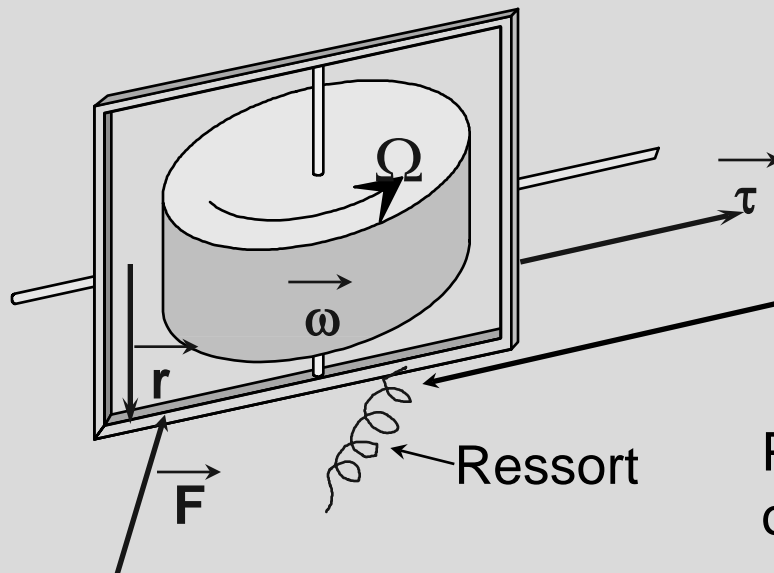
Ici,  $\omega$  entraîne une modification de  $L$  (variation de son orientation), d'où l'apparition d'un moment de force (couple) sur la toupie :

$$\vec{\tau} = \vec{\omega} \wedge \vec{L}$$

## 3.10 Capteurs inertiels (3)

Culture personnelle

### 3.10.2 Gyroscopes mécaniques (II)



Le moment de force entraîne l'apparition d'une force à ce niveau-ci de la toupie :

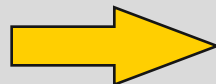
$$\vec{\tau} = \vec{r} \wedge \vec{F}$$

Par l'intermédiaire d'un ressort, on mesure cette force et ainsi  $\omega$  :

$$\vec{\omega} \wedge I\vec{\Omega} = \vec{r} \wedge \vec{F}$$

Puisqu'il n'y a que des angles de  $90^\circ$  :

$$\omega I \Omega = r F$$



$$\omega = \frac{rF}{I\Omega} = KF$$

K : constante



## 3.10 Capteurs inertiels (4)

Culture personnelle

### 3.10.2 Gyroscopes mécaniques (III)

Ordres de grandeurs :

- Vitesse de rotation de la toupie :  $10^4$  tr/min
- Etendue de mesure :  $\pm 7$  °/s à  $\pm 360$  °/s
- Précision :  $\pm 2$  à  $3$  %

## 3.10 Capteurs inertiels (5)

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (I)

- Quelques données :

Etat de l'art (en 2000)

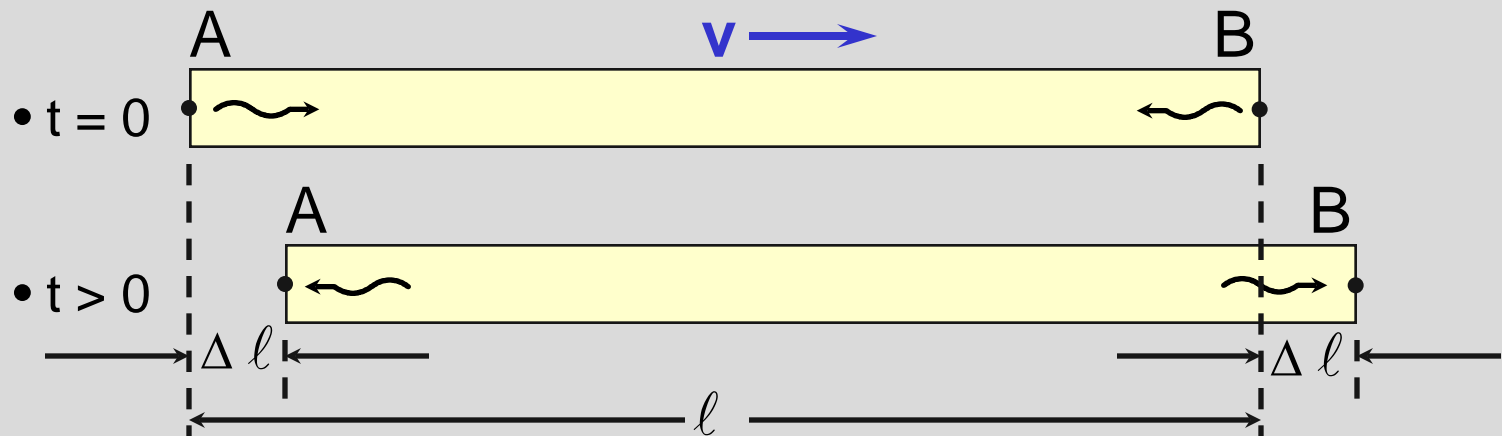
	Bobine de fibre	Résonateur	Laser à fibre
<b>Résolution</b>			
1 <sup>ère</sup> génération	100 °/h	10 °/h	<0,01°/h
2 <sup>ième</sup> génération	1 °/h	→ < 0,01 °/h	?
3 <sup>ième</sup> génération	0,01 °/h	?	?
	→ 0,001 °/h		

## 3.10 Capteurs inertiels (6)

Culture personnelle

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (II)

- **Effet Sagnac, principe :** Emission de lumière au points A et B simultanément



$$l_{A \rightarrow B} : d_{AB} = l + \Delta l = l + vt_1$$

$$t_1 = \frac{nl}{c} + t' \approx \frac{nl}{c}$$

$$d_{AB} = l + v \frac{nl}{c} = l \left( 1 + \frac{nv}{c} \right)$$

$$l_{B \rightarrow A} : d_{BA} = l - \Delta l = l - vt_2$$

$$t_2 = \frac{nl}{c} - t' \approx \frac{nl}{c}$$

$$d_{BA} = l - v \frac{nl}{c} = l \left( 1 - \frac{nv}{c} \right)$$



## 3.10 Capteurs inertiels (7)

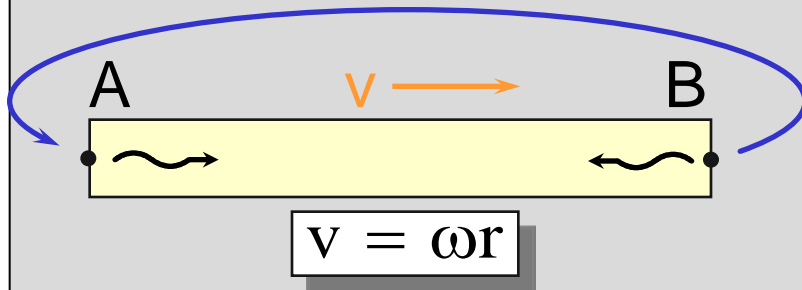
Culture personnelle

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (III)

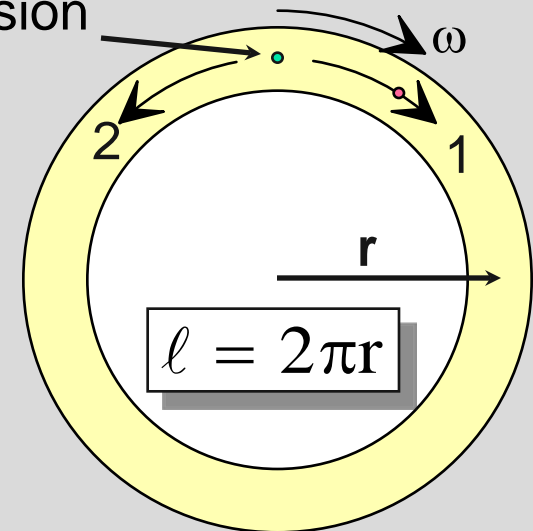
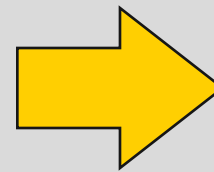
- Effet Sagnac, principe : (suite)

Différence de chemin :  $\Delta L = d_{AB} - d_{BA} = 2n\ell \frac{v}{c}$

Replions maintenant le trajet :



Source d'émission de lumière



$$\Delta \ell = 2n\ell \frac{\omega r}{c}$$

La mesure de  $\Delta \ell$  nous informe sur  $\omega$  !

## 3.10 Capteurs inertiels (8)

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (IV)

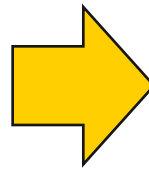
Comment mesurer  $\Delta\ell$  ?

- **1° Interférence à 2 ondes** : 2 faisceaux optiques cohérents parcourant une différence de chemin  $\Delta\ell$  vont interférer entre eux :

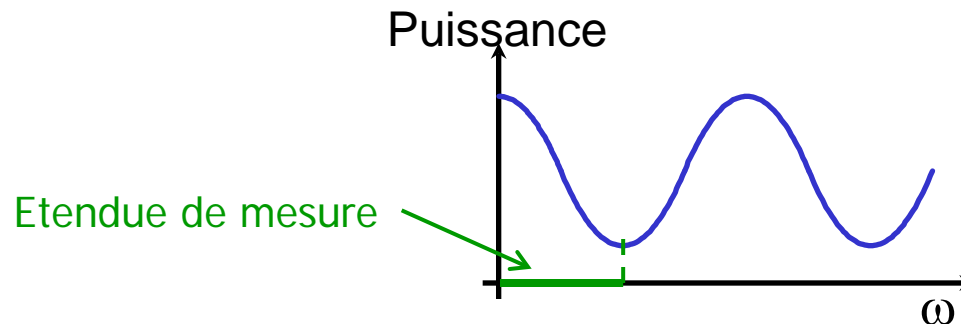
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi)$$

où :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta\ell$$



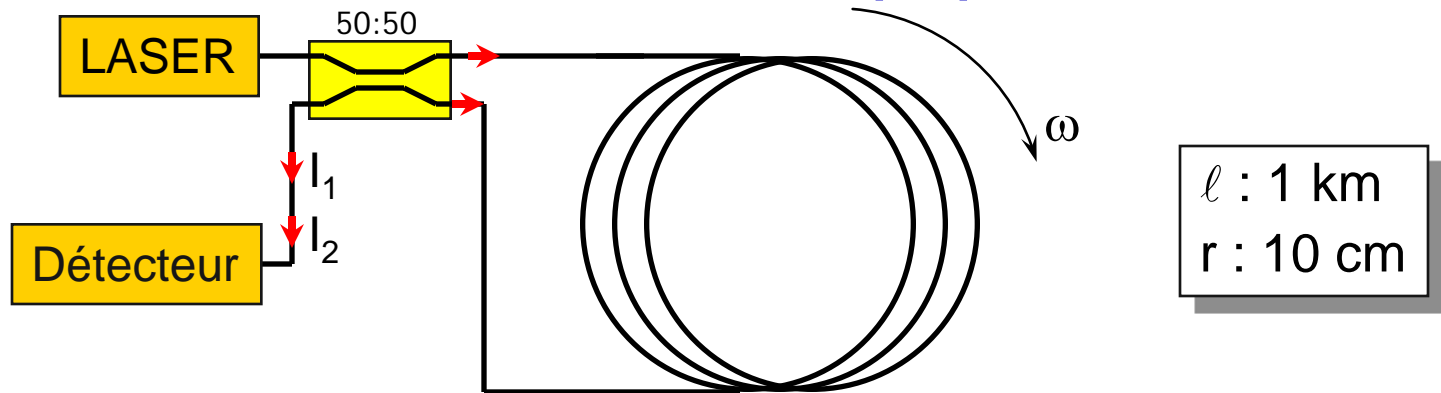
$$\Delta\phi = \frac{4\pi n \ell r}{\lambda_0 c} \omega$$



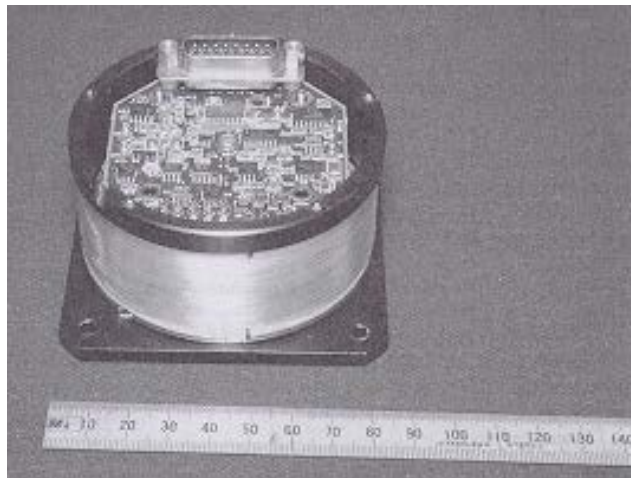
## 3.10 Capteurs inertiels (9)

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (V)

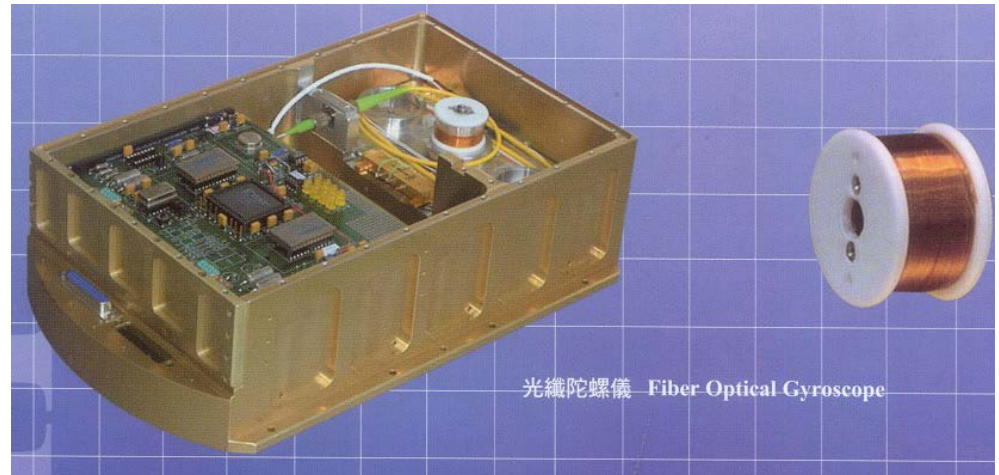
Réalisation concrète : bobine de fibre optique



Aviation



Automobile

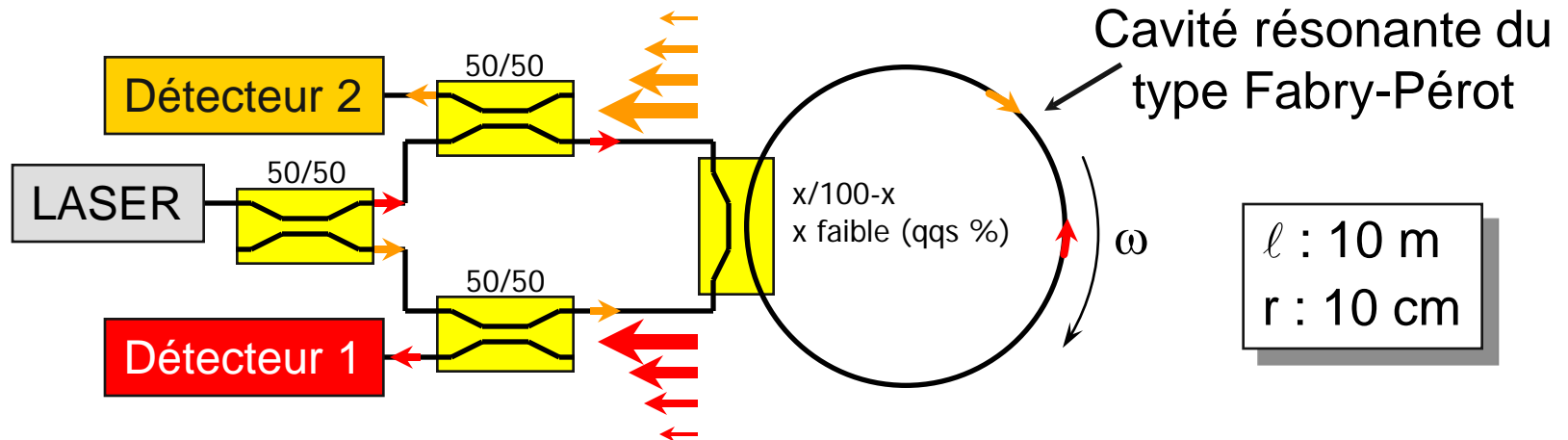


光纖陀螺儀 Fiber Optical Gyroscope

## 3.10 Capteurs inertiels (10)

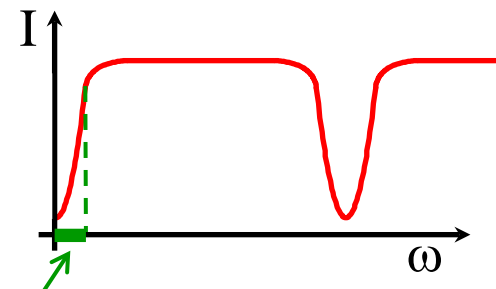
### 3.10.3 Gyroscopes optiques (VI)

- 2° Interférence à ondes multiples : résonateur



$$I = I_0 \left( 1 - \frac{1}{1 + M \sin^2(\Delta\phi/2)} \right)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n \ell r}{\lambda c} \omega$$



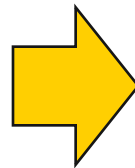
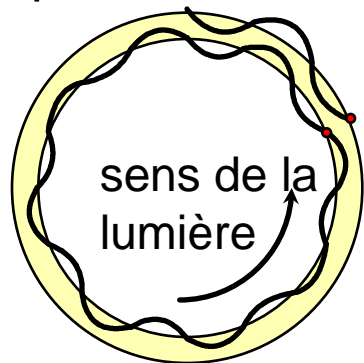
Etendue de mesure

## 3.10 Capteurs inertiels (11)

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (VII)

- 3° Battement optique : cavité laser

Dans une cavité circulaire, pour qu'il y ait résonance, il faut qu'une onde qui rencontre son point d'émission soit en phase avec l'onde émise à ce point, alors :



$$-\frac{dv}{v} = \frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d\ell}{\ell}$$

$v$  : fréquence optique

Si on imagine un laser circulaire, pour que celui-ci lase, nous avons :

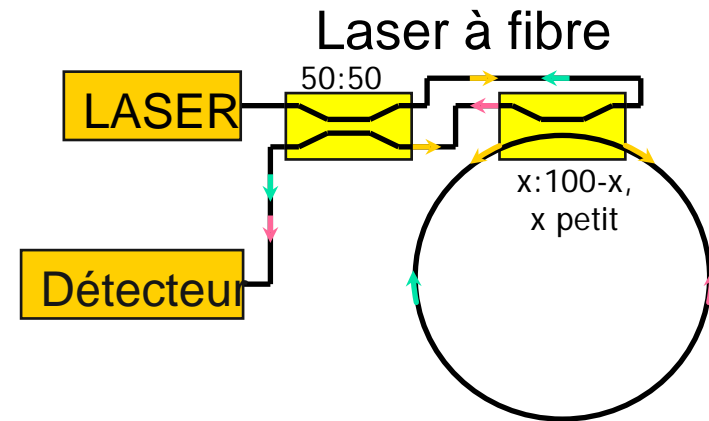
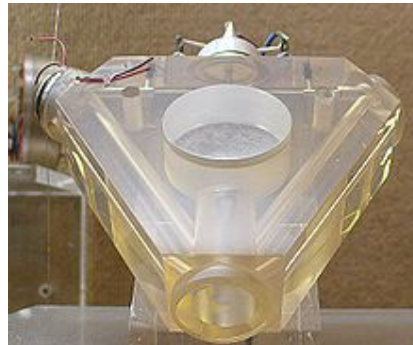
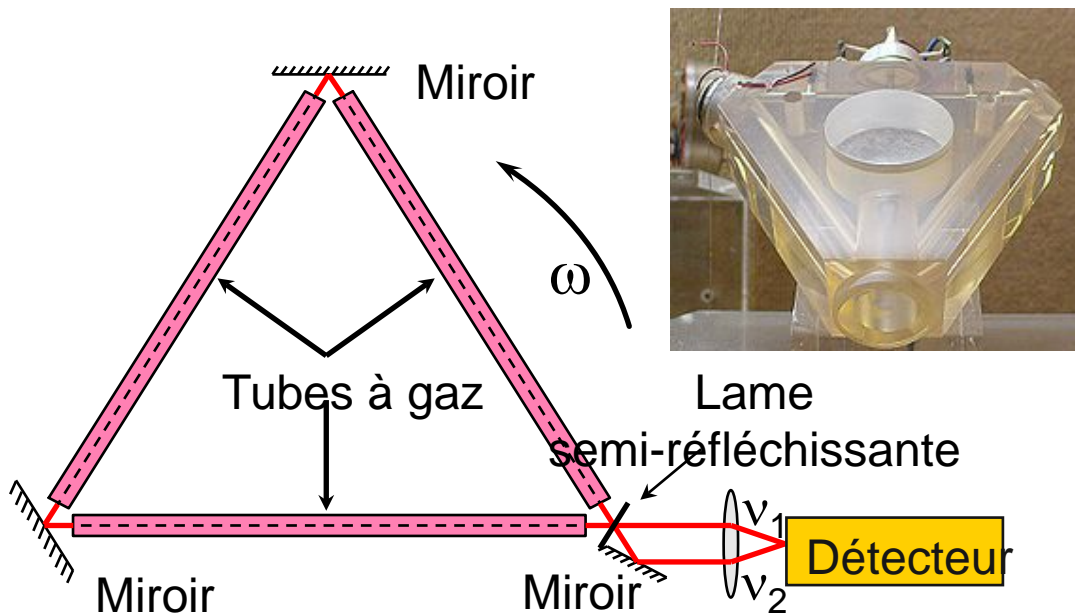
$$|\Delta v| = \frac{v \Delta \ell}{\ell}$$

$$|\Delta v| = 2 \frac{nv r}{c} \omega = \frac{2nr}{\lambda_0} \omega$$

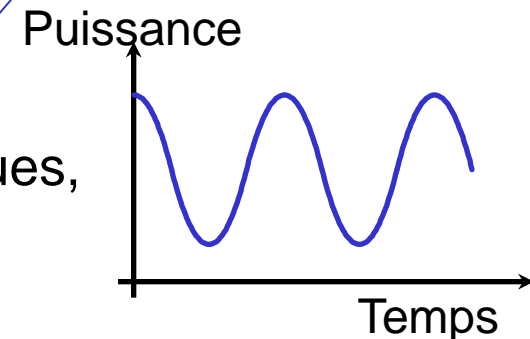
## 3.10 Capteurs inertiels (12)

### 3.10.3 Gyroscopes optiques (VIII)

Réalisation concrète : le laser en anneau



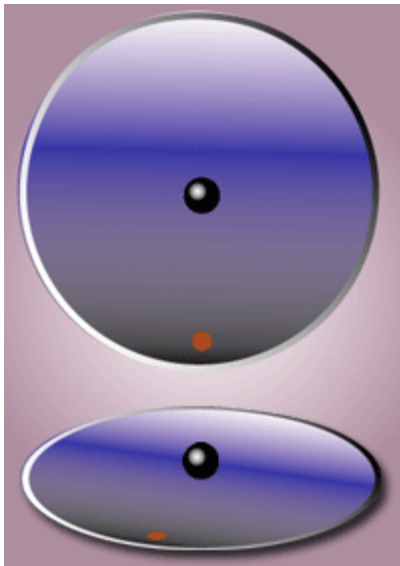
A cause du battement entre les deux faisceaux optiques, le détecteur voit un signal temporel de la forme :



## 3.10 Capteurs inertiels (13)

### 3.10.4 Gyroscopes MEMS (I)

- Une autre catégorie de gyroscope regroupe les réalisations sur silicium : *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS).
- Intérêt : très faible taille et bas-coût.
- Moins performants que ceux utilisant les technologies optiques.
- **Principe physique : accélération ou force de Coriolis**



$$\vec{r} = r\hat{r}$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = v_r\hat{r} + r\frac{d\hat{r}}{dt}$$

$\hat{r}$  : vecteur unitaire radial

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = a_r\hat{r} - \underbrace{2v_r(\hat{r} \wedge \vec{\omega})}_{\text{accélération de Coriolis}} - \omega^2 r\hat{r}$$

accélération radiale

accélération centripète

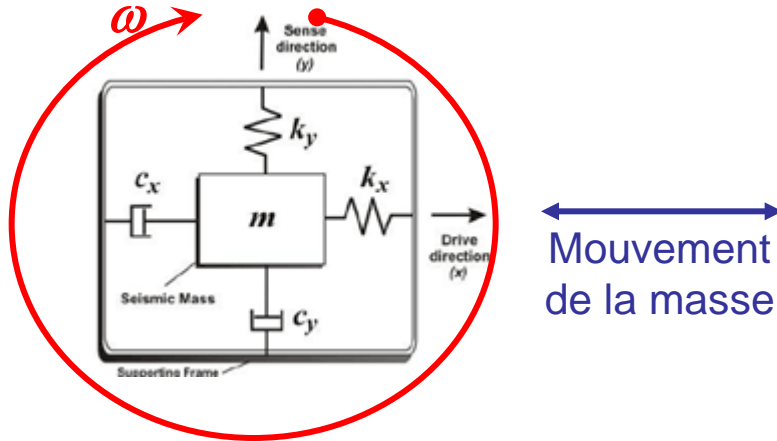
**accélération de Coriolis**

## 3.10 Capteurs inertiels (14)

### 3.10.4 Gyroscopes MEMS (II)

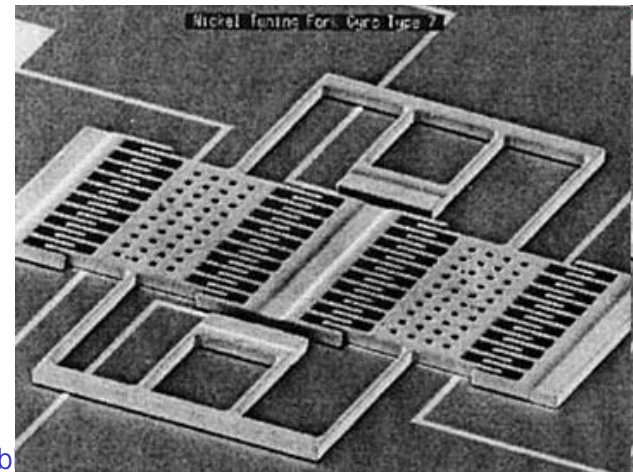
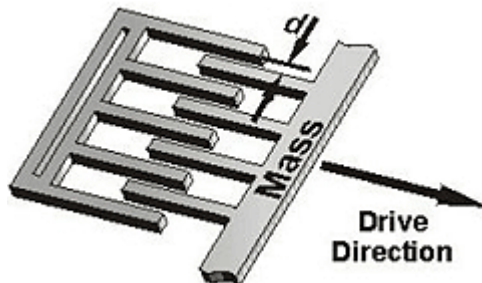
- **Le capteur :**

Une masse sismique est soumise à un mouvement vibratoire :



$$\vec{a}_{Coriolis} = -2\vec{v}_r (\hat{r} \wedge \vec{\omega})$$

- **Exemple de réalisation pratique :**







## 3.10 Capteurs inertiels (13)

### 3.10.5 Accéléromètres : principe

L'accélération (**a**) est la dérivée seconde de la position d'un mobile par rapport au temps.

On mesure directement l'accélération d'un corps grâce à la relation :

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

- **Stratégies de mesure :**

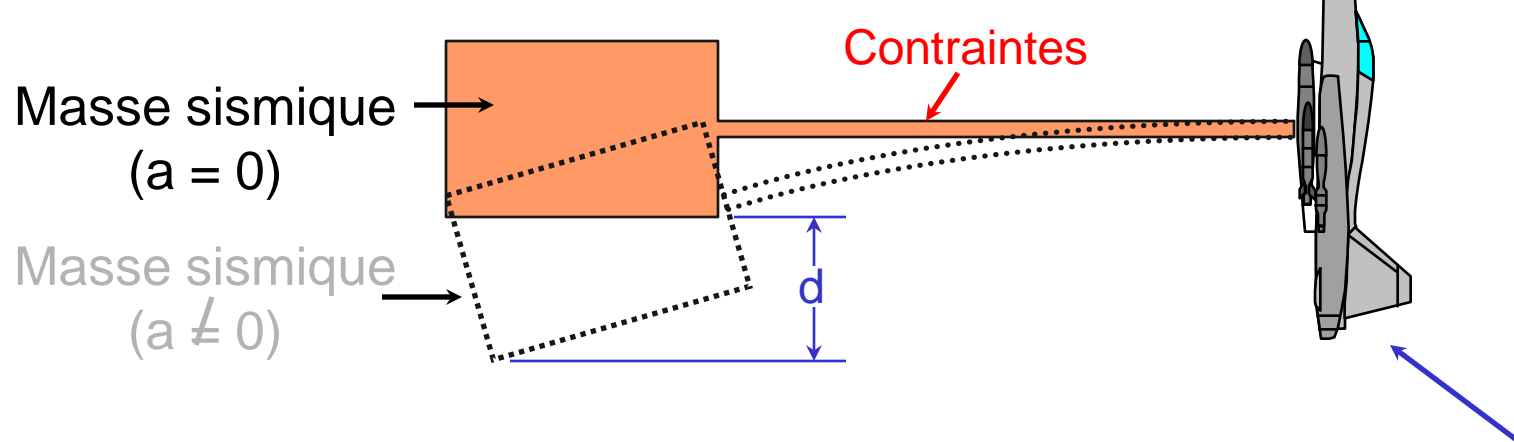
Ainsi, une «masse sismique» va, sous l'effet d'une accélération :

- se déplacer (on mesure le déplacement ou la déformation d'un corps),
- produire une force que l'on mesure directement.

## 3.10 Capteurs inertiels (14)

### 3.10.6 Capteur à déplacement de masse sismique (I)

- **Principe :** un corps de masse connue est physiquement relié à l'objet dont on veut mesurer l'accélération.



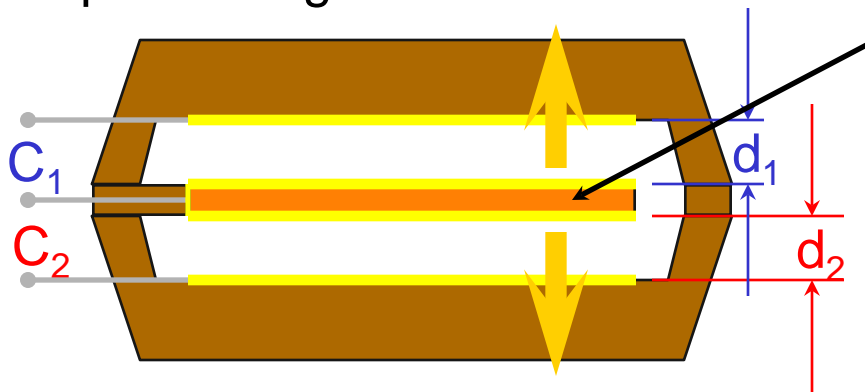
Ce lien physique va transmettre une partie de la force que subit l'**objet** à la masse sismique sous la forme d'une force de rappel. La masse sismique va donc se déplacer par rapport à sa position d'équilibre. On peut mesurer le déplacement ou les contraintes dans le «lien physique».

## 3.10 Capteurs inertiels (15)

### 3.10.6 Capteur à déplacement de masse sismique (II)

- **Rappel :** L'équation reliant le déplacement  $x$  de la masse sismique par rapport au boîtier à l'accélération est donnée à la section 1.7.2
- **Capteur capacitif à déplacement transversal :**

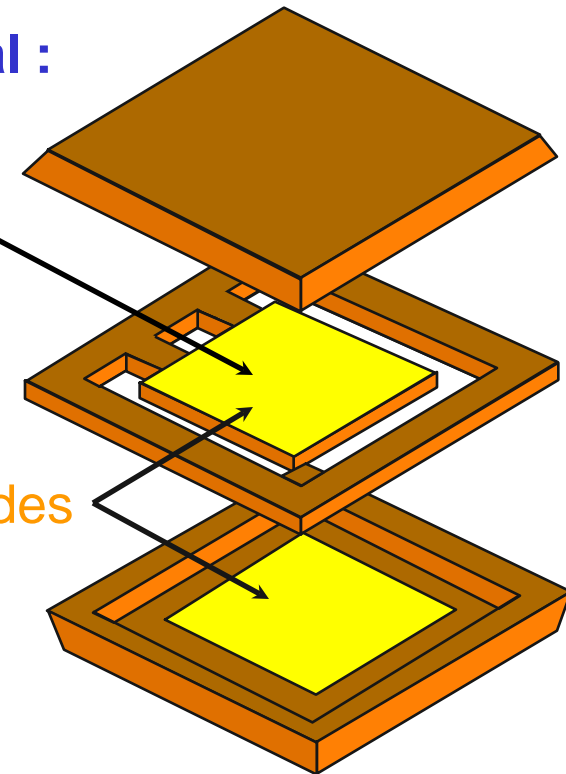
Capteur intégré sur Si :



Masse sismique

Electrodes

Fonctionnement en push-pull



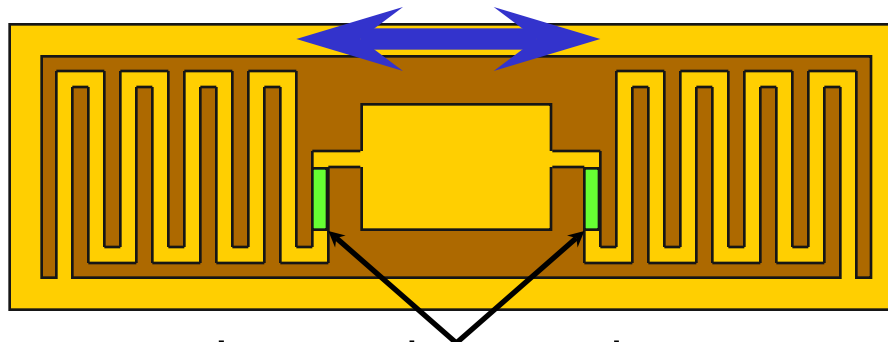
## 3.10 Capteurs inertiels (16)

### 3.10.6 Capteur à déplacement de masse sismique (III)

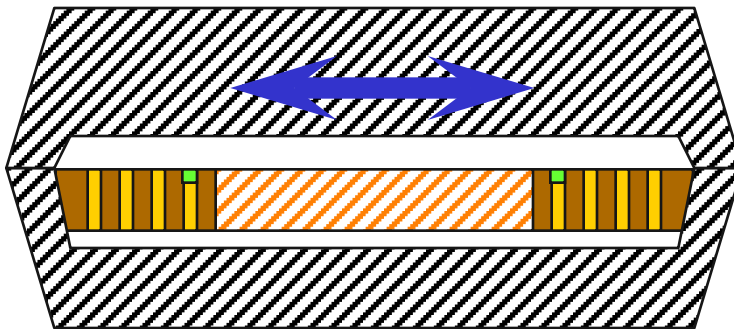
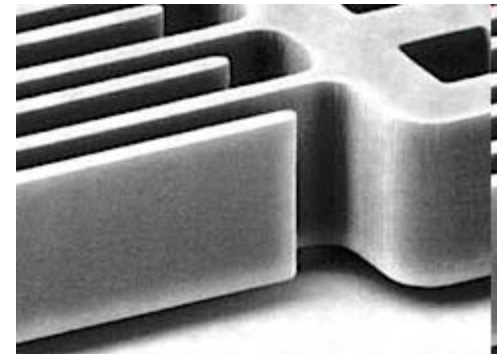
#### • Capteur piézorésistif à déplacement longitudinal :

La masse sismique se déplace parallèlement à sa surface, ce qui permet de diminuer le frottement visqueux.

Version intégrée  
sur Si :



Jauges de contraintes

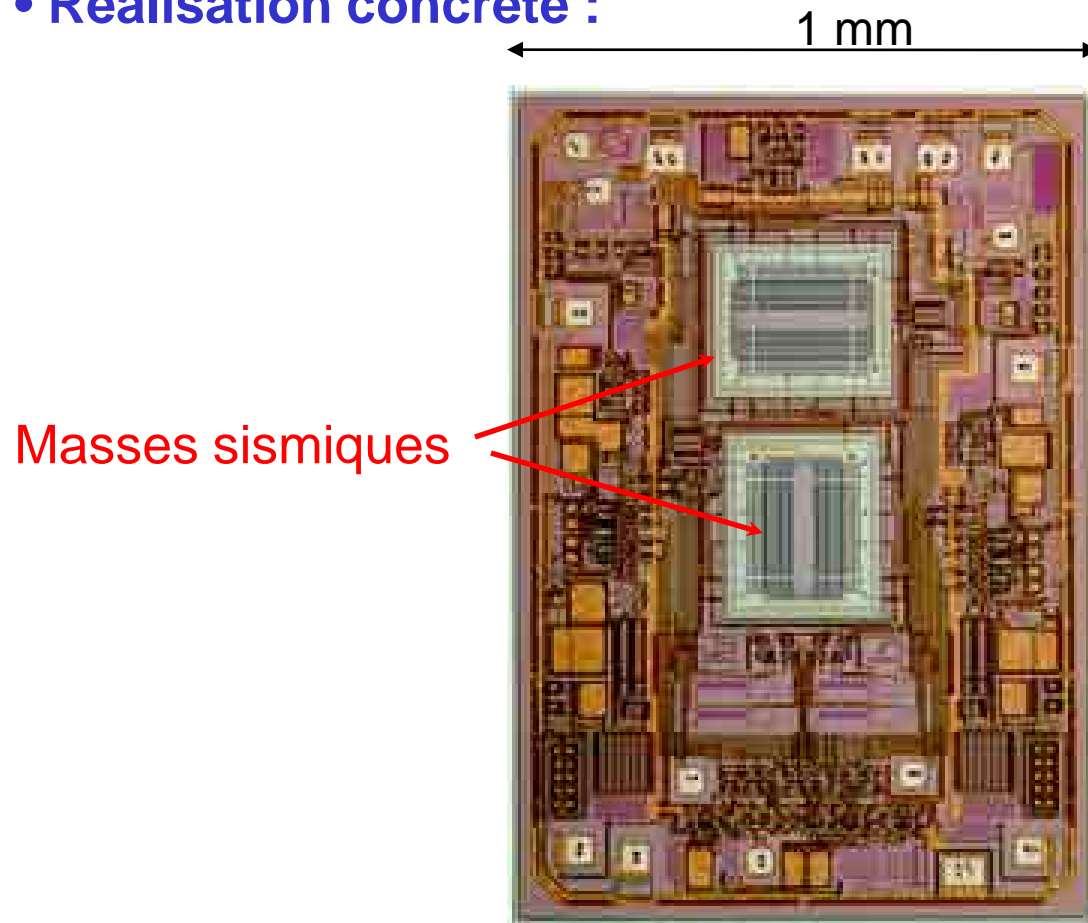


$\Delta R \longrightarrow$  Contraintes  $\longrightarrow$  Déplacement de la masse  $\longrightarrow a$

## 3.10 Capteurs inertiels (17)

### 3.10.6 Capteur à déplacement de masse sismique (III)

- Réalisation concrète :



Masses sismiques

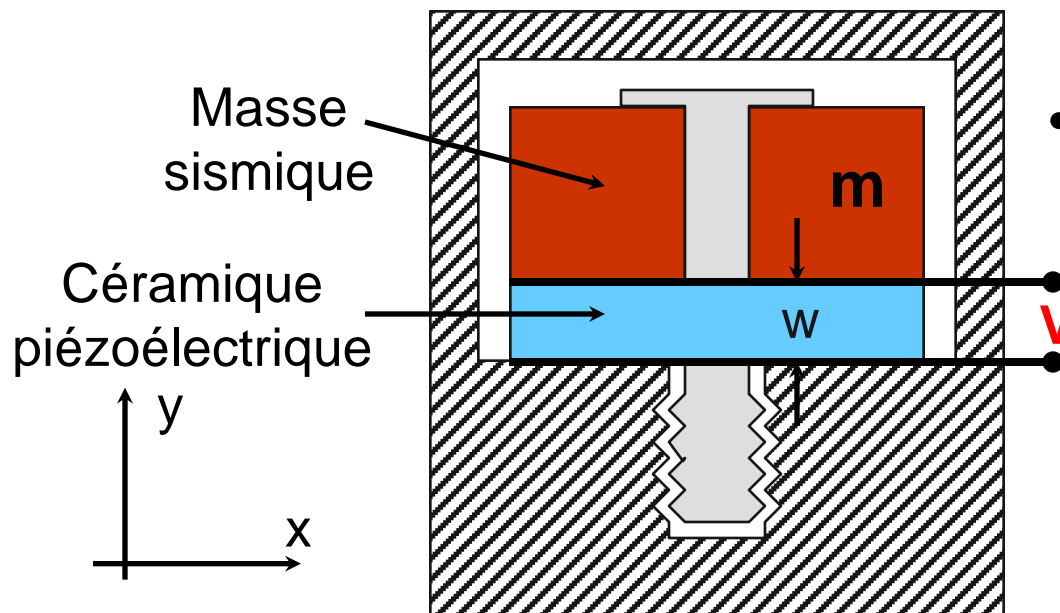
Fabriquant :  
Analog Device  
(ADXL)

## 3.10 Capteurs inertiels (18)

### 3.10.7 Capteur piézoélectrique

La deuxième stratégie de mesure est de mesurer la force que va exercer la masse sismique sur un élément piézoélectrique :

On exerce une précontrainte sur la céramique piézo-électrique pour effectuer la mesure dans les deux sens :  $F_y = m \mathbf{a} + \mathbf{F}_0$   
 précontrainte



- En circuit ouvert :

$$V = -Ew$$

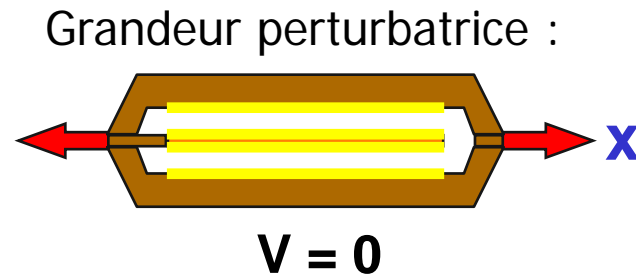
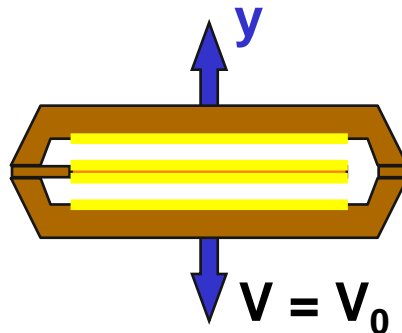
$$V = \frac{P}{\epsilon_0} w = \frac{d_{yy}}{\epsilon_0} \frac{w}{A} F_y$$

(Piézo : voir section 2.11.1)

## 3.10 Capteurs inertiels (19)

### 3.10.8 Sensibilité transversale

Une grandeur importante pour un accéléromètre est la sensibilité transversale. Idéalement, un accéléromètre ne doit donner une réponse que pour une accélération selon un seul axe :



En pratique, un accéléromètre réagit toujours un peu dans la seconde situation. On exprime cette sensibilité **non désirée** par un rapport :

$r = X \text{ g} / \text{g}$  (Exemple : 0,05 g/g).

