

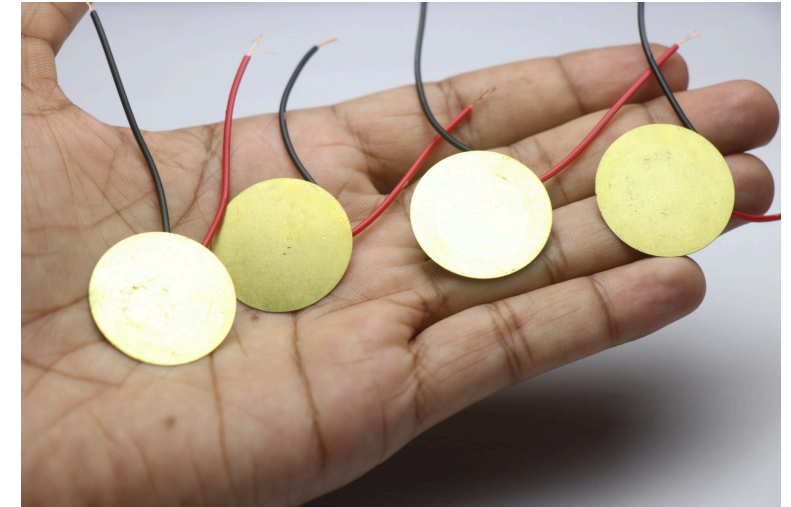
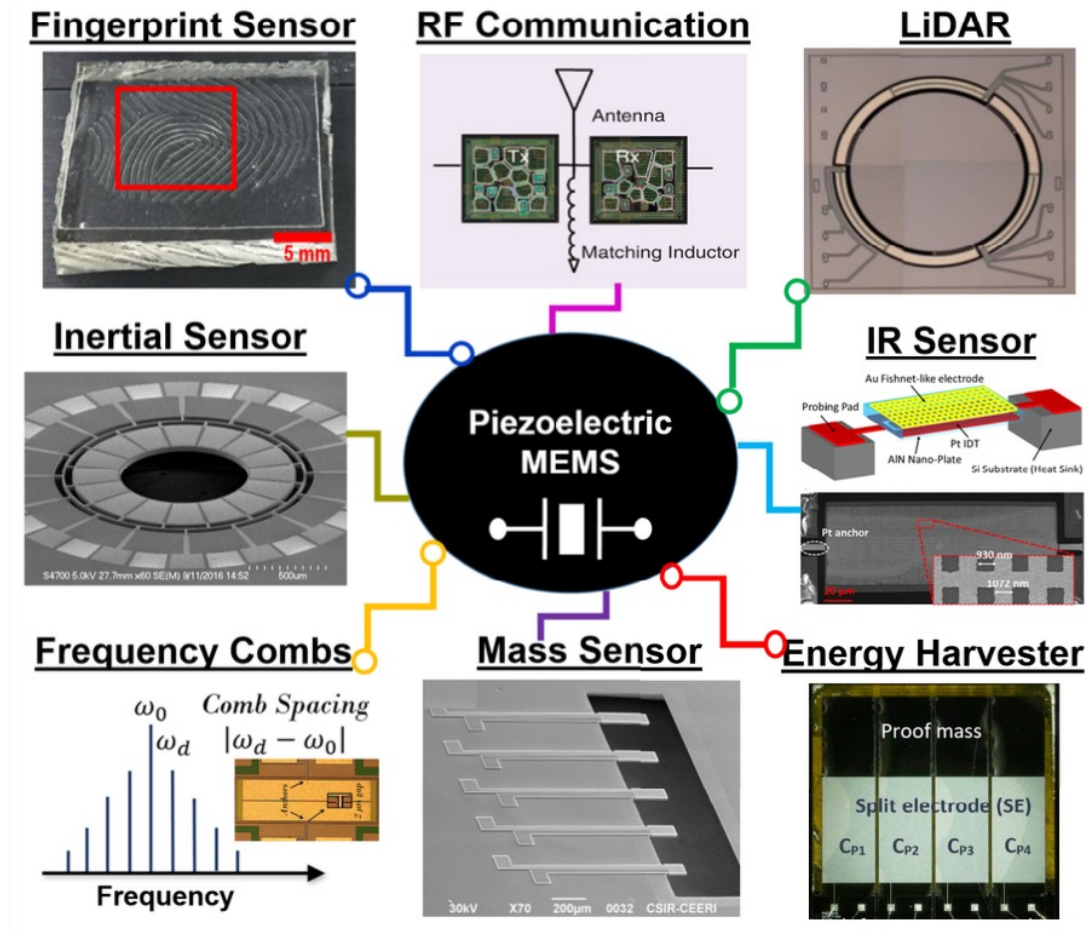
# Chapitre 8 - Capteurs piézoélectriques

**Partie 1 : Bases de la piézoélectricité**

**Partie 2: Circuits**

**Partie 3 : Capteurs mécaniques**

**Partie 4 : Capteurs ultrasons**

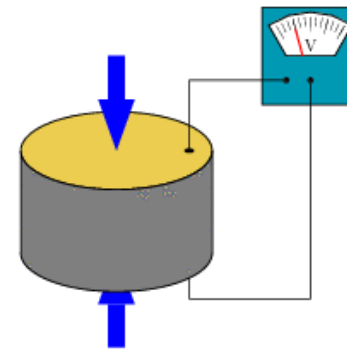
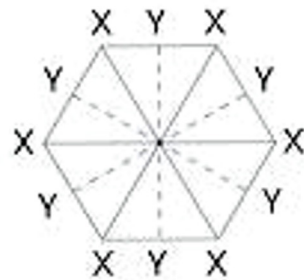
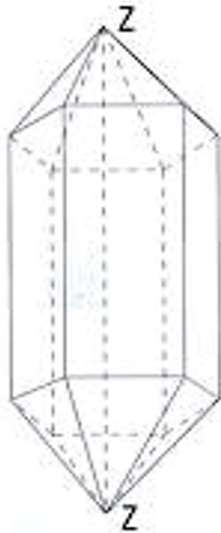


<https://www.kistler.com/PT/en/cp/piezoelectric-pressure-sensors-601c/P0001172>

G. Pillai and S.-S. Li,  
 "Piezoelectric MEMS Resonators: A Review,"  
*IEEE Sensors Journal*, vol. 21, pp. 12589–12605, 2021  
 doi: [10.1109/JSEN.2020.3039052](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3039052)

# Chapitre 8 - Capteurs piézoélectriques

## Partie 1 : Bases de la piezoélectricité



<https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>

# Effet piézoélectrique: capteur et actionneur

La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains matériaux diélectriques de:

- se **polariser électriquement** sous l'action d'une **contrainte mécanique** et,
- réciproquement, de **se déformer mécaniquement** lorsqu'on applique un **champ électrique**.

L'effet piézoélectrique lie donc **une déformation d'un matériau** à une **polarisation électrique**.

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \longleftrightarrow P \left[ \frac{C}{m^2} \right]$$

La **polarisation** désigne la densité de dipôles électriques. Unité: C/m<sup>2</sup>

Le changement de polarisation induit **l'apparition de charges** en surface



L' effet Piezoélectrique lie **déformation** ( $\epsilon$  et donc  $\sigma$ ) et **polarisation électrique P**

- An applied electric field leads to mechanical strain
- Mechanical stress generates charges

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} + d_{ijk} E_k$$

$$D_i = \epsilon_{ij} E_k + d_{ijk} \sigma_{kl}$$

Violet: tous les matériaux

Vert: seulement les piézos

$S_{ijkl}$  Compliance tensor (inverse of Elasticity tensor)

$\epsilon_{ij}$  Strain

$\sigma_{kl}$  Stress

$\epsilon_{ij}$  Permittivity matrix

$E_k$  Electric field components (not Young's modulus !)

$D_i$  Displacement field (electric)

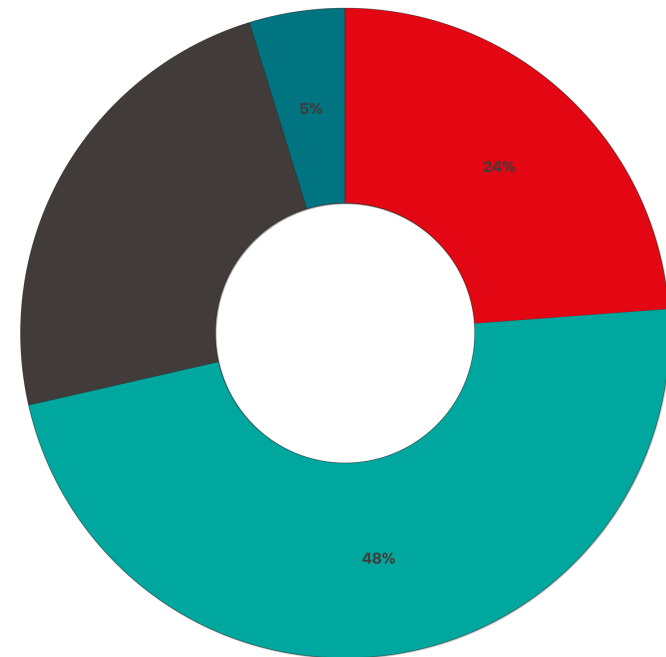
$d_{ijk}$  Piezo tensor

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \vec{P}$$

$\vec{P}$  Polarization: density of electric dipoles.  
units: C/m<sup>2</sup>

# Quelle déformation relative maximum pour un capteur piezo ?

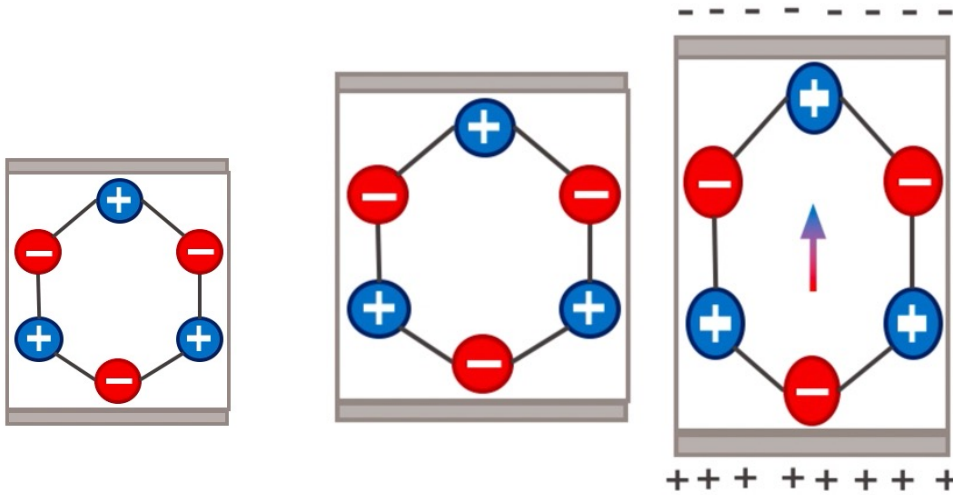
- A. 0.01 %
- B. 0.1%
- C. 1%
- D. 10%



Piezoelectric Material	Maximum Strain
PZT (Lead Zirconate Titanate)	0.1% to 0.2%
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	0.01 % to 0.05 %
AlN (Aluminum Nitride)	0.1% to 0.3%
ZnO (Zinc Oxide)	0.2% to 0.5%
PVDF (Polyvinylidene Fluoride) polymer	3% to 5%

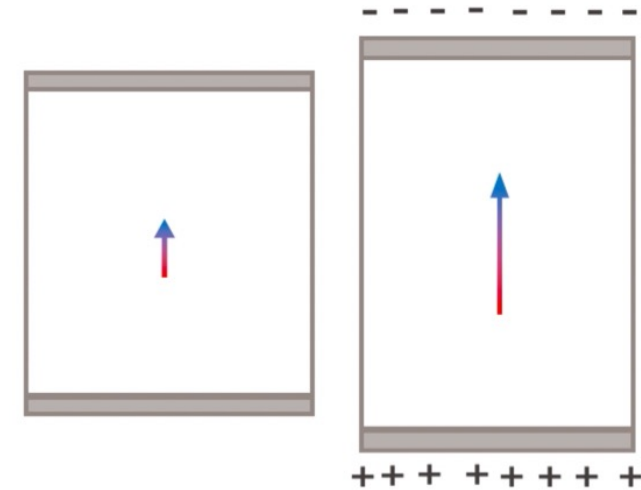
# Matériaux piézoélectriques: 2 types

1. Cristaux non-centrosymétrique
2. Matériaux ferroélectriques



cristaux  
non-centrosymétriques

Quartz,  $\text{PbTiO}_3$



matériaux  
ferroélectriques

Lead zirconate titanate  $\text{Pb} [\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}] \text{O}_3$   
nom courant: PZT

Polarisation: Densité volumique de moment dipolaire électrostatique.  
Unité:  $\text{C/m}^2$

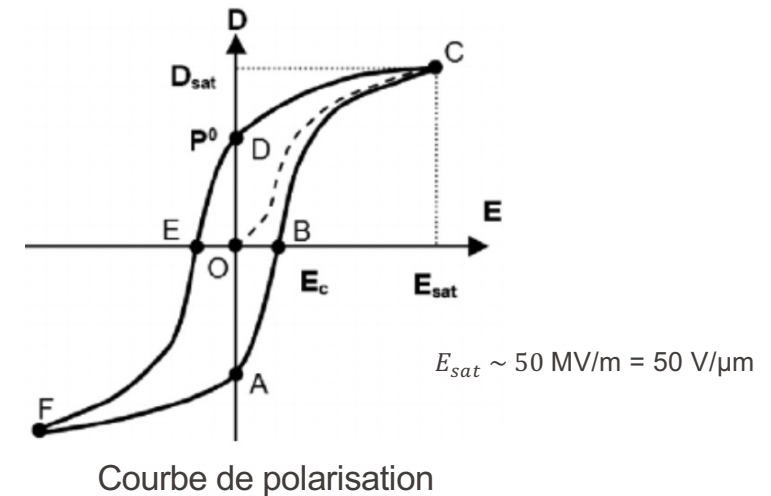
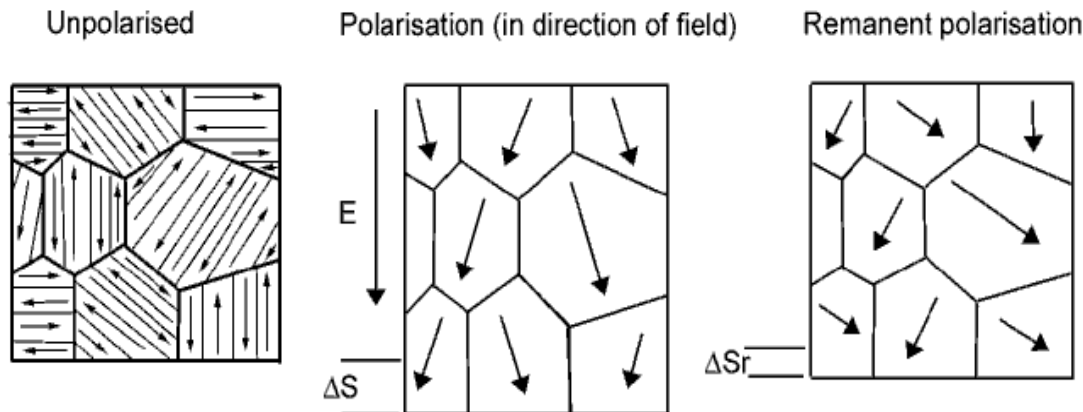


[https://youtu.be/wcJXA8lqYl8?si=vwVk6lWK0\\_jVE8v1](https://youtu.be/wcJXA8lqYl8?si=vwVk6lWK0_jVE8v1)

# Matériaux ferroélectriques

Un matériau ferroélectrique est un matériau diélectrique dans lequel les moments dipolaires sont couplés.

Le couplage ferroélectrique provoque, localement, un alignement des moments dipolaires les uns par rapport aux autres et la création de **domaines ferroélectriques**, où tous les moments dipolaires sont alignés parallèlement les uns aux autres.



La densité de charges en surface ( $q_s$ ) est égale à la polarisation interne rémanente  $P_0$  (à champ nul)

**Température de Curie:** disparition de la polarisation spontanée dans une ferroélectrique

# Matrice piézoélectrique $d_{ij}$

La matrice piézoélectrique  $d_{ij}$  décrit la relation entre les contraintes  $\sigma_{ij}$  et le déplacement électrique  $D_i$  qu'elles provoquent dans le matériau.

$$[D_i] = [d_{ij}] \cdot [\sigma_j]$$

$D_i$ : Déplacement électrique

$d_{ij}$ : Coefficients piézoélectriques

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} + \vec{P}$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}$$

On a **3 composantes** pour décrire le vecteur de champ de **déplacement électrique D** (unité : C/m<sup>2</sup>)

Les **contraintes** sont décrites par un vecteur à **6 composantes** :

- les composantes **1, 2, 3** décrivent les contraintes **axiales**
- les composantes **4, 5, 6** décrivent les contraintes de **cisaillement**



# Matrice piézoélectrique

Le champ de déplacement **D** équivaut à une **densité de charge en surface**  $q$  [C/m<sup>2</sup>]  
 L'unité des coefficients piézoélectriques  $d_{ij}$  est: C/N (Coulomb par Newton)

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & \dots & d_{16} \\ d_{21} & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underbrace{d_{31} \quad d_{32} \quad \dots}_{\text{axial}} & \dots & \dots & \underbrace{\dots \quad \dots \quad d_{36}}_{\text{cisaillement}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{pmatrix}$$

$$q_i = [\text{C/m}^2]$$

$$d_{ij} \text{ en } [\text{C/N}] \text{ ou en } [\text{m/V}]$$

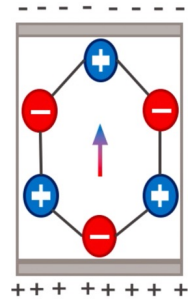
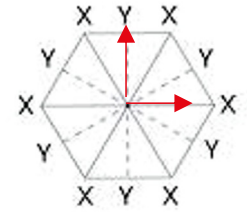
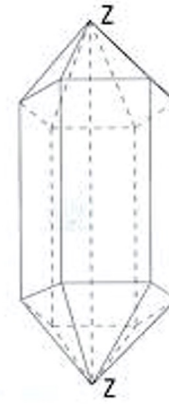
(souvent pC/N et pm/V)

$$\sigma_{ij} \text{ en } [\text{N/m}^2]$$

La matrice piézoélectrique a donc  $3 \times 6 = 18$  composantes :

- La partie de **gauche de la matrice** représente les coefficients piézoélectriques liés aux déformations **axiales**
- La partie de **droite de la matrice** représente les coefficients piézoélectriques liés aux déformations de **cisaillement**.
- Pour raisons de symétrie, plupart des coefficients sont souvent nuls

# Matrice piézoélectrique du quartz



$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot (\sigma_{1...6})$$

Cinq coefficients non-nuls et seulement **deux** valeurs différentes (pour des raisons de symétrie) :

$$d_{11} = 2.3 \text{ pC/N}$$

$$d_{14} = -0.7 \text{ pC/N}$$

Electrodes en:

- x: axe « électrique » → une **compression** axiale en **x** ou **y** ou un **cisaillement** en **xy** induit une polarisation
- y: axe « mécanique » → seul un **cisaillement yz ou zx** induit une polarisation
- z: axe « optique » → **aucune** polarisation possible selon cet axe

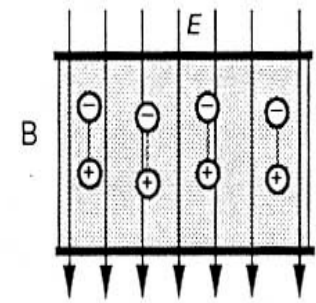
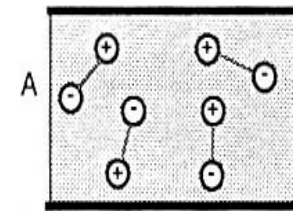
(attention, les coefficients dépendent du plan de coupe)

# Matrice piézoélectrique: céramiques piézoélectriques

La céramique ferroélectrique doit être **polarisée** avant devenir piézoélectrique. La polarisation est obtenue en appliquant un fort champ électrique, à haute température, en dernière étape de fabrication.

Par convention, la **direction de polarisation** définit la **direction z** du référentiel de la matrice.

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot (\sigma_{1...6})$$



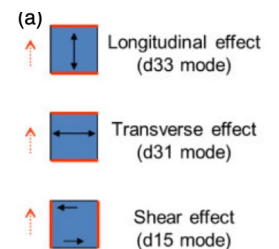
Pour PZT, Cinq coefficients non-nuls et seulement **trois** valeurs différentes (symétrie) :

$$d_{33} = 375 \text{ pC/N}$$

$$d_{31} = -190 \text{ pC/N}$$

$$d_{15} = 515 \text{ pC/N}$$

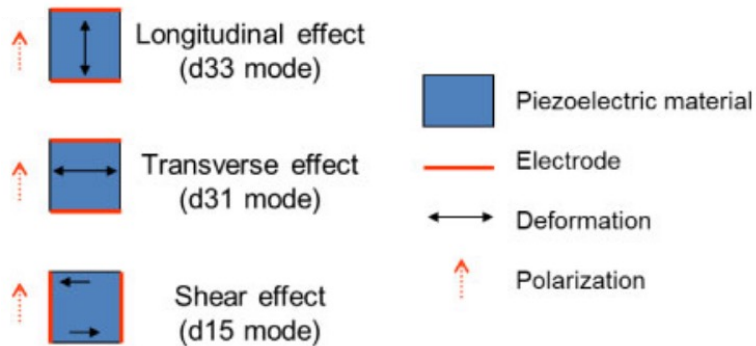
La constante diélectrique des céramiques piézoélectriques est très élevée :  $\epsilon=1200$



$$d_{ik}$$

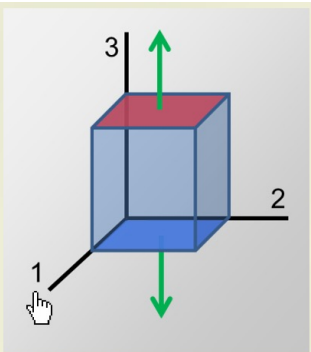
$k$  = direction of mechanical action  
 $i$  = direction of the electric field  
 = direction perpendicular to the electrodes

Polarization selon axe 3



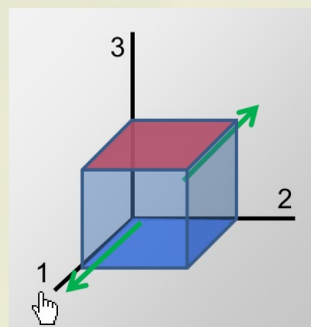
#### Compression Mode

$d_{33}$  would indicate the polarization generated in the 3-direction per unit of mechanical compression stress (T) applied in the 3-direction to the piezoelectric body.



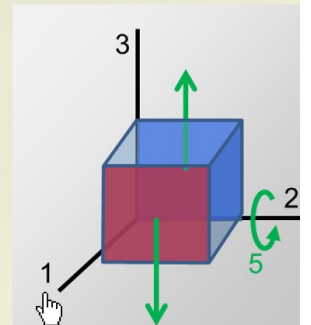
#### Transverse Mode

$d_{31}$  is the polarization developed in the 3-direction per unit stress applied in the 1-direction (all other external stresses = 0).



#### Shear Mode

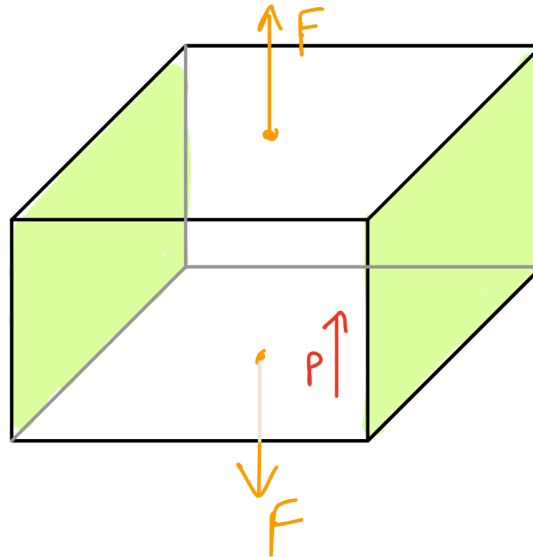
$d_{15}$  means the polarization developed in the 1-direction per unit shear stress 5 applied (= shear around the 2-direction) when there are no other external stresses.



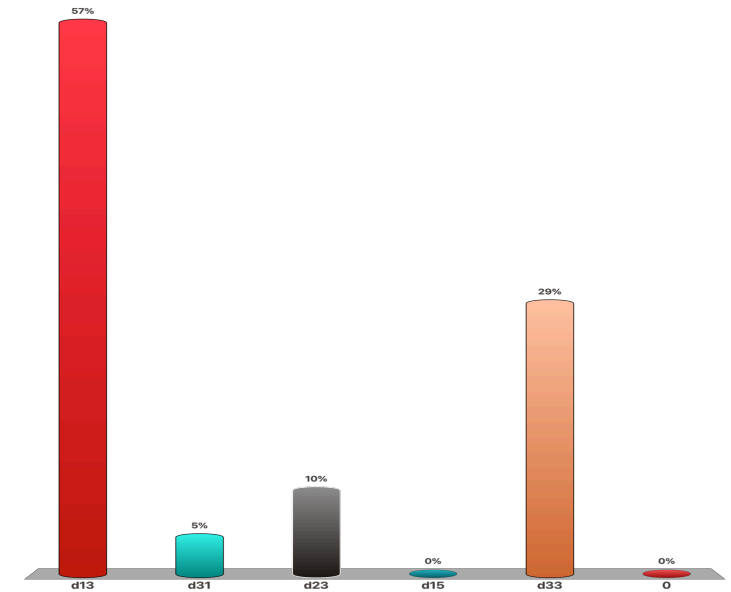
<https://www.f3lix-tutorial.com/piezo-constants>

# Quel coefficient Piezo pour PZT?

- A.  $d_{13}$
- B.  $d_{31}$
- C.  $d_{23}$
- D.  $d_{15}$
- E.  $d_{33}$
- F. 0

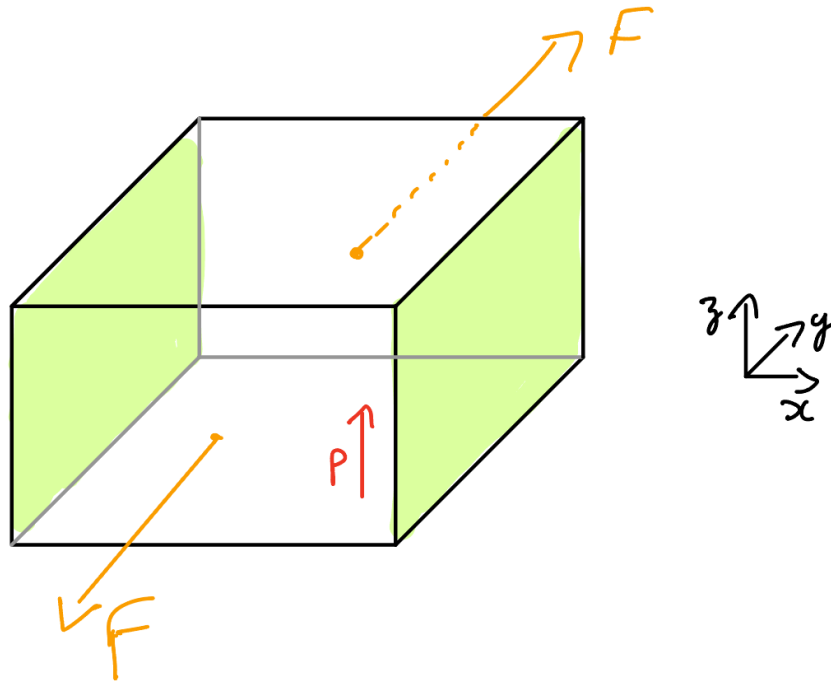


F selon z

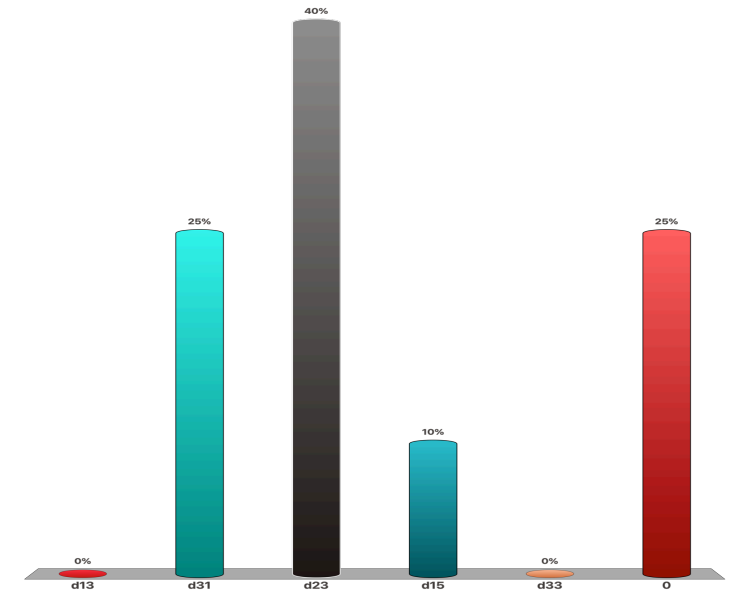


# Quel coefficient Piezo pour PZT?

- A.  $d_{13}$
- B.  $d_{31}$
- C.  $d_{23}$
- D.  $d_{15}$
- E.  $d_{33}$
- F. 0

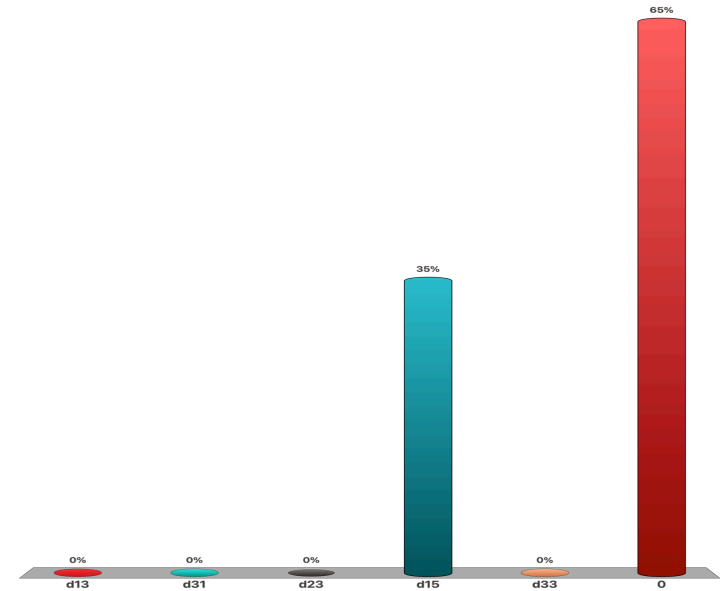
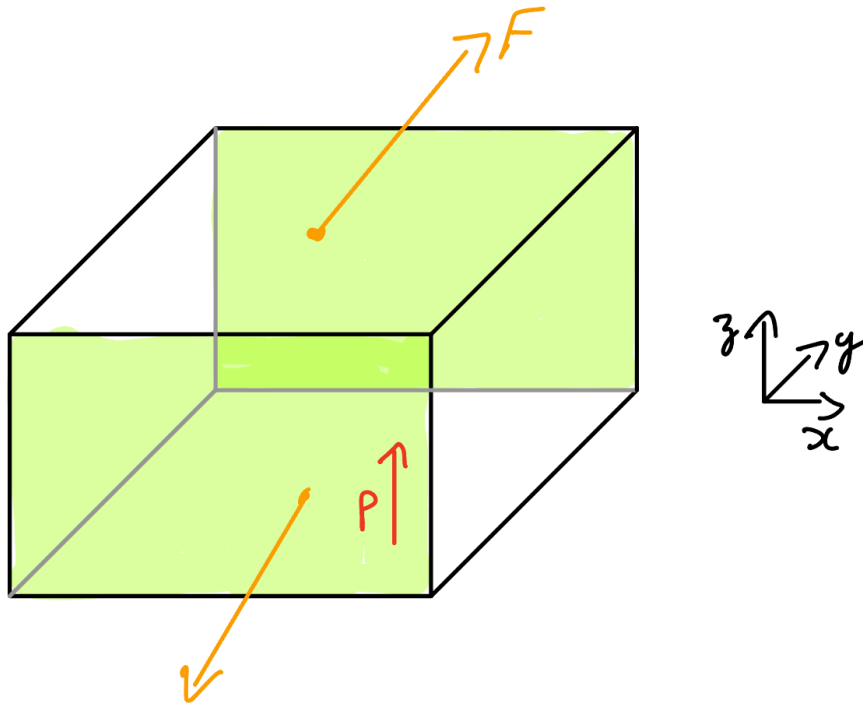


F selon y



# Quel coefficient Piezo?

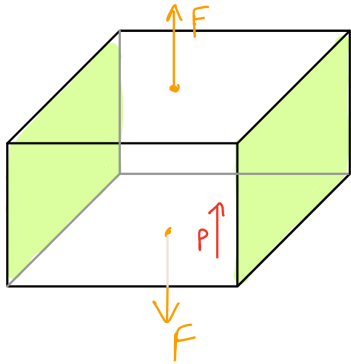
- A.  $d_{13}$
- B.  $d_{31}$
- C.  $d_{23}$
- D.  $d_{15}$
- E.  $d_{33}$
- F. 0



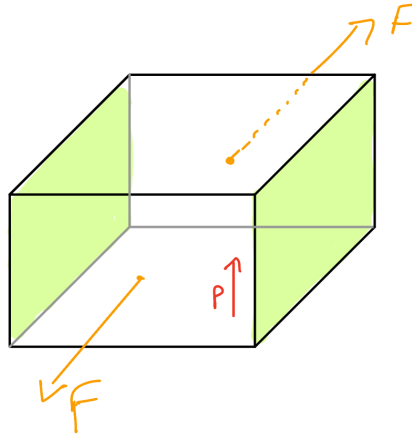
F cisaillement, force axe +-y, sur faces dans plans xy



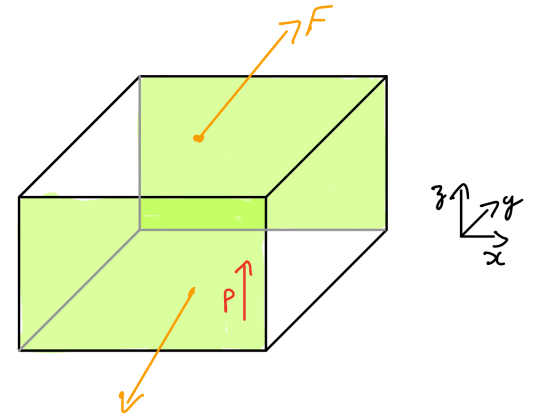
## Solutions



$d_{13}=0$



$d_{12}=0$



$d_{24}=d_{15}$

$$\begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot (\sigma_{1...6})$$

$d_{ik}$

$\begin{cases} \text{ } \end{cases} \begin{matrix} k = \text{direction of mechanical action} \\ i = \text{direction of the electric field} \\ = \text{direction perpendicular to the electrodes} \end{matrix}$

Polarization selon axe 3

## 1. Non-ferroelectric materials: Quartz (T=570 °C)

### Advantages

- Mechanical robustness
- Linearity, no hysteresis
- Can be used up to 400° C (transition temperature 573° C)
- No pyroelectric effect (no T dep)
- No aging

### Drawbacks

- Price (~10'000 x more expensive than PZT)
- Requires a charge amp (weak coupling)
- Difficult to assemble

- good for precision devices like oscillators and scales
- can't integrate Quartz in MEMS flow (AlN however OK)

## 2. Ferroelectric materials: PZT ceramics (Lead - Zirconium - Titanium, + oxides), BaTiO, Single crystals: LiNbO, (T=1210 °C),...

### Advantages

- low cost
- High piezoelectric modules
- High electrical permittivity (1200) → High capacitance
- Machining/casting possible
- Adjustable Curie temperature (depending on composition)

### Drawbacks

- Thermal dependence of coefficients
- Thermal hysteresis

- good for applications requiring high energy density (actuators)
- Higher sensitivity than Quartz

## EPFL Comparing Piezo materials

### 3. Polymer piezo materials

**Polyvinylidene Fluoride (PVDF)** is the most widely used piezoelectric *polymer*. The piezoelectric effect in PVDF arises from its molecular structure.  $d_{33} = -33$  pC/N.

- Lightweight, flexible
- Can be cast as thin film

#### Advantages:

- **Flexibility and Processability:** can be manufactured into large areas, thin sheets and various shapes, offering design flexibility.
- **High Piezoelectric Stress Constants:** PVDF has higher piezoelectric stress constants ( $g_{33}$ , units of V. m /N) than ceramics like PZT, i.e., better sensitivity in sensor applications.

$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

#### Drawbacks:

- Pyroelectric effect (leads to thermal drift)
- Low Curie temperature (120 °C)
- Mechanical damping
- Lower Electro-Mechanical Coupling Factor

Property	PVDF (Polyvinylidene Fluoride)	PZT (Lead Zirconate Titanate)	Quartz	BaTiO <sub>3</sub> (Barium Titanate)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.78–1.80	7.5–8.0	2.65	~6.0
Dielectric Constant	10–12	300–1200	~4.5	1200–1700
$d_{33}$ (pC/N)	–20 to –33	200–600	~2.3	~190–350
Pyroelectric Constant (μC/m <sup>2</sup> K)	~30	~300	~0.1	~100
Elastic Modulus (GPa)	2–4	50–70	~80	~30–35
Electromechanical Coupling Constant (k <sup>2</sup> )	~0.12	0.35–0.7	~0.1	~0.45–0.5

Source: ChatGPT, 12-2024

# Calcul de la sensibilité d'une céramique piézoélectrique

Ici, électrodes dans plan xy (=champ électrique selon z), polarisation selon z

La densité de charge  $q_z$  qui apparaît sur les électrodes (selon la direction z) en fonction d'un vecteur de contraintes quelconque est :



$$q_z = d_{31}\sigma_x + d_{32}\sigma_y + d_{33}\sigma_z + d_{34}\sigma_{xy} + d_{35}\sigma_{xz} + d_{36}\sigma_{yz}$$

En tenant compte des coefficients nuls de la matrice des céramiques piézoélectrique (PZT), il ne reste que :

$$q_z = d_{31}\sigma_x + d_{31}\sigma_y + d_{33}\sigma_z$$

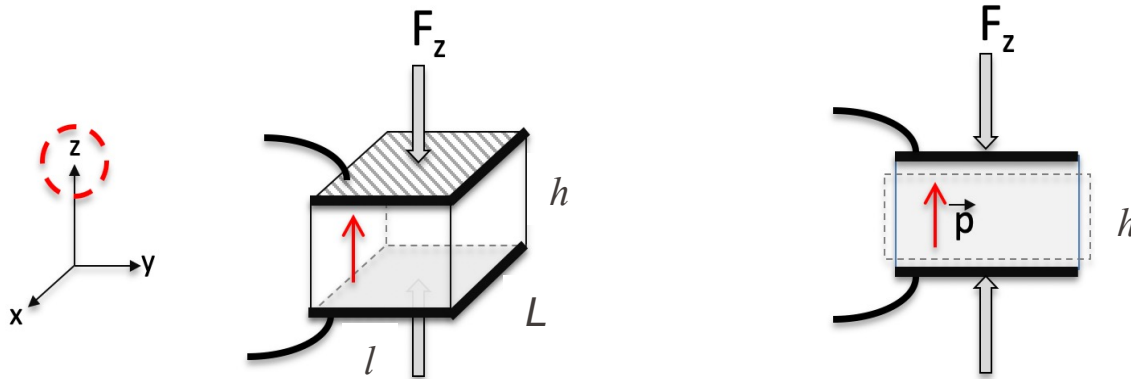
Pour des raisons de **symétrie**, une contrainte en x ou en y induit la **même** densité de charge

Pour  $q_z$  il n'y a **pas** de couplage piézoélectrique pour les contraintes de **cisaillement**.

# Calcul de la sensibilité d'une céramique piézoélectrique

## Cas 1: Effet longitudinal (Force selon $z$ , tension selon $z$ )

Polarisation perpendiculaire aux électrodes



$$\sigma_3 = \frac{F_z}{L \cdot l}$$

$$q_z = d_{33} \sigma_z = d_{33} \frac{F_z}{L \cdot l}$$

$$Q_z = L \cdot l \cdot q_z = d_{33} \cdot F_z$$

La réponse en charge du capteur est **indépendante** de sa géométrie.

$$V = \frac{Q_z}{C} \quad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 L \cdot l}{h}$$

$$V_z = \frac{Q_z}{C} = \frac{Q_z h}{\epsilon \epsilon_0 L l} = \frac{d_{33}}{\epsilon \epsilon_0} \frac{h}{A} \cdot F_z$$

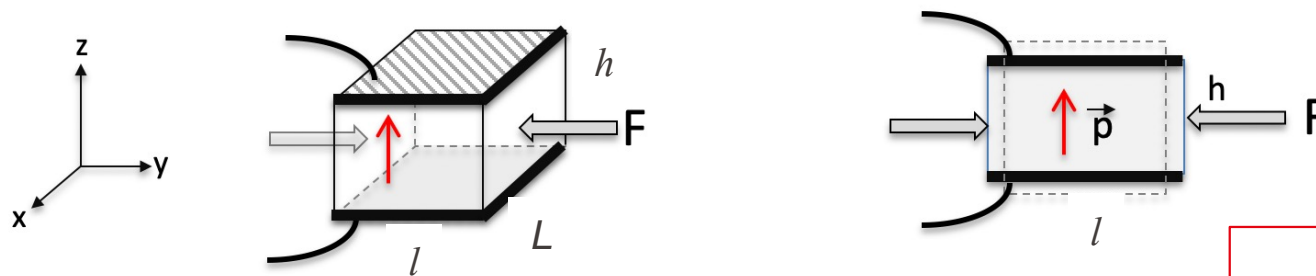
La réponse en tension du capteur **dépend** de la géométrie

Pour optimiser un capteur, il faut savoir quel signal on souhaite mesurer. Charge ou tension? Ça change bcp la géométrie souhaitée. Ou vice versa, si la géométrie est fixe, on peut choisir de mesurer soit tension ou charge

# Calcul de la sensibilité d'une céramique piézoélectrique

## Cas 2: Effet transverse (Force selon $y$ , tension en $z$ )

Polarisation perpendiculaire aux électrodes



$$\sigma_y = \frac{F_y}{Lh}$$

$$q_z = d_{31}\sigma_y = d_{31}\frac{F_y}{Lh}$$

$$Q_z = Llq_z = d_{31}\frac{l}{h}F_y$$

$$V_z = \frac{Q_z}{C} = d_{31}F_y \frac{1}{L} \frac{1}{\epsilon_0\epsilon_r}$$

La **réponse en charge** et la **réponse en tension** du capteur **dépendent** de la **géométrie**.

Plus le capteur est mince ( $h$  petit) et long ( $l$  grand), plus sa sensibilité en  $Q$  est grande

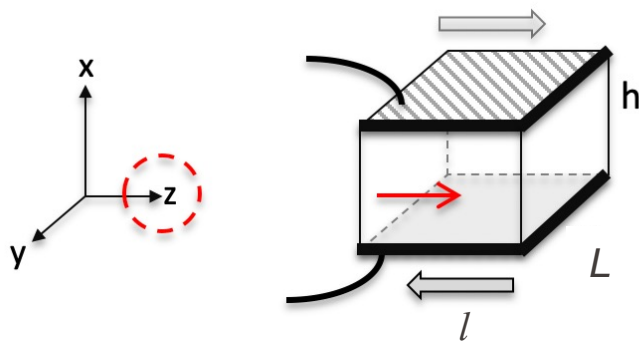
Plus le capteur est court ( $L$  petit), plus sa sensibilité en  $V$  est grande

**Aucune sensibilité au cisaillement**

# Calcul de la sensibilité d'une céramique piézoélectrique

## Cas 3: Effet transverse (forces en z pour cisaillement plan yz, tension en x)

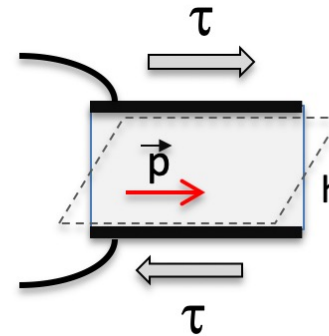
Polarisation parallèle aux électrodes



(attention :  $P$  définit la direction  $z$ )

$$\sigma_{yz} = \frac{F}{L \cdot l} \quad q_x = d_{15} \sigma_{yz}$$

La réponse en charge ne **dépend pas** de la géométrie  
La réponse en tension du capteur **dépend** de sa géométrie



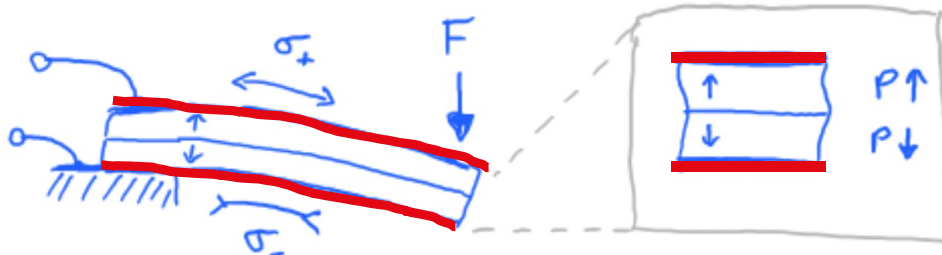
$$Q_x = L \cdot l \cdot q_x = d_{15} \cdot F_z$$

$$V_x = d_{15} \frac{h}{\epsilon \epsilon_0 L \cdot l} F$$

$$V_x = \frac{Q_x}{C}$$

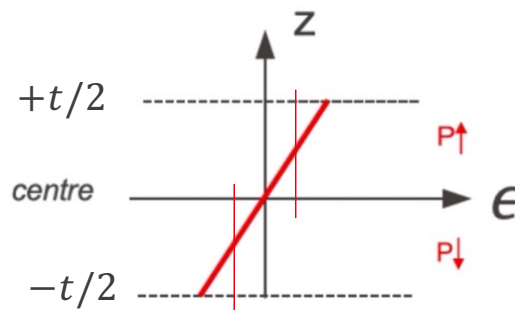


# Bimorphe piézoélectrique



2 lames piézos, dos à dos,  
collées avec polarisations opposées

$$Q = 2 \times (l w d_{31} \sigma_{av}) \quad \text{Cas 2}$$



Une lame en traction  
Une lame en compression

$$\sigma_{x,av} = \sigma_{moyen_{trac}} = -\sigma_{moyen_{comp}}$$

$$\sigma_{x,av} = \frac{3l}{wt^2} F$$

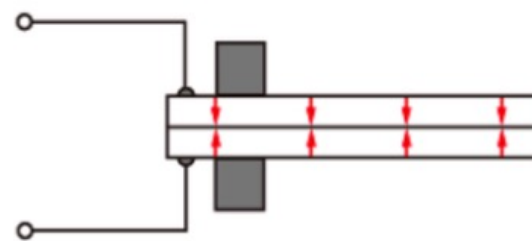
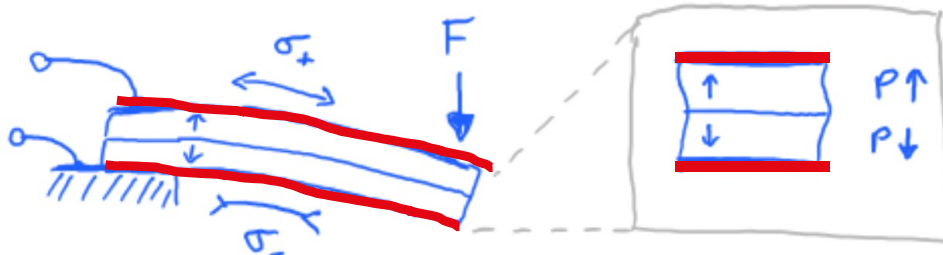
$$Q_{cs} = 6 d_{31} \left(\frac{l}{t}\right)^2 F$$

$$V_s = \frac{Q}{C} = 6d_{31} \frac{l}{tw} \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_R} F$$

J. G. Smits et al, "The constituent equations of piezoelectric bimorphs", *Sensors and Actuators A: Physical* **28**, p.41 (1991).

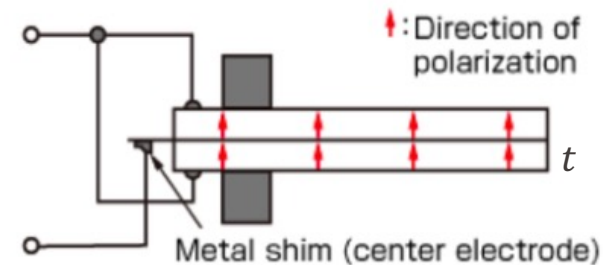
$l$ : longueur du bimorphe  
 $t$ : épaisseur du bimorphe  
 $w$ : largeur du bimorphe

# Bimorphe piézoélectrique



**Series type**

$$Q_{cs} = 6 d_{31} \left( \frac{l}{t} \right)^2 F$$



**Parallel type**

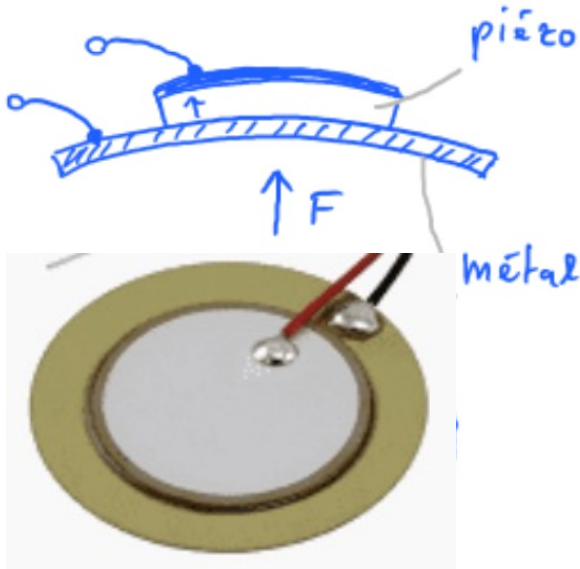
$$Q_{cp} = 12 d_{31} \left( \frac{l}{t} \right)^2 F$$

<http://www.fuji-piezo.com/Bimorph.htm>

$l$ : longueur du bimorphe  
 $t$ : épaisseur du bimorphe

# Autres configurations de capteurs

## Bimorphe piézoélectrique-métal

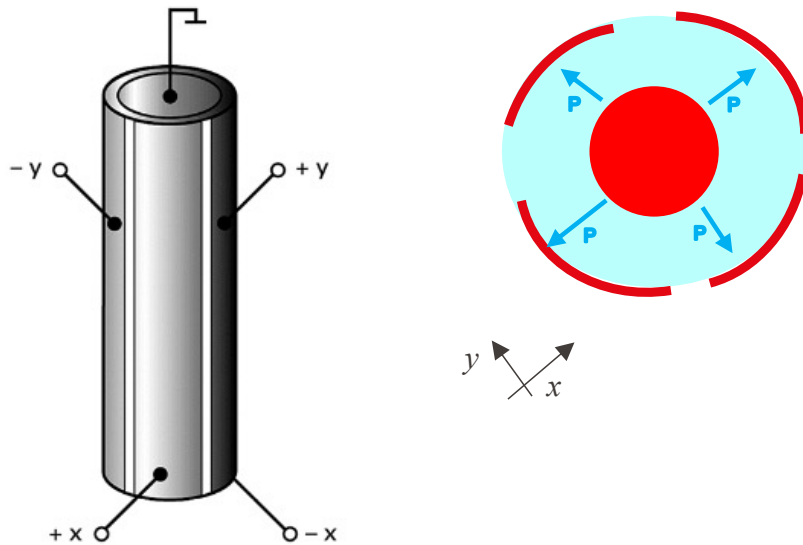


Coefficient  $d_{31}$ , pas  $d_{33}$

F est parallèle à z, mais force sur le piezo est radiale (x, y)

# Autres configurations de capteurs

## Tube

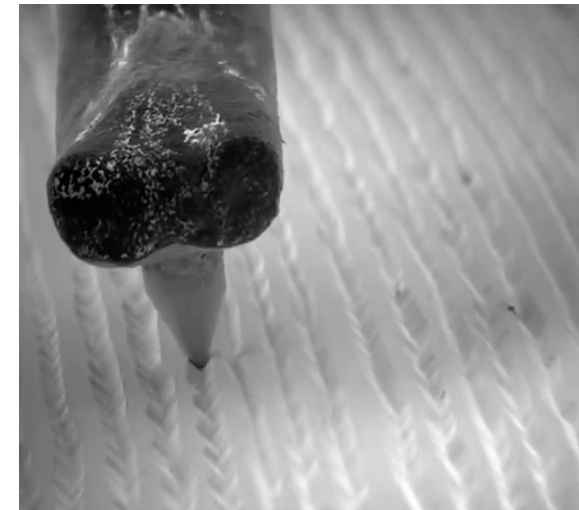


4 segments d'électrode externes  
1 électrode interne (à la masse)

- Force en  $z$ : même réponse 4 électrodes,  $d_{31}$
- Force en  $x$  ou en  $y$ : un côté en traction, un côté en compression: signal différentiel

Capteur/actionneur X Y Z

- Polarisation **radiale**
- Coefficient  **$d_{31}$**  pour les forces X Y
- Coefficient  **$d_{31}$**  pour la force Z



Disque vinyle  
stéréo: faut 2 canaux

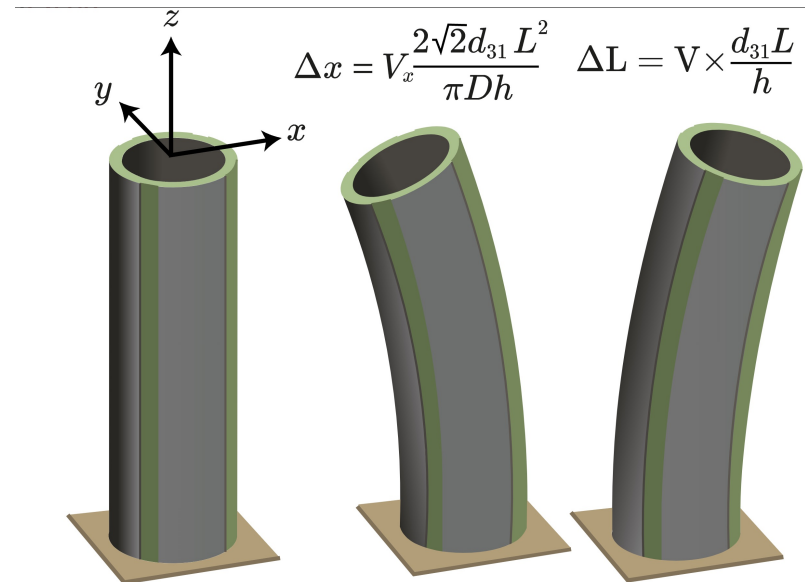
$z = 1+2+3+4$

$x=1-3$



45° bien expliqué dans <https://www.youtube.com/watch?v=3DdUvoc7tJ4>

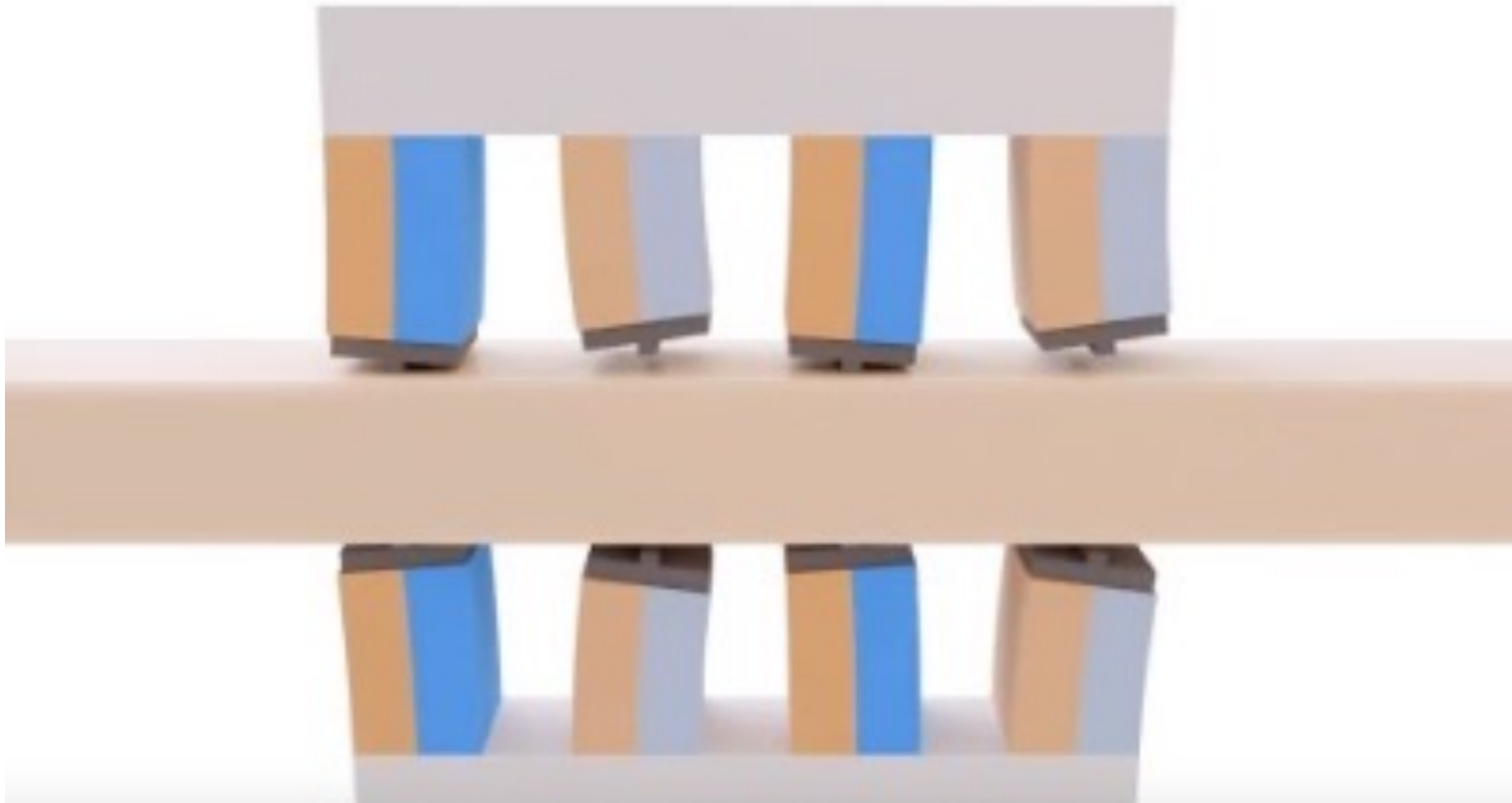
# Quelques actionneurs (même config que capteurs)



<https://www.piezodrive.com/actuators/piezoelectric-tube-scanners/>

# Piezomotor, mm-scale (or less)

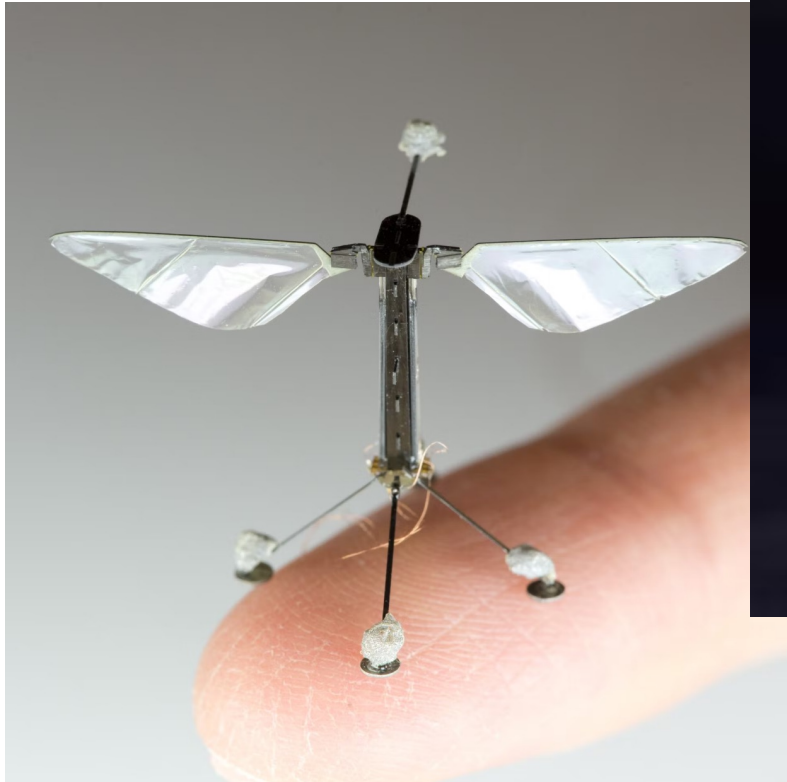
---



<https://www.youtube.com/watch?v=7iHL4ZCkCKc>

nm steps at many kHz

<https://www.piezomotor.com/>



<https://vimeo.com/65313515>

Rob Wood and co, Robobee, Harvard University

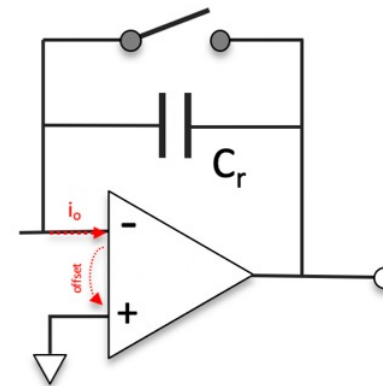
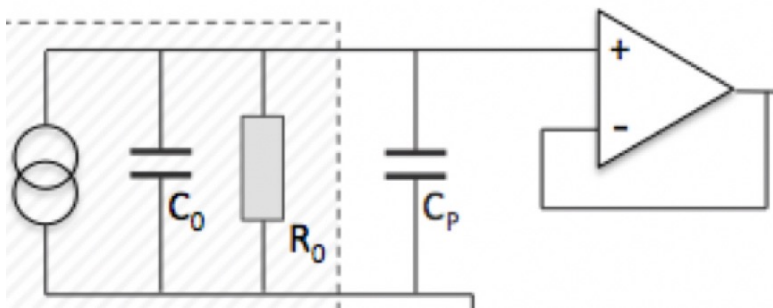
Piezo bimorph (2 antagonistic), 200 Hz

K. Y. Ma, P. Chirarattananon, S. B. Fuller, and R. J. Wood, "Controlled Flight of a Biologically Inspired, Insect-Scale Robot," *Science*, vol. 340, no. 6132, pp. 603–607, May 2013, doi: [10.1126/science.1231806](https://doi.org/10.1126/science.1231806).



# Chapitre 8 - Capteurs piézoélectriques

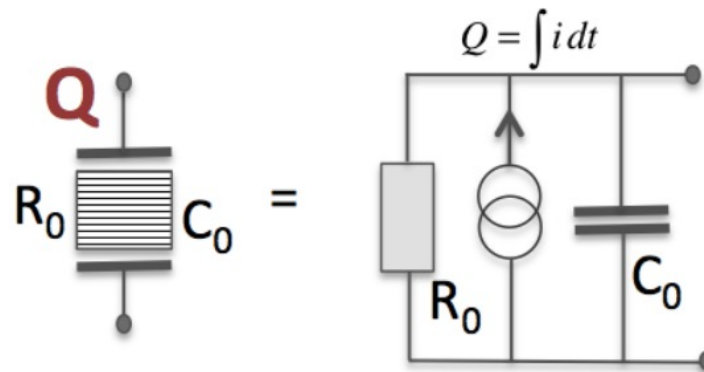
## Partie 2 : Circuits



# Modèle électrique équivalent du piézo

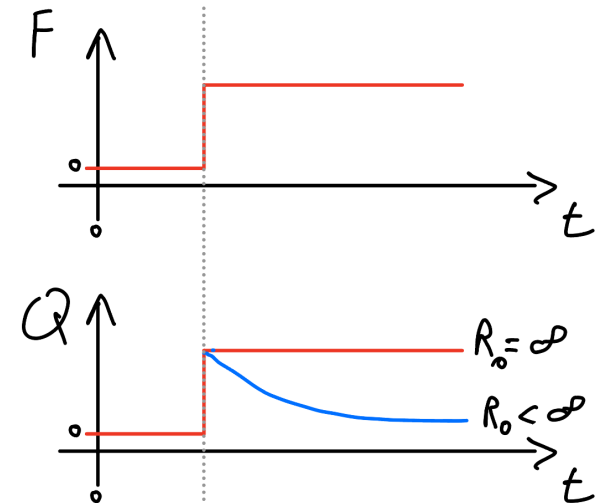
L'effet piézoélectrique génère des **charges** qui induisent une **tension** sur les électrodes  $V = Q/C$

L'effet piézoélectrique est modélisé par une **source de courant** (génération de charges  $Q$ )



$C_0$  est la **capacité de l'élément piézoélectrique**

$R_0$  est une **résistance de fuite**



$R_0$  est une résistance qui représente l'**auto-décharge** de la capacité. Cette résistance peut être très grande ( $G\Omega$  et plus dans le quartz), mais jamais infinie. Les capteurs piézoélectriques ne peuvent donc **jamais** avoir une **réponse continue** (pour une force constante)

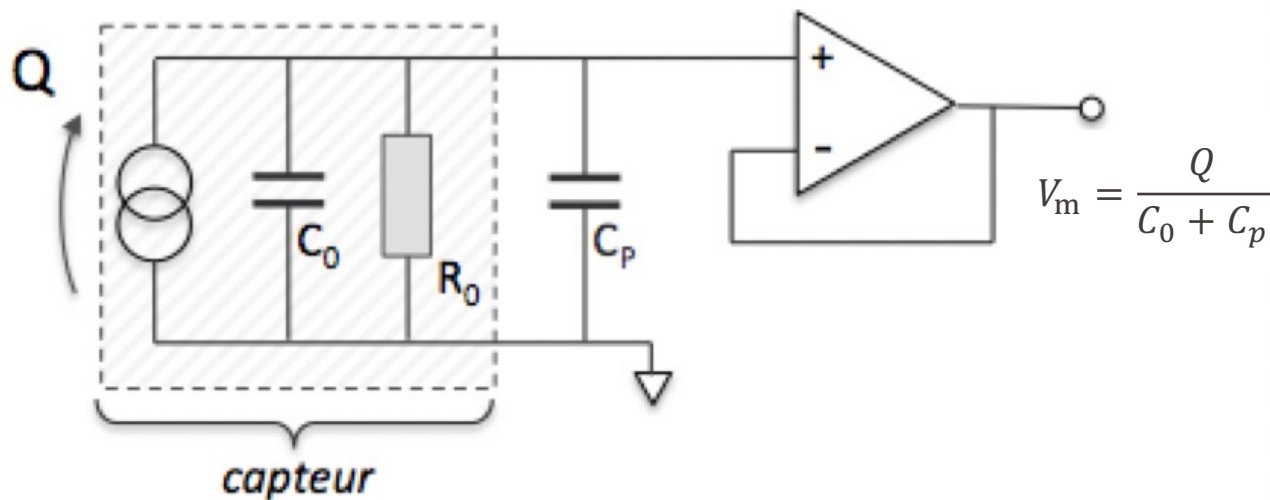
On a deux possibilités de lecture du signal des capteurs piézoélectriques :

- **amplificateur de tension**
- **amplificateur de charge**

# Amplificateur de tension

Si on branche directement un élément piézoélectrique sur un amplificateur à trop basse impédance d'entrée, il sera très **rapidement déchargé**.

Il faut donc faire un montage avec un amplificateur opérationnel non-inverseur ou suiveur ( = **haute impédance d'entrée** ).



$R_0$  ,  $C_0$  = résistance et capacité interne de l'élément piézoélectrique

$Q$  = charges générées par le capteur

$C_p$  = capacité parasite (souvent les câbles)

# Amplificateur de tension – réponse en fréquence

Réponse du circuit:

Le courant à l'entrée (ampli OP idéal) est nul. La somme des courants à l'entrée est définie par :

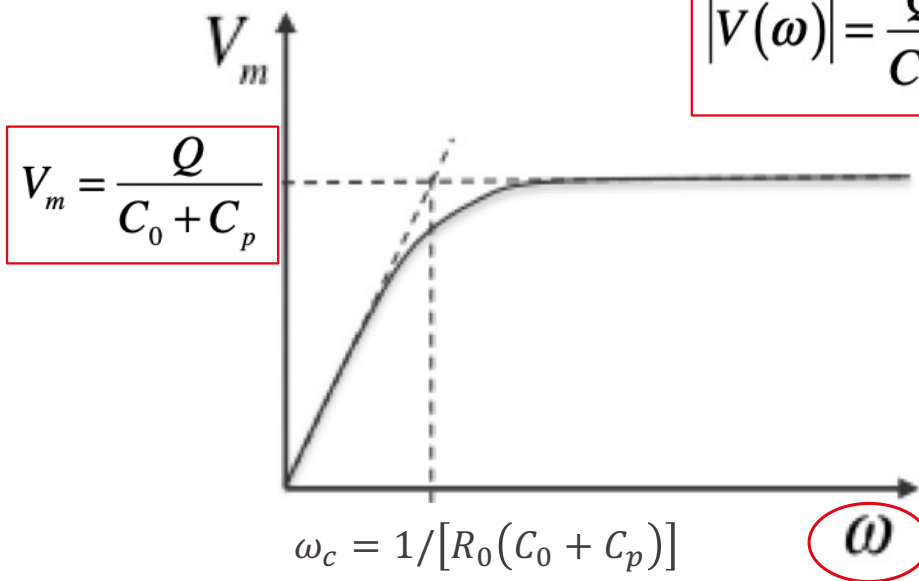
$$i_{op} = \frac{dQ}{dt} - (C_0 + C_p) \frac{dV_{in+}}{dt} - \frac{V_{in+}}{R_0} = 0$$

Réponse en fréquence :  $j\omega Q - j\omega V \cdot C_{tot} + V / R_0 = 0$

$$|V(\omega)| = \frac{Q}{C_{tot}} \frac{\omega R_0 C_{tot}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$

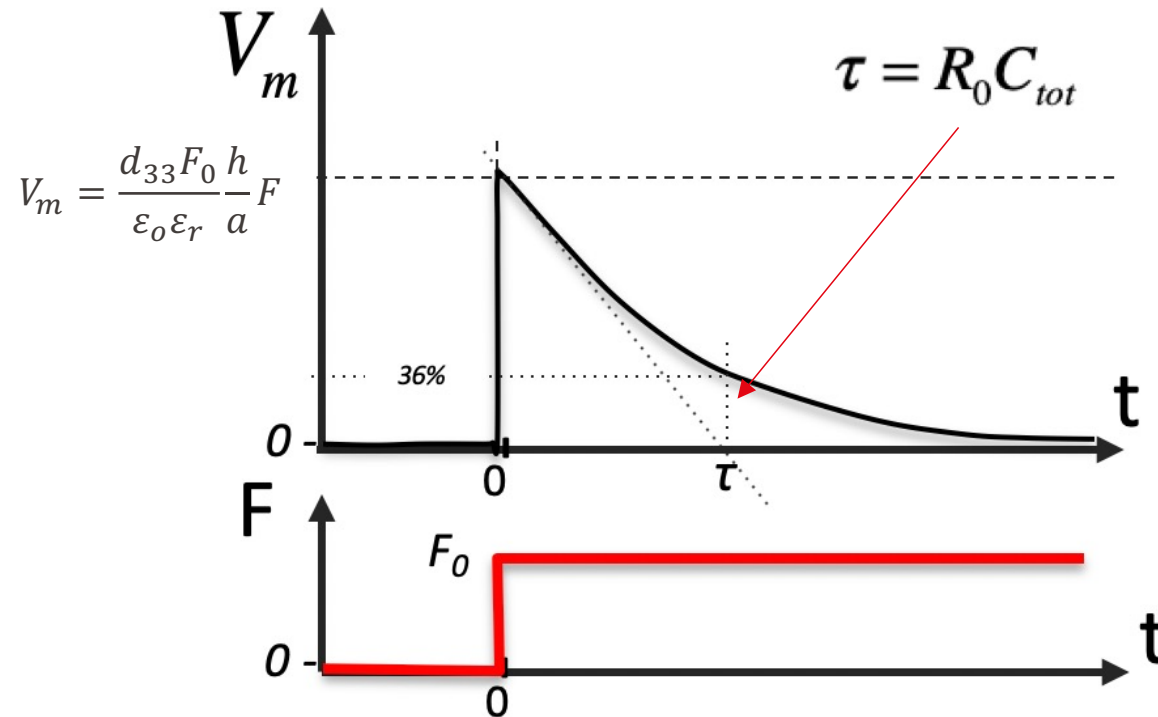
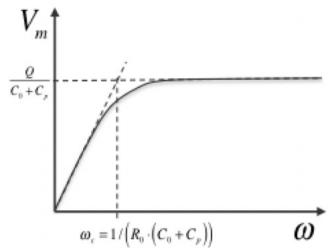
$$\tau = R_0 C_{tot}$$

$$C_{tot} = C_0 + C_p$$



- **Aucune réponse DC** - ne peut pas faire de mesures statiques!
- Le gain **dépend de la capacité parasite  $C_p$**  (et donc de câbles et montage)
- Le montage ampli de tension a de **bonnes** caractéristiques à **haute fréquence**

# Amplificateur de tension – réponse en temps



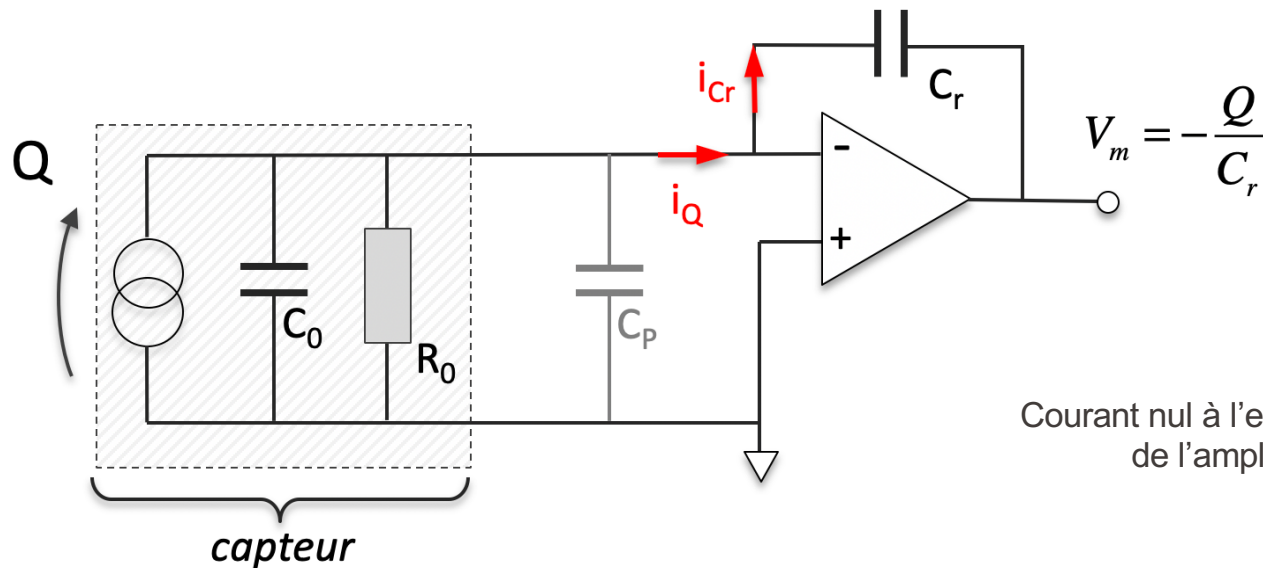
## Piézo: Pas de réponse en DC

Réponse à un saut en force est un saut de tension, suivie d'une chute exponentielle



<https://www.youtube.com/watch?v=qun4HYWeOBg>

# Amplificateur de charge (avec ampli op idéal)



Calcul de la réponse du circuit (pour un ampli OP idéal: zéro courant d'entrée, zéro offset, gain infini)

Courant nul à l'entrée de l'ampli OP:

$$i_Q + i_{Cr} = \frac{dQ}{dt} + C_r \frac{dV_m}{dt} = 0$$

$$Q = -C_r \cdot V_m$$

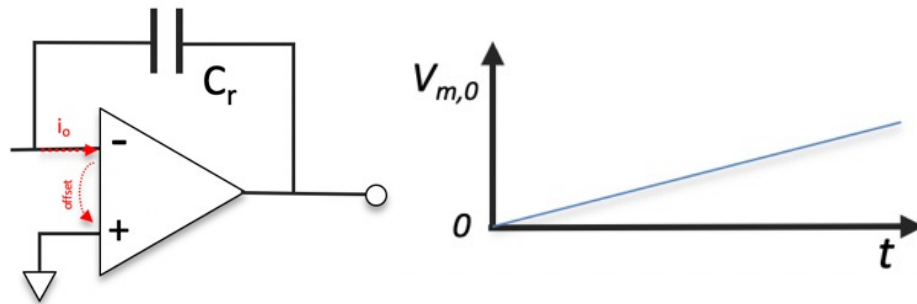
$$V_m = -\frac{Q}{C_r}$$

- 1) Le **gain dépend uniquement de  $C_r$**  (aucun effet ni de  $C_p$  ni de  $C_0$ !)
- 2)  $V = 0$  à l'entrée de l'ampli op: Il n'y a donc pas **de courant à travers  $R_0$**  → pas de perte de charges dans le capteur. Donc réponse DC?

Si l'ampli-op est idéal, on a tout réglé: réponse en fréquence DC et pas de dépendance sur  $C_p$  !

# Amplificateur de charge – ampli OP *non* idéal

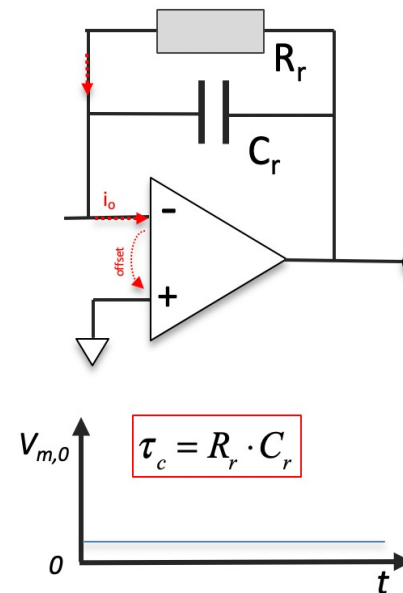
Ampli OP réel: i) courant à l'entrée et ii) un offset qui provoque une **dérive** de la tension de sortie  $V_m$ .



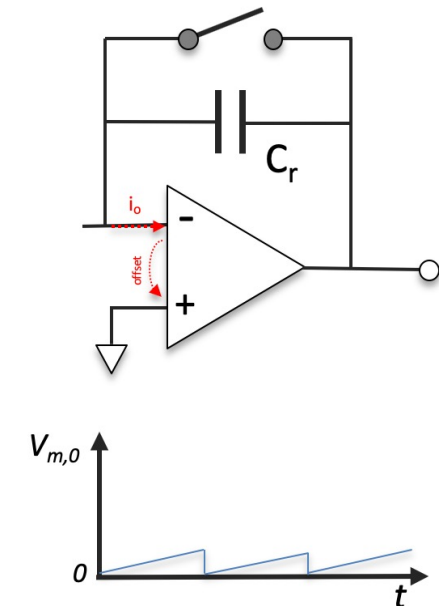
Pour compenser ceci on peut soit:

- mettre une **résistance en parallèle** à  $C_r$
- mettre **commutateur** que l'on actionne à intervalle régulier pour remettre  $V_m$  à zéro

**résistance en parallèle**



**commutateur**



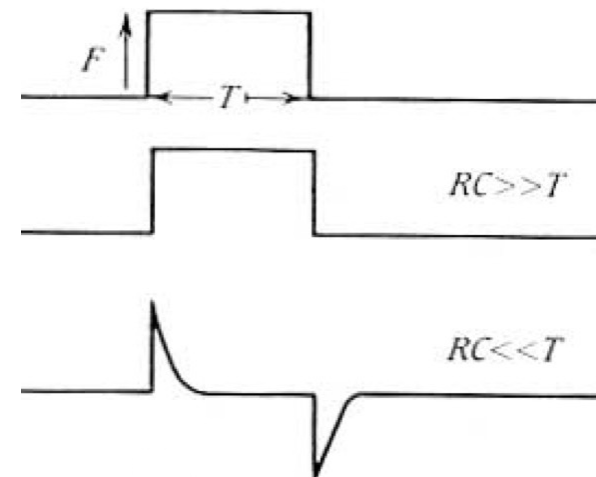
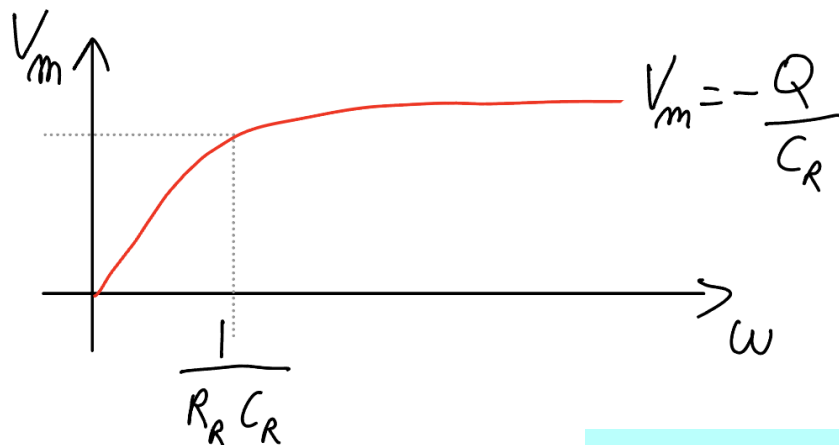


# Amplificateur de charge - ampli OP *non*-idéel

Réponse en fréquence avec une résistance compensation  $R_r$  (en parallèle à  $C_r$ )

$$j\omega Q + C_r j\omega V_m + \frac{V_m}{R_r} = 0 \quad \frac{Q}{C_r} + V_m \left( 1 + \frac{1}{j\omega R_r C_r} \right) = 0$$

$$|V(\omega)| = \frac{Q}{C_r} \frac{\omega R C_r}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C_r^2}}$$



$R_r$  permet de régler la constante de temps du capteur

Ampli charge  $\tau_{charge} = R_r C_r$

Gain (V/Q) =  $-1/C_r$

Ampli tension  $\tau_{tension} = R_0 (C_0 + C_p)$

Gain (V/Q) =  $+1/(C_0 + C_p)$

On veut mesurer à une fréquence min de 0.1 Hz avec un ampli de charge. On veut un gain de  $-10^7$  V/C. Quelle valeur de  $R_r$  ?

- A.  $R_r = 630 \text{ k}\Omega$
- B.  $16 \text{ M}\Omega$
- C.  $314 \text{ M}\Omega$
- D.  $160 \text{ M}\Omega$
- E.  $3.14 \text{ G}\Omega$
- F.  $320 \text{ G}\Omega$

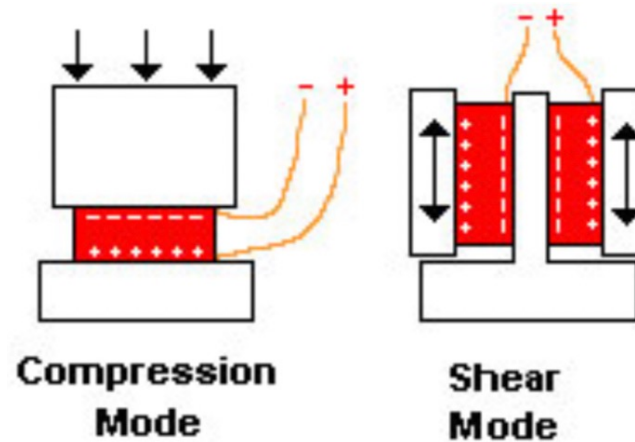
$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad R = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

f=0.1 Hz C=100 nF alors R= 16 MΩ

Si f= 0.01 Hz et C=100 pF, alors R= 160 GΩ.

# Chapitre 8 - Capteurs piézoélectriques

## Partie 3 : Capteurs mécaniques



# Capteurs de force et de pression

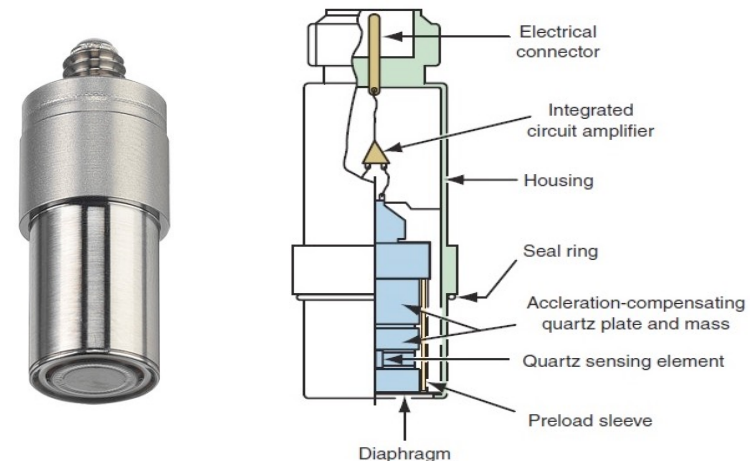
## Capteurs de force

- **Mesure de force axiale ou de couple**
- **Quartz.** Précision, stabilité excellente, peu d'effets parasites
- Mesure de forces ( $> 100$  kN pour une cellule) et couples élevés.
- Grande rigidité (peu de déplacement sous charge, quelques mm à pleine échelle)
- Mesures **quasi-statiques** possibles avec quartz et ampli de charge (0.001 Hz)

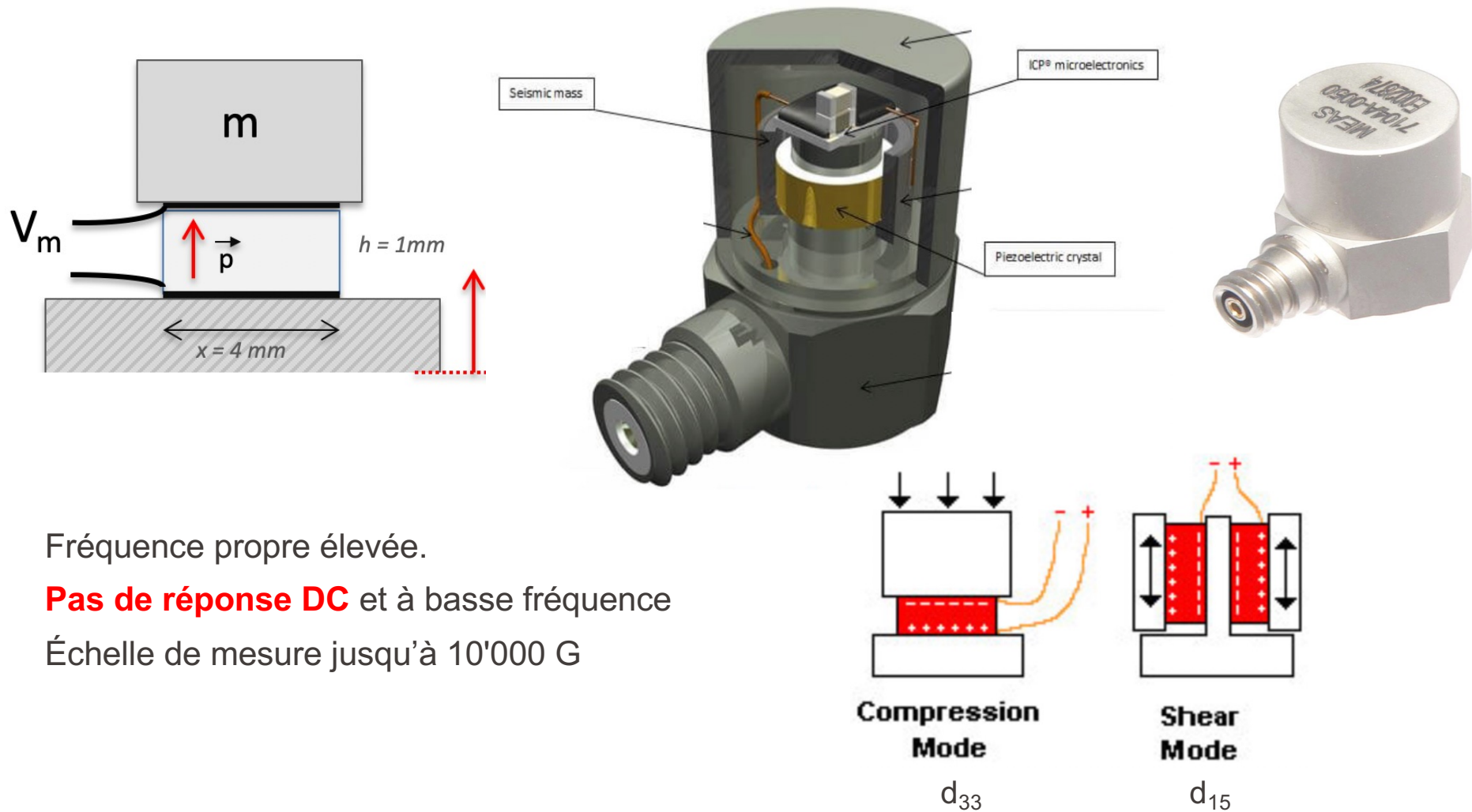


## Capteurs de pression

- Capteur **Quartz**
- Convient aux mesures de **hautes pression** : jusqu'à 7'000 bar
- Temps de réponse court (fréquence propre possible  $> 100$  kHz)
- **Pas de mesure DC** de la pression
- Peut fonctionner à **haute température**



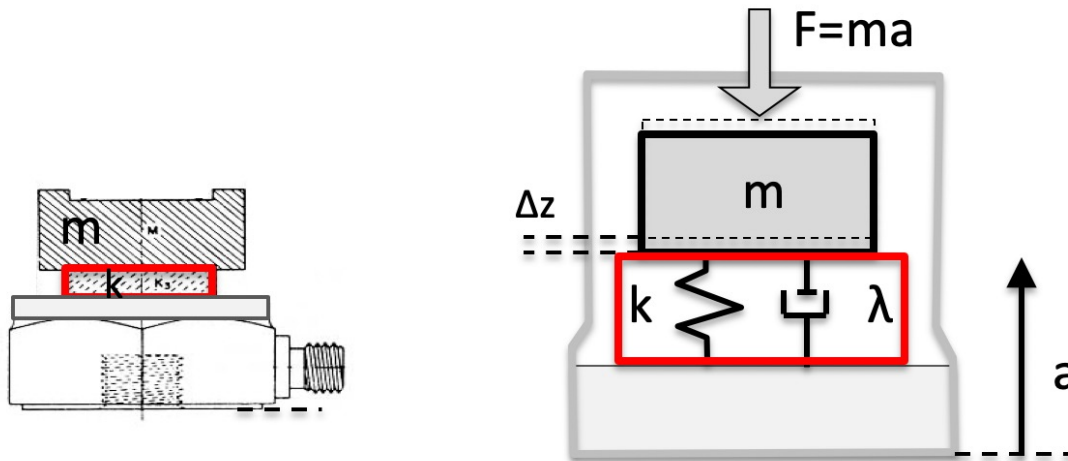
# Accéléromètre piézoélectrique



- Fréquence propre élevée.
- **Pas de réponse DC** et à basse fréquence
- Échelle de mesure jusqu'à 10'000 G

<https://www.pcb.com/resources/technical-information/introduction-to-accelerometers>

# Accéléromètre piézoélectrique – modèle mécanique

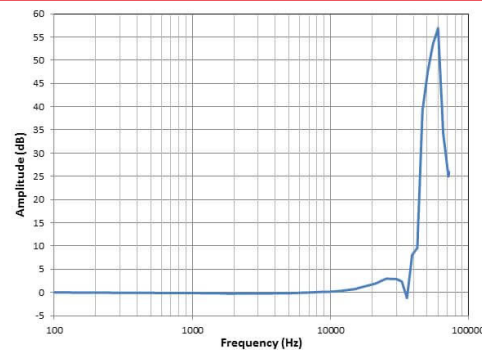


Fréquence propre :  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$

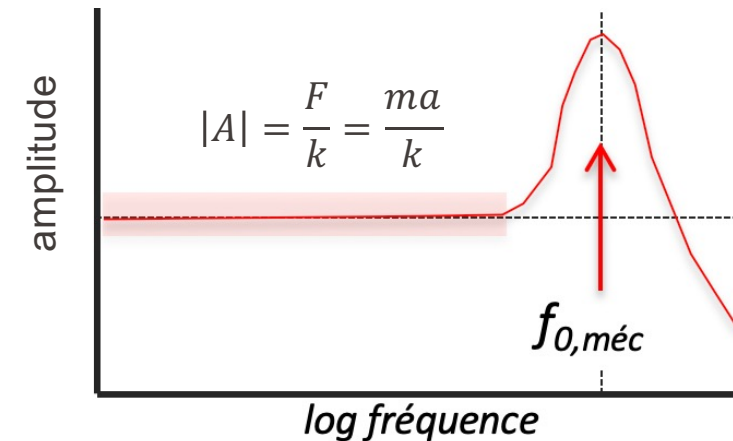
Coefficient  
d'amortissement :  $\xi = \lambda / 2\sqrt{km}$

Fonction de transfert mécanique

$$|F(\omega)| = k \cdot |x(\omega)| = m \cdot a \left( \left( 1 - (\omega / \omega_0)^2 \right)^2 + 4\xi (\omega / \omega_0)^2 \right)^{-1/2}$$



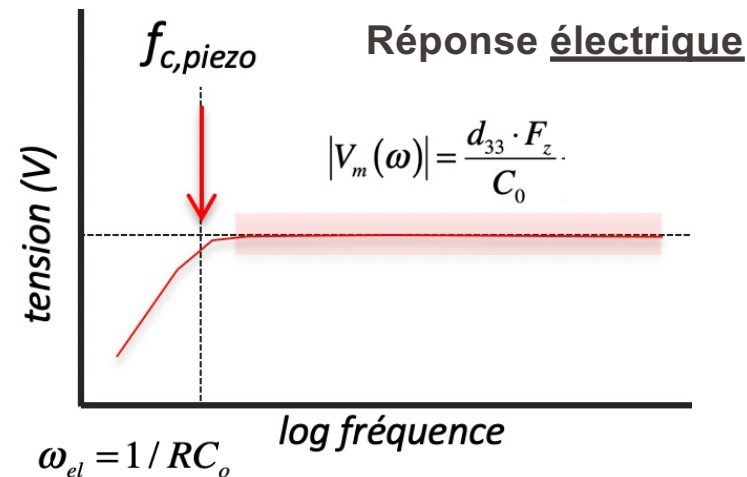
Réponse mécanique:



# Accéléromètre piézoélectrique - modèle

Fonction de transfert piézoélectrique

$$|V_m(\omega)| = \frac{d_{33} \cdot F_z}{C_0} \frac{\omega}{\sqrt{1 + (\omega^2 / \omega_{el}^2)}}$$

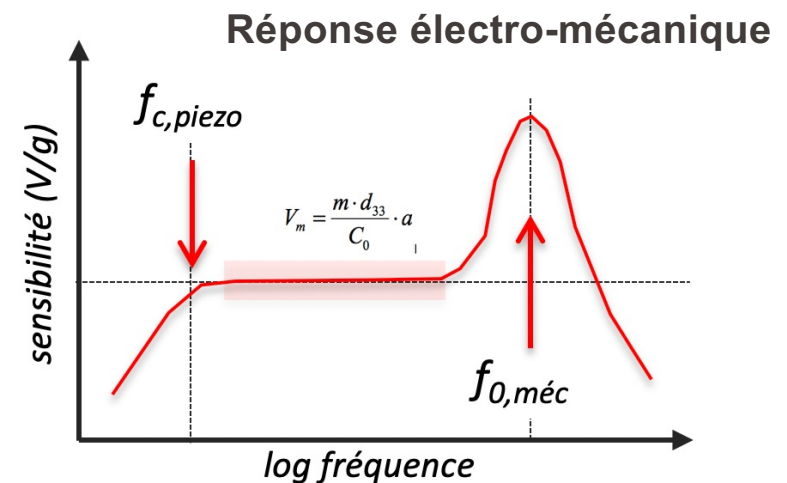


Réponse du capteur (mécanique + piézoélectrique) :

$$V_m = a \cdot \frac{m \cdot d_{33}}{C_0} \left( \left( 1 - (\omega / \omega_0)^2 \right)^2 + 4\xi(\omega / \omega_0)^2 \right)^{-1/2} \cdot \frac{\omega}{\sqrt{1 + (\omega^2 / \omega_{el}^2)}}$$

Domaine de fréquences "utilisable"

$$f_{c,piezo} < f < f_{0,mec}$$





# Mesure de vibration- Maintenance préventive

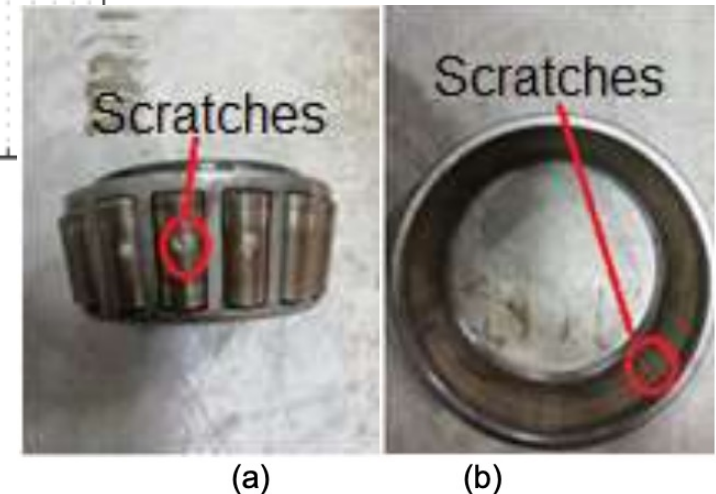
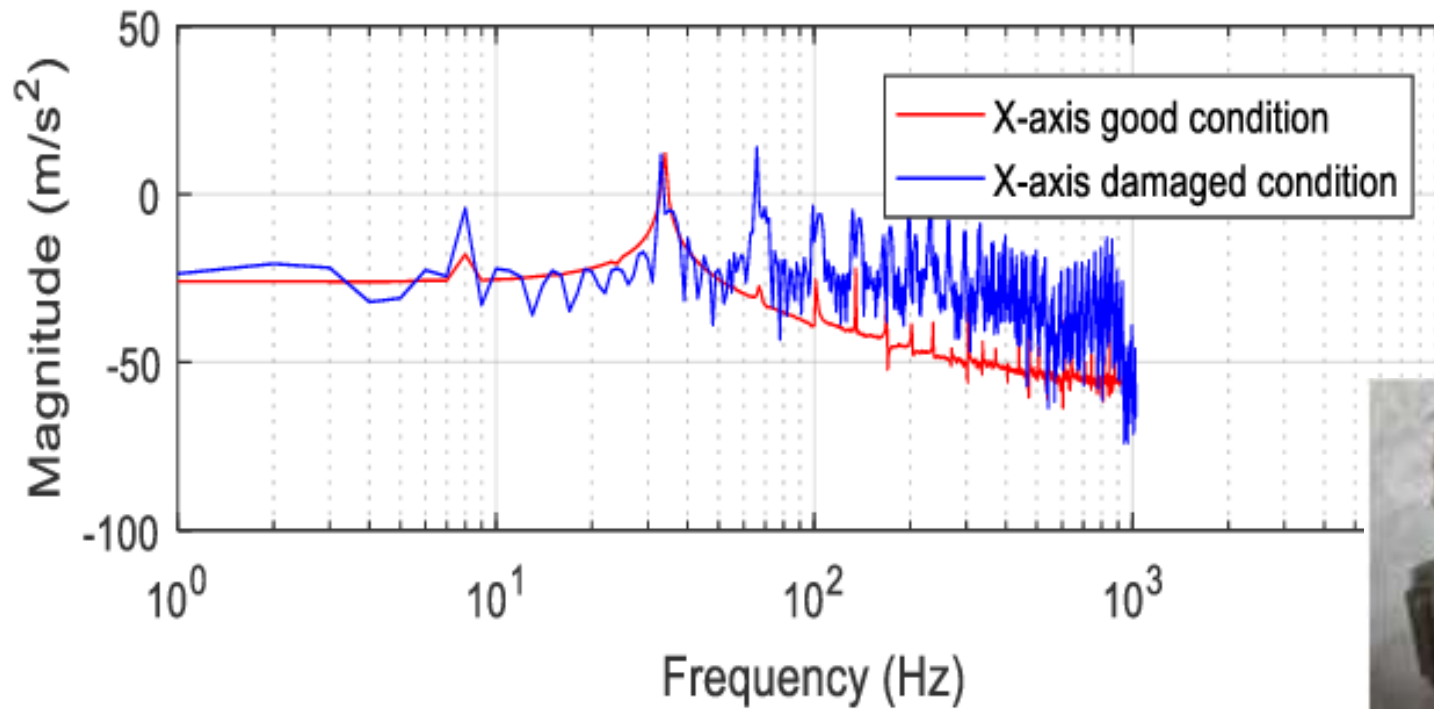
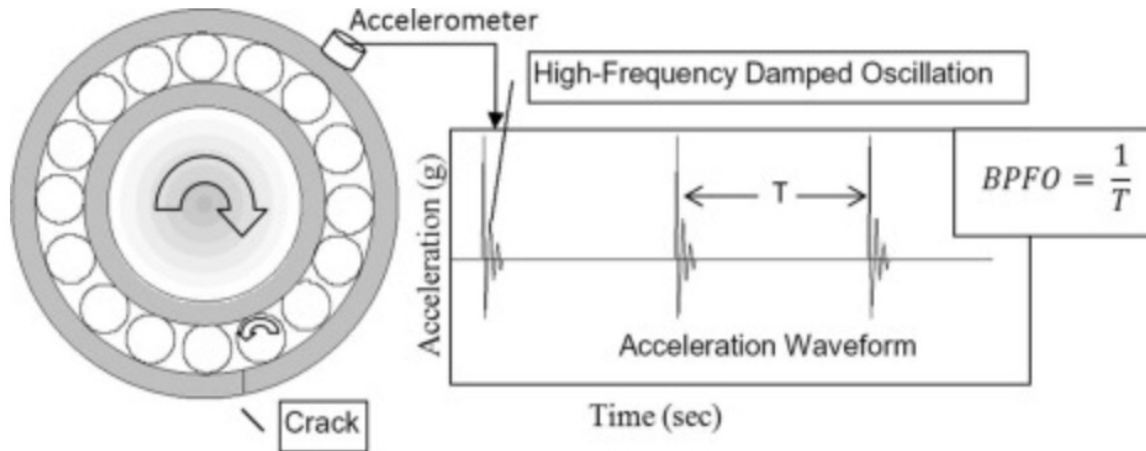


Figure 17. Taper and House Bearing

A. Susanto et al, Implementation of frequency response function on taper bearing maintenance. *Sinergi* **23**, 132 (2019).

# Mesure de vibration- Maintenance préventive

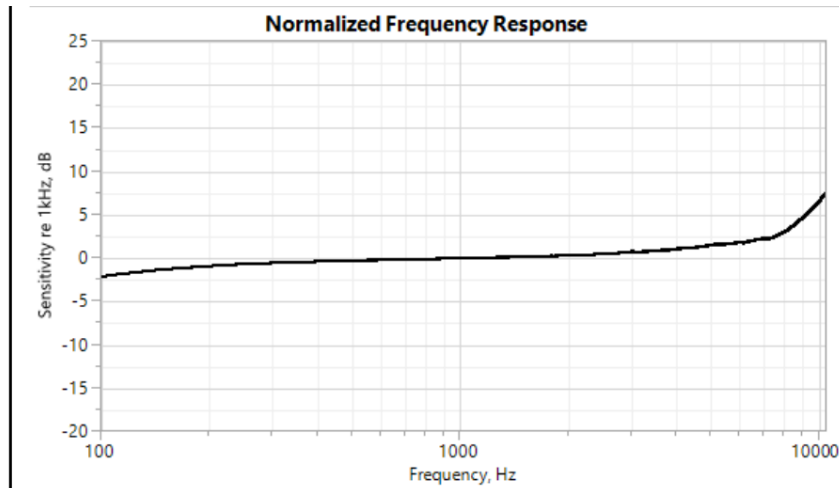


S. Tyagi, S. K. Panigrahi, An improved envelope detection method using particle swarm optimisation for rolling element bearing fault diagnosis. *Journal of Computational Design and Engineering* 4, 305–317 (2017).

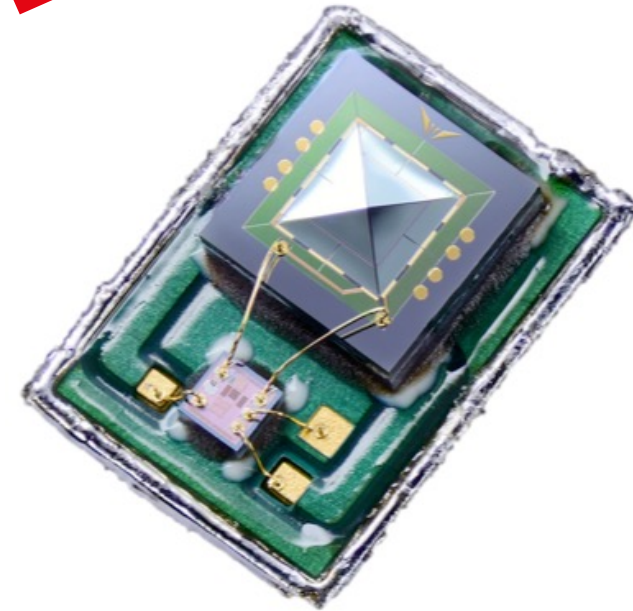
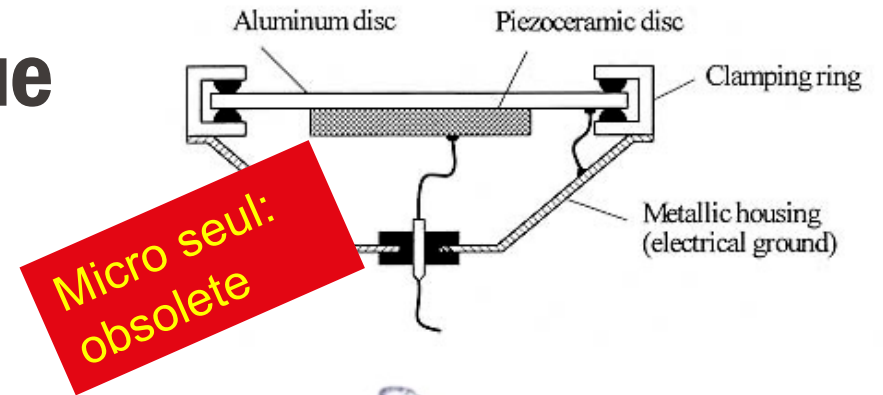


# Microphone piézoélectrique

couches minces PZT sur silicium



*Normalized Frequency Response*



18  $\mu$ W in « wake on sound » mode

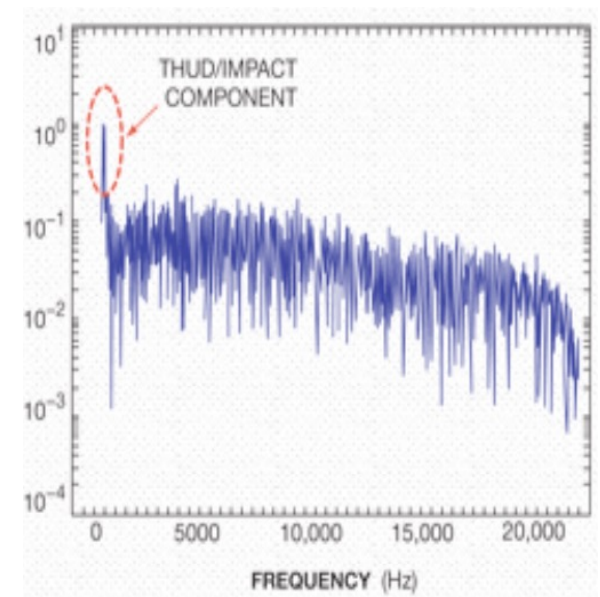
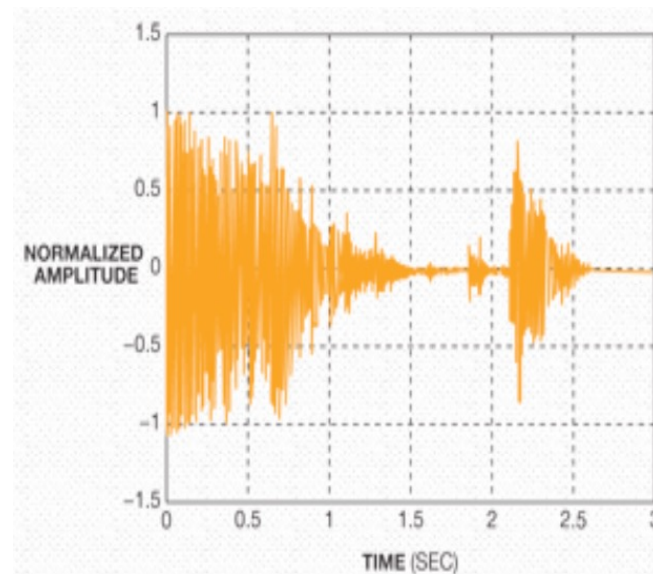
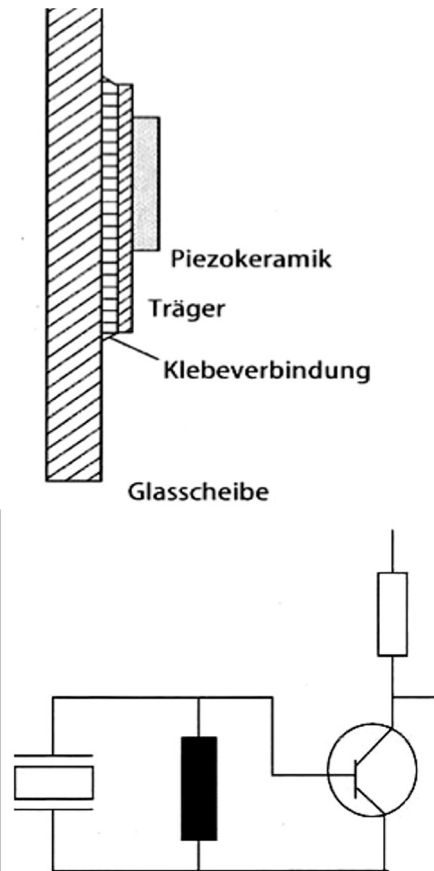
MEMS piézoélectrique microphone: Vesper VM1010

[https://vespermems.com/wp-content/uploads/2019/03/VM1010\\_Datasheet-1.pdf](https://vespermems.com/wp-content/uploads/2019/03/VM1010_Datasheet-1.pdf)



# Détecteur de bris de vitres

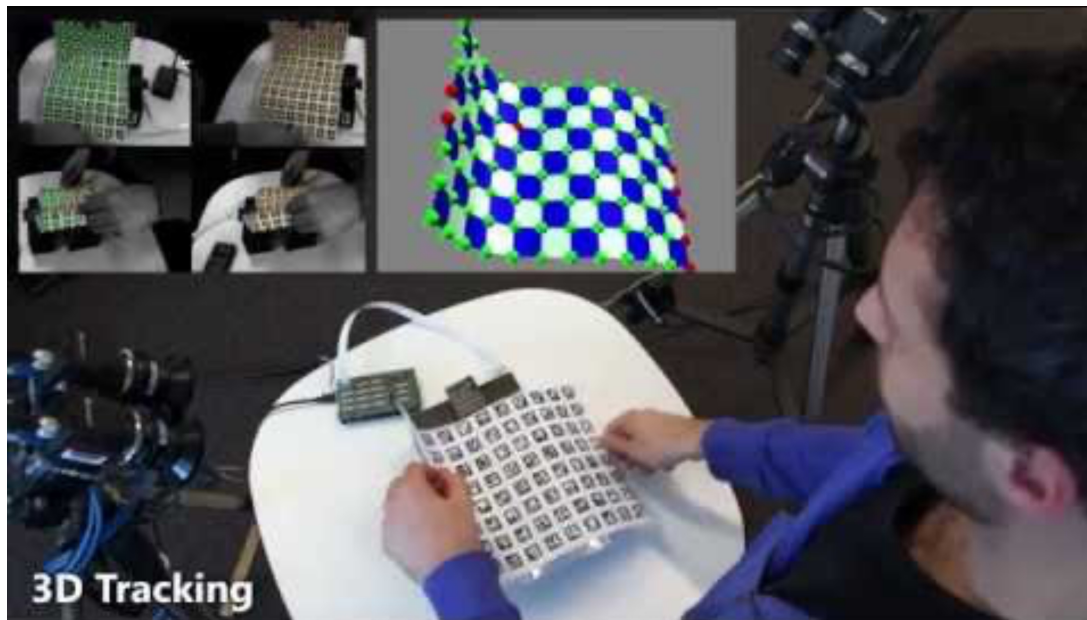
52





# Capteurs piezo flexibles en PVDF

- PVDF-TrFE
  - Peut être imprimé
  - Puis il faut appliquer un fort champ électrique pour orienter le piezo)



Σ

<https://www.pyzoflex.com/>

Product name	Typical TrFE content (mol%)	Curie Temperature (°C)	Typical remnant polarization at 150 V/ μm (mC/m <sup>2</sup> )	Typical d <sub>33</sub> (pC/N)
Piezotech® FC20	20	136	85	-24 to -30
Piezotech® FC25	25	115	70	
Piezotech® FC30	30	100	65	-18 to -22
Piezotech® FC45	45	60	45	

<https://piezotech.arkema.com/en/Products/piezoelectric-copolymers/>

## Pop Touch @EPFL-LMTS

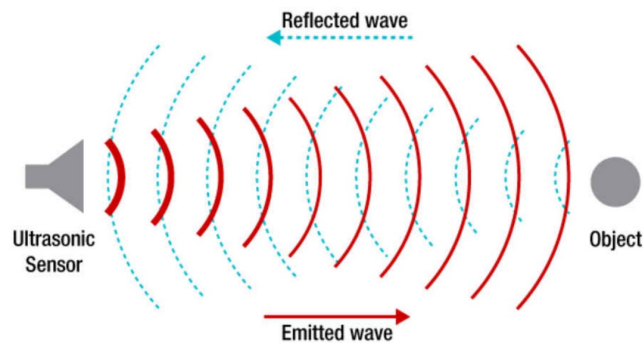
- Adding flexible piezoelectric sensing to haptic buttons



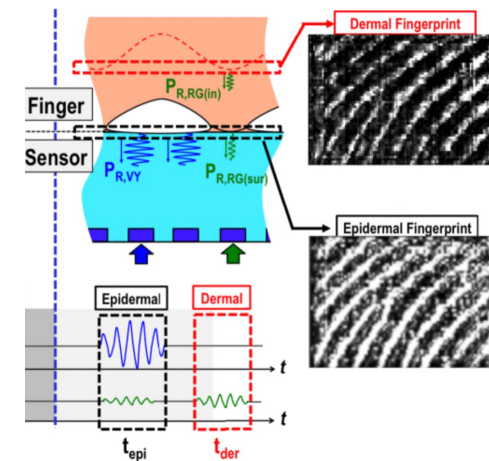
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.202307636>

# Chapitre 8 - Capteurs piézoélectriques

## Partie 4 : Capteurs ultrasons (de distance)



30–500 kHz  
(dans l'air)



20–50 MHz  
(dans liquides ou solide)

# Capteur de distance à ultrasons

Principe : émettre une impulsion sonore puis mesurer le temps de transit de l'écho

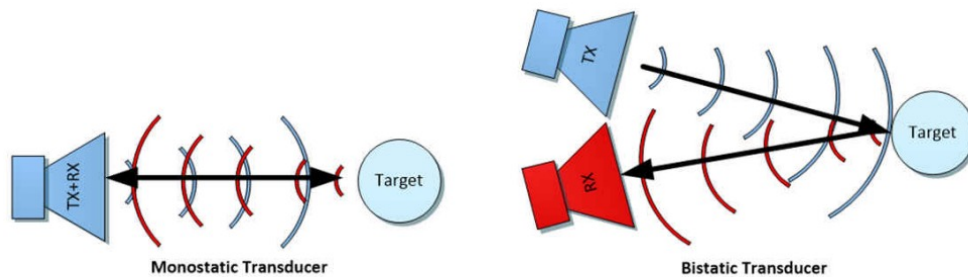
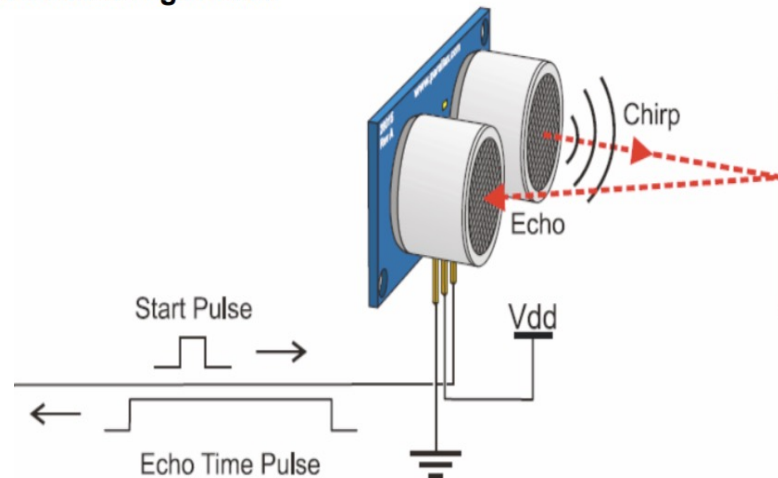


Figure 2-7. Monostatic vs Bistatic Configuration

$$d = \frac{1}{2} v_s T_{TOF}$$



- $v_s$ : vitesse du son (330 m/s dans l'air)
- TOF: Time of Flight (temps de vol)

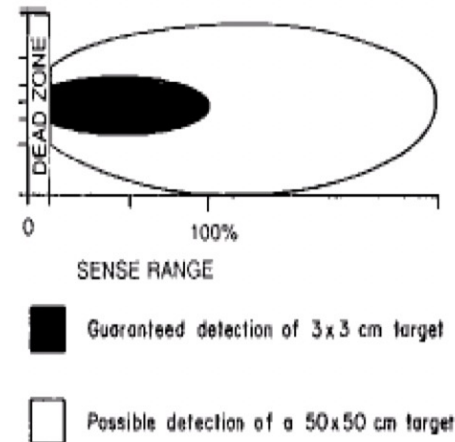
Ultrasonic Sensing Basics:

<https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf?ts=1681549683232>



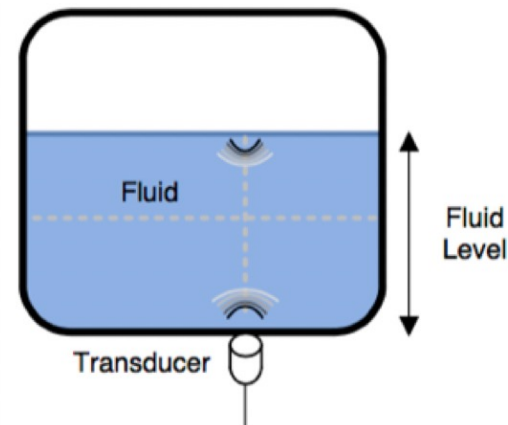
# Capteur de distance à ultrasons

- Fréquence: de 50 kHz (air) à 1 MHz (liquides)
- Etendue de mesure typique dans l'air : entre 10 cm et 1 m
- Précision absolue : entre 1 et 5 mm
- Envoi de trains d'impulsions (par ex: 16 pulse, 2 ms total)
- Technologie alternative : transducteur **magnétostriction**



## Applications :

- Détection de proximité, occupation
- Mesure de distance
- Niveau de liquide (très courant)
- Détection de bulles (systèmes médicaux)
- Sonar (sous-marin)
- Capteur de débit  
Typiquement 1 MHz



*Mesure de niveau*

Table 1-1. Proximity Sensing Technology Comparison

	Passive Infrared	Ultrasonic	Optical ToF	mmWave
<b>Detection Range</b>	0.1 to 5 m	0.1 to 10 m	0.01 to 20 m	0.01 to 100+ m
<b>Resolution</b>	Few cm	Few mm (transducer dependent)	Few mm (optics dependent)	Few mm (range dependent)
<b>Field of View</b>	Up to 180°	5° to 120°	0.15° to 120°	5° to 160°
<b>Current Consumption</b>	<5 mA	72 mW to 336 mW (active) 2-9 mW (standby/sleep)	100 µW to 200 mW (active) ~ 80 µW (standby/sleep)	0.5 W to 1.5 W
<b>Solution / Module Size</b>	Medium	Medium	Small	Large
<b>Aesthetics</b>	Requires lens to achieve range and wide field of view	Exposure to medium for longer range	Hidden behind dark glass	Penetrates most materials (not metal)
<b>Measuring Medium Speed</b>	Infrared light (emitted by object)	Sound	Light	Light
<b>Single Sensor System Cost (US\$)</b>	< \$1	\$1 - \$3	\$1.5 - \$4	\$18 - \$26
<b>Key Differentiation</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limited performance in high heat environments and corner regions</li> <li>Insensitive to slow motion</li> <li>Prone to false positives</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Effectively detect solid and transparent glass surfaces</li> <li>Able to detect objects in a smoke/gas-filled environment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Target localization (up to 3 zones of detection)</li> <li>Precise long-range measurements</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Provides range, velocity, and angle data</li> <li>Can penetrate non-metal materials</li> <li>Intelligent object differentiation</li> </ul>

<https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf?ts=1681549683232>

La **vitesse du son**  $c$  ne dépend pas fortement de la fréquence  
(mais dépend fortement du milieu)

$$c_{solide} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$c$ : vitesse du son  
 $E$ : module de Young (pour solide)  
 $\rho$ : densité

$$c_{gaz} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

$\gamma$  = Adiabatic index (  $C_p/C_v$  )  
 $R$  = Universal gas constant (8.314 J/mol·K)  
 $T$  = Absolute temperature (K)  
 $M$  = Molar mass of the gas (kg/mol)

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

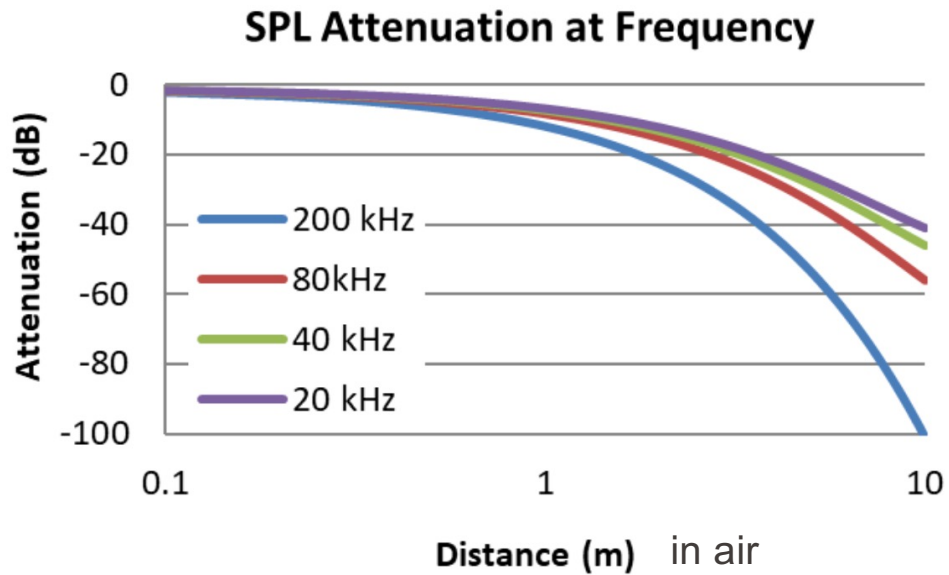
$\lambda$ : longueur d'onde  
 $f$ : fréquence

Material	Speed ms <sup>-1</sup> (mean <i>in vitro</i> )
Air	330
Fat	1400
Water	1500
Assumed soft tissue mean	1540
Muscle	1580
Blood	1580
Transducer PZT	3000
Tooth	3600
Bone	3500
Steel	4000

freq (kHz)	$\lambda$ (mm) in air
20	16.5
40	8.25
60	5.5
100	3.3
200	1.65
500	0.66
1000	0.33

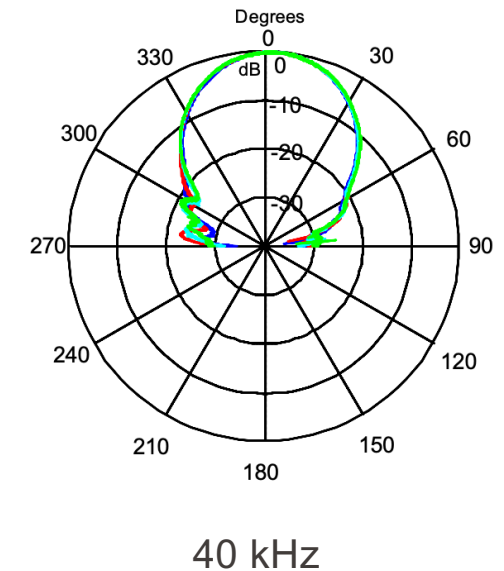
# Capteur de distance à ultrasons. Quelle fréquence ?

- Haute fréquence,
  - $\lambda$  plus petit (donc plus précis)
  - faisceau souvent plus étroit.
  - Mais plus d'atténuation



<https://www.ti.com/lit/an/slaa907d/slaa907d.pdf?ts=1681549683232>

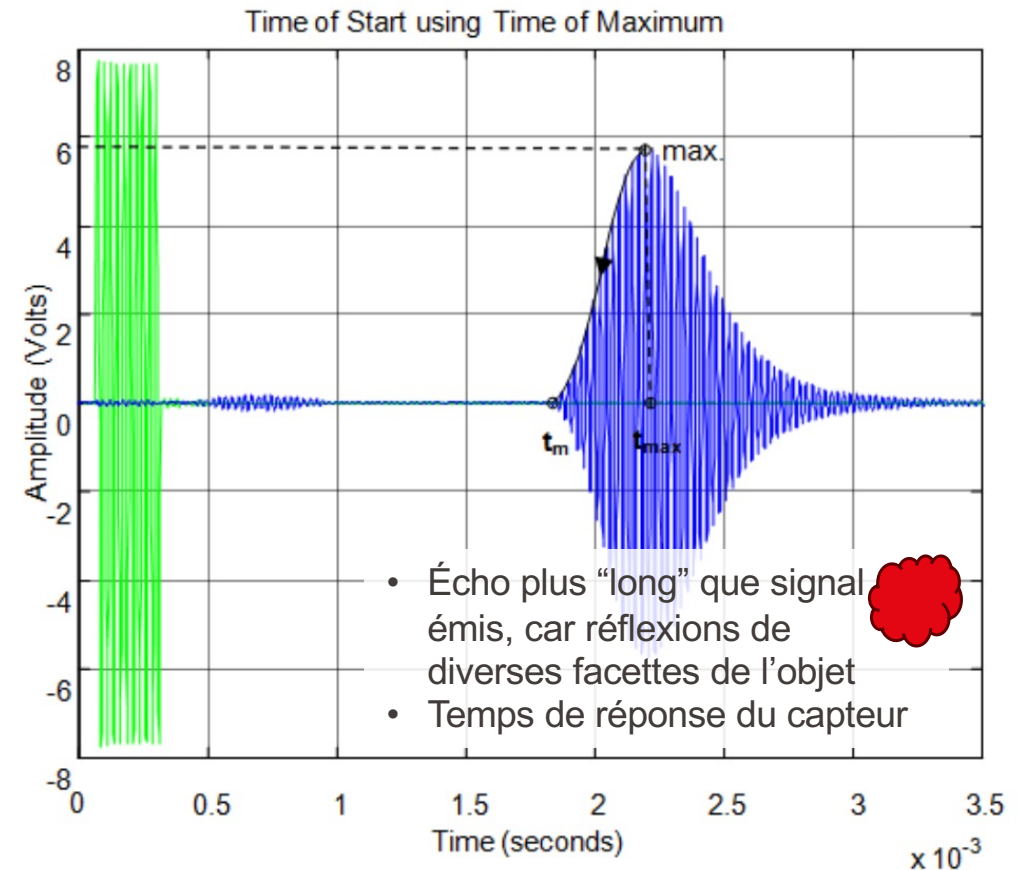
- 30 kHz à 80 kHz: bien pour longue portée
- 80 kHz à 500 kHz: plus précis, mais portée plus courte



# Capteur de distance à ultrason

- Génère un train d'impulsions
- Il faut au minimum une impulsion!
- Typiquement de l'ordre de 8 impulsions
- Train d'impulsion aussi court que possible (car on ne peut pas écouter les échos quand on transmet en même temps)

La forme de l'écho reçu dépend de la forme du signal électrique appliqué à l'émetteur (en vert), mais aussi des caractéristiques mécaniques du transducteur émetteur et récepteur.

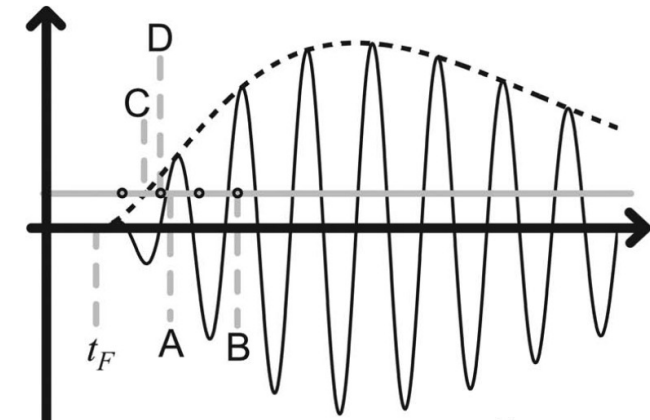
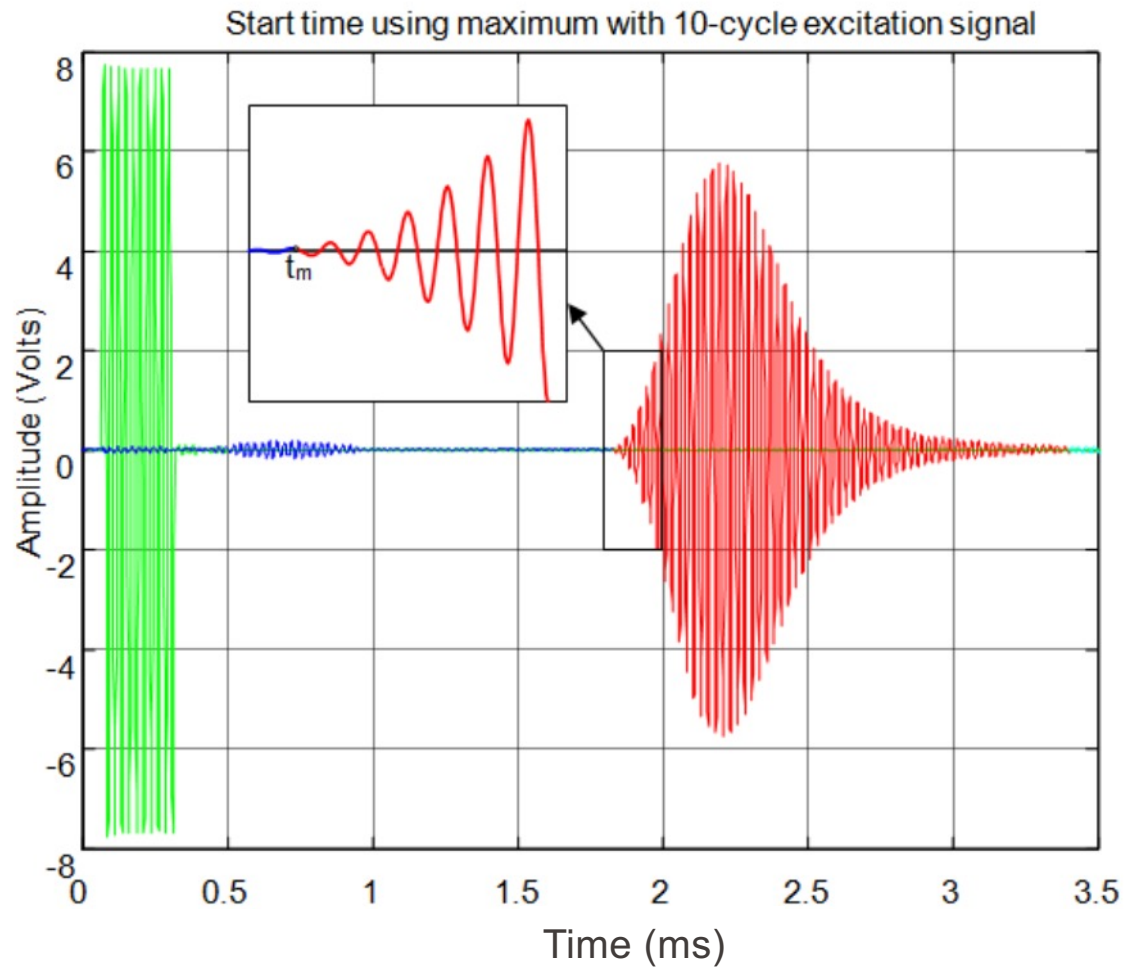


40 kHz, 3 cm spacing

E. G. Sarabia et al, Accurate Estimation of Airborne Ultrasonic Time-of-Flight for Overlapping Echoes. *Sensors* **13**, 15465–15488 (2013).

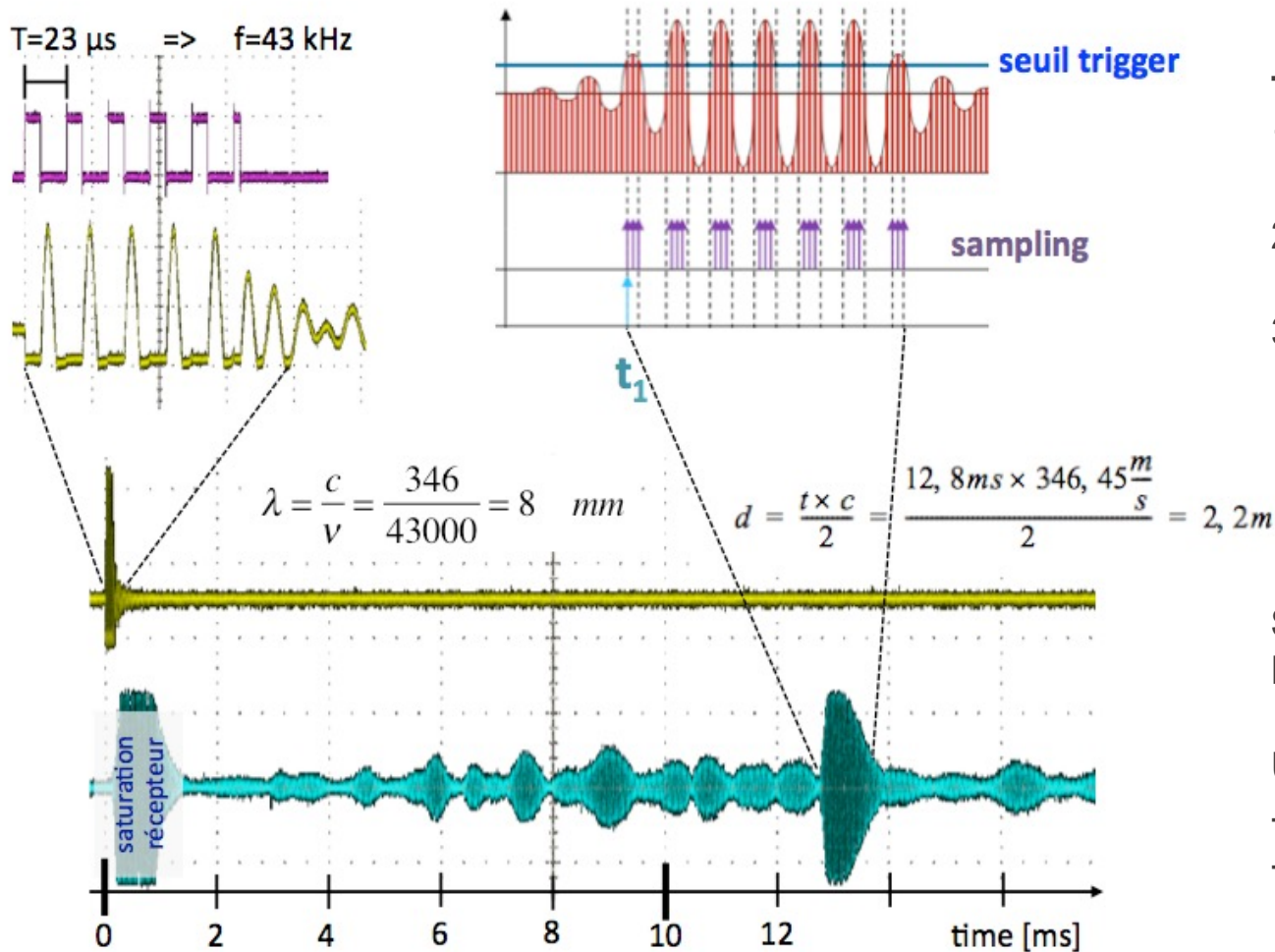
# Quand a-t-on reçu l'écho ?

Il faut connaître  $t_{echo}$  avec précision pour déterminer la distance  $d$  avec précision



- Seuil (très facile, pas précis)
- Analyse de l'enveloppe

# Capteur de distance à ultrasons. TOF par seuil



## TOF par Seuil

1. Quel seuil choisir (très sensible au bruit)?
2. On ne peut guère être plus précis qu'une longueur d'onde...
3. On tolère une erreur de combien de périodes?

## Signal faible quand objet est loin

Le signal reçu chute comme  $(\text{distance})^2$

Une solution:

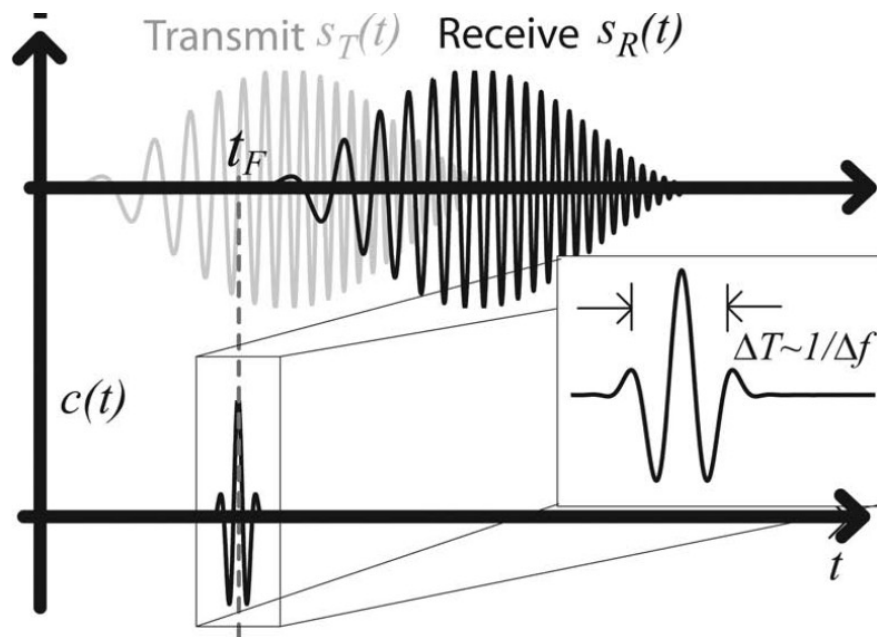
- Ampli avec un gain qui dépend du temps.
- Ampli logarithmique



# Mesure TOF par auto-corrélation

Le seuil du trigger influence très fortement la précision de la mesure.

Pour éviter ce problème, dans système de précision, on calcule la cross-corrélation entre signal émis (X) et l'enregistrement digital du signal écho (Y) pour différents délais de temps ( $\Delta t$ ).



$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_T(\tau) s_R(t + \tau) d\tau.$$

Le **maximum de corrélation** indique de temps de parcours (=TOF)

Précision proportionnelle à  $\lambda$  (mais peut être bien plus petit que  $\lambda$ )

Utilise TOUT le signal.

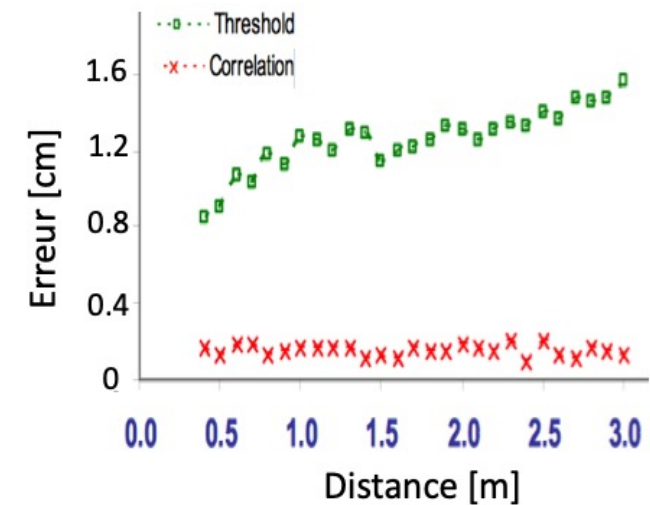
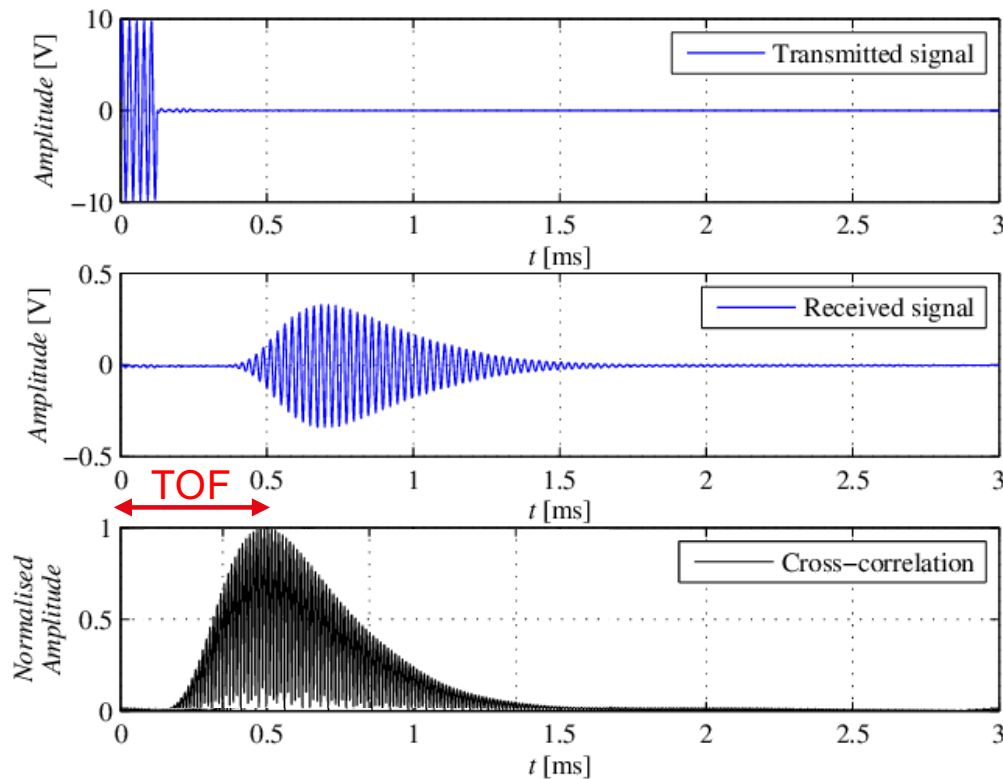
J. C. Jackson et al, Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* **60**, 343–355 (2013).



# Mesure par corrélation

$$c(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_T(\tau) s_R(t + \tau) d\tau.$$

- ✓ **Précision améliorée** : réduit l'erreur due au bruit et aux signaux parasites.
- ✓ **Fiabilité accrue** : fonctionne même si l'amplitude du signal d'écho varie.
- ✓ **Meilleure détection** : permet d'identifier correctement l'écho même en présence de réflexions multiples.



TOF est peu sensible à l'intensité du signal reçu

Erreur 1 mm ou moins

# EPFL Limitations de mesure de distance par ultrason

- La vitesse du son dépend de la Température
- $c = 300 + 0.6 T$  [m/s], avec  $T$  en degrés celsius

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{M}}$$

$M$  masse molaire  
 $p$  pression  
 $\rho$  densité  
 $\gamma$  adiabatic index of air

$$\left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 = \left(\frac{\Delta t_F}{t_F}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2.$$

$d$ : distance

- Courte distance: l'erreur de mesure de temps domine
- Longue distance: l'erreur de vitesse (due à la température) domine

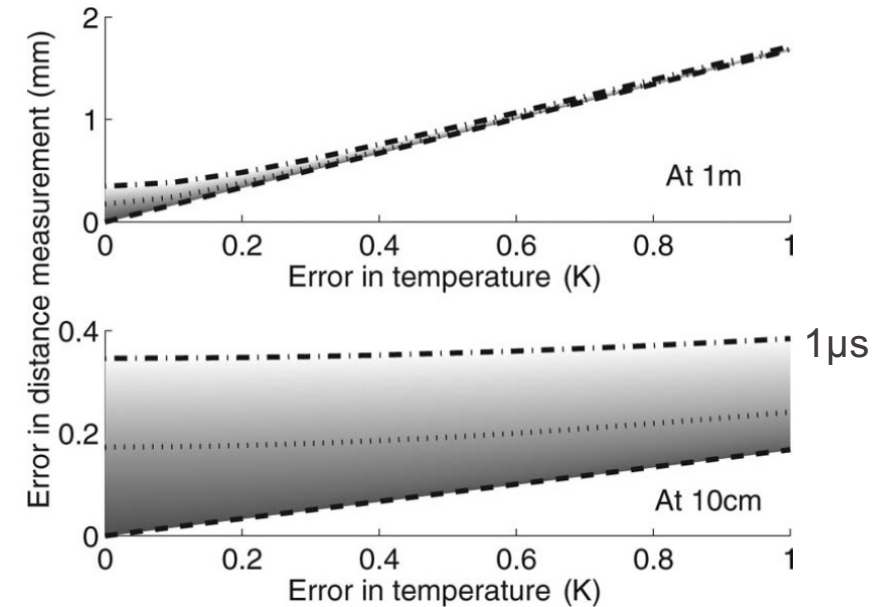
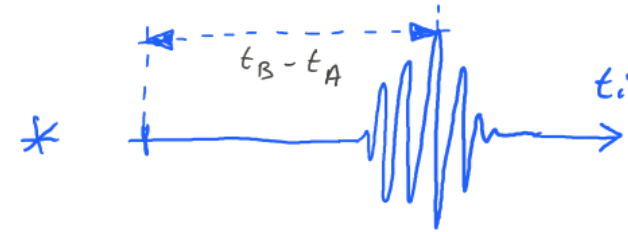
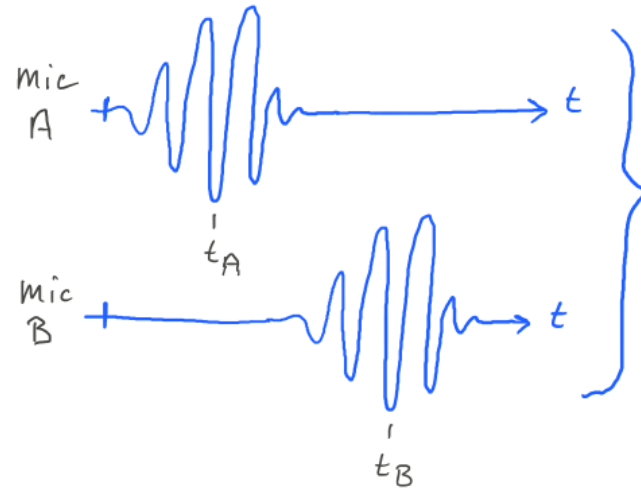
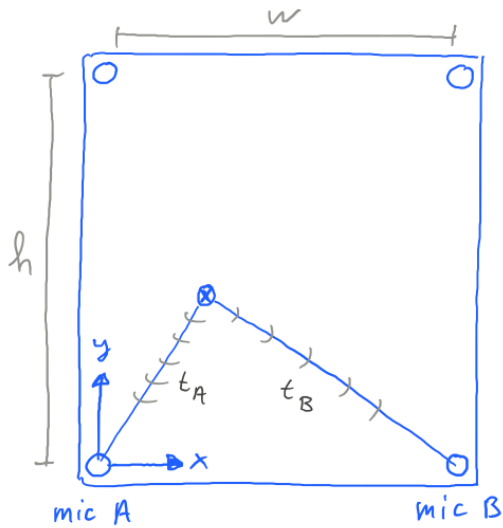


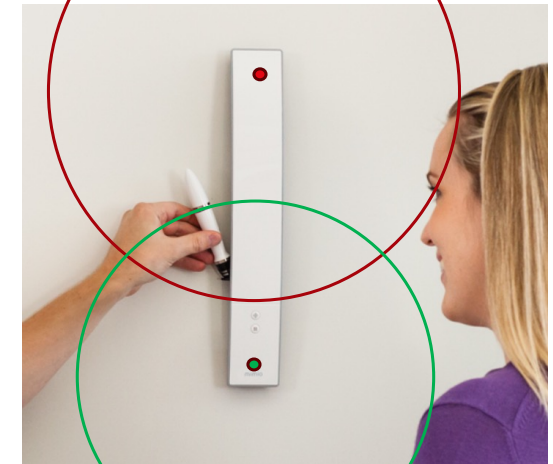
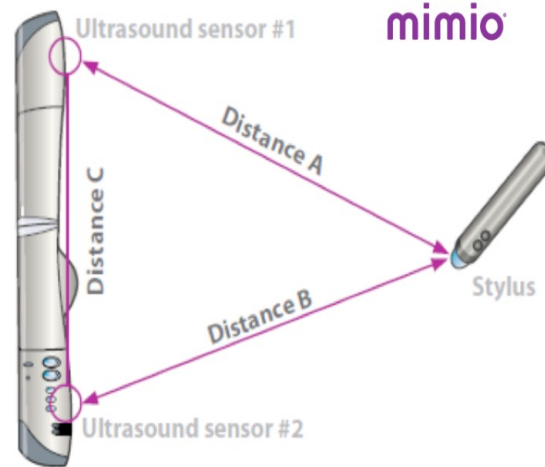
Fig. 8. Graph of the error in a distance measurement as a function of temperature uncertainty. The shading represents the effect of a time-of-flight error on this distance error; in these cases, black-to-white shading indicates the range of time-of-flight error of 0  $\mu$ s (bounded by the dashed line) to 1  $\mu$ s (bounded by the dot-dashed line). A time-of-flight error of 500 ns is indicated by the dotted-line contour. (top) A signal that has traveled 1 m in air. (bottom) A signal that has traveled 10 cm in air.

J. C. Jackson et al, Time-of-flight measurement techniques for airborne ultrasonic ranging. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.* **60**, 343–355 (2013).

# Stylo wireless à ultrasons



$$(X * Y)[t_i] = \sum_n X(t_n + t_i) \cdot Y(t_n)$$

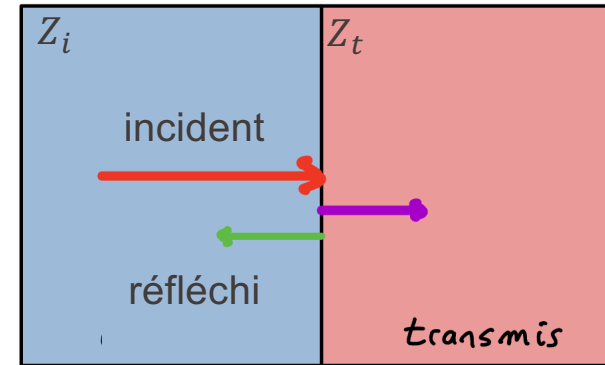


# Imagerie par ultrasons: réflexions aux changements d'impédance acoustique

Impédance acoustique  $Z$  :  
dépend de la densité et du module élastique

$$Z_{acous} = \rho \cdot v_s \quad \left[ \frac{Pa \cdot s}{m} \right] \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

L'onde sonore est réfléchi à l'interface entre deux milieux d'impédance acoustique différente (comme en optique avec index de réfraction)



$$R = \left( \frac{Z_i - Z_t}{Z_i + Z_t} \right)^2$$

**R : coefficient de réflexion à l'interface**

$$R_{air-graisse} = 0.998$$

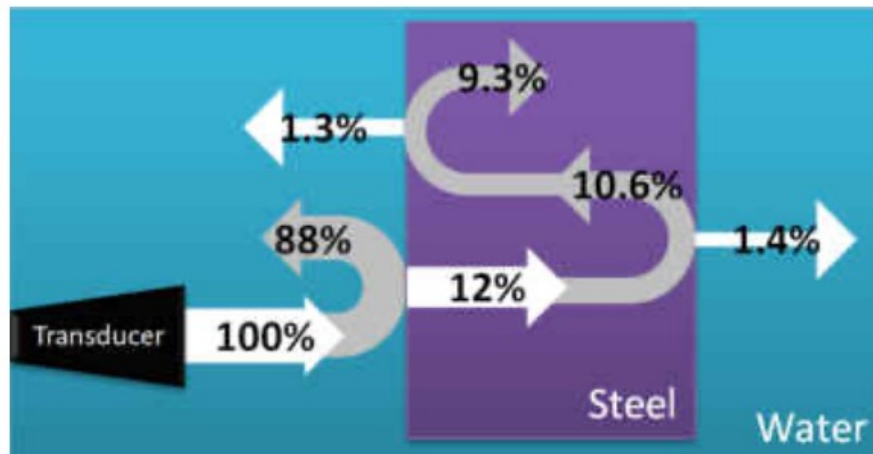
$$R_{muscle-graisse} = 0.02$$

Milieu	Densité $\rho$	$c$ en m/s	$Z$
air	1.3	343	$4.5 * 10^2$
poumons	300	600	$1.8 * 10^5$
graisse	924	1410-1470	$1.33 * 10^6$
foie	1061	1535-1580	$1.6 * 10^6$
muscle	1068	1545-1631	$1.7 * 10^6$
os	1913	2100-4080	$7.7 * 10^6$



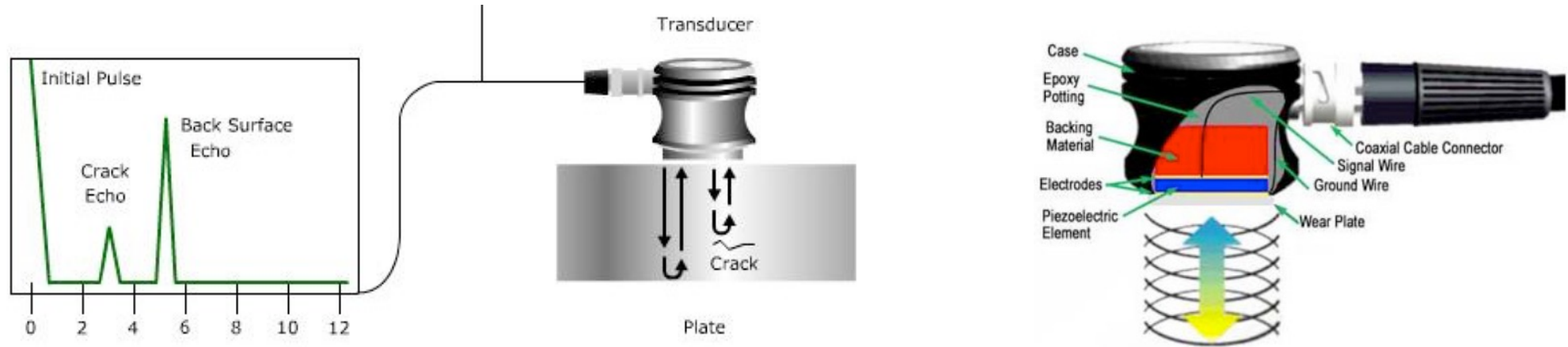
$$\left( \frac{Z_{\text{Skin}} - Z_{\text{Air}}}{Z_{\text{Skin}} + Z_{\text{Air}}} \right)^2 = \left( \frac{1.6 - 0.00429}{1.6 + 0.00429} \right)^2 = 0.99$$

(donc besoin de gel en imagerie US médicale pour éviter la première réflexion)



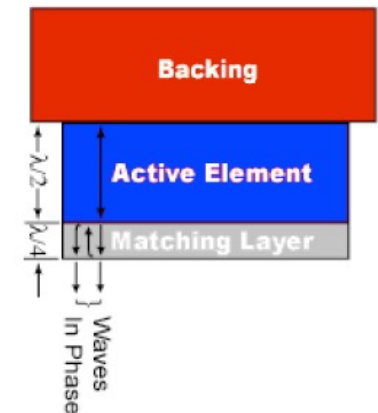
Ne pourra pas imager derrière une plaque d'acier

# Test non destructif par ultrasons



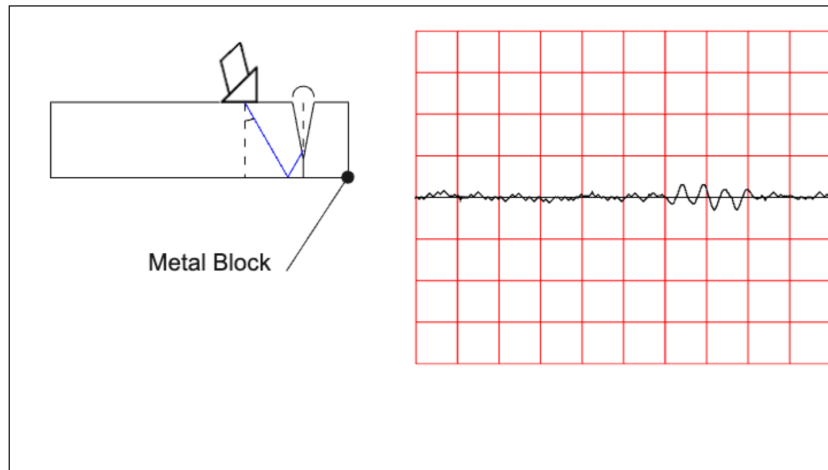
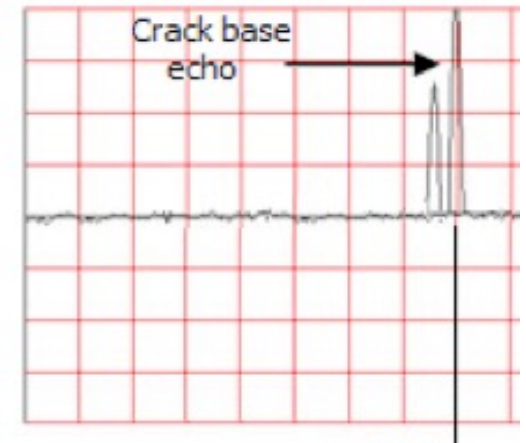
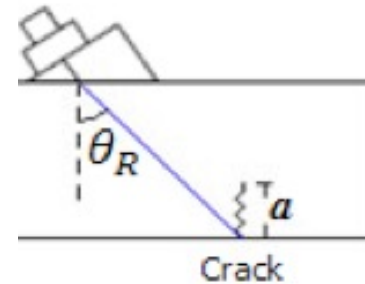
<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/Introduction/description.xhtml>

- L'élément piézoélectrique a une épaisseur d'une demi-longueur d'onde pour maximiser le déplacement en surface. Onde longitudinale ou de cisaillement.
- L'élément de « backing » a la même **impédance acoustique** que le piézo. Il sert à amortir la vibration (et donc augmenter la bande de fréquence de la sonde)
- La couche d'interface (« matching » layer) a une épaisseur de **1/4 de longueur d'onde** pour maximiser transmission
- Un **couplant** (eau, graisse) est nécessaire (pour éviter de saut d'impédance dû à l'air de l'interface)



# Test non destructif par ultrasons

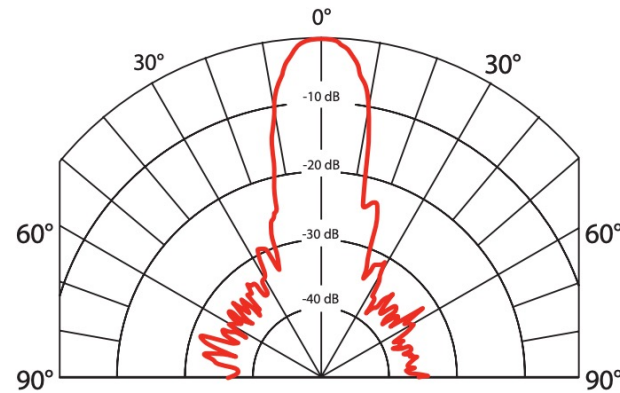
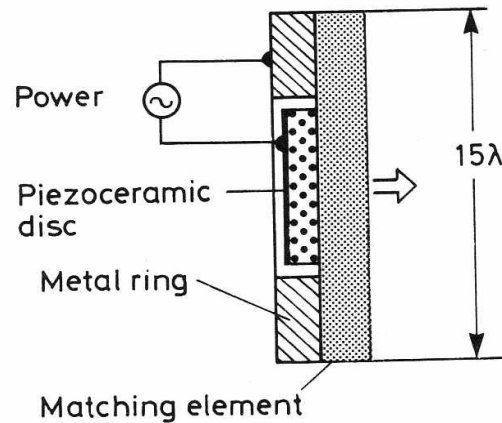
Estimation de la profondeur de **fissures** en mesurant avec une sonde latérale à **différentes distances**  
 Ondes de cisaillement (**transversales**): ne sont pas transmises dans les fissures.



<https://www.nde-ed.org/NDETechniques/Ultrasonics/MeasurementTech/anglebeam1.xhtml>



# Transducteurs piézo-acoustiques (émetteur/récepteur d'ultrasons)

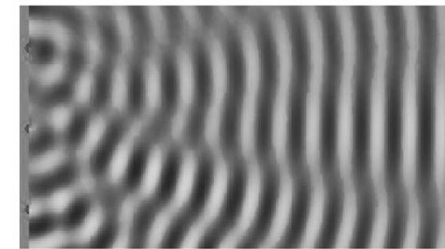


<https://www.airmarweb.com/uploads/air/AT120.pdf>

- Pas un seul lobe, car interférences
- Grand disque: bcp d'effets d'interférence
- Petit disque: Moins de puissance émise

Zone de champ proche (*near field*): à cause de la taille du transducteur, la zone proche contient des **interférences** qui rendent le **signal incohérent**. Il est donc difficile de mesurer dans cette zone.

La distance  $X_{\text{NearField}}$  est donnée par la formule ci-contre pour une source circulaire de diamètre  $D$  fonctionnant à fréquence  $f$ :



$$X_{NF} = \frac{D^2 f}{4v_{son}} = \frac{D^2}{4\lambda}$$

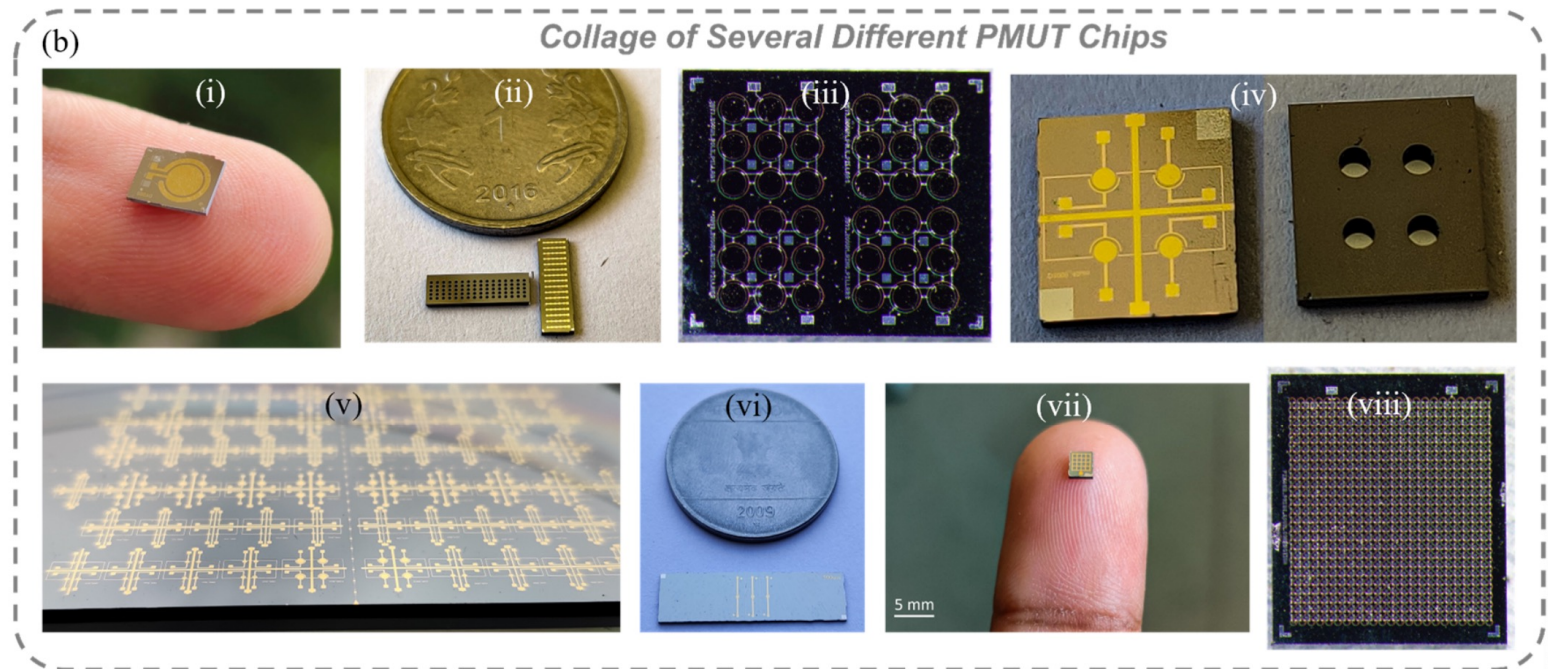
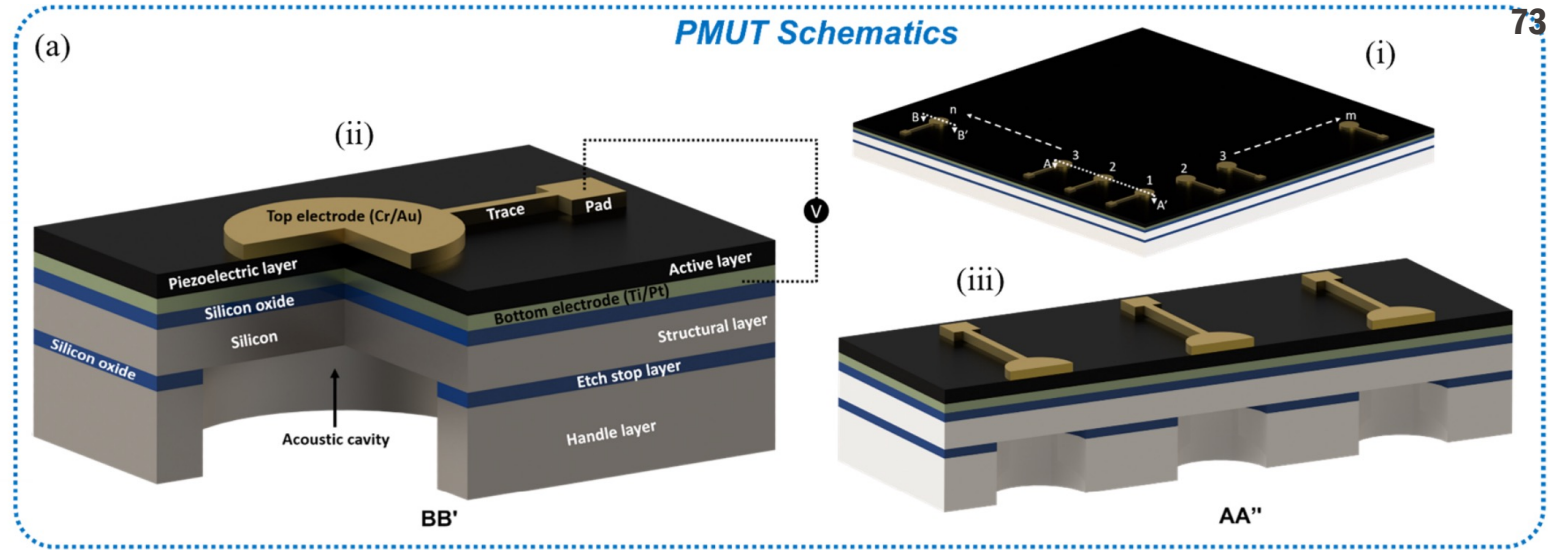


# PMUT:

## Piezoelectric Micromachined Ultrasound Transducers

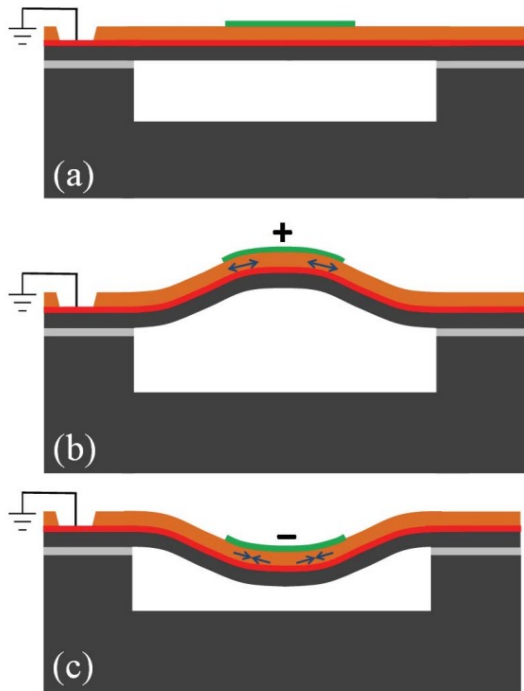
K. Roy, J. E.-Y. Lee, C. Lee, Thin-film PMUTs: a review of over 40 years of research. *Microsyst Nanoeng* **9**, 1–17 (2023).

<https://www.nature.com/articles/s41378-023-00555-7>

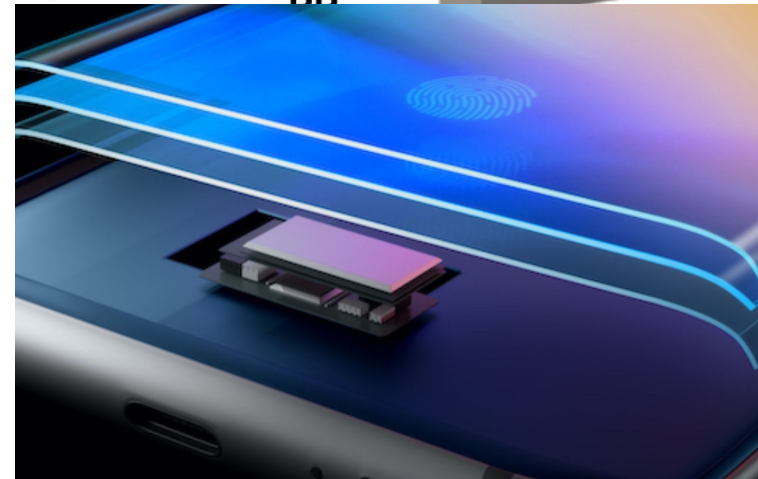
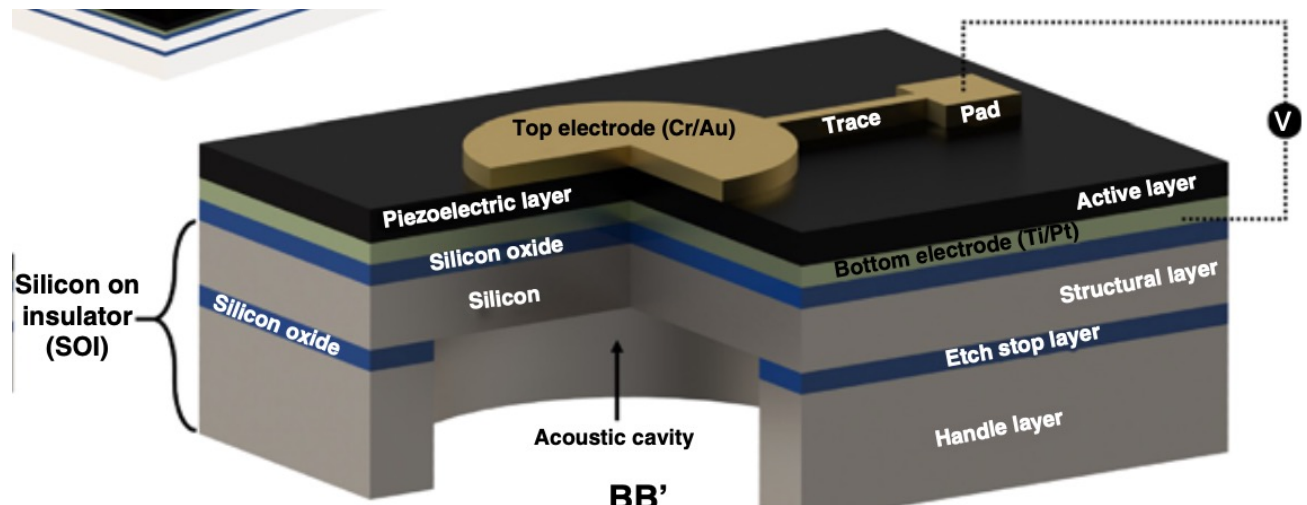


# Ultrasound sources (PMUT)

piezoelectric micromachined ultrasonic transducer.  $\mu\text{m}$ -scale



■ Si   ■ SiO<sub>2</sub>   ■ Piezoelectric Layer  
 ■ Bottom Electrode   ■ Top Electrode

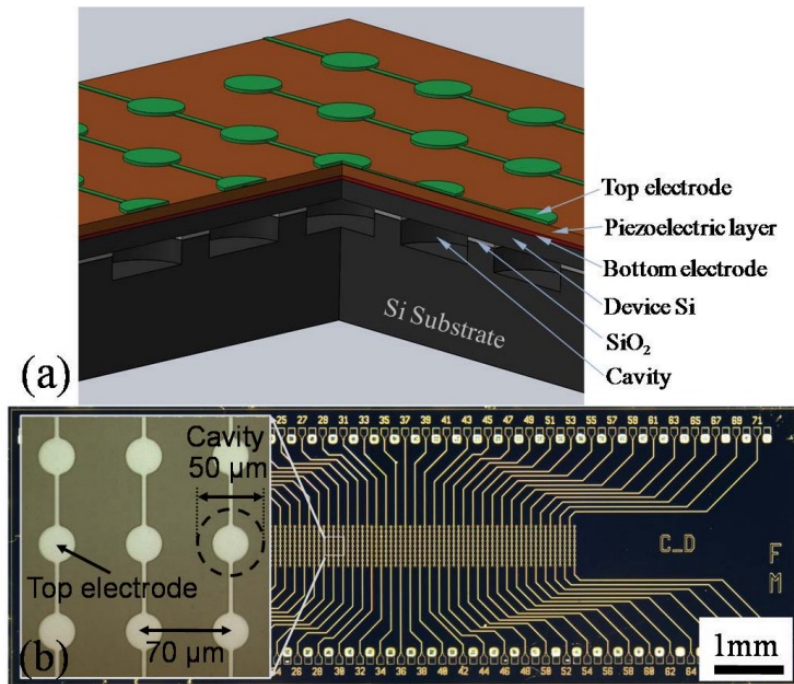


Y. Lu and D. A. Horsley, JMEMS 2015,  
doi: [10.1109/JMEMS.2014.2387154](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2014.2387154).

PMUT: To both sense **and** actuate

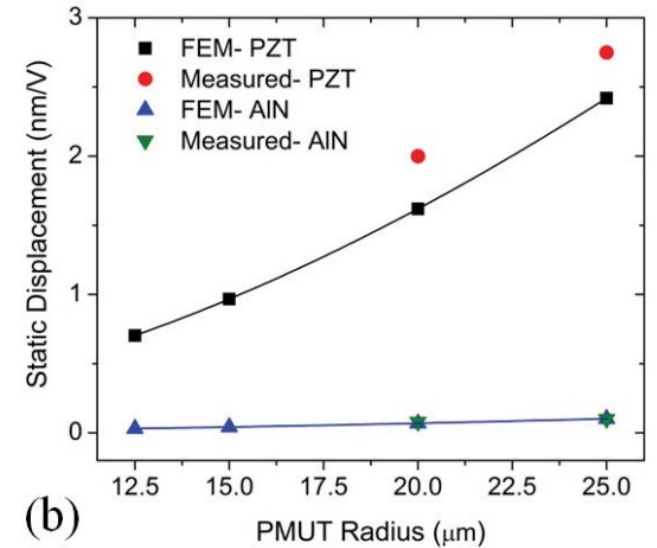
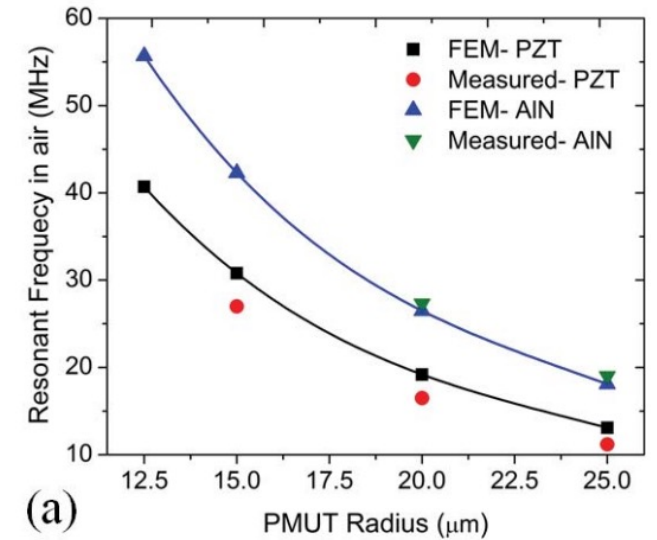
# Ultrasound sources (PMUT)

piezoelectric micromachined ultrasonic transducer.  $\mu\text{m}$ -scale



PMUT: Must sense and actuate

13-55 MHz

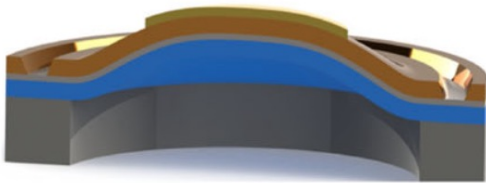


Y. Lu and D. A. Horsley, "Modeling, Fabrication, and Characterization of Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays Based on Cavity SOI Wafers," *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, doi: [10.1109/JMEMS.2014.2387154](https://doi.org/10.1109/JMEMS.2014.2387154).

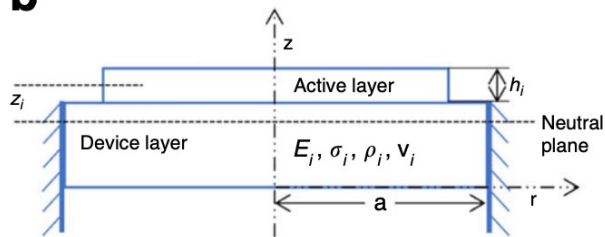


## PMUT structural classification

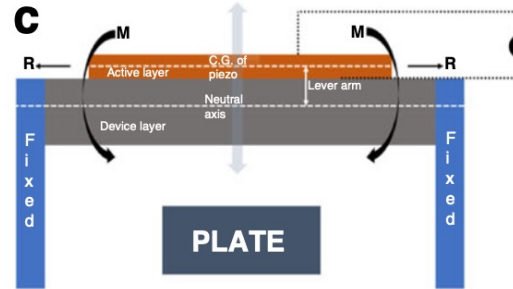
a



b



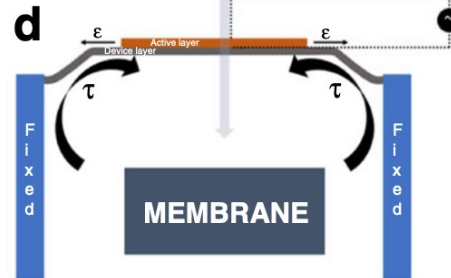
c



PLATE

$$f \sim \frac{h}{a^2}$$

d



$$f \sim a^0$$

Flexural rigidity ( $D_e$ ) dominated

$$D_e = \sum_i \left( \frac{E_i}{1 - \nu_i^2} \right) \left( \frac{h_i^3}{12} + z_i^2 h_i \right)$$

$E_i$  – Young's Modulus of the  $i^{\text{th}}$  layer  
 $\nu_i$  – Poisson's ratio of the  $i^{\text{th}}$  layer  
 $h_i$  – Thickness of  $i^{\text{th}}$  layer  
 $z_i$  – Distance of the  $i^{\text{th}}$  layer from the neutral axis

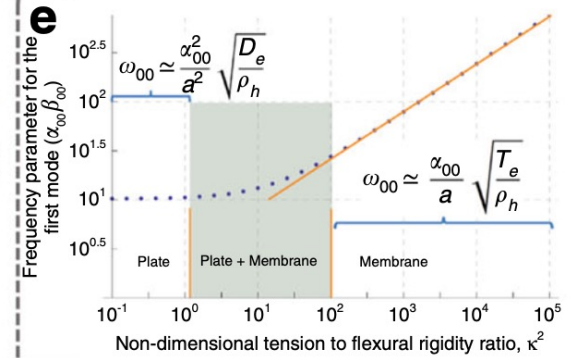
Pretension ( $T_e$ ) dominated

$$T_e = \sum \sigma_i h_i$$

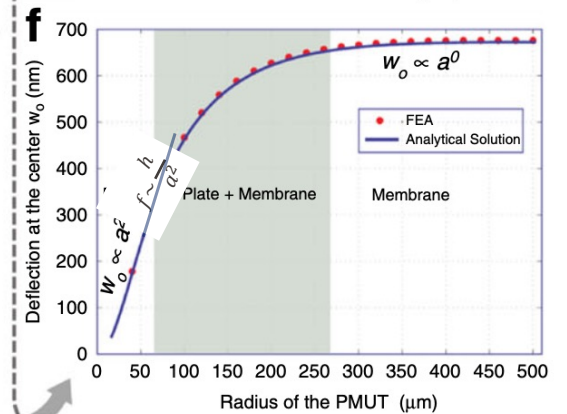
$\sigma_i$  – Prestress of the  $i^{\text{th}}$  layer

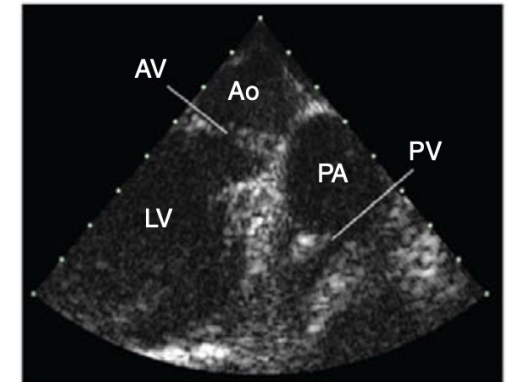
$$\kappa^2 = \frac{T_e a^2}{D_e}$$

e



f

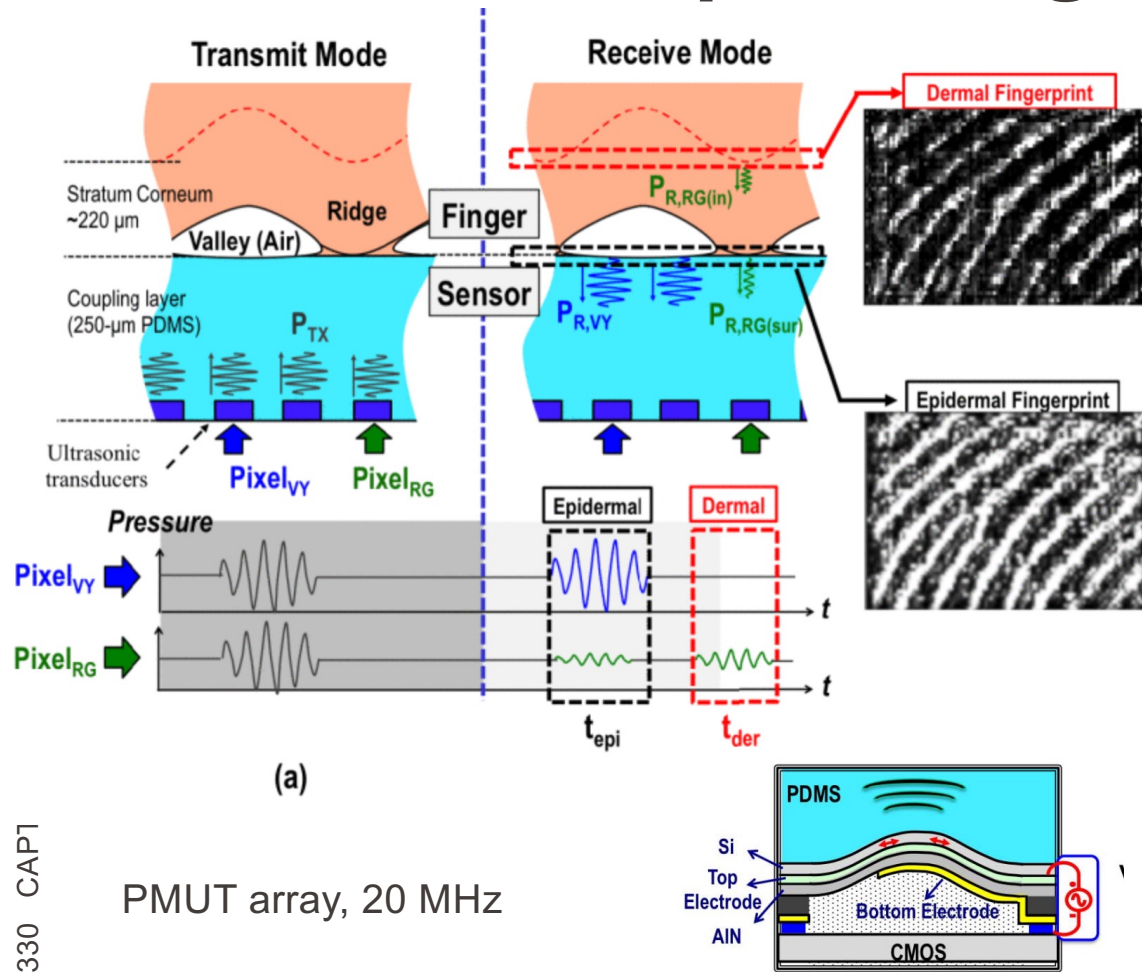




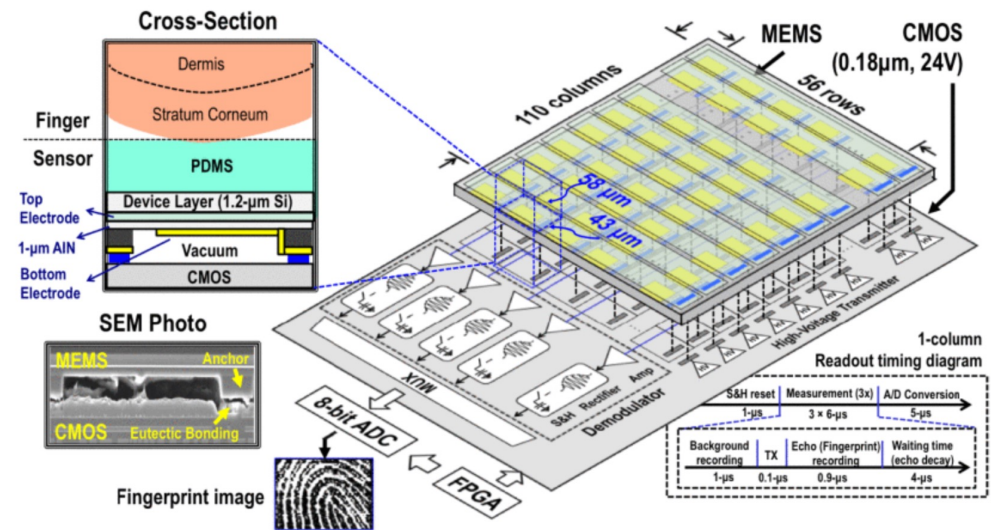
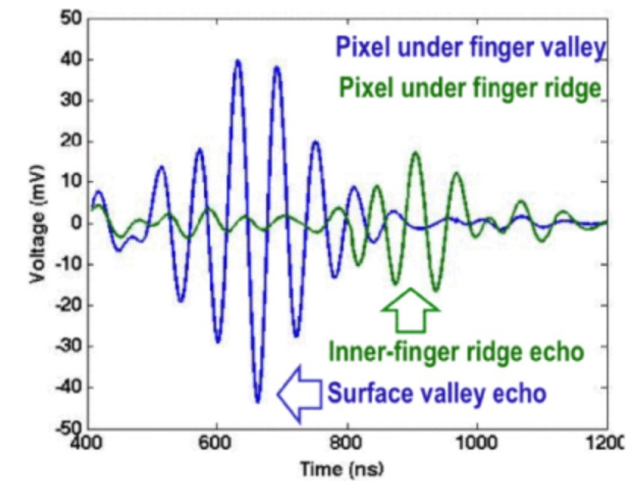
<https://www.nature.com/articles/s41378-023-00555-7>

## Clinical & industrial imaging

# Lecture d'empreintes digitales



H.-Y. Tang et al, 3-D Ultrasonic Fingerprint Sensor-on-a-Chip.  
*IEEE Journal of Solid-State Circuits* **51**, 2522–2533 (2016).





## Comparison of Capacitive vs. Ultrasonic Fingerprint Readers

Feature	Capacitive Sensor	Ultrasonic Sensor
Mechanism	Locally measure Capacitance	Emits ultrasonic waves that bounce off the fingerprint, capturing both surface and subsurface details.
Image Formation	Creates a map of capacitance to plot the fingerprint pattern.	Uses the time-of-flight and reflection strength of ultrasonic waves to create a 3D fingerprint image.
Feature	Capacitive Sensor	Ultrasonic Sensor
Detail Captured	Captures only the surface fingerprint ridges.	Captures both surface and subsurface details, making it more secure.
Spoof Resistance	Can be fooled by high-quality fingerprint molds (e.g., silicone replicas).	Harder to spoof since it captures subsurface details (e.g., blood flow and sweat pores).
Feature	Capacitive Sensor	Ultrasonic Sensor
Placement	Usually found on physical buttons (home button, back panel, or side).	Can be embedded under the display (e.g., in-screen fingerprint readers).
Complexity & Cost	Cheaper and easier to manufacture (~\$3-5 per sensor).	More expensive (~\$7-10 per sensor) due to advanced MEMS and ultrasonic tech.
Integration	Limited to physical locations (button, back, or side).	Works through glass, allowing for full-screen fingerprint scanning.

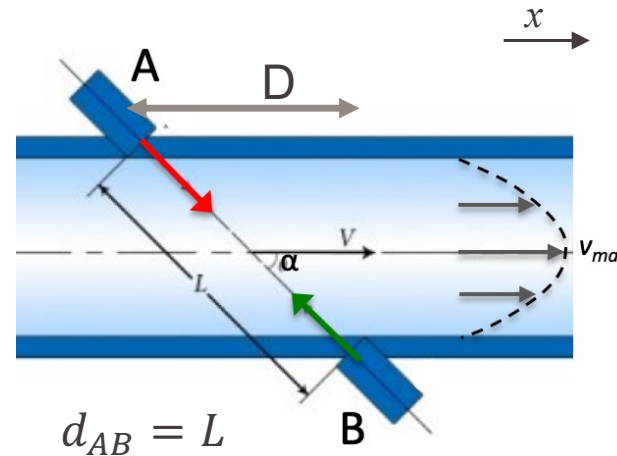
# Débitmètre ultrasons - à temps de transit

On souhaite mesurer le débit  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).  
Liquide et gaz

- Mesure non-intrusive, ne change pas le flux  $Q$
- L'onde acoustique est « transportée » par le fluide qui s'écoule dans le tuyau
- Mais la vitesse d'écoulement  $v$  n'est pas homogène dans le tuyau. Pour mesurer le débit, on doit déterminer la vitesse moyenne  $\bar{v}$  du liquide
- On mesure d'abord la vitesse **moyenne**  $\bar{v}_{US}$  de l'onde sur **une ligne à un angle  $\alpha$  au flux**.
- La mesure de  $\bar{v}_{US}$  ne dépend pas de la vitesse du son  $c$  si on mesure dans les 2 directions.

**vitesse du moyenne  $\bar{v}_{US}$  du liquide (vue par l'onde)**  
à partir des temps de transit  $t_{AB}$  et  $t_{BA}$  :

$\bar{v}_{US}$  n'est pas la vitesse moyenne du flux sur toute la section du tuyau! C'est la vitesse moyenne sur l'axe AB



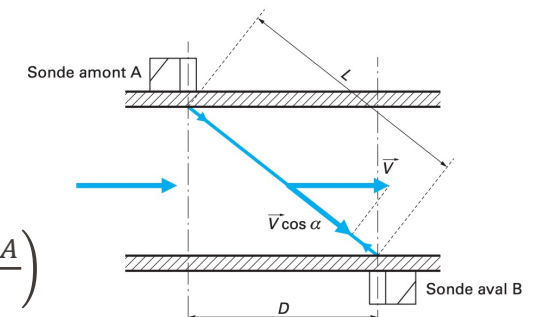
$$t_{AB} = \frac{L}{c + \bar{v}_{US} \cos \alpha}$$

$$t_{BA} = \frac{L}{c - \bar{v}_{US} \cos \alpha}$$

D: distance (le long du tuyau) entre les deux transducteurs  
R: rayon du tuyau  
c: vitesse du son dans le liquide ou gaz  
 $\bar{v}$ : vitesse moyenne du liquide  
 $\bar{v}_{US}$ : vitesse moyenne du liquide sur axe AB

$$\bar{v}_{US} = \frac{L^2}{2D} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right)$$

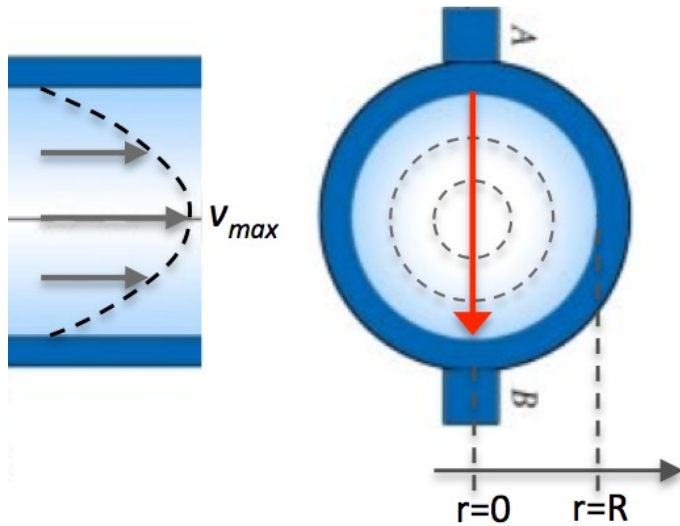
$$\bar{v}_{US} = \frac{R}{\cos \alpha \sin \alpha} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right)$$





# Débitmètre ultrasons à temps de transit

Calcul du **débit** à partir de la vitesse **moyenne** (vraie) du flux à partir de la vitesse moyenne  $\bar{v}_{US}$  vue par l'ultrason :



$$v(r) = v_{\max} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right)$$

Dans un écoulement laminaire, on a un **profil parabolique de la vitesse**.

Vitesse moyenne sur la ligne traversée par l'ultrason

$$\bar{v}_{US} = \frac{1}{R} \int_0^R v_{\max} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) dr = \frac{2}{3} v_{\max}$$

Vitesse moyenne du liquide (section circulaire) :

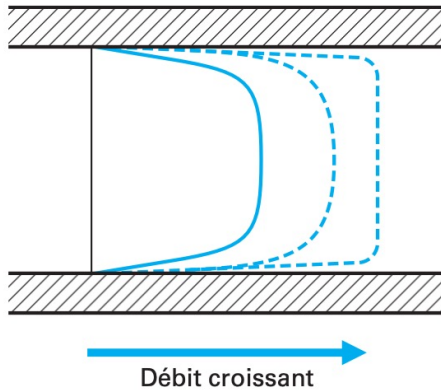
$$\begin{aligned} \bar{v} &= \frac{1}{2\pi R^2} \int_0^R v_{\max} \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) R dr = \frac{1}{2} v_{\max} \\ &= \frac{3}{4} \bar{v}_{us} \end{aligned}$$

$$Q = \bar{v} A = \bar{v} \pi R^2$$

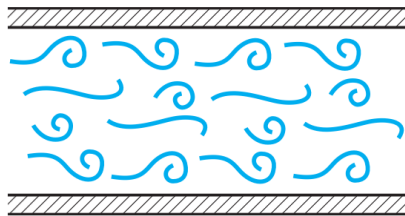
$$Q = \frac{3}{4} \bar{v}_{us} \pi R^2$$

$$Q = \frac{3}{4} \pi R^2 \frac{L^2}{2D} \left( \frac{t_{AB} - t_{BA}}{t_{AB} t_{BA}} \right)$$

# Débitmètre ultrasons à temps de transit



Allongement et aplatissement du profil de vitesses d'un écoulement turbulent quand le débit augmente

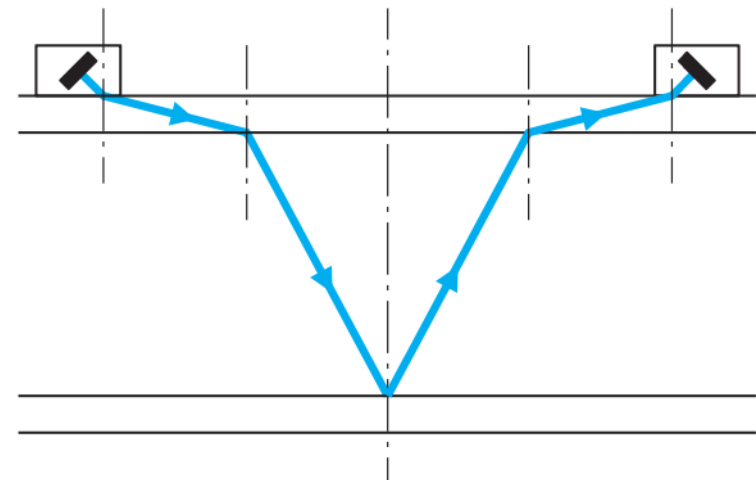


Sur flux non-laminaire, faut

$$C \approx 2\,800 \text{ m/s}$$

$$C \approx 3\,200 \text{ m/s}$$

$$C \approx 1\,500 \text{ m/s}$$

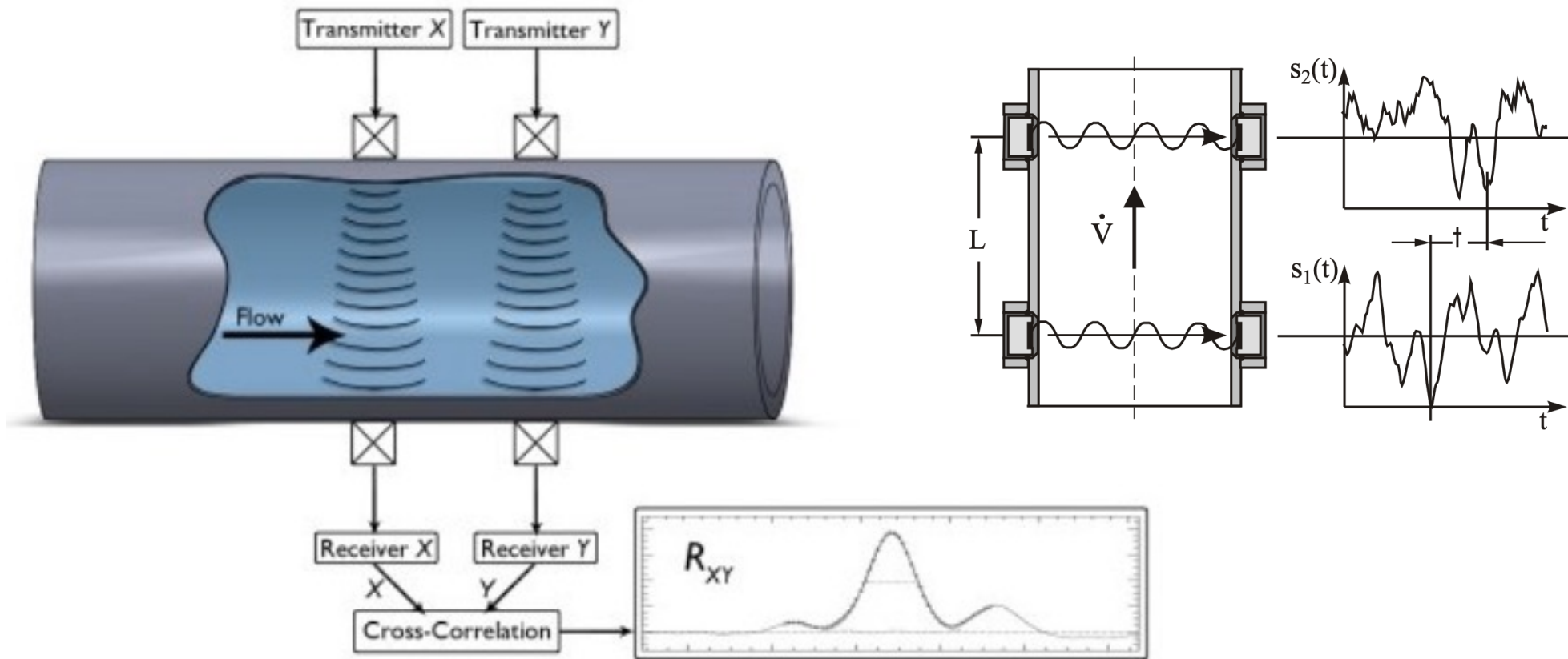


Réfraction pour guider onde

En réalité des corrections pour rugosité des parois, etc.

# Capteur de débit : par corrélation

Pour liquides chargés



Donne le temps de parcours entre les 2 capteurs, et donc la vitesse du flux

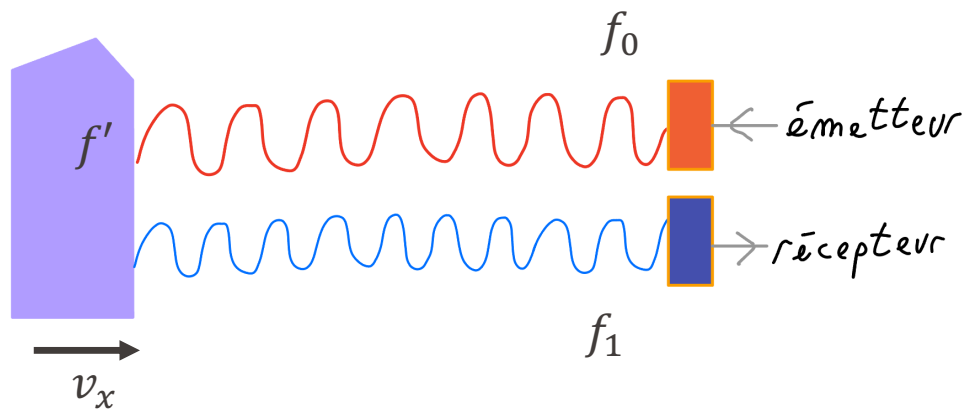
# Capteurs Doppler acoustiques: mesure de vitesse

Un objet en **mouvement** à une vitesse  $v_x$  en direction de la source perçoit (dans son référentiel) l'onde sonore  $f_0$  décalée à une fréquence  $f'$  à cause de l'effet **Doppler** :

$$f' = \frac{c}{c - v_x} f_0 \approx f_0 \left( 1 + \frac{v_x}{c} \right) \quad \text{si } v_x \ll c$$

Si cet objet réfléchit le son et le renvoie vers un récepteur fixe placé à côté de la source, ce récepteur voit l'onde sonore à une fréquence  $f_1$  donnée par :

$$f_1 = f' \left( 1 + \frac{v_x}{c} \right)$$



$$f_1 = f_0 \underbrace{\left( 1 + \frac{v_x}{c} \right)}_{f'} \left( 1 + \frac{v_x}{c} \right) \approx f_0 \left( 1 + \frac{2v_x}{c} \right)$$

$c$ : vitesse du son

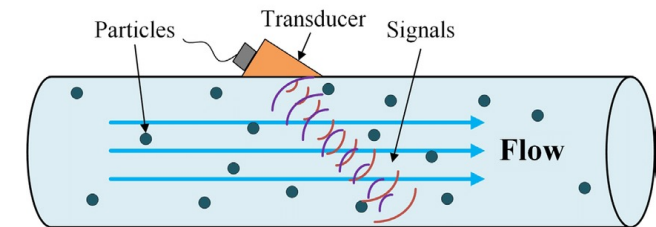
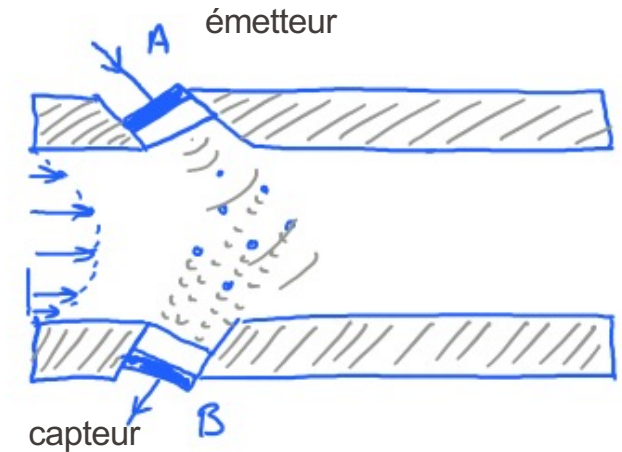
Émetteur et récepteurs fixes: 2x le changement de fréquence que si le récepteur est sur l'objet en mouvement

# Capteur de débit - Doppler

Un **émetteur** à ultrasons est placé sur un tube et émet une onde sonore vers l'intérieur du tube avec un **angle**  $\alpha$  fixe.

Un **récepteur** placé sur le même tube est détecté selon le même **angle**  $\alpha$ .

Si le fluide qui se **déplace** à l'intérieur contient des particules (ou simplement des petites bulles) dont l'impédance acoustique est différente du liquide, celles-ci vont réfléchir une partie de l'onde sonore avec un décalage dû à l'effet **Doppler**.



Pour une **particule** du flux qui a une **vitesse horizontale** dans le flux de  $v_{i0}$

$$v_i = v_{i0} \cdot \cos \alpha$$

La fréquence du signal en retour est :

$$f_i = f_0 \left( 1 + \frac{2v_{i0} \cos \alpha}{c} \right)$$

$$\Delta f_i = f_0 \frac{2v_i \cos \alpha}{c}$$

Echos à multiples fréquences si profile parabolique de vitesse

# Capteur de débit Doppler

Comme les particules peuvent se situer dans n'importe quelle ligne de vitesse de l'écoulement, on doit tenir compte du **profil** d'écoulement pour calculer le **débit** du fluide.

Si l'écoulement est **laminaire**, le profil de vitesse est **parabolique**, avec la vitesse maximale au centre.

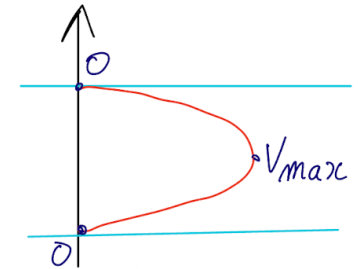
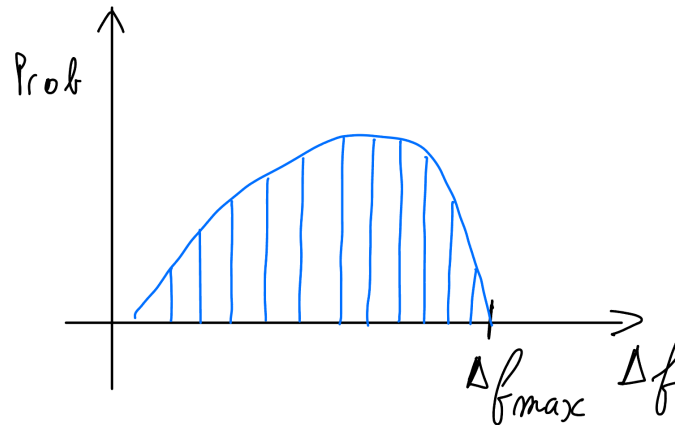
La mesure Doppler donne un spectre de  $\Delta f_i$  dont les décalages sont compris entre 0 et  $\Delta f_{\max}$  qui correspond à la **vitesse** maximale au **centre**.

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_{i,\max}$$

$$Q = \bar{v} \cdot \pi R^2$$

$$Q = \pi R^2 \frac{c}{\cos \alpha} \frac{\Delta f_{i,\max}}{f_0}$$

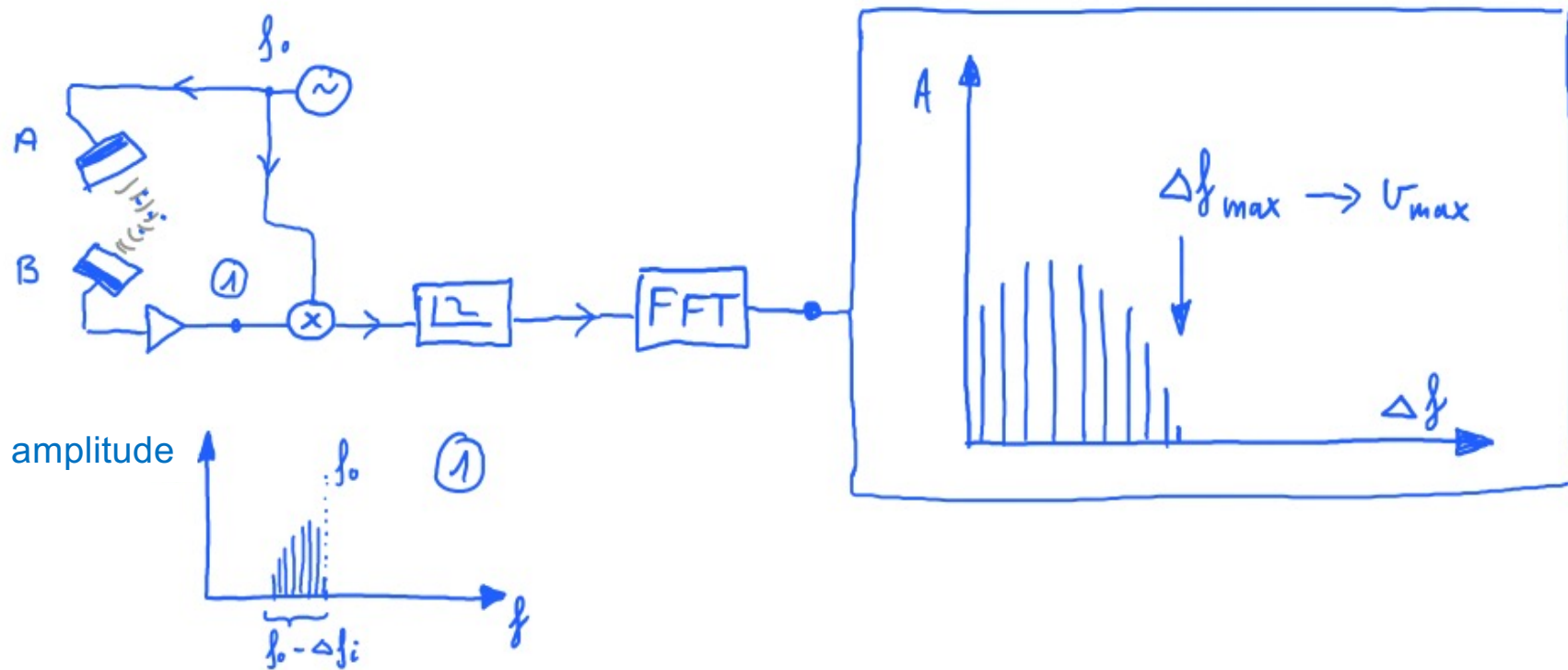
Le **maximum de décalage de fréquence** observé dans le **spectre**  $\Delta f$  indique la **vitesse maximale** des particules au centre.



# Circuit de mesure pour capteur Doppler (démodulation synchrone)

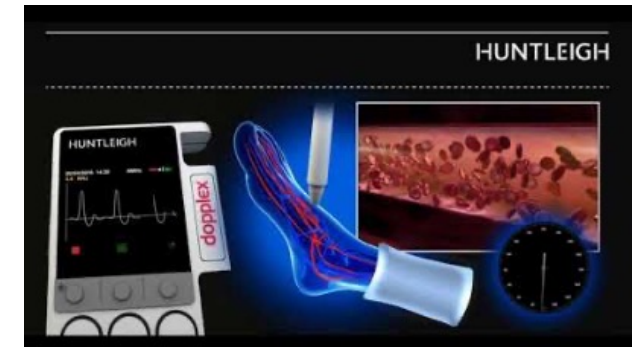
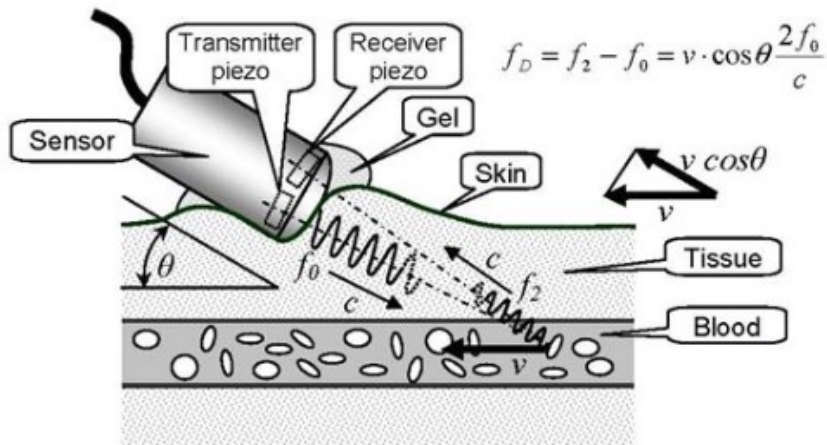
Le signal est généré par un **oscillateur** à la **fréquence  $f_0$**

Le signal de **retour** à  **$f_0 + \Delta f$**  est amplifié puis mixé (**multiplié**) avec le signal de l'oscillateur  $f_0$   
Puis **filtré basse bas** pour ne garder que les composantes  $\Delta f_i$  (en rejetant  $2f_0$ )

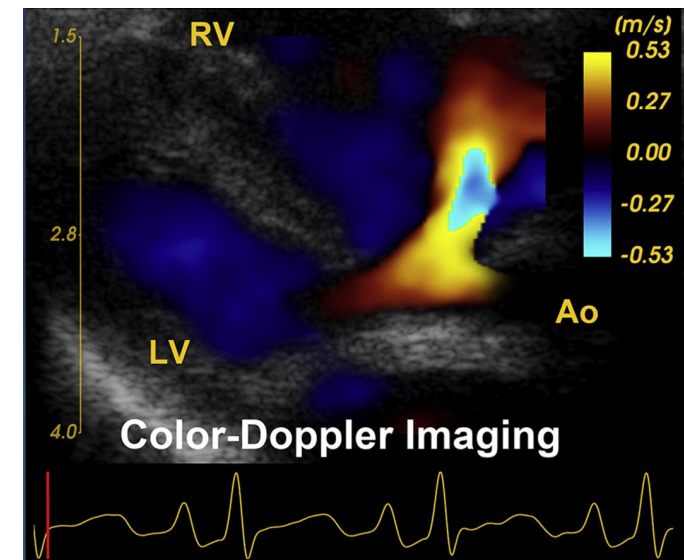
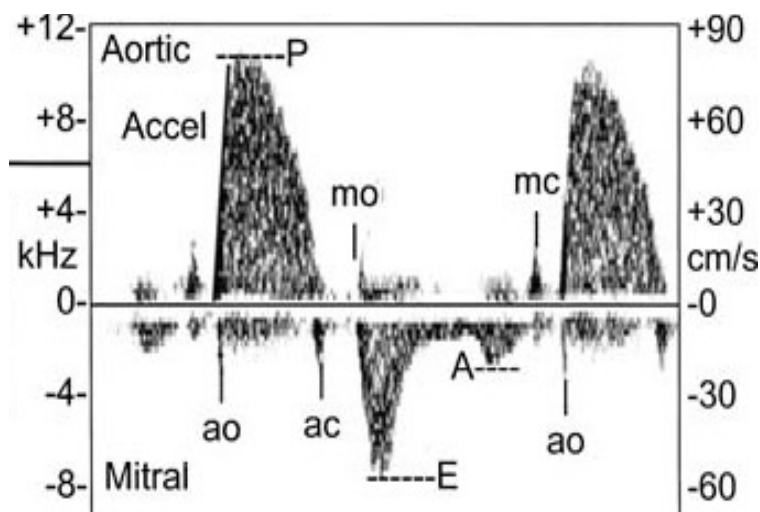




# Capteurs Doppler : mesure du flux sanguin



<https://youtu.be/CM2yrvF9pgo>



<https://www.dicardiology.com/article/development-echo-blood-flow-dynamics-imaging>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler\\_ultrasonography](https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_ultrasonography)



# Comparaison PiezoRésistif et PiezoElectrique comme capteur

Property	Piezoelectric Sensors	Piezoresistive Sensors
Detection Mechanism	Converts mechanical strain into electric charge (voltage)	Converts mechanical strain into a resistance change
Output Signal	Voltage or charge	Resistance change (then converted to voltage)
Response Time	Fast (can reach nanoseconds)	Slower (milliseconds)

Parameter	Piezoelectric Sensors	Piezoresistive Sensors
Sensitivity	High (charge generated per unit force)	Moderate to high (resistance change per unit strain)
Frequency Response	Very high (suitable for dynamic loads)	Lower (good for static and slow-varying loads)
Best for	<i>Dynamic</i> strain/force measurements	<i>Static</i> strain/force measurements
Linearity	Moderate (requires charge amplifier)	can be Highly linear
Temperature Sensitivity	High	Moderate

# Comparaison PiezoRésistif et PiezoElectrique comme capteur

Application	Piezoelectric Sensors	Piezoresistive Sensors
Vibration Sensing	✓ Excellent	✗ Poor
Static Force Measurement	✗ Poor (leakage of charge over time)	✓ Excellent
High-Frequency Response (e.g., ultrasound, impact sensing)	✓ Superior	✗ Slow response
High-temperature use	✓ Excellent (Quartz, AlN, GaPO <sub>4</sub> can withstand 600°C+)	✓ OK to excellent: Si-based max 150°C Pt-W up to 800°C
MEMS Sensors	✓ Used in accelerometers	✓ Used in pressure/strain sensors
Harsh Environment Use	✓ Durable (self-powered)	✗ Can be affected by drift

# Comparaison PiezoRésistif et PiezoElectrique comme capteur

## ✓ Use Piezoelectric Sensors for:

- Vibrations, impact, and dynamic force sensing.
- Aerospace, medical ultrasound, and energy harvesting applications.
- Self-powered operation in wireless sensor networks.

## ✓ Use Piezoresistive Sensors for:

- Long-term static force/strain monitoring.
- Low-power MEMS devices (e.g., pressure sensors, strain gauges).
- Applications requiring high linearity and stable output.