

La piézoélectricité

Couplage électromécanique dans
certains cristaux

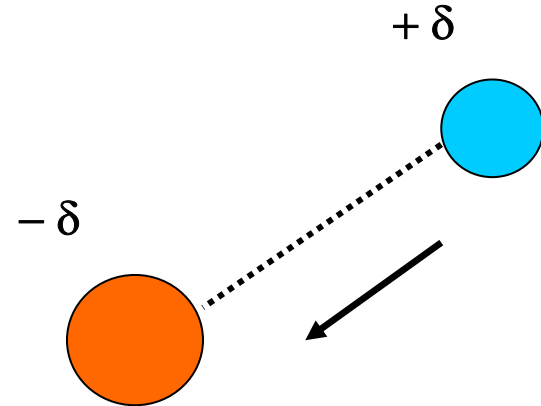
Vers la définition...

- Etymologie: grec *piezein* = presser
- Histoire:
 - ***Effet direct***: frères Curie (1880)
 - ***Effet inverse***: prédit par Lippman (1881)
- Définition: couplage électromécanique réversible

Rappels préalables

- Moment dipolaire (C.m)

$$p = \delta.l$$

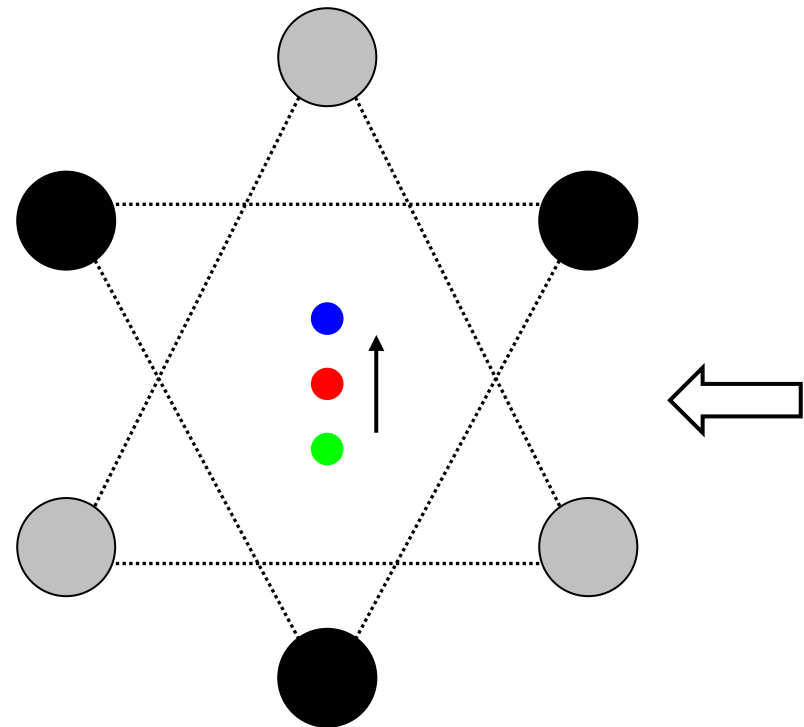
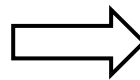
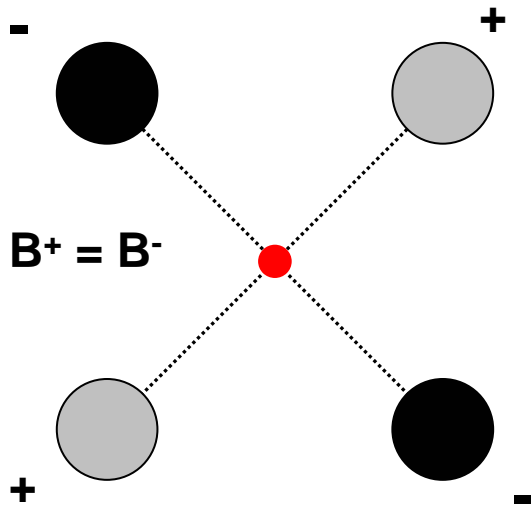


- Polarisation (C.m⁻²)

$$\vec{P} = \frac{d\vec{p}}{dV}$$

Effet direct: explication cristallographique

- CN: pas de centre de symétrie



Effet direct: courant piézoélectrique

$$V = V(r, t) \quad \psi(k, r, t) = e^{ik \cdot r} u(r, t) \quad (\text{Bloch})$$

$$\hat{H}(k, t) u_n(r, t) = E(k, t) u_n(r, t) \quad (\text{Schrödinger})$$

Réel:
$$\vec{E}(r, t) = -\frac{\partial \vec{A}(r, t)}{\partial t} - \vec{\nabla}_r \Phi(r, t)$$

Réciproque:
$$\vec{E}_n(k, t) = -\frac{\partial \vec{A}_n(k, t)}{\partial t} - \vec{\nabla}_k \Phi_n(k, t) \quad \text{avec} \quad A_n = i \langle u_n | \nabla_k u_n \rangle$$

$$\Phi_n = -i \left\langle u_n \left| \frac{\partial u_n}{\partial t} \right. \right\rangle$$

$$\vec{j}(t) = -\frac{1}{4\pi^3 V_{ZB1}} \sum_{n=1}^l \int_{ZB1} E_n(k, t) dk$$

Effet direct: condition de symétrie

Cristal avec centre de symétrie = invariant par inversion de l'espace

Inversion de l'espace:

$$\vec{E}_n(-k, t) = -\vec{E}_n(k, t)$$

Inversion du temps:

$$\vec{E}_n(-k, t) = \vec{E}_n(k, t)$$

$$\vec{E}_n(k, t) = \vec{0}$$

d'où

$$\vec{j}(t) = 0$$

Lois macroscopiques

- Anisotropie

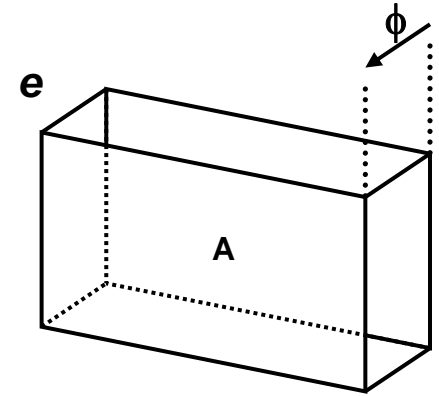
- Linéarité:

$$P_i = \sum_{jk} d_{ijk} T_{jk}$$

- **P**: polarisation
- **T**: contraintes (6 composantes)
- **d**: coefficients piézoélectriques
(18 composantes)

$$d_{ijk} = d_{ikj}$$

Effet direct: thermodynamique



$$dU = \delta W + \delta Q = -pA.de + \Phi.dq + T.dS$$

$$\Omega = U + pAe - \Phi q$$

(transformation de Legendre)

$$d\Omega = Ae.dp + q.d\Phi + T.dS$$

$$\left. \frac{\partial q}{\partial p} \right|_{S, \Phi} = A \left. \frac{\partial e}{\partial \Phi} \right|_{S, p}$$

(théorème de Schwarz)

$$\left. \frac{\partial e}{\partial \Phi} \right|_{S, p} = K$$

$$q = KAp$$

Effet inverse: prédiction thermodynamique

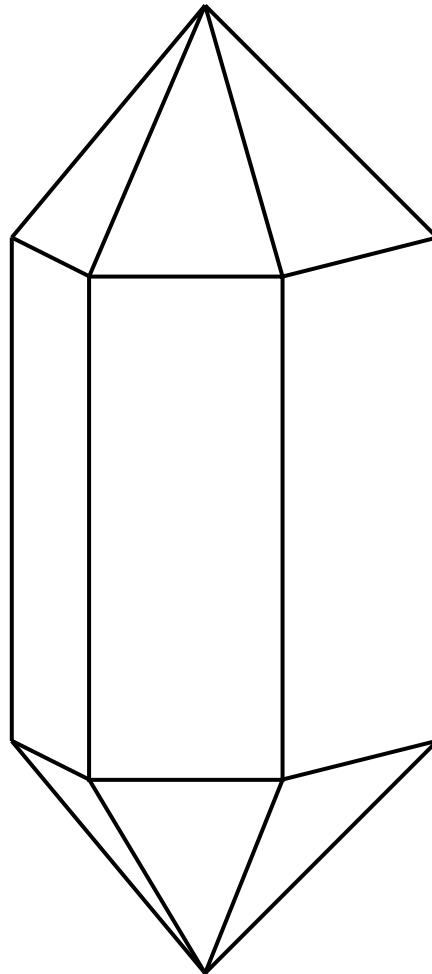
- Lippman en 1881 « Principe de la conservation d'électricité » ????

Le quartz: SiO_2

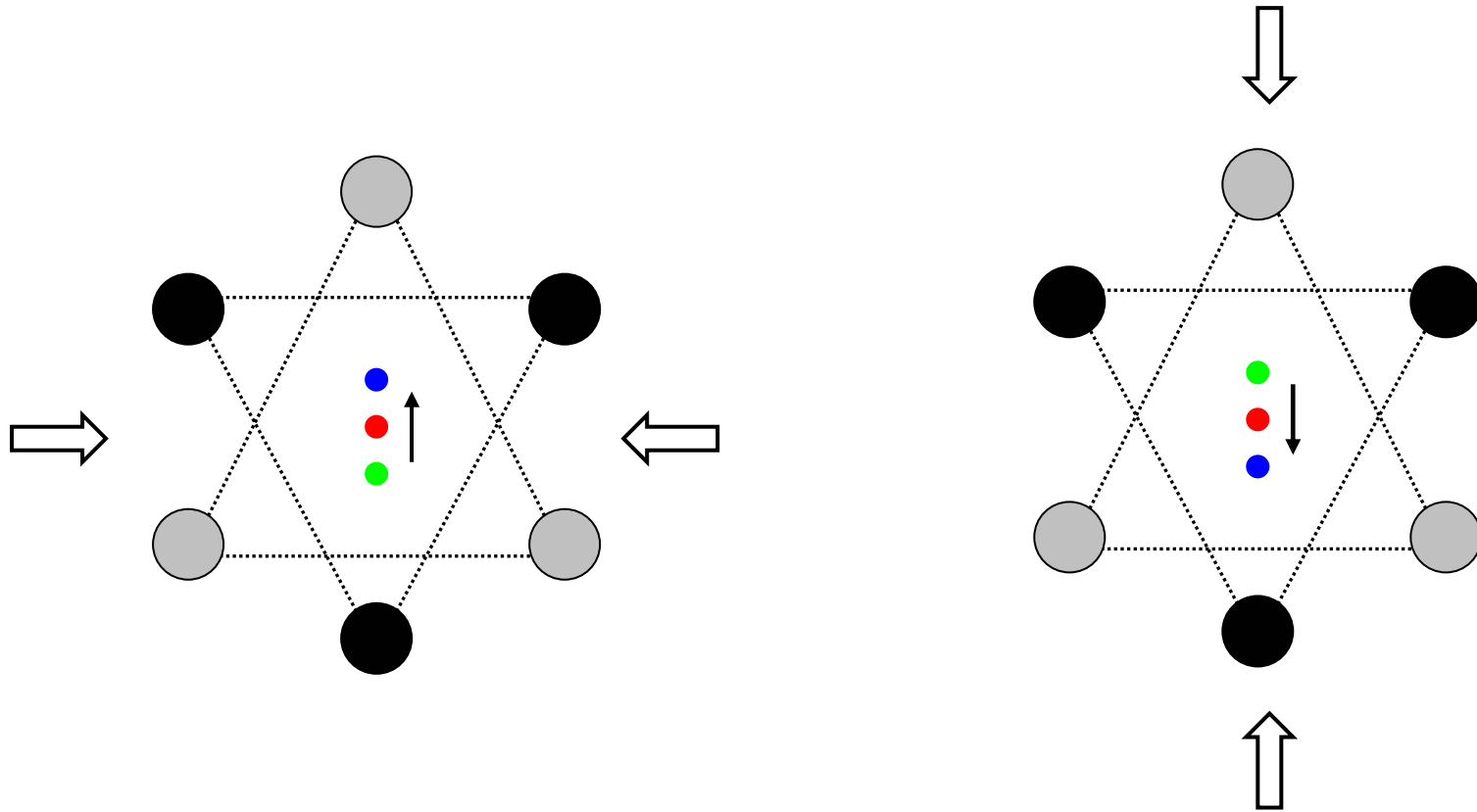
1 axe ternaire

3 axes binaires

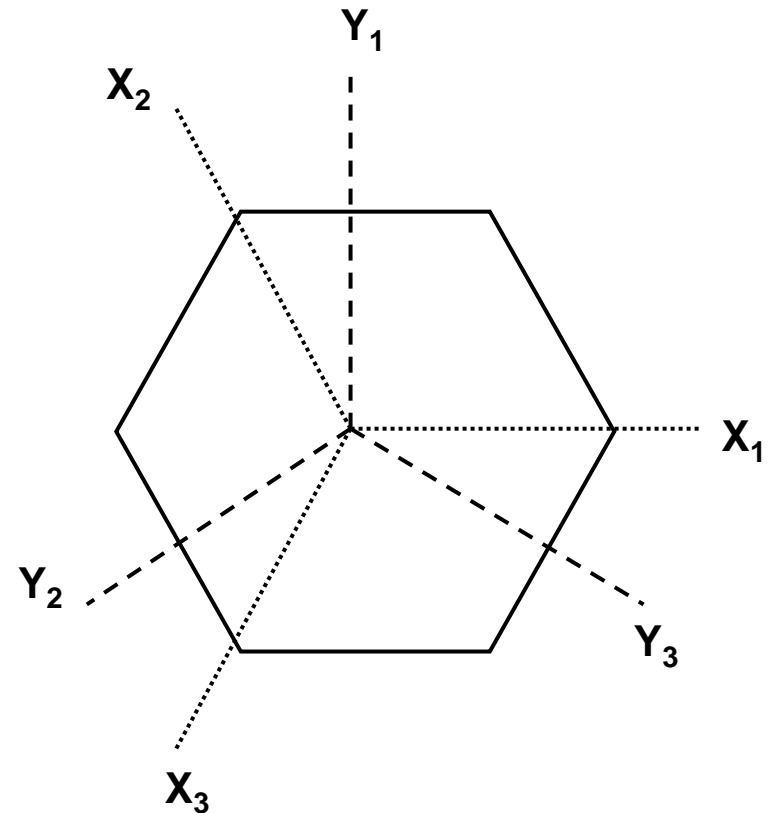
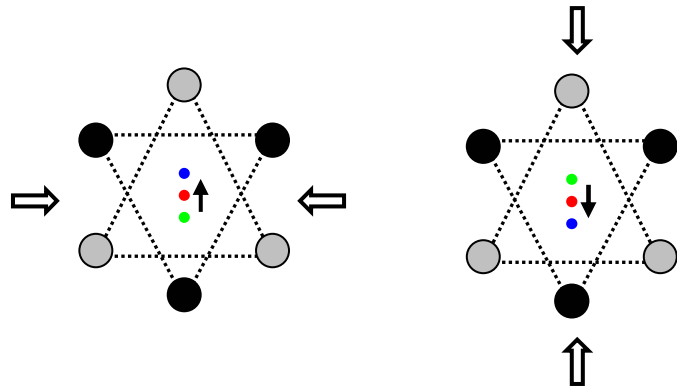
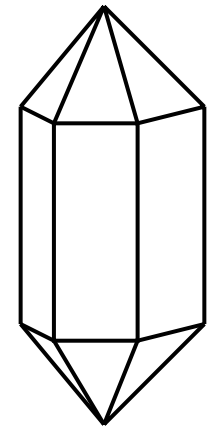
2 coefficients



Le quartz: anisotropie

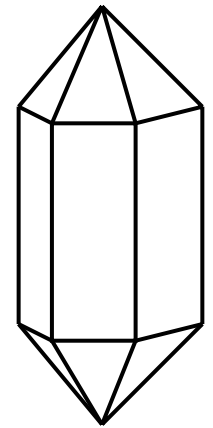


Le quartz: anisotropie

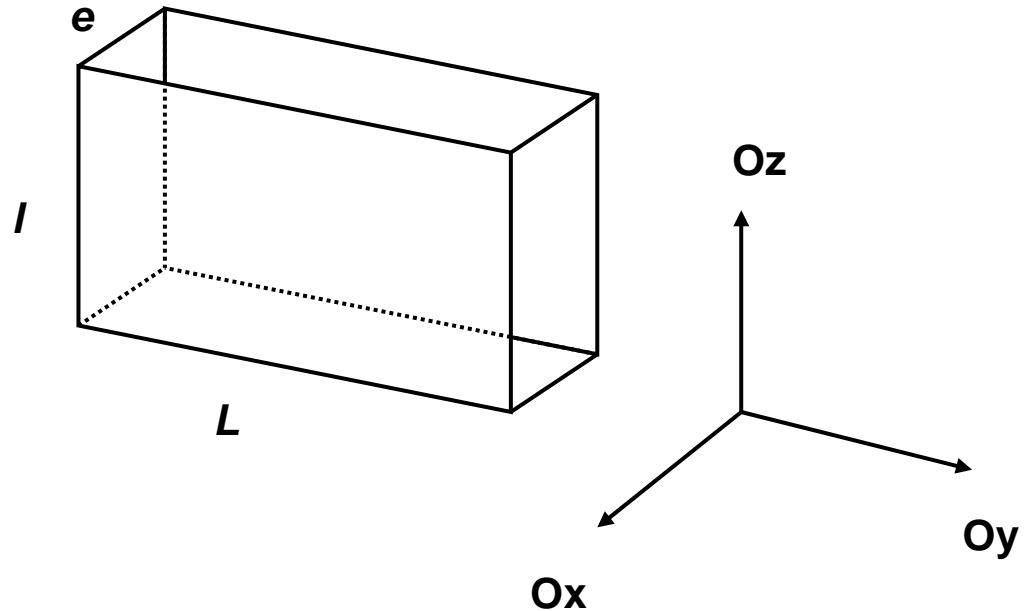


OX_i axes électriques
 OY_i axes mécaniques
 OZ axe optique

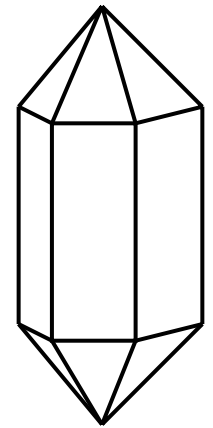
Le quartz: anisotropie



Ox axe électrique
Oy axe mécanique
Oz axe optique



Le quartz: anisotropie

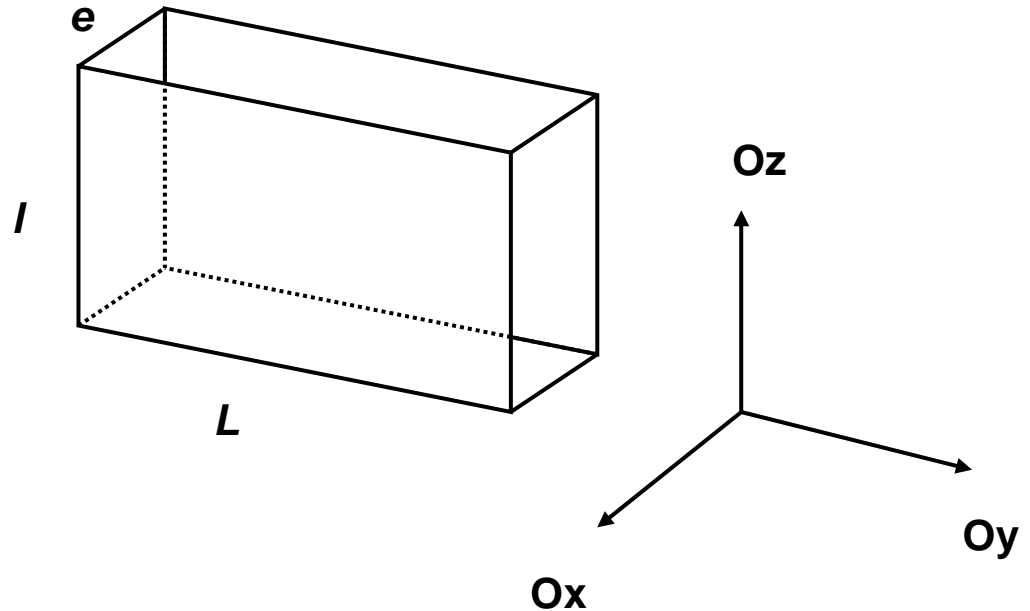


Ox axe électrique

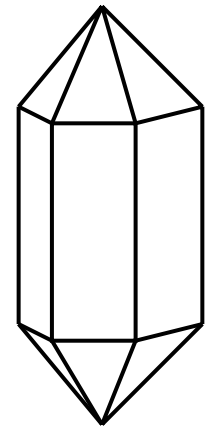
Oy axe mécanique

Oz axe optique

$$Q_x = KF_x$$



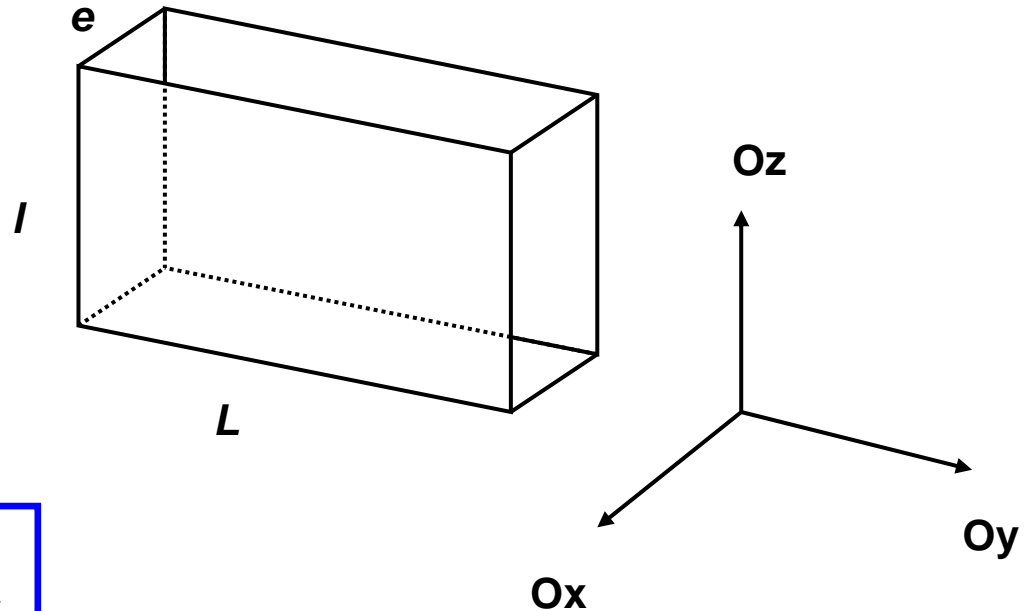
Le quartz: anisotropie



Ox axe électrique

Oy axe mécanique

Oz axe optique



$$Q_x = KF_x$$

$$Q_x = -KF_y \frac{L}{e}$$

Le quartz: ordres de grandeurs

- $K = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$

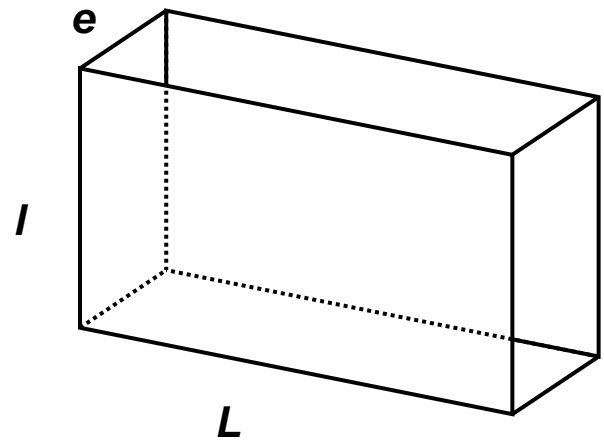
$$\begin{bmatrix} 2.3 & -2.3 & 0 & -0.67 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.67 & 4.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$$

- $1 \text{ kN} \gg 10^{-9} \text{ C}$; $1 \text{ kV} \gg 10^{-9} \text{ m}$
- $T_{\text{Curie}}: 573^\circ\text{C}$, transition $\alpha\text{-}\beta$

Résonance

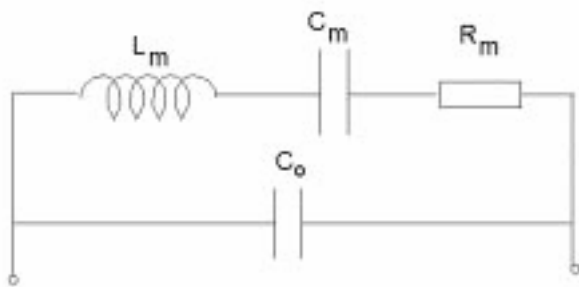
- L'épaisseur de la lame doit vérifier les faces terminales correspondant à des ventres de déplacement $e = m\lambda/2$
- Il existe une certaine inélasticité ou frottement interne du solide

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + r \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = f.e.m$$



Résonance

- Analogie électrique



utilisée à basse fréquence

f_p

utilisée à haute fréquence

f_s

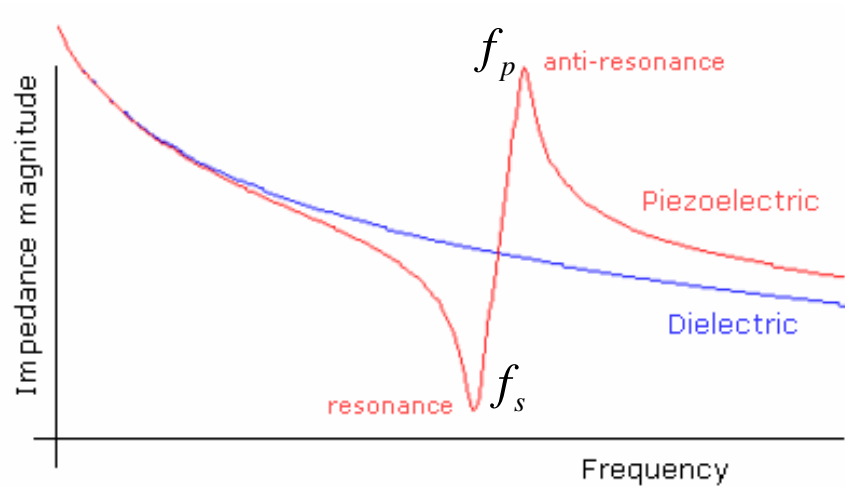
$$\omega_s \equiv Z = 0$$

$$Q_m = \omega \frac{L_m}{R_m}$$

$$\omega_p \equiv Z \rightarrow \infty$$

Résonance

- Choix de la fréquence



$$\omega_s \equiv Z = 0$$

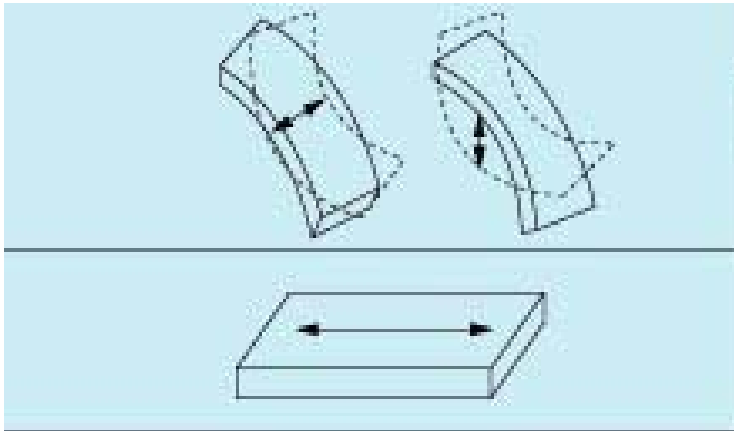
$$Q_m = \omega \frac{L_m}{R_m}$$

$$\omega_p \equiv Z \rightarrow \infty$$

Résonance

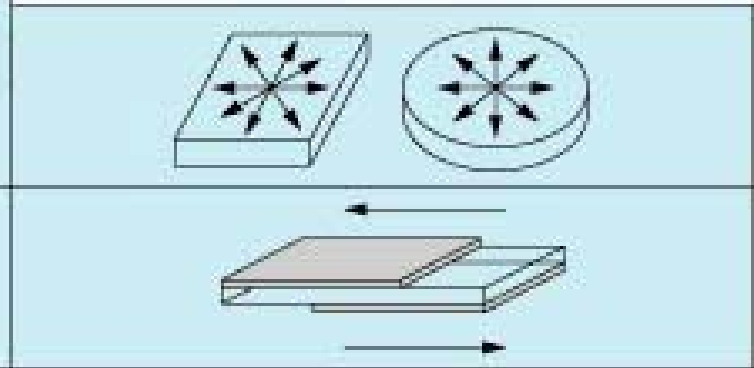
- Modes de vibration:

Flexion



Élongation

Cisaillement de surface



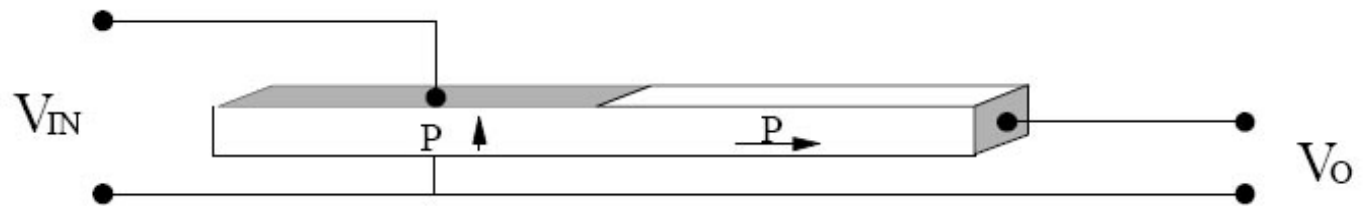
Cisaillement d'épaisseur

Amplificateurs

- Principe: Couplage acoustique
- Montre les deux effets: direct et inverse
- Efficacités supérieures à 90%

Amplificateur longitudinal

- 10 W à 50 KHz
- Tension de l'ordre de 1000 fois plus élevée

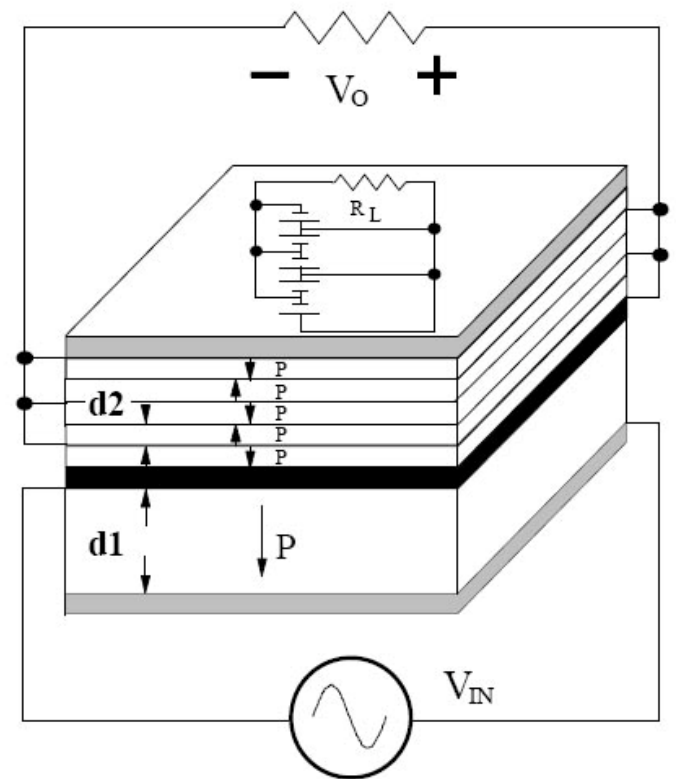


$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = ck^2 Q_m \frac{L}{e}$$

Amplificateur d'épaisseur

- Multiples couches ~150
- 5 nW à 100 MHz

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{d_2}{d_1}$$



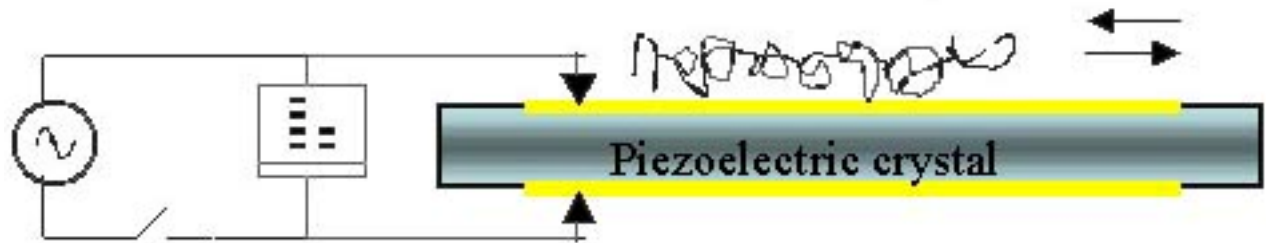
Microbalance – Effet direct

- Mesure différences de masse de l'ordre du

ng

$$f \propto \frac{1}{m_{tot}}$$

AC ~ MHz

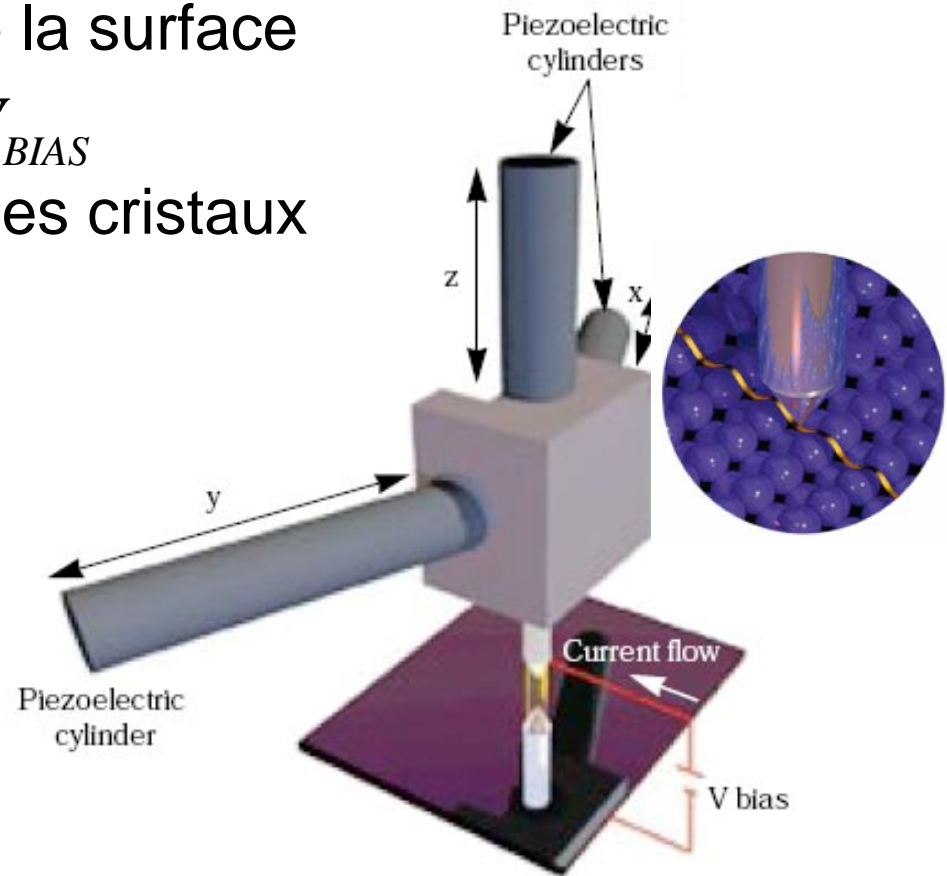


$$\Delta f = \frac{-\Delta m f_0^2}{A \sqrt{\rho_q \mu_q}}$$

Relation de Sauerbrey

Microscopie d'effet tunnel – Effet inverse

- Révèle la structure atomique
- Positionnement à 2 nm de la surface
- La moindre variation de V_{BIAS} provoque la déformation des cristaux piézoélectriques

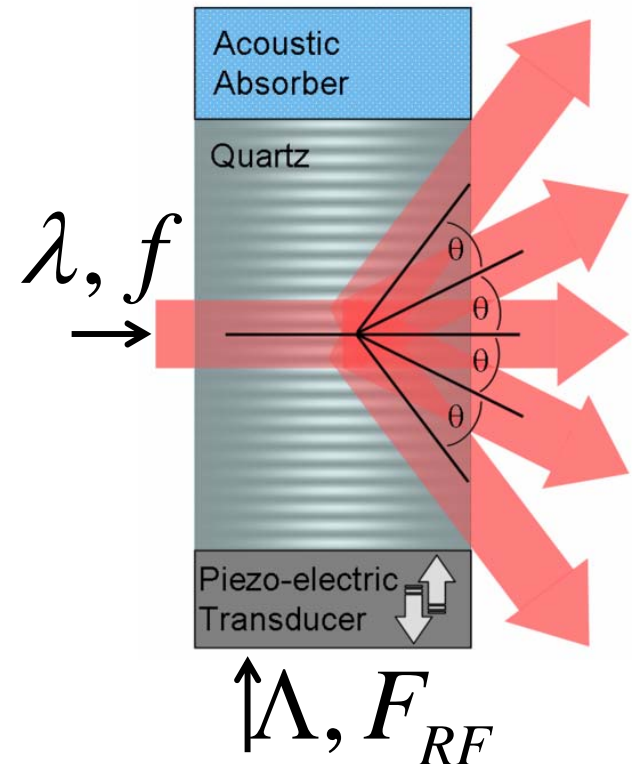


Cellule de Bragg – Effet inverse

- Déflexion de la lumière
- On les utilise dans les dispositifs actuels de commutation optique, ASONs

$$\theta \sim 10 \text{ mrad}$$

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{2\Lambda}$$



Cellule de Bragg – Effet inverse

- Modification de la fréquence
 - Régime de Bragg

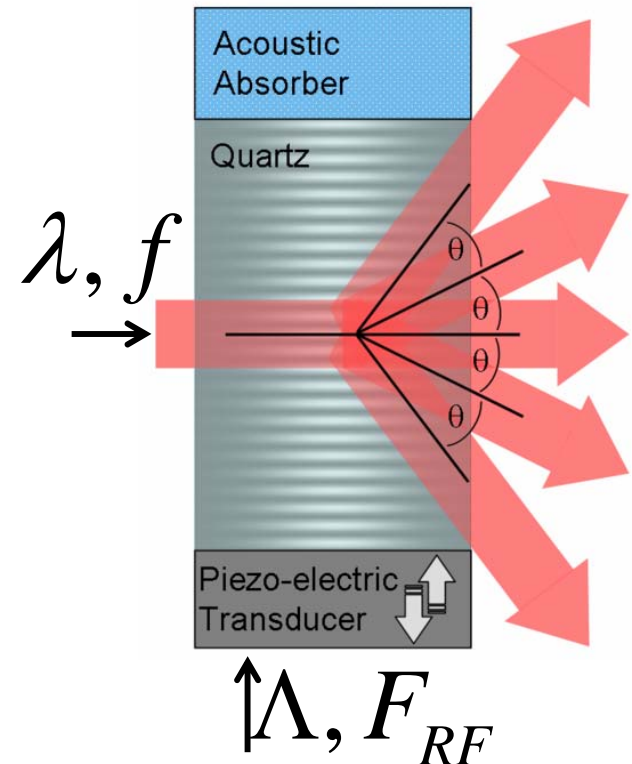
$$\theta_i = \theta_B$$

$$f \rightarrow f \pm F_{RF}$$

- Régime de Raman-Nath

$$\Delta f \sim 400 \text{ MHz}$$

$$f \rightarrow f + m \cdot F_{RF}$$

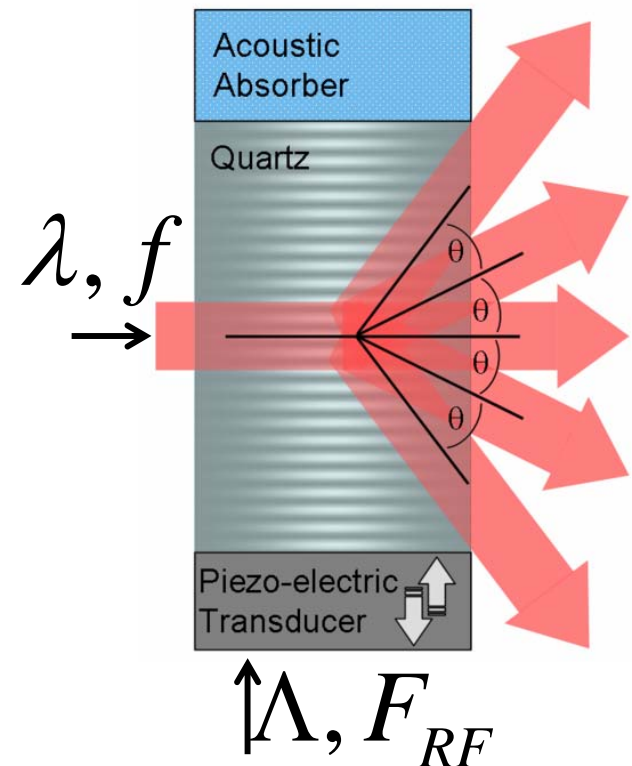


Cellule de Bragg – Effet inverse

- Modification de l'intensité, la phase et la polarisation

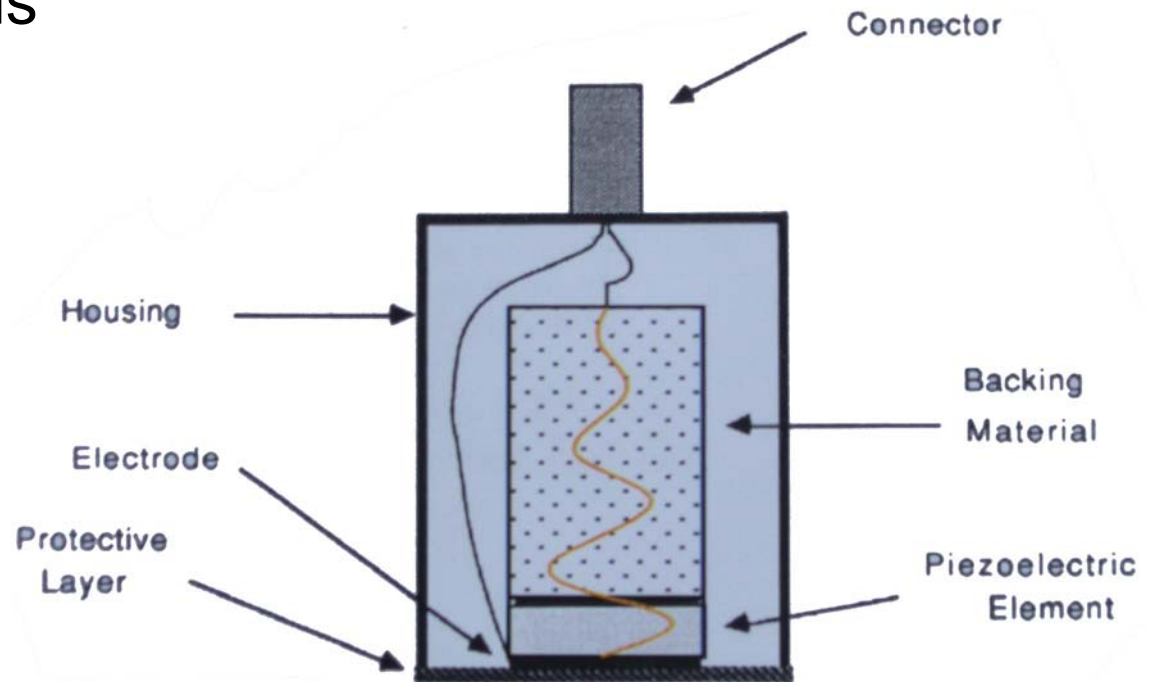
$$0\% I_{in} < I_0 < 80\% I_{in}$$

$$15\% I_{in} < I_1 < 99\% I_{in}$$



Transducteur d'ultrasons – Effets direct et inverse

- Génération d'un train de pulses ultrasoniques
- Réception des réflexions produites avec les différents tissus



Autres usages

- **Effet direct:** détection de pression, capteurs sonores, batteries électroniques (musique).
- **Effet inverse:** haut-parleurs, optique adaptative, réalisation d'appareils médicaux de lithotripsie ou de suture de plaies internes.

Le futur

Bateaux qui puisent leur énergie dans le ressac de la mer et la pression des vagues contre leurs parois



Centrales électriques utilisant l'énergie des marées

Pour conclure

- Structures originales bien adaptées à l'intégration
- Technologie relativement peu coûteuse
- Utilisation dominante dans l'industrie