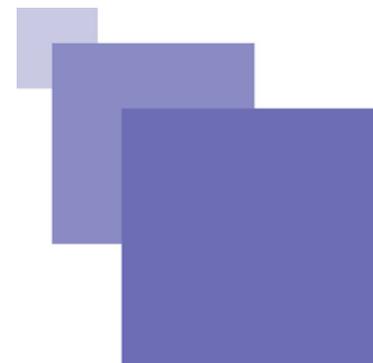


La transduction piézoélectrique



STÉPHANE DURAND ET HERVÉ LISSEK

Table des matières



Objectifs	5
I - Exercice : QUESTIONNAIRE D'ENTRÉE	7
II - L'effet piézoélectrique	9
A. Découverte de la piézoélectricité.....	9
B. Description de la piézoélectricité - échelle cristalline.....	9
III - La transduction piézoélectrique	11
A. Définition : lame piézoélectrique.....	11
B. Modèle de couplage piézoélectrique simplifié.....	12
C. Représentation par des schémas.....	14
IV - Applications des transducteurs piézoélectriques	17
A. Généralités.....	17
B. Capteurs.....	17
C. Actionneurs.....	19
V - Exercice : Testez vos connaissances	21
Solution des exercices	23

Objectifs

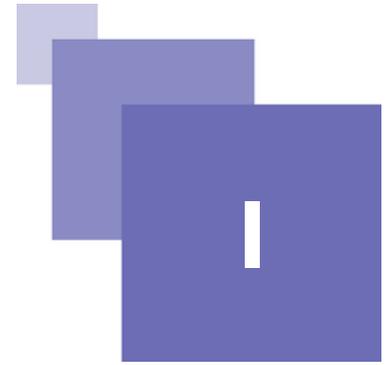
L'objectif de ce grain est de :

- présenter les **phénomènes physiques** responsables de la transduction piézoélectrique, en décrivant qualitativement les mécanismes à l'oeuvre dans un matériau piézoélectrique, sans entrer toutefois dans les fondements de la piézoélectricité ;
- décrire le phénomène de transduction piézoélectrique au moyen des **équations de couplage** simplifiées, permettant finalement de relier les grandeurs électriques (U, i) et mécaniques (F, v) (comme dans G3.2 et G3.3) ;
- traduire ces équations de couplage sous forme de **schémas électriques équivalents**.

Prérequis :

- notions d'électrocinétique
- quelques notions de base de physique de la matière condensée
- les modules G3.1, G3.2 et G3.3.

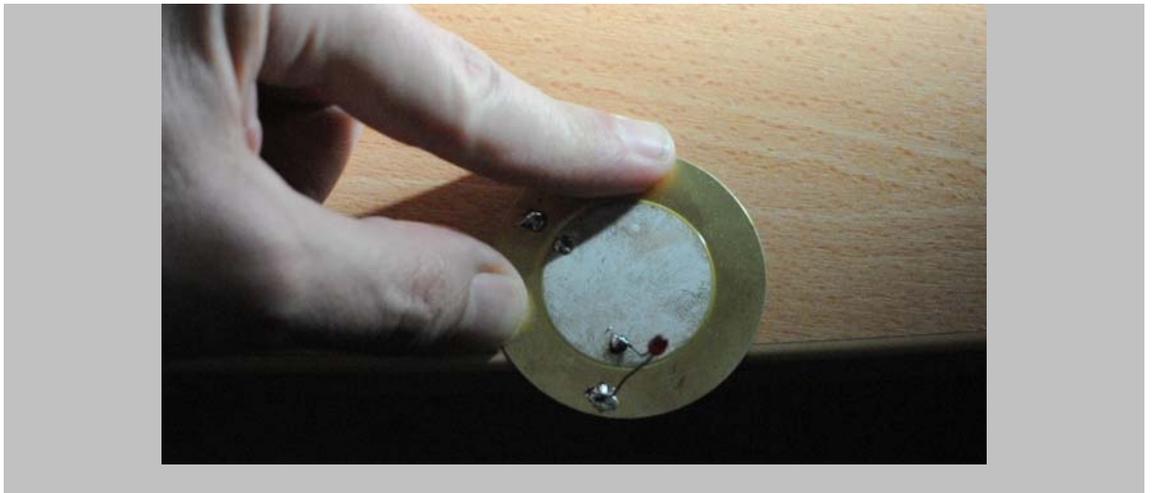
Exercice : QUESTIONNAIRE D'ENTRÉE



Question 1

[Solution n°1 p 23]

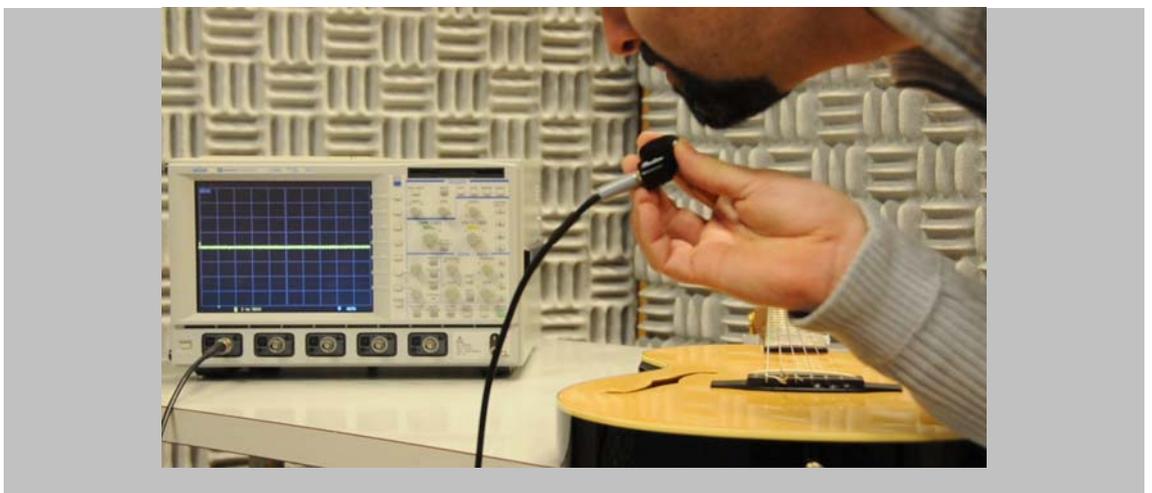
Comment peut-on allumer la LED avec cette plaque ?



Question 2

[Solution n°2 p 23]

Si on chante directement devant ce capteur piézo pour guitare, que se passe-t-il ?



Question 3

[Solution n°3 p 23]

Si on chante directement devant ce capteur piézo pour guitare, que se passe-t-il?

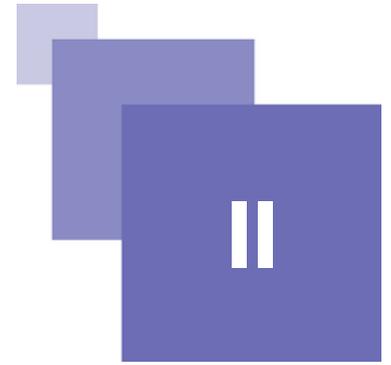


Question 4

[Solution n°4 p 23]

Un exemple d'utilisation du capteur piézo ?

L'effet piézoélectrique



Découverte de la piézoélectricité

9

Description de la piézoélectricité - échelle cristalline

9

A. Découverte de la piézoélectricité

UN TOUT PETIT PEU D'HISTOIRE

- Le préfixe "piézo" vient du grec πιεζειν qui signifie presser.
- La **piézoélectricité** a été découverte (pour l'effet direct) par les frères Jacques et Pierre Curie en 1880

"Nous avons trouvé un nouveau mode de développement de l'électricité polaire dans ces [...] cristaux, qui consiste à les soumettre, à des variations de pression suivant leurs axes d'hémiédrie. [...] pendant une compression, les extrémités de l'axe sur lequel on agit se chargent d'électricités contraires; une fois le cristal ramené à l'état neutre, si on le décomprime, le phénomène se reproduit, mais avec une inversion des signes; l'extrémité qui se chargeait positivement par compression devient négative pendant la décompression, et réciproquement"

- En 1881, Gabriel Lippmann prévoit l'effet inverse : une polarisation électrique appliquée sur les faces d'un cristal piézoélectrique provoque une déformation de ce dernier.

B. Description de la piézoélectricité - échelle cristalline

- L'effet piézoélectrique résulte d'un déplacement des atomes (chargés positivement ou négativement) à l'intérieur de certains solides déformables (**matériaux piézoélectriques**), qui présentent des structures cristallines particulières (**on parle de cristal piézoélectrique**) ne présentant pas de centre de symétrie.
- L'effet piézoélectrique peut être considéré à **l'échelle microscopique** comme un déplacement interne du **barycentre des charges électriques positives** et du **barycentre des charges électriques négatives** dans une même structure cristalline, lorsque tous les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres sous l'effet d'une déformation du cristal.

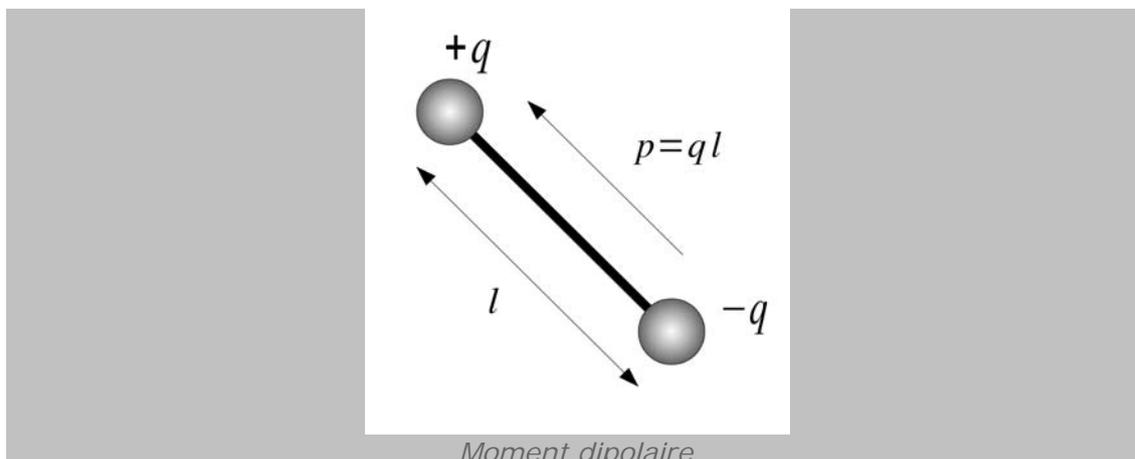
L'effet piézoélectrique

- Lorsque ces barycentres de charges positives et négatives sont distincts, il y a **polarisation (électrique)** du cristal, qui se traduit par un moment dipolaire $p = ql$, où q est la charge et l la distance séparant les deux charges (cf figure).

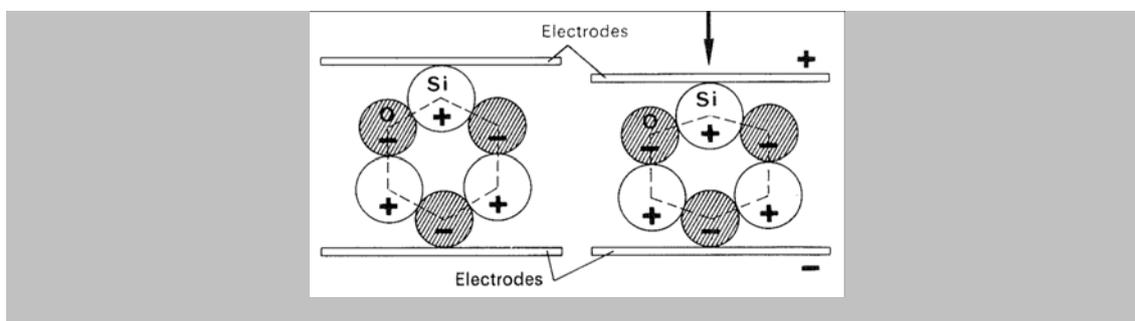


Attention

il n'y a pas de "déplacement de charge" dans la mesure où toutes les charges restent confinées dans le matériau, conservant sa neutralité électrique.

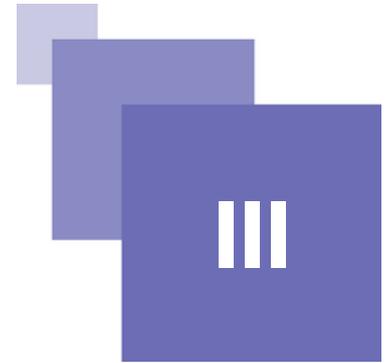


- L'effet piézoélectrique peut être considéré à **l'échelle macroscopique** comme une polarisation électrique d'un solide (3D) déformable, sous l'effet de forces appliquées sur sa surface (et en particulier de pression)
- Si les faces du solide sont métallisées on peut ramener le problème à un condensateur plan au sein duquel on voit "apparaître" des charges lorsque des forces sont appliquées sur le solide



- Réciproquement, si on applique une tension sur les faces du "condensateur", on voit apparaître un champ électrique à l'intérieur du matériau.
- Ce champ sépare les barycentres des charges positives et négatives présentes à l'intérieur du matériau, ce qui peut se traduire soit par une déformation du matériau (si le matériau est libre de se déformer), soit par l'apparition d'une force (si on empêche le matériau de se déformer).

La transduction piézoélectrique



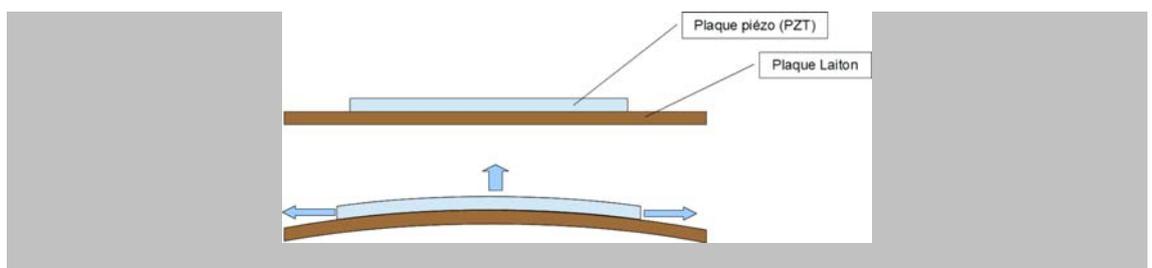
Définition : lame piézoélectrique	11
Modèle de couplage piézoélectrique simplifié	12
Représentation par des schémas	14

A. Définition : lame piézoélectrique

DÉFINITION : LAME PIÉZOÉLECTRIQUE

Pour les applications acoustiques, les transducteurs piézoélectriques couramment utilisés sont basés sur le dispositif suivant :

- une plaque piézoélectrique est collée sur une plaque en laiton, formant ainsi un **bilame** ;
- lorsqu'un potentiel électrique est appliqué sur les électrodes portées par chaque face de la plaque piézoélectrique, cette dernière s'allonge, ce qui produit la flexion du bilame (déplacement transverse).



- le mouvement transverse de la plaque support est donc associé à une élongation de surface de la plaque piézoélectrique : sans la plaque en laiton, le mouvement d'élongation du piézo ne provoquerait pas de vibration transverse ;



Remarque

C'est ce qui explique que le capteur ne fonctionne pas s'il n'est pas solidaire de la table d'harmonie dans le questionnaire du début.

B. Modèle de couplage piézoélectrique simplifié

- L'effet piézoélectrique peut s'avérer relativement complexe, faisant intervenir des tenseurs de couplage déformation / champ électrique d'ordres élevés.
- pour rendre le couplage piézoélectrique plus aisé à modéliser, il est fait ici plusieurs approximations
 - petites déformations, permettant de linéariser les équations de couplage
 - le matériau piézoélectrique présente une épaisseur négligeable devant ses dimensions transversales. Ainsi on peut assimiler une face du matériau (lame) piézoélectrique comme une armature mobile d'un condensateur, dont l'autre extrémité est supposée immobile (à l'instar du transducteur électrostatique)
 - l'élément piézoélectrique ne subit que des forces de traction, à l'exclusion de toute autre contrainte dans le plan transverse.

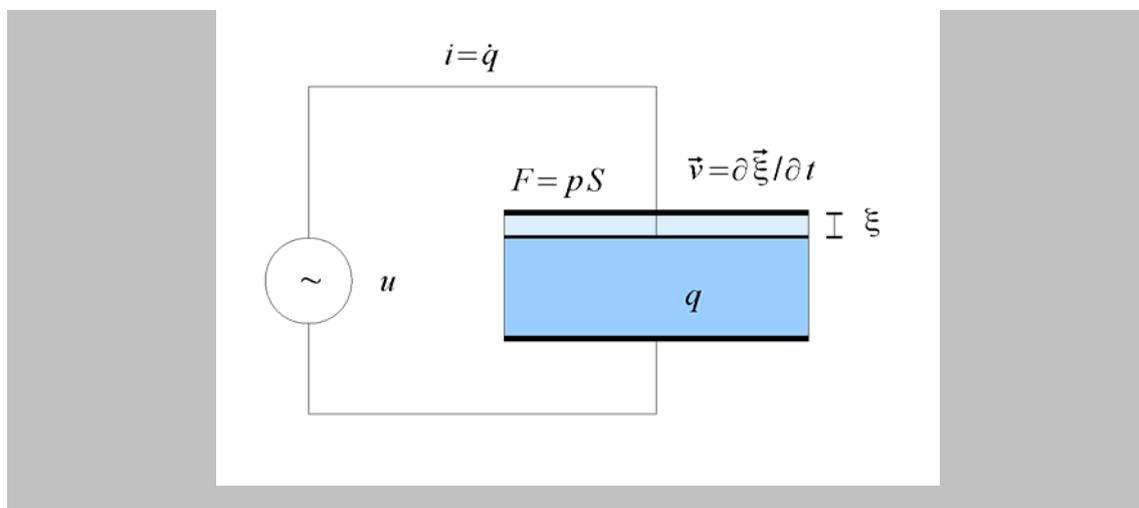
On considérera dans ce qui suit :

- un élément de matériau piézoélectrique mince et section carrée, soumis à des forces de traction-compression harmoniques (de fréquence f) dans son épaisseur (et pas des forces normales à sa surface, comme présenté dans les cours G3.2 et G3.3), entraînant un mouvement vibratoire transversal ;
- les deux faces peuvent être considérées comme les 2 armatures d'un condensateur, dont la charge varie dans le temps en fonction du déplacement de l'armature mobile
- nous considérerons le cas des petites déformations, et si ses dimensions latérales sont petites devant la longueur d'onde dans le matériau (λ), on peut supposer en première approximation que la lame piézoélectrique se comporte principalement comme une compliance (ou souplesse) mécanique C_m .

GRANDEURS PHYSIQUES CONSIDÉRÉES

Dans ce qui suit, nous noterons :

- ξ l'élongation de la face supérieure ;
- v la vitesse vibratoire de la face supérieure ;
- q la charge électrique de l'élément ;
- $i = \dot{q}$ la courant électrique traversant l'élément ;
- u la tension appliquée entre les armatures ;
- $F = pS$ la force de traction appliquée à l'élément.



- La charge électrique q , due à la polarisation électrique provoquée par la déformation résultant de l'application de la force F seule (ie. lorsque le piezo est en circuit ouvert), peut s'exprimer, dans l'hypothèse linéaire :

$$q|_{u=0} = -\Gamma_p \cdot F$$

où Γ_p désigne le module piézoélectrique de charge en C/N.

- Réciproquement, l'application à l'élément de la tension u seule (ie. lorsque le bilame n'est pas soumis à une force extérieure) y crée un champ électrique, résultant en une contrainte, et par voie de conséquence une déformation de la face mobile selon :

$$\xi|_{F=0} = \Gamma_p \cdot u$$

où Γ_p est cette fois exprimée en m/V.



Remarque

il est important de noter que, contrairement à la transduction électrostatique qui est caractérisée par des équations quadratiques (non linéaires), les relations de couplage piézoélectrique sont linéaires.

ÉQUATIONS DU MOUVEMENT

- Loi de Newton : en première approximation, le bilame se comporte comme une souplesse mécanique dans le domaine fréquentiel de fonctionnement du transducteur (ie. en dessous de la fréquence de résonance de la plaque). Lorsque le bilame n'est soumis qu'à la force F (en supposant le piezo en circuit ouvert), le bilame opposera une force de rappel de telle manière que :

$$\xi|_{u=0} = -C_m \cdot F$$

- Loi des mailles : Si le transducteur piézo, assimilé en première approximation à un condensateur de capacité C_0 , est connecté à une source de tension u , on a la loi suivante :

$$q|_{F=0} = C_0 \cdot u$$

ÉQUATIONS DE COUPLAGE PIÉZOÉLECTRIQUE SIMPLIFIÉ

- Si l'élément est soumis simultanément à une tension u et à une force F , la déformation résultante est la combinaison de la déformation à force F nulle et de la déformation à tension u nulle (en supposant que la lame se comporte comme compliance mécanique C_m pure), selon

$$\xi = \Gamma_p u - C_m F$$

- Réciproquement, la charge électrique q de la lame résulte de la combinaison de la conversion piézoélectrique à tension u nulle, et de l'application de la tension seule u à travers la capacité électrique C_0 statique selon

$$q = -\Gamma_p F + C_0 u$$

- À l'instar des grains 3.2 et 3.3, nous cherchons à relier les grandeurs mécaniques (F, v) aux grandeurs électriques (u, i) . Cela revient donc à dériver

les deux précédentes équation, afin d'obtenir

$$i = j\omega C_0 u - j\omega \Gamma_p F$$

$$v = j\omega \Gamma_p u - j\omega C_m F$$

Problème : dans le précédent système, le couplage est exprimé à travers un coefficient imaginaire pur ($j\omega \Gamma_p$), qui ne peut être représenté dans un schéma par un élément de type transformateur (de coefficient réel). Nous allons donc réarranger le système précédent de deux manières différentes

La transduction piézoélectrique

- Formulation 1 :
Si on dérive $\Gamma_p i - C_0 v$ d'après le système précédent, on montre que :

$$F = \frac{1}{C'_m} \left(-v + \frac{\Gamma_p}{C_0} i \right)$$

$$u = \frac{1}{j\omega C_0} i + \frac{\Gamma_p}{C_0} F$$

$$\text{où } C'_m = j\omega C_m \left(1 - \frac{\Gamma_p^2}{C_0 C_m} \right)$$

$$\frac{\Gamma_p}{C_0}$$

Le couplage est désormais exprimé par le coefficient $\frac{\Gamma_p}{C_0}$.

- Formulation 2 :
Si on dérive $C_m i - \Gamma_p v$ d'après le système précédent, on montre que :

$$u = \frac{1}{C'_0} \left(i - \frac{\Gamma_p}{C_m} v \right)$$

$$F = -\frac{1}{j\omega C_m} v + \frac{\Gamma_p}{C_m} u$$

$$\text{où } C'_0 = j\omega C_0 \left(1 - \frac{\Gamma_p^2}{C_0 C_m} \right)$$

$$\frac{\Gamma_p}{C_m}$$

Le couplage est désormais exprimé par le coefficient $\frac{\Gamma_p}{C_m}$.

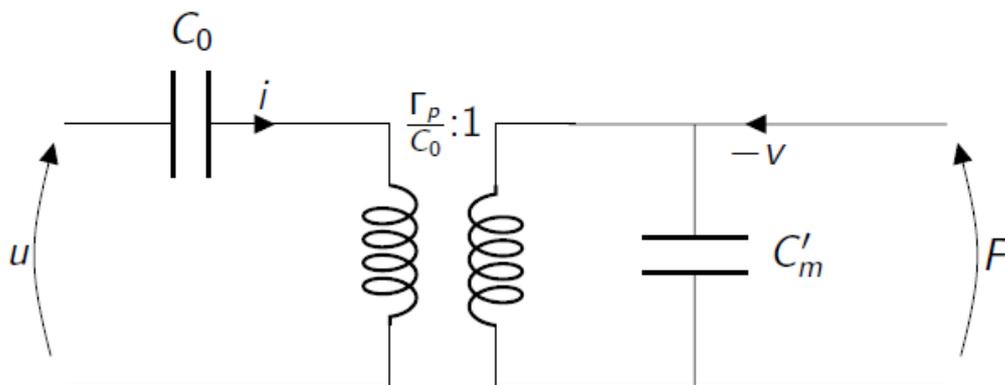
C. Représentation par des schémas

SELON LA FORMULATION 1

$$u = \frac{1}{j\omega C_0} i + \frac{\Gamma_p}{C_0} F$$

$$F = \frac{1}{C'_m} \left(-v + \frac{\Gamma_p}{C_0} i \right)$$

Ce système peut être représenté par le schéma suivant :

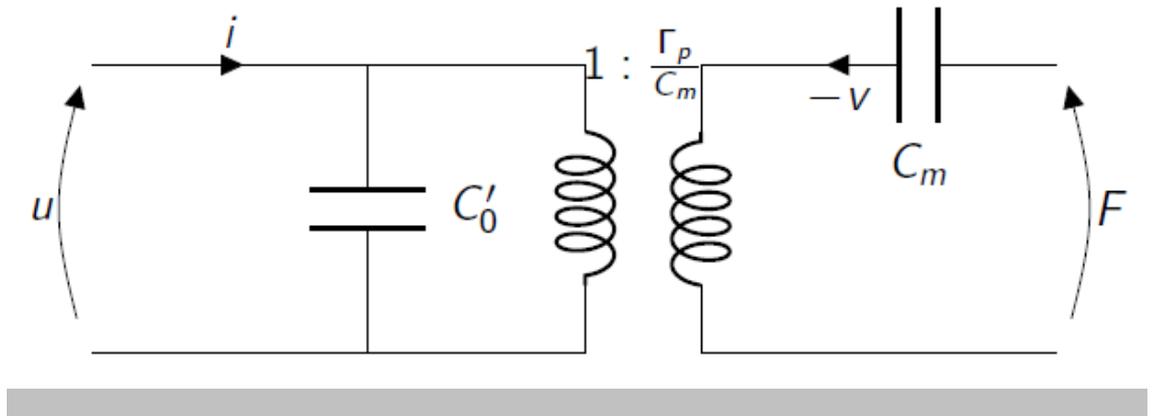


SELON LA FORMULATION 2

$$u = \frac{1}{C'_0} \left(i - \frac{\Gamma_p}{C_m} v \right)$$

$$F = -\frac{1}{j\omega C_m} v + \frac{\Gamma_p}{C_m} u$$

Ce système est représenté par le schéma suivant :



Applications des transducteurs piézoélectriques

IV

Généralités	17
Capteurs	17
Actionneurs	19

A. Généralités

Les transducteurs piezoélectriques peuvent être utilisés indifféremment comme capteurs ou comme actionneurs, à l'instar des transducteurs électrodynamiques ou électrostatiques.

B. Capteurs

Les transducteurs piezoélectriques peuvent être utilisés comme capteurs :

- microphones :
certains "microphones" de guitare sont basés sur le principe piézoélectrique. Ces capteurs sont en général collés sur la table d'harmonie de la guitare, mais il existe également des modèles intégrés dans le chevalet ou le sillet (barres sur lesquelles les cordes sont fixées au niveau de la table et au niveau du manche). Le signal électrique est alors relié aux déformations du cristal piézoélectrique soumis aux mouvements vibratoires de la guitare.



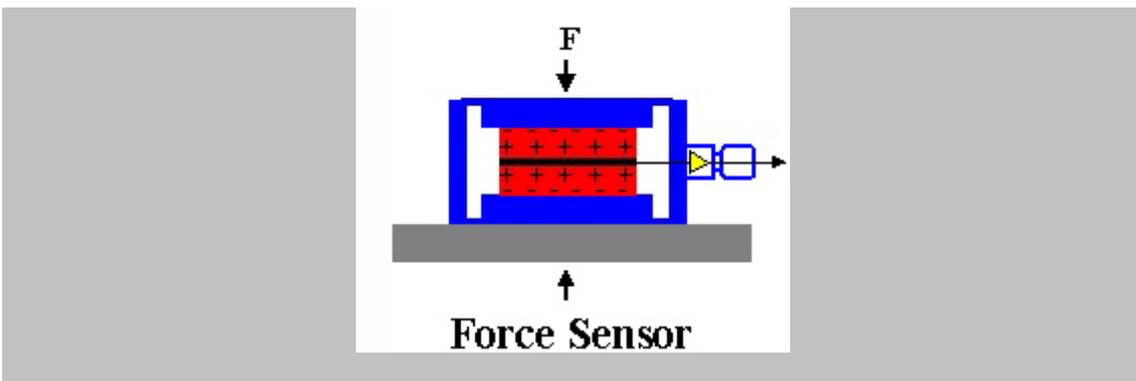
Capteur piézo pour table d'harmonie de guitare.

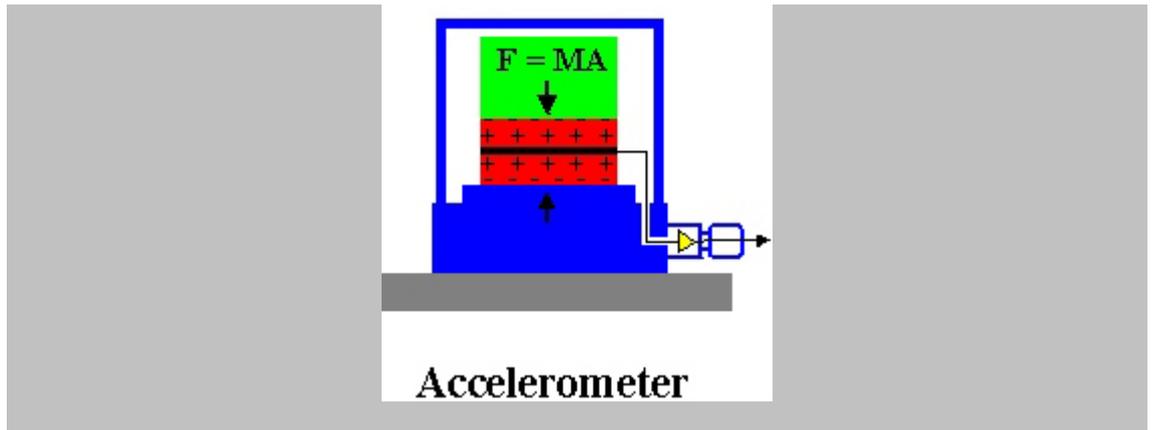


Remarque

la réponse du capteur à l'excitation des cordes dépend de la position sur la guitare.

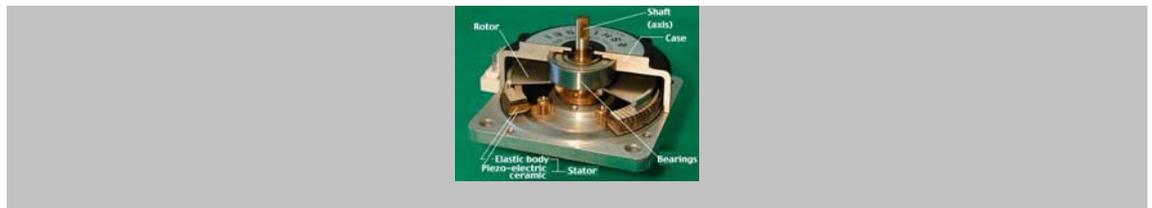
- capteurs de force ou accéléromètres : dans ce type de capteurs, le cristal piézoélectrique est inséré dans un boîtier rigide, lequel est posé sur la structure dont on souhaite connaître l'accélération (ou la force mécanique appliquée). La seule différence entre ces deux capteurs est la présence d'une masse connue dans l'accéléromètre, qui suit le mouvement vibratoire de la structure et permet de dériver l'accélération (force / masse) de la mesure de la force.



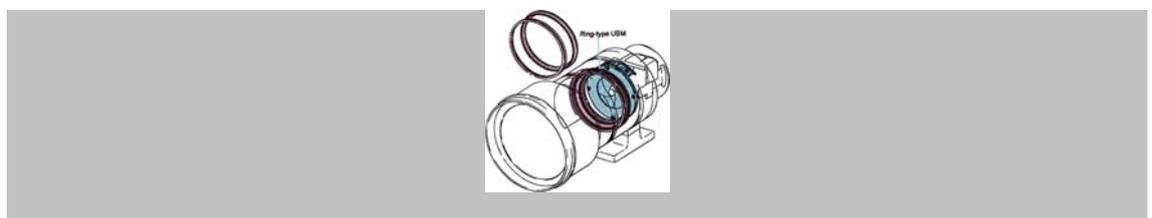


C. Actionneurs

- Haut-parleur (tweeter) piézoélectrique :
 les cristaux piézoélectriques sont généralement fixés sur une membrane, qui est l'élément "rayonnant" les ondes acoustiques. La sensibilité de ces haut-parleurs dépend essentiellement des modes de vibration de la membrane. Il s'agit le plus souvent de tweeters.
- Moteur piézoélectrique :
 Les transducteurs piézoélectriques peuvent également être utilisés comme moteurs, par exemple entre un bâti et une membrane rigide, à l'instar du moteur électrodynamique dans un haut-parleur du même nom. Cette technologie à l'avantage de ne pas nécessiter d'aimant (qui est souvent le composant le plus cher des HP électrodynamiques), au détriment de performances électroacoustiques plus faibles.



Les applications des moteurs piézoélectriques vont des haut-parleurs aux auto-focus des appareils photographiques.



Exercice : Testez vos connaissances



V

Question 1

Lorsque l'on applique une tension électrique à un film piézoélectrique (petite épaisseur comparées aux dimensions latérales), ce dernier :

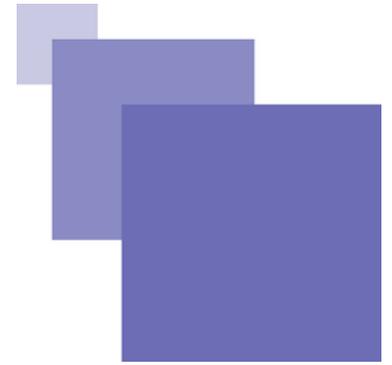
- se déforme selon la direction normale à sa surface ?
- se déforme dans le plan de sa surface ?

Question 2

On utilise un bilame piézoélectrique comme actionneur, soumis à une source de tension u que l'on suppose harmonique de fréquence f . On suppose que le bilame se comporte comme une compliance mécanique $C_m = 1\text{mm/N}$, et que la capacité électrique statique vaut $C_0 = 1\text{pF}$. Par ailleurs, on considère un facteur de couplage $\Gamma_p = ??$.

- En l'absence de forces extérieures, comment représenteriez-vous schématiquement l'actionneur ?
- Exprimez la vitesse vibratoire du bilame en fonction de la fréquence f . Tracez le diagramme de Bode de cette grandeur.

Solution des exercices



> Solution n° 1 *(exercice p. 7)*

Slide5_video.mp4

> Solution n° 2 *(exercice p. 7)*

Slide6_video.AVI

> Solution n° 3 *(exercice p. 7)*

Slide7_video.AVI

> Solution n° 4 *(exercice p. 8)*

slide8_video.avi