Adaptation électrique d'un convertisseur d'énergie piézoélectrique

H. Ohanessian, P. Gonnard, Y. Fétiveau

► To cite this version:

H. Ohanessian, P. Gonnard, Y. Fétiveau. Adaptation électrique d'un convertisseur d'énergie piézoélectrique. *Revue de Physique Appliquée*, 1974, 9 (6), pp.995-999. 10.1051/rphysap:0197400906099500 . jpa-00243871

HAL Id: jpa-00243871

<https://hal.science/jpa-00243871>

Submitted on 1 Jan 1974

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification
 Physics Abstracts
 7.229 — 8.760

ADAPTATION ÉLECTRIQUE D'UN CONVERTISSEUR D'ÉNERGIE PIÉZOÉLECTRIQUE

H. OHANESSIAN, P. GONNARD et Y. FETIVEAU

Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France

(Reçu le 25 juin 1974)

Résumé. — L'utilisation des structures piézoélectriques comme transducteurs acoustiques ou comme générateur d'étincelles pour l'allumage des gaz connaît un développement important. Parmi les problèmes soulevés par ces techniques, se pose celui de l'accroissement de l'énergie électrique récupérée lors d'un choc mécanique uniaxial.

A partir des équations de la piézoélectricité et des caractéristiques de l'impulsion de commande, une formule est proposée qui donne la résistance d'adaptation.

L'étude expérimentale de l'énergie fournie au cours de la transformation mécano-électrique réversible sur des échantillons d'origines diverses conduit à des valeurs pratiques de résistance en bon accord avec les valeurs théoriques.

Abstract. — The use of piezoelectric transducers in ultrasonic detection, as well as in gas ignition, leads to the necessity of optimizing the delivered electric energies during reversal conversions under uniaxial mechanical stress pulses.

A theoretical computation of the matched resistive load has been done which allows this optimization.

A comparative study on different ceramics of the energies recovered shows a good agreement between the experimental values of matching and those calculated by the proposed formula.

1. Introduction. — Dans les derniers développements des transducteurs piézoélectriques, on note un intérêt croissant pour l'utilisation de l'énergie fournie au cours d'une transformation mécano-électrique réversible, provoquée par des impulsions mécaniques uniaxiales sur une céramique.

Le champ d'applications de ces transducteurs concerne aussi bien la détection ultrasonique que la production d'énergies capables d'enflammer des gaz.

Ce travail a pour but de proposer un calcul théorique des conditions optimales de fonctionnement, et en particulier de l'adaptation de la résistance d'utilisation afin de récupérer l'énergie la plus élevée possible, et d'effectuer une vérification expérimentale de la formule proposée.

2. Calcul de la résistance d'adaptation en régime réversible. — On considère une pastille piézoélectrique de forme cylindrique (surface S , épaisseur l) qui, sous l'effet d'une impulsion de pression uniaxiale, libère des charges dq dans une résistance d'utilisation R (Fig. 1).

2.1 LA VARIATION DE L'INDUCTION ÉLECTRIQUE S'ÉCRIT

$$dD = - \frac{l}{SR} E dt$$

où E est le champ électrique dans la pastille.

FIG. 1. — Principe de la mesure.

Pour simplifier les relations, on remplace R par une résistivité fictive ρ telle que : $\rho = R S / l$ soit $\rho \varepsilon = RC$ (S et l étant caractéristiques de la pastille et non de R), ε est la constante diélectrique, C la capacité de la céramique, d'où :

$$dD = - \frac{E}{\rho} dt.$$

En négligeant l'effet pyroélectrique, on peut exprimer cette variation dans la pastille sous la forme :

$$dD = \varepsilon dE + d.dT$$

où T représente la pression axiale instantanée sur l'échantillon.

On suppose que, dans le domaine de contraintes envisagé, la variation $D = f(T)$ est linéaire et que $d = d_{33}$, constante de charge piézoélectrique, est invariante.

En comparant les deux relations précédentes, il vient :

$$\frac{E}{\rho} dt + \varepsilon dE + d \cdot dT = 0.$$

2.2 L'impulsion de pression est fournie par une masse M tombant sur la pastille et possédant une vitesse initiale v_0 à l'abscisse $x = 0$. Si l'on appelle Y le module d'Young de l'ensemble échantillon-support, on peut déterminer l'équation de la déformation x , en égalant la force appliquée et la réaction dans l'échantillon.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{YS}{lM} x = 0$$

équation qui se résout, en utilisant la condition initiale ($t = 0$, $x = 0$), par :

$$x = A \sin at \quad \text{avec} \quad a = \left[\frac{YS}{lM} \right]^{1/2}.$$

On en déduit la variation de pression appliquée sur l'échantillon au cours du temps

$$T = \frac{F}{S} = \frac{Yx}{l} = T_0 \sin at.$$

Pour $t = 0$, $dx/dt = v_0$ soit

$$T_0 = v_0 \left[\frac{MY}{lS} \right]^{1/2}.$$

Dans cette solution simplifiée, on ne tient pas compte des coefficients de frottement qui introduisent un terme d'amortissement en e^{-bt} . En fait, les courbes expérimentales montrent qu'il suffit d'assimiler l'impulsion de pression à la première demi-période de la sinusoïde.

2.3 Dans ces conditions, l'expression du champ électrique est solution de l'équation différentielle :

$$\varepsilon \frac{dE}{dt} + \frac{E}{\rho} = -adT_0 \cos at.$$

En tenant compte des valeurs limites $E(t = 0) = 0$, on peut donner la solution générale de cette équation :

$$E(t) = adT_0 \rho \sin \varphi (e^{-t/\rho\varepsilon} \sin \varphi - \sin(at + \varphi))$$

avec :

$$\varphi = \arcsin(1 + \rho^2 \varepsilon^2 a^2)^{-1/2}$$

expression valable pour t variant entre 0 et $t_0 = \pi/a$, demi-période de l'impulsion de pression. On vérifie que E s'annule pour $\rho = 0$ (pastille en court-circuit) et que pour $\rho \rightarrow \infty$, $E = -gT$, où $g = g_{33} = d_{33}/\varepsilon$ est la constante de tension piézoélectrique : à vide,

le champ électrique varie de la même manière que la pression exercée.

2.4 L'énergie récupérée dans la charge provient de deux termes :

— une partie W_0 correspondant à la variation du champ électrique entre 0 et t_0 ;

— une partie W_1 récupérée après le temps t_0 et due à la valeur non nulle $E(t_0)$ du champ électrique à l'instant t_0 . Toutes ces énergies sont prises par unité de volume d'échantillon.

a) Entre les instants 0 et t_0

$$W_0 = \int_0^{t_0} \frac{E^2(t)}{\rho} dt$$

et l'intégration conduit à l'expression de l'énergie :

$$W_0 = \frac{1}{2} a^2 d^2 T_0^2 \frac{\rho}{1 + \rho^2 \varepsilon^2 a^2} \times \left[t_0 - \frac{\rho\varepsilon}{1 + \rho^2 \varepsilon^2 a^2} (e^{-2t_0/\rho\varepsilon} + 4e^{-t_0/\rho\varepsilon} + 3) \right].$$

b) Le champ électrique au temps t_0 est déterminé par :

$$E(t_0) = adT_0 \rho \sin^2 \varphi (e^{-t_0/\rho\varepsilon} + 1)$$

et l'énergie W_1 que reçoit la charge après le temps t_0 s'exprime sous la forme :

$$W_1 = \frac{1}{2} \varepsilon E^2(t_0).$$

c) On détermine alors l'énergie totale W_T dissipée dans la charge ρ d'une manière simple en utilisant la variable auxiliaire

$$y = \rho\varepsilon a$$

$$W_T = \frac{d^2 T_0^2}{2\varepsilon} \left[\pi - \frac{2y}{1+y^2} (e^{-\pi/y} + 1) \right] \frac{y}{1+y^2}.$$

On peut vérifier que W_T s'annule pour $\rho = 0$ et pour $\rho \rightarrow \infty$.

2.5 On trace la courbe représentative des variations de l'énergie totale W_T en fonction de la résistance d'utilisation normalisée ρ . Cette courbe présente un maximum de valeur :

$$W_T = 0,5265 \frac{d^2 T_0^2}{\varepsilon} \quad \text{pour} \quad y = 0,9$$

ce qui correspond à :

$$\frac{t_0}{\rho_0 \varepsilon} = 3,5 \quad \text{soit} \quad R_0 = \frac{t_0}{3,5 C}$$

le champ électrique à l'adaptation ayant pour expression :

$$E_0(t) = 0,669 \frac{dT_0}{\varepsilon} \times \left[0,743 e^{-3,5 t/t_0} - \sin \left(\pi \frac{t}{t_0} + 0,838 \right) \right].$$

3. Résultats expérimentaux. — Nous avons cherché à vérifier expérimentalement l'exactitude de ce calcul en déterminant l'énergie maximum récupérable sur charges résistives, avec des matériaux de fabrication industrielle et d'autres synthétisés au laboratoire. Ces mesures comparatives ont été faites pour une impulsion de pression donnée ; on obtiendrait des énergies supérieures avec des impulsions de pression plus élevées, tout en restant dans la zone de linéarité de la courbe $D(T)$ de ces échantillons.

3.1 DISPOSITIF D'ÉTUDE. — L'échantillon est fortement serré, au moyen d'une tige filetée, entre 2 rondelles métalliques dont l'une possède une extrémité arrondie et reçoit la pression de la bille.

L'ensemble est placé au centre d'un bloc cylindrique de plexiglas, lui-même solidement maintenu à l'intérieur d'un cylindre de laiton ($\varnothing' = 10$ cm, $h = 8$ cm) qui annihile les vibrations parasites (Fig. 2).

FIG. 2. — Dispositif expérimental.

La bille maintenue par un électroaimant, est centrée à l'aide d'un petit tube auxiliaire ; elle possède une vitesse nulle à l'instant initial. Nous avons utilisé 2 billes d'acier, l'une de 18,86 g et de 16,7 mm de diamètre, l'autre de 11,9 g et 14,3 mm de diamètre.

Nos échantillons se présentent sous la forme de pastilles de 5 mm de diamètre et de 1 ou 2 mm d'épaisseur.

3.2 PRINCIPE DES MESURES. — Nous avons vu que le champ électrique varie linéairement avec la pres-

sion exercée lorsque la charge est infinie. Pour chaque pastille, l'enregistrement de la tension à vide permet donc de déterminer la demi-période t_0 de l'impulsion de pression ; on peut également en déduire le champ maximum atteint à vide.

On en tire une valeur théorique de la résistance d'adaptation déduite du calcul ci-dessus.

$$R_{0th} = \frac{t_0}{3,5 C}.$$

A partir des courbes $V(t)$ (Fig. 3) obtenues pour diverses résistances de charge, on trace les diagrammes $V^2(t)$ que l'on intègre pendant la durée du phénomène. L'énergie disponible par unité de volume se déduit alors de l'expression :

$$W_T = \frac{1}{vR} \int_0^t V^2(t) dt.$$

FIG. 3. — Courbes $V(t)$ à vide et près de l'adaptation. Echantillon PXE 5.

Les courbes $W_T = f(R)$ tracées à partir de ces résultats permettent de déterminer, pour chaque échantillon, la valeur de la résistance d'adaptation R_{0m} .

Notons que la tension est mesurée au moyen d'une sonde TEKTRONIX de 40 kV possédant une résistance d'entrée de 100 MΩ. La courbe dite à vide correspond donc en réalité à une charge de 100 MΩ ; toutefois cette valeur n'influe pas sur les charges utilisées.

3.3 RÉSULTATS. — Pour chaque céramique, les essais sur 8 à 10 résistances de charge différentes ont permis de tracer les courbes $W_T = f(R)$ (Fig. 4). Le tableau de la figure 5 présente les résultats comparatifs des valeurs théoriques et mesurées de R_0 ; il donne également le rapport $t_0/R_0 C$ correspondant et l'énergie maximum disponible à l'adaptation ; l'énergie cinétique incidente varie pour chaque échantillon ; sa valeur n'a pas été ramenée à l'unité de volume.

Si l'on excepte certains échantillons tels que LE 11 et LE 12, l'erreur sur la détermination de R_0 est inférieure à 20 %.

FIG. 4. — Courbes $W_T = f(R)$. Echantillon NTK.

On peut penser que la différence entre les valeurs théoriques et pratiques provient de la non-linéarité de la caractéristique $D(T)$ de l'échantillon ; en effet, pour les faibles impulsions de pression, d_{33} reste constant dans le domaine de pression considéré, alors que pour des efforts plus importants sur la pastille, d_{33} varie beaucoup et conduit à une résistance d'adaptation très différente de la valeur théorique.

Un calcul simple permet de déterminer approximativement la pression maximum exercée sur les échantillons lorsque d_{33} est constant :

$$P_{\max} = E_{\max} \frac{\varepsilon}{d_{33}} = V_{\max} \frac{C}{S d_{33}}$$

$V_{\max}$ étant la valeur maximum de la tension à vide.

Echantillons	C pF	t_0 μs	$R_{0\text{ th}}$ kΩ	$R_{0\text{ m}}$ kΩ	$\frac{t_0}{R_0 C}$	$P_{\max}$ bar	$W_{T\max}$ mJ/cm³	Energie incidente mJ
NTK	255	80	90	80	3,9	420	18	100
Δ								
Matsushita	273	90	95	120	2,8	515	14	100
MURATA	376	78	59	45	4,6	—	2,8	100
LE 10-LEA	287	80	80	65	4,3	840	39	100
LE 11-LEA	52	80	436	250	6,1	—	0,31	100
LE 12-LEA	65	72	315	35	31	—	0,53	100
PXE4								
Philips	138	100	207	185	3,9	820	20,2	100
PXE5								
Philips	190	100	151	150	3,5	915	17	100
P4.68								
Quartz et Silice	287	100	100	90	4,1	1 180	16,6	100
P7.62								
Quartz et Silice	118	77	186	170	3,8	350	5,3	23
308 INSA								
Génie Electrique	70	92	370	330	3,9	—	10,7	42
310 INSA								
Génie Electrique	100	88	250	200	4,4	—	18,4	42

FIG. 5. — Tableau comparatif des résultats.

En ce qui concerne ces deux types particuliers de pastilles, nous avons remarqué une différence très sensible entre les courbes $V(t)$ à vide obtenues à la première impulsion de pression et après une vingtaine de chocs successifs, et par conséquent, une réduction, allant jusqu'à la moitié, de l'énergie récupérée.

Aussi avons-nous procédé à une nouvelle étude en diminuant l'énergie cinétique incidente de la bille (diminution de hauteur de chute). En réduisant cette énergie dans un rapport de un tiers, on note une nouvelle résistance d'adaptation de 150 kΩ, alors que la valeur calculée serait de 260 kΩ, la demi-période t_0 ayant également diminué à 60 μs ; on obtient $t_0/R_0 C = 6$.

Pour certaines céramiques, d_{33} n'étant pas connu ou n'ayant pas été déterminé dans les conditions de l'expérience, la valeur de $P_{\max}$ n'a pas été calculée. Nous prévoyons l'insertion dans le montage d'une rondelle de charge à quartz Kistler du type 901 A qui permettra de tracer les variations $V(P)$ et d'atteindre la valeur de d_{33} correspondant au fonctionnement considéré.

4. Conclusion. — Dans l'hypothèse d'une conversion mécano-électrique linéaire et réversible, le calcul proposé permet d'évaluer une résistance adaptée à la céramique piézoélectrique, dans le cas d'une impulsion sinusoïdale de pression. Le calcul peut d'ailleurs

être étendu à des impulsions de formes différentes (apériodique ou sinusoïdale amortie par exemple).

La connaissance de cette résistance assure la transmission de la plus grande énergie possible du matériau à la charge, et conduit à une utilisation optimale de ces éléments comme transducteurs et en particulier comme générateurs de forte intensité.

En ce qui concerne l'allumage des gaz, le problème se complique du fait de la non-linéarité de la charge que constitue l'étincelle et de la difficulté d'obtenir des conditions expérimentales parfaitement reproductibles ; il est alors indispensable, pour déterminer l'énergie maximum, de mesurer simultanément la tension et le courant.

Bibliographie

- [1] EYRAUD, L., *Diélectriques solides anisotropes et ferro-électricité* (Gauthier-Villars, Paris) 1967.
 - [2] BERLINCOURT, D. A., Piezoelectric and Ferroelectric energy conversion *IEEE Transactions on sonics and ultrasonics*, Vol. SU-15 n° 2, p. 89-97 (April 1968).
 - [3] « *Piezoelectric ceramics* » PHILIPS Application Book. Electronic components and material division.
 - [4] YORK, T. M., Stress dynamics in high speed piezoelectric pressure probes. *Rev. Sci. Instrum.* **41** (1970) 519-521.
-