



**HAL**  
open science

## Le transformateur piézoélectrique : principe et applications

Dejan Vasic, Sandrine Hallaert, Emmanuel Sarraute, François Costa

► **To cite this version:**

Dejan Vasic, Sandrine Hallaert, Emmanuel Sarraute, François Costa. Le transformateur piézoélectrique : principe et applications. La Revue 3E.I, 2001, 26, pp.26-35. hal-00811664

**HAL Id: hal-00811664**

**<https://hal.science/hal-00811664>**

Submitted on 16 May 2024

**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.

# Le Transformateur Piézoélectrique, Principe et Applications

Dejan VASIC, Sandrine HALLAERT, Emmanuel SARRAUTE, François COSTA

Ecole Normale Supérieure de Cachan

Laboratoire d'Electricité, Signaux et Robotique (LESIR, UPRESA 8029)

61, avenue du président Wilson 94230 CACHAN

**Résumé** - Cet article a pour but de présenter un nouveau type de transformateur électrique mettant en œuvre des matériaux piézoélectriques à un public plus large que celui des chercheurs et vise en particulier le milieu enseignant. En effet, même si le transformateur piézoélectrique a bénéficié ces dernières années d'un grand engouement sur le plan de la recherche, il reste encore très mal connu du public du génie électrique et cela, alors que ce type de transformateur commence à être disponible sur le plan commercial : on voit actuellement plusieurs industriels tel que Toshiba qui proposent des alimentations DC/DC faible puissance (qqe 10W) isolées par des transformateurs piézoélectriques. Une grande famille d'application en voie d'extension rapide de ces alimentations, est le rétroéclairage des écrans LCD. Nous nous proposons donc dans ce papier de rappeler dans un premier temps les principes de fonctionnement mis en jeu, de présenter ensuite quelques structures de transformateurs piézoélectriques et enfin de donner quelques exemples d'application.

## I. INTRODUCTION

Les premières structures de transformateurs piézoélectriques sont apparus dans les années 1950 suite aux travaux menés notamment par C. A. Rosen [1]. Mais ce n'est que relativement récemment, en particulier grâce aux progrès réalisés dans la synthèse des céramiques PZT (Titanate de Zirconate de Plomb) et l'amélioration de leurs caractéristiques que le transformateur piézoélectrique a trouvé de l'intérêt. La miniaturisation de plus en plus poussée des matériels mobiles utilisés en télécommunication mais aussi dans d'autres domaines d'application tels que le génie médical ou l'instrumentation, nécessite de disposer de sources d'énergie électrique de quelques Watts à quelques dizaines de Watts, très compactes, et offrant de bonnes performances en terme de rendement, de fiabilité, de compatibilité électromagnétique. Dans ce cadre, l'utilisation de transformateurs piézoélectriques apparaît comme une solution tout à fait prometteuse par comparaison à la solution électromagnétique classique. En effet, l'utilisation d'une telle technologie peut permettre d'envisager la fabrication de convertisseurs électriques entièrement compact dans la mesure où, comme nous le verrons plus tard, le transformateur piézoélectrique se présente généralement sous la forme d'un bloc uniforme de céramique, avec deux paires d'électrodes primaires et secondaires, (Figure 1) ce

qui n'est pas le cas du transformateur électromagnétique qui nécessite un bobinage plus encombrant. De plus la puissance volumique du transformateur piézoélectrique est assez importante, de l'ordre de 20Watts/cm<sup>3</sup>, ce qui est comparable à celle des transformateurs électromagnétiques en ferrite fonctionnant à haute fréquence.

Un transformateur piézoélectrique possède deux parties bien distinctes ; la première peut être considérée comme la partie motrice ou primaire, et la deuxième comme la partie réceptrice ou secondaire. Le déplacement et la contrainte dans la partie motrice sont créés par une tension alternative, et ceci grâce à l'effet piézoélectrique inverse. Dans le même temps un champ électrique est créé dans la seconde partie par les déformations générées par la partie motrice. Ce dernier effet est appelé effet piézoélectrique direct. Le mécanisme de transfert de puissance dans le transformateur piézoélectrique est basé sur une double conversion électromécanique puis mécano-électrique de l'énergie. Il n'y a donc aucun couplage électromagnétique.

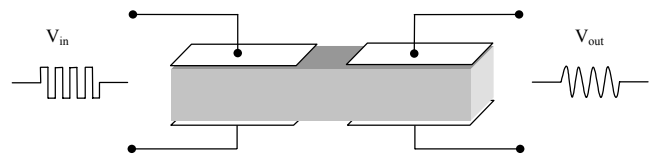


Figure 1 : Transformateur piézoélectrique : principe

Dans la mesure où le fonctionnement est basé sur la mise en vibration d'une céramique piézoélectrique, le rapport de transformation et les performances du transformateur ne sont vraiment intéressantes qu'au voisinage de la résonance mécanique de la structure. Différentes structures de transformateurs piézoélectriques existent. Dans ce document nous présenterons trois structures : structure type Rosen, structure multicouche et structure circulaire.

## II. L'EFFET PIEZOELECTRIQUE

L'effet piézoélectrique permet la conversion électromécanique. L'effet piézoélectrique direct (Figure 2) est le phénomène de polarisation électrique induite par application d'une contrainte à certains matériaux. Cette polarisation est proportionnelle à la contrainte et change de signe avec elle. Le coefficient qui retranscrit cette proportionnalité est appelé  $d$  : coefficient piézoélectrique. Ce phénomène est réversible : une polarisation électrique résultant de l'application d'un champ électrique entraînera

une déformation du même matériau. On parle alors d'effet piézoélectrique inverse.

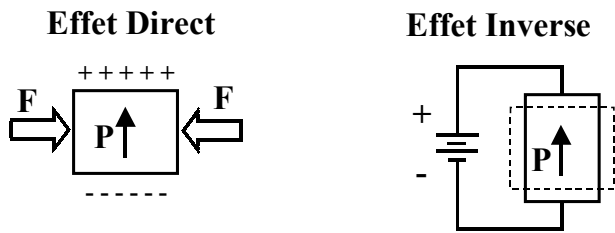


Figure 2 : L'effet piézoélectrique

L'origine de la piézoélectricité est liée à la structure cristalline du matériau : le phénomène ne s'observe que dans certains solides non-conducteurs possédant une anisotropie cristalline caractéristique. Il existe alors un axe privilégié d'apparition des charges électriques : l'axe de polarisation. Très peu de solides sont naturellement piézoélectrique, le quartz étant le plus connu.

### 2.1. La céramique PZT [2][3]

Les céramiques piézoélectriques de synthèse apparaissent dans les années quarante. Par leurs coefficients piézoélectriques bien supérieurs à ceux des cristaux, elles permettent un net élargissement du champ d'application des matériaux piézoélectriques.

Parmi ces matériaux de synthèse, la céramique PZT composée de zirconate, de titanate et de plomb, se positionne comme un leader incontestable. Des formes géométriques simples (barreau, disques, anneaux) sont obtenues par des procédés de pressage et de frittage de poudres de PZT mélangées à un liant comme indiqué sur la figure 3.

Dans le matériau, les microcristaux élémentaires sont ferroélectriques, donc doués d'une polarisation spontanée. Mais à l'échelle macroscopique, il n'apparaît aucun moment dipolaire global. Il est alors nécessaire de polariser le matériau pour créer une polarisation rémanente, suivant une direction donnée. C'est uniquement après cette opération que la céramique devient ferroélectrique et par là, piézoélectrique.

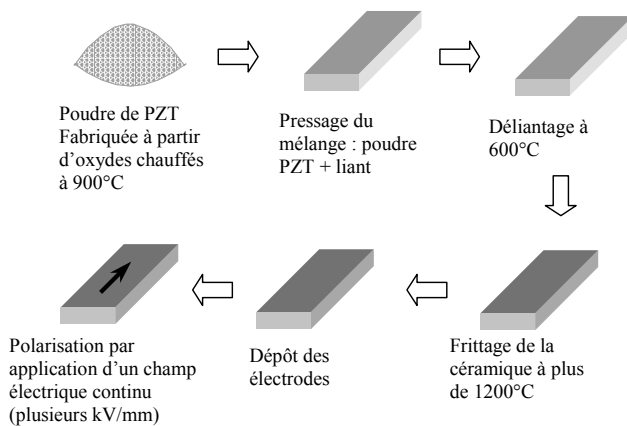


Figure 3 : Procédé de fabrication des céramiques PZT

Pratiquement, l'orientation des polarisations élémentaires sur la direction du champ polarisant s'accompagne de contraintes mécaniques dont la libération lente provoque un retour progressif à l'état désordonné : c'est ce qu'on appelle le vieillissement des céramiques.

L'élévation de la température tend également à détruire l'alignement des dipôles élémentaires sur le champ de polarisation. A la température de Curie, il n'existe plus de moment électrique macroscopique et la céramique perd toutes ses propriétés piézoélectriques. L'un des avantages de la céramique PZT est d'avoir une température de Curie élevée de l'ordre de 250°C à 350°C.

La formulation chimique de ces matériaux influe directement sur leurs caractéristiques. On distingue ainsi sommairement deux familles : les céramiques dites "douces" et celles dites "dures", selon la propension que présente le matériau à se dépolier. Le choix du type de céramique s'effectue en fonction de l'application visée :

- Les matériaux "doux" sont utilisés pour les applications à bas niveau d'excitation, notamment comme détecteurs (hydrophone, sondes échographiques).
- Les applications de puissance (transformateur, piézomoteur, transducteur) nécessitent l'utilisation de céramique "dures" présentant également de faibles pertes mécaniques et diélectriques.

On peut enfin noter l'existence d'alliage piézoélectrique de type Nitrure d'Aluminium (AlN) apparus sur la marché au début des années quatre-vingts. Cet alliage à l'avantage d'avoir une masse volumique plus faible que celle du PZT mais des caractéristiques piézoélectriques moins intéressantes.

### 2.2. Equations de la piézoélectricité [4][5][6]

De façon générale, en se limitant à de faibles déformations, on peut établir des relations locales liant les grandeurs électriques dans le matériau, telles que le champs électriques E et le champ d'induction électrique D, aux grandeurs mécaniques, telles que les contraintes T et les déformations relatives S.

En choisissant (S,E) comme couple de variable indépendantes, on obtient les relations suivantes :

$$T = \left[ \frac{1}{s^E} \right] S - \left[ \frac{d}{s^E} \right]^t E$$

$$D = \left[ \frac{d}{s^E} \right] S + \left[ \epsilon^S \right] E$$

La définition et la dimension de chacun des termes sont rappelées dans le tableau suivant.

Type	Signification	Unité
Electrique	D déplacement électrique ou induction	C/m <sup>2</sup>
	E champ électrique	V/m
	ε permittivité diélectrique	F/m
Mécanique	S déformation relative	
	T contrainte	N/m <sup>2</sup>
	s souplesse	m <sup>2</sup> /N
Piézoélectrique	d constante reliant T et l'induction D à E constant	C/N ou m/V

Tableau 1 : Définition et dimension des termes

A ces deux équations s'ajoutent classiquement l'expression du champ électrique E en fonction du potentiel U :

$$E = -\frac{\partial U}{\partial x}$$

et l'équation de Poisson, en supposant qu'il n'y a pas de charges libres dans le matériau :

$$\frac{\partial D}{\partial x} = 0$$

Enfin en dynamique, la loi de Newton s'applique :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}$$

où  $\rho$  est la masse volumique et  $u_i$  le déplacement.

### 2.3. Modes de vibrations

On distingue trois modes de vibration fondamentaux d'une céramique piézoélectrique. La nature de ces modes, autrement dit la distribution géométrique de la déformation, dépend des dimensions de l'échantillon considéré mais aussi de la direction de la polarisation P et du champ électrique E. Il est ainsi possible de privilégier un mode de vibration donné par un choix convenable de ces grandeurs. La figure 4 présente ces modes fondamentaux et les conditions d'excitation nécessaire à leur obtention.

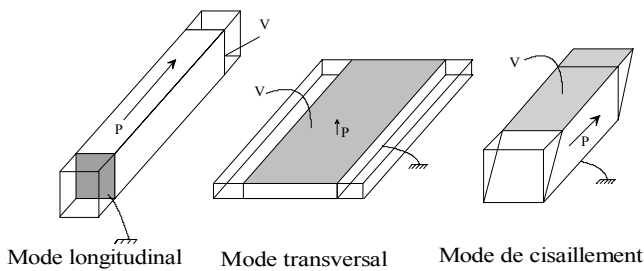


Figure 4 : Modes de vibration

## III. LES TRANSFORMATEURS PIEZOELECTRIQUES

Pour réaliser un transformateur piézoélectrique, on peut utiliser différents modes de polarisation ainsi que différentes géométries de céramiques piézoélectriques. Le choix se fait en fonction des applications souhaitées. Nous allons présenter trois structures rencontrées dans la littérature : la structure Rosen qui présente l'avantage d'avoir un gain en tension important, la structure multicouche qui permet de minimiser les régimes transitoires et la structure circulaire qui utilise l'effet planaire.

### 3.1. Structure Rosen

C'est une des première structure qui a été définie. Elle présente d'excellente caractéristique et fonctionne en élévateur de tension.

Dans ce type de structure, le primaire est polarisé en épaisseur et le secondaire dans le sens de la longueur (figure 5). On utilise donc deux modes de fonctionnement : le mode transversal et le mode longitudinal. C'est la combinaison de ces deux modes différents qui permet

d'obtenir un gain important, proportionnel au rapport de la longueur sur l'épaisseur de la structure.

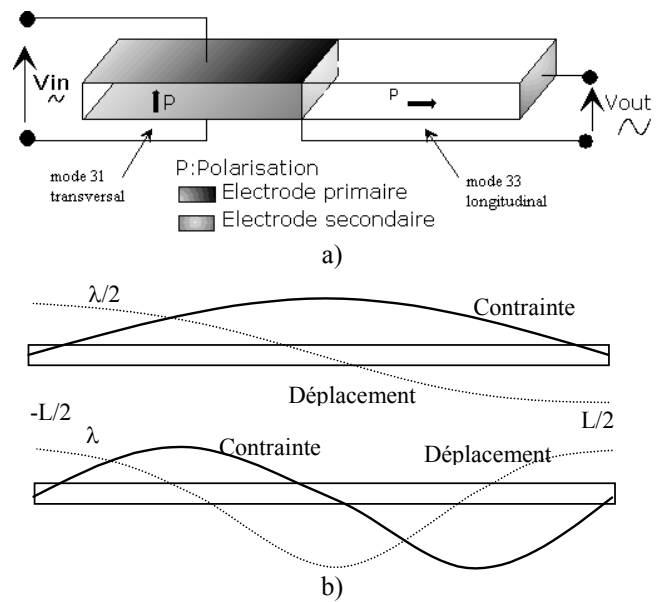


Figure 5 : Transformateur piézoélectrique type Rosen

Le transformateur Rosen présenté ici ne dispose pas d'isolation galvanique (composant à trois électrodes). Cependant il est possible en compliquant la structure de contourner ce problème.

De façon générale, ce type de transformateur est développé pour des applications haute tension à faible courant. Par exemple, un barreau de 48mmx8mmx2,2mm excité à une fréquence de 67kHz peut donner en sortie 1000V et 5W (source GAÏA Converter).

Comme pour tous les transformateurs piézoélectriques, il est nécessaire d'alimenter ce transformateur à une fréquence permettant la résonance mécanique de la structure. Ceci s'obtient par exemple pour un fonctionnement en demi-longueur d'onde  $\lambda/2$  ou en pleine longueur d'onde  $\lambda$ . La répartition du déplacement et de la contrainte pour ces deux longueurs d'onde est représentée sur la figure 5b. Afin d'exploiter au mieux ces distributions de grandeurs mécaniques, les électrodes doivent être placées de telle sorte à maximiser la valeur moyenne de la contrainte sous l'électrode.

### 3.2. Structure multicouche [7][8]

Cette structure est utilisée en tant qu'abaisseur de tension dans des applications nécessitant plutôt des courants importants.

Dans ce type de structure le primaire et le secondaire sont polarisés en épaisseur dans le sens de la déformation de sorte que seul le mode longitudinal est mis en jeu.

Ce transformateur est réalisé par empilement de couche, le primaire étant séparé du secondaire par une couche isolante (figure 6).

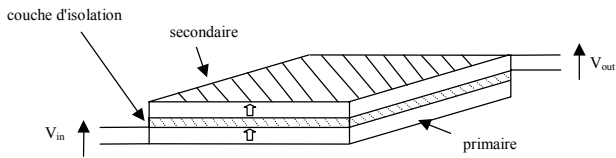


Figure 6 : Transformateur multicouche

L'un des intérêts de cette structure réside dans le bon couplage mécanique par augmentation de la surface d'échange entre le primaire et le secondaire. Un autre avantage est la minimisation des régimes transitoires. En effet l'épaisseur étant très faible (de l'ordre du millimètre) le parcours de l'onde mécanique pendant la mise en oscillation s'en trouve réduit ce qui permet d'obtenir des temps de réponse en régime transitoire du transformateur inférieurs à 500ns.

Par contre, pour minimiser les problèmes de couplage capacitif entre les électrodes primaires et secondaires dues aux surfaces très importantes en regard (cette capacité est de l'ordre de 100pF), il est nécessaire de placer un écran métallique dans la couche isolante et de le relier à un potentiel fixe.

Comme précédemment cette structure doit fonctionner à des fréquences de résonance correspondant à des vibrations en épaisseur en demi-longueur d'onde  $\lambda/2$ , ou en pleine longueur d'onde  $\lambda$ .

A titre d'exemple un transformateur de 1cmx1cmx3mm excité à 2MHz peut fournir 15V/500mA en sortie.

### 3.3. Structure circulaire [9]

C'est une nouvelle génération de transformateurs piézoélectriques qui fonctionnent suivant des déformations radiales avec une polarisation en épaisseur (figure 7). On utilise donc un mode de vibration planaire qui correspond en fait à un mode de vibration transversal plus efficace que dans la structure 1, dans la mesure où la déformation radiale se fait dans le plan.

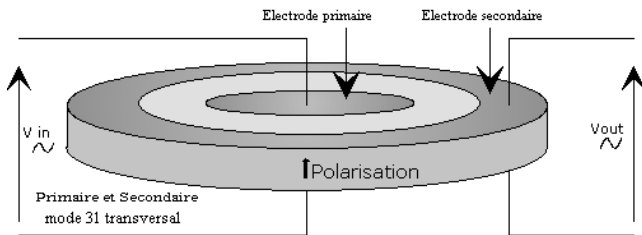


Figure 7 : Transformateur piézoélectrique circulaire

Ainsi on exploite mieux les contraintes dans le matériau. Le gain en tension peut être assez grand (10 à 20 suivant la géométrie).

La fréquence d'alimentation doit correspondre à une résonance mécanique suivant le rayon en quart de longueur d'onde  $\lambda/4$ , ou en trois quart de longueur d'onde  $3\lambda/4$ .

## IV. SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT ET CARACTERISTIQUES DES TRANSFORMATEURS PIEZOELECTRIQUES

Comme pour le transformateur électromagnétique, à partir des équations électromécaniques décrivant le système établies au paragraphe 2.2, on peut établir un schéma électrique équivalent.

### 4.1. Etablissement du schéma électrique équivalent [10][11]

Cette modélisation est réalisée en deux étapes. On établit séparément les modèles du primaire et du secondaire, ce qui revient à modéliser deux résonateurs piézoélectriques (comparable à un quartz), puis on les relie mécaniquement en considérant la continuité des efforts et des vitesses à la jonction mécanique des deux éléments. Le schéma électrique fait donc apparaître la double conversion électromécanique.

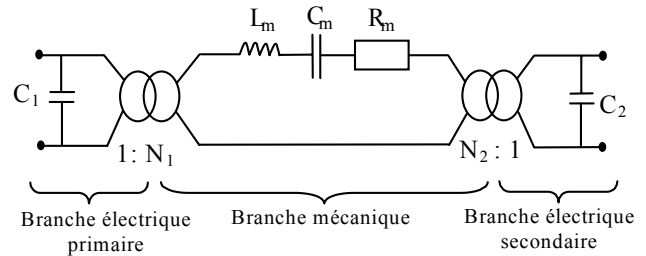


Figure 8 : Schéma électrique du transformateur

Le schéma électrique équivalent du transformateur piézoélectrique obtenu après simplification est donné figure 8. Nous y voyons apparaître 3 branches distinctes. La branche dite mécanique ou motionnelle est représentée par un circuit  $R_m L_m C_m$  série. Elle retranscrit l'oscillation mécanique du matériau ainsi que le phénomène de résonance, les grandeurs mises en jeu étant la force et la vitesse. L'expression du circuit résonant  $L_m C_m$  dépend directement de la géométrie du transformateur (dimensions position des électrodes) ainsi que du matériau utilisé. La résistance  $R_m$  tient compte des pertes mécaniques et est inversement proportionnelle au facteur de qualité mécanique du matériau  $Q$ . Les capacités d'entrée  $C_1$  et de sortie  $C_2$  retranscrivent la nature diélectrique de la structure du transformateur. Le couplage entre les parties électriques et mécaniques est représenté par les transformateurs parfaits de gain  $N_1$  et  $N_2$ .

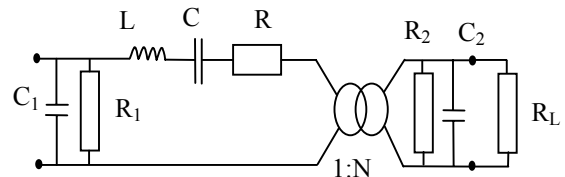


Figure 9 : Schéma électrique simplifié du transformateur

Il est classique de simplifier ce schéma (Figure 9) en regroupant les deux transformateurs parfaits en un seul de rapport  $N=N_2/N_1$  et cela en ramenant la branche mécanique au primaire, qui devient alors le circuit RLC. Les résistances  $R_1$  et  $R_2$  sont ajoutées pour tenir compte des pertes diélectriques dans les capacités  $C_1$  et  $C_2$ , et sont calculées à partir de l'angle de pertes  $\tan\delta$  du matériau.

#### 4.2. Identification des éléments du schéma électrique

La méthode d'identification consiste à réaliser deux séries de mesures. L'une est faite en mesurant l'admittance d'entrée du transformateur avec le secondaire en court-circuit, l'autre en mesurant cette fois-ci l'admittance de sortie avec le primaire en court-circuit.

En court-circuitant le secondaire du transformateur nous obtenons un résonateur mécanique. Le schéma électrique est alors uniquement composé du circuit RLC de la branche motionnelle et de la branche capacitive  $C_1$  associée à sa résistance  $R_1$ . L'admittance d'entrée  $Y_{in}=G+jB$ , où  $G$  représente la conductance et  $B$  la susceptance, de ce circuit électrique peut être représentée dans le plan de Nyquist ( $B,G$ ) et paramétrée en fréquence (figure 10). La lecture du diagramme des admittances permet d'obtenir directement la valeur des éléments  $C_1$ ,  $R_1$  et  $R$  du schéma électrique. Les valeurs de  $L$  et  $C$  se calculent à partir des fréquences de résonance série  $f_s$  et parallèle  $f_p$ .

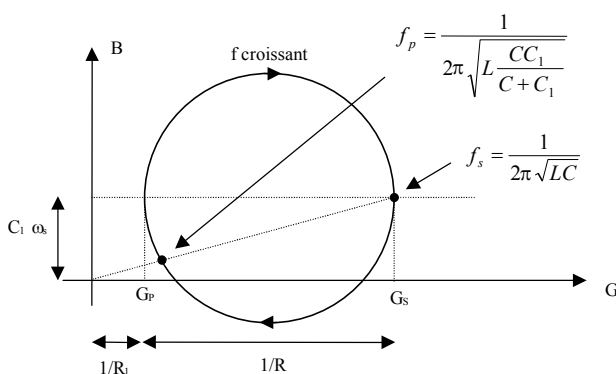


Figure 10 : Cercle de l'admittance d'entrée  $Y_{in}$

Le déroulement du second essai est identique au premier. Il permet d'obtenir à partir de l'admittance vue du secondaire la valeur du gain  $N$  du transformateur parfait et les valeurs de  $C_2$  et  $R_2$ .

#### 4.3. Caractéristiques du transformateur piézoélectrique

Nous allons présenter ici les principales caractéristiques du transformateur piézoélectrique obtenue à partir du schéma électrique. L'analyse comportementale du gain en tension, de la puissance au secondaire et du régime transitoire est faite en fonction de la fréquence d'alimentation et de la résistance de charge  $R_L$  placée au secondaire du transformateur.

##### 4.3.1. Gain en tension

La fonction de transfert en tension (Figure 11) est celle d'un filtre passe-bande. Le gain du transformateur piézoélectrique est donc très fortement dépendant de la

fréquence de fonctionnement. Pour avoir un gain maximum il faut l'alimenter à sa fréquence de résonance.

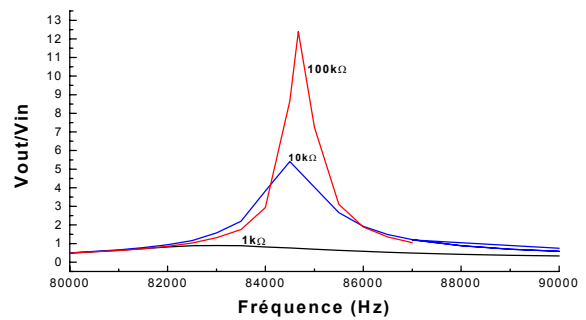


Figure 11 : Gain en fonction de la fréquence

Le gain du transformateur est également fortement dépendant de la résistance de charge  $R_L$  placée au secondaire (Fig 12). Si l'on souhaite utiliser le transformateur comme élévateur (fort gain), cela nous oblige à garder une résistance de charge élevée et constante.

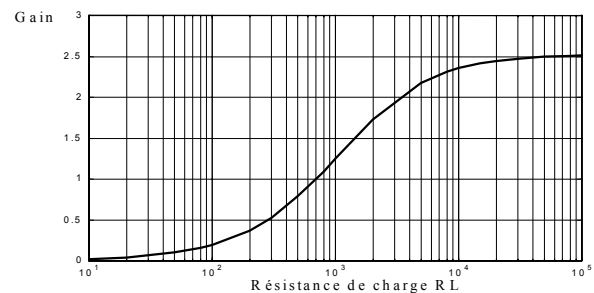


Figure 12 : Gain en fonction de la charge

##### 4.3.2. Etude de la puissance

L'expression de la puissance au secondaire du transformateur lors d'un fonctionnement à la résonance est donnée par :

$$P_2 = \frac{|V_{out}|^2}{R_L} = \frac{N^2 V_1^2}{R_L \left\{ \left( 1 + \frac{N^2 R}{R_L} \right)^2 + (C_2 N^2 R \omega_S)^2 \right\}}$$

Cette expression nous montre que le maximum de puissance au secondaire du transformateur est obtenu lorsque la résistance de charge vaut  $R_L=N^2R$  (figure 13).

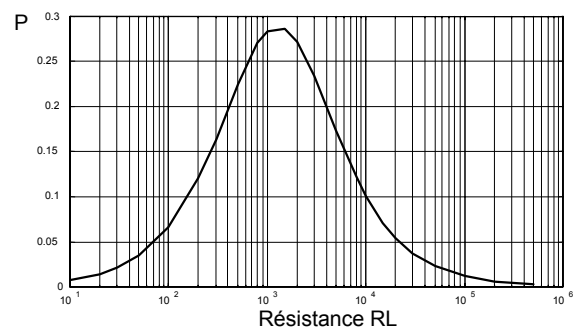


Figure 13 : Puissance en fonction de la charge

### 3.5.3. Etude du régime transitoire [12]

Dans un transformateur piézoélectrique le couplage entre le primaire et le secondaire se fait par une onde mécanique. La vitesse de cette onde acoustique est de l'ordre de  $5000\text{m.s}^{-1}$  pour le PZT, qui en comparaison à une onde électromagnétique est très lent, ce qui implique que dans ce type de transformateur les régimes transitoires ne sont pas négligeables. Dans certaines applications, on est amené à alimenter le transformateur par des salves de tensions alternatives. Il est donc nécessaire de minimiser le temps de réponse du transformateur en choisissant une structure adéquate.

La durée du régime transitoire  $t_R$  en fonction des caractéristiques du matériau est donnée par :

$$t_R = \frac{2e^2\rho}{\eta\pi}$$

où

$e$  : distance de parcours de l'onde

$\rho$  : masse volumique

$\eta$  : coefficient de viscosité du matériau

Il apparaît dans cette expression que pour diminuer le temps de réponse il faut, d'une part minimiser la distance de parcours de l'onde  $e$  (diminuer l'épaisseur) et la masse volumique  $\rho$  et d'autre part augmenter la viscosité du matériau  $\eta$ . Cette viscosité retranscrit les pertes mécaniques dans le matériau (échauffement) et l'augmentation de ce coefficient entraîne une augmentation des pertes. Il est donc nécessaire de chercher un compromis entre le temps de réponse et le rendement du transformateur.

### 4.4. Limitations pratiques

Les données précédentes ne tiennent pas compte des limitations pratiques de fonctionnement dues à différents phénomènes qu'il convient de prendre en compte sous peine de détruire la structure.

- **rigidité diélectrique** : La céramique utilisée est considérée comme un isolant possédant une rigidité diélectrique donnée par le constructeur qui conduit naturellement à une valeur limite de la tension d'utilisation,
- **champ coercitif** : Les céramiques de type PZT utilisées sont des matériaux ferro-électrique dont le cycle d'hystérésis permet de définir une valeur particulière du champ électrique (champ coercitif) au delà de laquelle le matériau se dépoliarise,
- **contrainte de dilatation maximale** : Les céramiques de type PZT sont constituées de poudres compactées et frittées qui supportent très mal les contraintes de dilatation pouvant entraîner des micro-fissures et cassure du matériau,
- **échauffement** : Les différentes sources de perte (diélectriques, mécaniques) sont à l'origine d'un échauffement de la structure. Or les propriétés piézo-électriques du matériau sont sensibles à la température avec en particulier des risques de dépoliarisation. Les capacités de refroidissement ainsi que l'environnement de la structure influent directement sur ce paramètre.

## V. APPLICATIONS

Actuellement, le transformateur piézoélectrique est principalement utilisé en élévateur de tension dans des alimentations DC/DC de faible puissance (qqe Watts). Mais une autre application prometteuse de ce type de transformateur est l'isolation galvanique des commandes de transistor de puissance.

### 5.1. Alimentation DC/DC [13][14]

Cet exemple d'application présente le transformateur piézoélectrique inséré dans un convertisseur statique (figure 14) réalisant une conversion continue-continue.

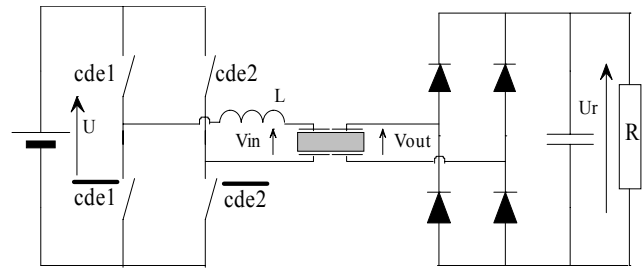


Figure 14 : Convertisseur DC/DC

La tension continue  $U$  d'entrée est ondulée par un onduleur de tension monophasé en pont complet. La commande des deux bras peut être décalée d'un angle  $\beta$  de façon à pouvoir moduler la puissance mise en jeu en jouant sur la valeur efficace de la tension primaire  $V_{in}$  du transformateur. La tension secondaire  $V_{out}$  est redressée grâce à un pont redresseur à diode débitant sur une charge RC parallèle. La fréquence de commutation de l'onduleur est ajustée de façon à faire fonctionner le transformateur à sa résonance. Les formes d'onde des tensions au primaire et au secondaire ainsi que du courant primaire pour un angle  $\beta=90$  sont présentées figures 15.

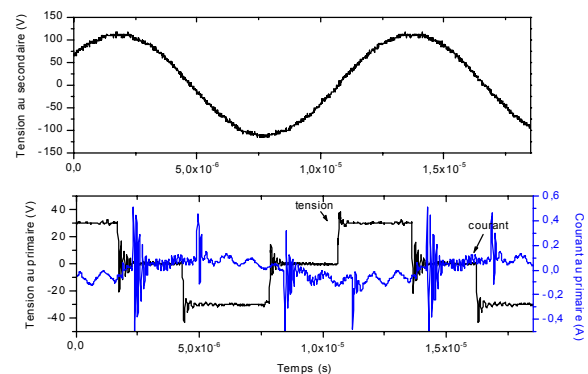


Figure 15 : Formes d'onde

Dans la mesure où le transformateur se comporte comme un filtre passe-bande, la tension obtenue au secondaire est quasi sinusoidale. Avec des niveaux de puissance mis en jeu faible et afin de garder une structure simple de convertisseur, il est possible de "violier" les règles d'interconnexion de sources, ce qui se répercute sur la

forme d'onde du courant primaire par des oscillations HF. Pour respecter les règles d'association des sources et éviter les discontinuités du courant primaire lors des commutations, il est possible d'introduire un composant inductif en série. Si cette solution est intéressante sur le plan théorique, elle nuit cependant aux objectifs de départ qui sont de supprimer tous les éléments inductifs pour des soucis de miniaturisation.

La figure 16 montre la variation de la tension de sortie en fonction de l'angle  $\beta$ .

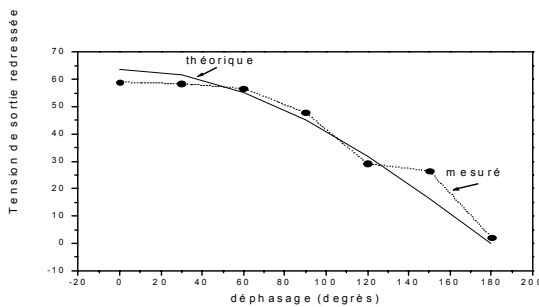


Figure 16 : Tension de sortie en fonction de  $\beta$

## 5.2. Commande rapprochée de transistor à grille isolée [15][16]

Un nouveau type de commande rapprochée a été mis au point récemment faisant intervenir le transformateur piézoélectrique comme organe d'isolation. En effet, une commande de transistor de puissance à grille isolée nécessite une forte isolation galvanique. Cette fonction est traditionnellement réalisée par des opto-coupleurs ou, pour des contraintes plus sévères, par des transformateurs d'impulsion. Le transformateur piézoélectrique trouve là une application des plus prometteuse, car il présente l'avantage de disposer d'une isolation galvanique exceptionnelle. La céramique PZT réalisant l'inter-électrode est un diélectrique de permittivité élevée, l'ordre de grandeur du champs de claquage est supérieur à plusieurs kV/mm.

Le synoptique de la commande intégrant le transformateur piézoélectrique est présenté figure 17. L'alimentation du transformateur piézoélectrique est réalisée à une fréquence fixe qui est sa fréquence de résonance. Pour transmettre le signal de commande on réalise une modulation de porteuse. Cela revient à alimenter le transformateur par des salves de tension alternative. Le signal de commande est remis en forme au secondaire par une démodulation de type détecteur d'enveloppe.

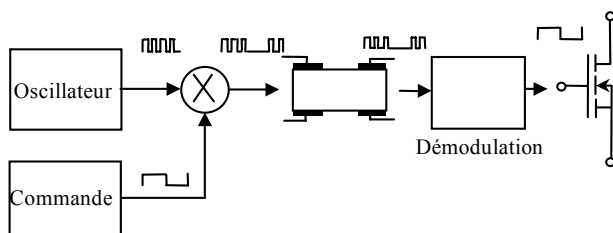


Figure 17 : Synoptique de la commande de transistor.

Les formes d'onde des tensions au primaire et au secondaire du transformateur pour un signal de commande donné sont présentées figure 18. La tension au primaire du transformateur est modulée par le signal de commande. Sur la forme d'onde de la tension secondaire, on voit apparaître la nécessité de choisir une structure de transformateur adéquate afin de minimiser les temps de retard introduit par le régime transitoire.

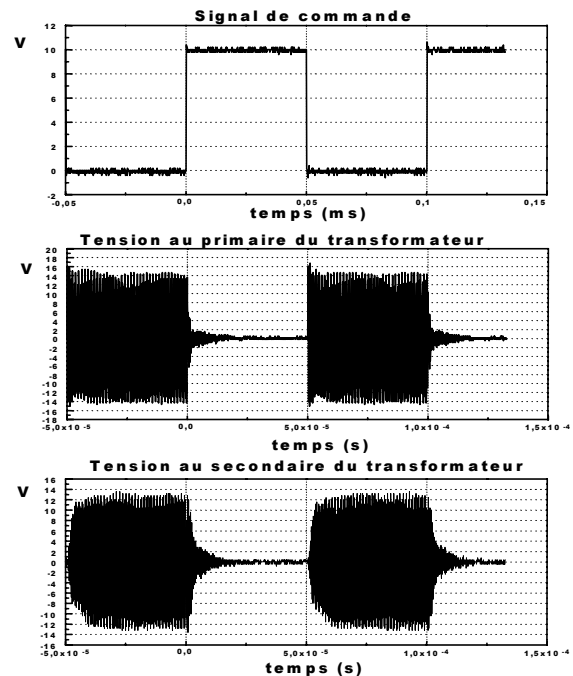


Figure 18 : Formes d'onde expérimentales

Le signal récupéré au secondaire par la détection d'enveloppe (Figure 19) présente un temps de retard. Il est dû à la bande passante du transformateur et il est de l'ordre de  $1\mu s$ . Ce temps de retard est fixe quelque soit la fréquence et le rapport cyclique du signal de commande.

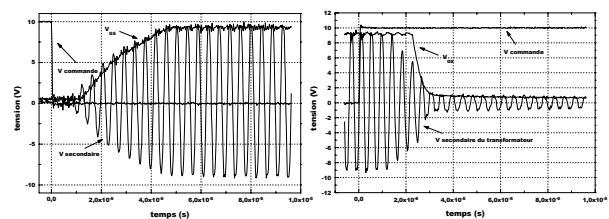


Figure 19 : Détection d'enveloppe

Le bon fonctionnement de la commande rapprochée intégrant un transformateur piézoélectrique est validé par les formes d'onde de la commutation (blocage et amorçage) d'un transistor MOS de puissance. On a représenté sur le même graphe (Figure 20) les formes d'onde du courant  $I_D$ , de la tension  $V_{DS}$  et de la tension  $V_{GS}$  lors du blocage du transistor.



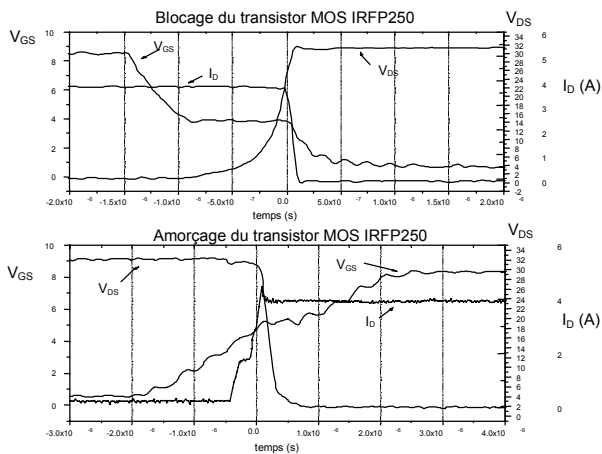


Figure 20 : Commutation d'un transistor MOS

## VI. CONCLUSION

On peut se demander quel intérêt nouveau peut apporter l'utilisation d'un transformateur piézoélectrique par rapport à un transformateur électromagnétique, tout en sachant que son utilisation comporte un certain nombre de contraintes inhérentes à son principe de fonctionnement. Les avantages sont nombreux. Tout d'abord ce transformateur fonctionne par couplage électromécanique, et non électromagnétique. Cela lui confère une immunité aux champs électromagnétiques extérieurs, et lui même ne rayonne pas de perturbation. Son insertion dans des dispositifs comme les convertisseurs statiques est donc avantageuse en terme de compatibilité électromagnétique. Toutefois des travaux plus précis sur ce point restent à être menés. Un autre intérêt est la bonne tenue en tension de claquage entre primaire et secondaire. En effet, la céramique PZT réalisant l'inter-électrode est un diélectrique de rigidité diélectrique élevée, supérieure à plusieurs kV/mm. Enfin, en terme de structure le transformateur piézoélectrique se présente comme un simple bloc uniforme de céramique. Cette caractéristique géométrique lui donne deux avantages. Le premier est que sa fabrication en grande quantité est facilitée. Le second est sa grande compacité, cela le rend particulièrement bien adapté à la réalisation d'alimentation de faible puissance très fortement miniaturisée.

## VII. REFERENCES

- [1] C.A. ROSEN, "Ceramic transformers and filters", Proc. Electronic Comp. Symp., pp 205-211, 1956
- [2] J.-P. AUBRY, "Composants piézoélectriques", Techniques de l'ingénieur E2205
- [3] Catalogue Quartz & Silice, "Céramiques piézoélectriques"
- [4] T. IKEDA, "Fundamentals of piezoelectricity", Oxford science publication, 1996
- [5] D. ROYER, E. DIEULESAINT, "Ondes élastiques dans les solides", Tome 1 et 2, Edition Masson, 1996
- [6] M. ROSSI, "Electro-acoustique", Edition Dunod, 1986

- [7] S. KAWASHIMA, "Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer", IEEE Ultrasonic Symposium, pp. 525, 1994
- [8] O. OHNISHI, "Piezoelectric ceramic for power supply operating in thickness extensional vibration mode", IEICE, Trans. Fundamentals, december, 1994
- [9] S. HALLAERT, E. SARRAUTE, "Numerical And Analytical Modeling Of The P T And Exprimental Verification", MSM 99, pp 198-201, San Juan, Puerto Rico, USA, Avril 19-21, 1999
- [10] F. MERTEN, "Etude et modélisation de transformateurs piézoélectriques", Mémoire CNAM, 1997
- [11] L. ADNOT, "Etude et insertion d'un transformateur piézoélectrique dans une alimentation DC-DC", Mémoire CNAM, 1999
- [12] M. REDWOOD, "Transient performance of piezoelectric transducer", The journal of the acoustical society of america, april 1961
- [13] S. HALLAERT, E. SARRAUTE, F. COSTA, L. ADNOT, " Transformateur piézoélectrique : la solution piézoélectrique", MGE 2000
- [14] T. ZAITSU, T. INOYE, O. OHNISHI, Y. SASAKI, "2MHz power converter with piezoelectric ceramic transformer", IEICE TRANS ELECTRON, vol E77C, n°2, pp 280-286, 1996
- [15] D. VASIC, "Commande rapprochée des transistors à grille, isolée par transformateur piézoélectrique", Rapport de D.E.A. ENS Cachan, 2000
- [16] D. VASIC, F. COSTA, E. SARRAUTE, "Commande de transistor à grille isolée par transformateur piézoélectrique", EPF 2000