



HAL
open science

Caractérisation électromécanique de structures piézoélectriques bimorphes par mesure de force de blocage

Seifeddine Maaroufi

► **To cite this version:**

Seifeddine Maaroufi. Caractérisation électromécanique de structures piézoélectriques bimorphes par mesure de force de blocage. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280190

HAL Id: hal-01280190

<https://hal.science/hal-01280190>

Submitted on 29 Feb 2016

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.

Caractérisation électromécanique de structures piézoélectriques bimorphes par mesure de la force de blocage

Seifeddine Maaroufi¹, Fabien Parrain¹, Elie Lefeuvre¹,
Bertrand Boutaud², Renzo Dal Molin²

¹IEF, Institut Electronique Fondamentale, Univ. Paris Saclay, UMR5516, 91405 Orsay

²SORIN CRM, Dép. Recherche Avancée, 92143 Clamart

Seifeddine.maaroufi@u-psud.fr

Abstract

Characterization of Piezoelectric Bimorphs by the Way of Blocking Force Investigation

In this paper we propose an approach to characterize and so to study the reliability of piezoelectric structures and more precisely energy harvesting micro-devices dedicated to autonomous active medical implants (new generation pacemakers). The structure under test is designed as a bimorph piezoelectric cantilever with a seismic mass at its tip. Good understanding of material aging and mechanical failure is critical for this kind of system. To study the reliability and durability of the piezoelectric part we propose to establish a new accelerated testing methodology and an associated test bench where the environment and stimuli can be precisely controlled over a wide period of time. This will allow the identification of potential failure modes and the study of their impacts by the way of direct mechanical investigation based on stiffness and blocking force measurements performed periodically.

1. Introduction

Les progrès récents en biotechnologie et microfabrication ont permis le développement d'une grande variété de systèmes miniaturisés implantables. Leurs applications peuvent aller de la surveillance et du diagnostic aux traitements localisés. Tous ces systèmes fortement intégrés comprennent, entre autres, des composants électroniques et nécessitent une source d'énergie pour être alimentés. Même si l'utilisation des piles ou de batteries est toujours possible, leur remplacement n'est pas une procédure simple et souhaitable. Ceci est particulièrement le cas avec les stimulateurs cardiaques sans sonde directement implantés dans le ventricule du patient (Figure 1). Le recours à un dispositif de récupération d'énergie est une alternative intéressante pour parer aux batteries traditionnelles rendant les systèmes en question entièrement autonomes tout en permettant une miniaturisation plus poussée et des performances accrues.

Des études universitaires et industrielles ont montré par différentes preuves de concept la viabilité de cette approche, en particulier pour les stimulateurs cardiaques sans sondes [1]. Différents principes et architectures ont été élaborés et évalués dans la littérature [2]. A titre d'exemple, certains d'entre eux utilisent la transduction électrostatique [3] [4], la variation de la pression sanguine [5] [6] ou des dispositifs piézoélectriques comme les structures étudiées ici et développées par la compagnie SORIN CRM (Cardiac Rhythm Management).

Dans tous les cas, l'objectif est de maximiser la densité de puissance, ce qui implique l'utilisation des différents matériaux au maximum de leur potentiel. Toutefois, la fiabilité à long terme de ces dispositifs et des matériaux qui les constituent (notamment les céramiques piézoélectriques) est largement méconnue aujourd'hui et leur étude détaillée est nécessaire pour passer des preuves de concept à un prototype fonctionnel et ainsi à l'industrialisation. En effet, la connaissance de la durée de vie des matériaux, des composants et de l'assemblage est nécessaire pour assurer le bon fonctionnement à long terme de l'implant, et optimiser ses performances. Dans le domaine des implants médicaux comme les stimulateurs cardiaques, leur fiabilité à long terme est cruciale car elle a un impact direct sur la vie du patient.

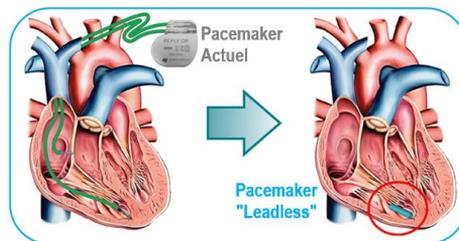


Figure 1. Pacemaker actuel /Pacemaker sans sonde.

Pour étudier les propriétés électromécaniques et donc la fiabilité d'un dispositif piézoélectrique à long terme, plusieurs approches sont possibles. La plus commune est certainement la spectroscopie d'impédance qui permet d'extraire à partir de la mesure d'impédance/admittance les principaux paramètres électromécaniques (fréquences de résonance, facteur de qualité Q, coefficient de couplage [7]). Néanmoins, en raison de l'amplitude d'excitation généralement faible, appliquée par les analyseurs d'impédance et du formalisme sous-jacent (hypothèse petit signaux), cette méthode ne permet pas d'investiguer sur le comportement en grand débattement/mouvement et ainsi de mettre en évidence les non-linéarités piézoélectriques ou mécaniques qui pourraient apparaître.

Dans notre cas, nous proposons un banc de test de vieillissement massivement parallèle (jusqu'à 36 structures pourraient être testées simultanément), où un pot vibrant va actionner le dispositif sous test par sa base. Grâce à un système associé à chaque structure sous test, il est possible d'extraire la raideur de la structure, de mesurer la force de réaction pour un mouvement donné, mais également la force de blocage pour une tension d'excitation imposée. Ceci permet d'extraire périodiquement les paramètres électromécaniques du dispositif sous test (principalement le module d'Young, le coefficient piézoélectrique d_{31}) et de

suivre leur évolution afin de mettre en exergue l'évolution du vieillissement de la structure ou des matériaux (ruptures, fissures, délamination, dépolarisation ...).

2. Architecture du récupérateur d'énergie

Les structures étudiées sont des bimorphes piézoélectriques de forme rectangulaire constituées d'un sandwich de plusieurs couches. Leurs dimensions dans l'espace sont de 30 millimètres de longueur, 5 millimètres de large et quelques centaines de microns d'épaisseur. Elles se composent d'une couche structurelle en métal de quelques dizaines de microns d'épaisseur située entre deux films de PZT (titanate zirconate de plomb) d'une centaine de micromètres d'épaisseur chacune. Les deux faces sont métallisées afin de collecter les charges électriques produites et de permettre la prise de contact. Une masse sismique de quelques grammes en tungstène est placée à l'une des extrémités de la structure alors que l'autre est encastrée (Figure 2).

Dans le cadre de l'application finale, la structure va fonctionner par effet inertiel : lors des battements cardiaques, les mouvements de la masse sismique vont induire des contraintes successives d'allongement et de compression au sein des couches PZT qui permettent une récupération d'énergie électrique du domaine mécanique vers le domaine électrique par couplage piézoélectrique.

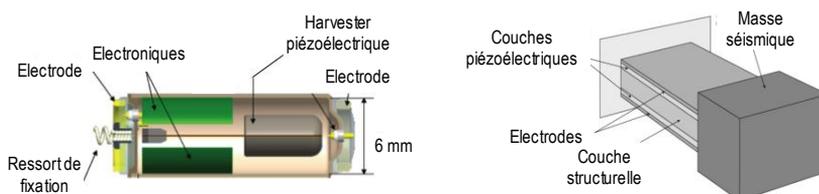


Figure 2. Récupérateur d'énergie utilisant une structure piézoélectrique bimorphe intégré au sein d'un implant cardiaque de dernière génération (a). Détails de la structure employée (b).

3. Banc test de vieillissement accéléré

Le banc de test proposé se compose principalement d'un pot vibrant qui peut actionner simultanément jusqu'à 36 structures sur de longues périodes de temps (jusqu'à 10^9 cycles). Le banc simule la même déformation mécanique ainsi que les mêmes contraintes électriques que lors de l'utilisation réelle mais à des fréquences beaucoup plus élevées afin d'accélérer le vieillissement (de 100 à 200 Hz). Ainsi, compte tenu que la fréquence de fonctionnement du dispositif dans l'environnement réel qui est aux alentours de 10 Hz, le vieillissement est accéléré d'un facteur compris entre 10 et 20. Si nécessaire, celui-ci peut être encore accéléré en utilisant de grands débattements. Pour être dans des conditions aussi proches que celles de la réalité, les structures testées sont placées dans un environnement maintenu à une température de 37°C qui est la température du corps humain.

Pour contrôler l'amplitude des déformations mécaniques induites, le mouvement du pot vibrant est continuellement mesuré via un système de triangulation laser ayant une

répétabilité de l'ordre de 100 nm (série LK du fabricant Keyence). De manière à imposer la déformation mécanique correspondant au premier mode de flexion d'une poutre encastrée/libre comme lors de l'utilisation finale, l'extrémité de la structure (sans la masse sismique qui est toujours omise durant les tests) sera maintenue fixe verticalement par un système de pince qui permet néanmoins la rotation dans toutes les directions grâce à un contact sphère/plan (contact hertzien). La force de contact entre les billes et la structure est assurée par un ressort précisément taré (Figure 3).

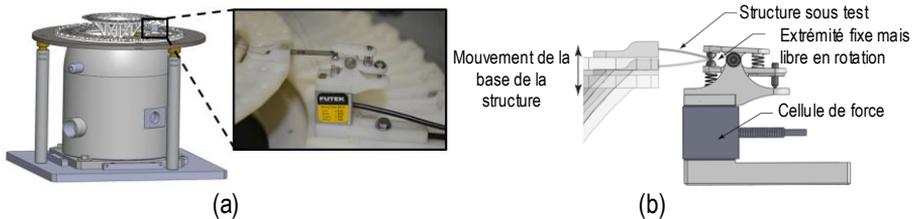


Figure 3. Vue globale du banc de test qui permet de tester simultanément jusqu'à 36 récupérateurs (a). Système de pincement qui permet de maintenir l'extrémité de la structure testée fixe verticalement (b).

Ici la force de contact des billes avec la surface de la structure (force notée F_B) doit être suffisante pour assurer le contact durant toutes les phases du mouvement sans pour autant l'endommager. Ainsi, la force F_B doit répondre à la condition suivante :

$$F_B > k_0 \cdot \delta_{max} \quad (1)$$

Où k_0 est la raideur de la structure testée et δ_{max} l'amplitude maximale des mouvements (déflexion maximale du bimorphe). Du fait de l'existence d'un seuil minimal, il serait tentant d'utiliser des ressorts ayant une grande raideur afin d'éviter tout problème. Néanmoins, il convient de limiter F_B afin de ne pas endommager la surface de l'échantillon par poinçonnage (pénétration des billes dans la structure). Dans notre cas, les billes utilisées ont un diamètre de 3 mm et sont en acier inoxydable trempé et rectifié. En tenant compte de la raideur des ressorts utilisés, nous avons estimé la profondeur de pénétration à moins de 500 nm, ce qui est négligeable compte tenu de l'épaisseur des différentes couches.

Pour chaque structure, le système de pincement est lui-même monté sur une cellule de force de 50 gf (LSB200 de Futek), qui permet de mesurer la force de réaction induite sur le support. Chaque cellule de force est associée à une électronique de lecture (figure 4) réalisée au sein du laboratoire et basée sur l'emploi d'un convertisseur AD7780 (résolution 24 bits) du fabricant Analog Devices interfacé via un microcontrôleur PSOC du fabricant Cypress. En accord avec les données du constructeur, ce convertisseur Sigma Delta ($\Sigma\text{-}\Delta$) a une résolution de 18,8 bits effectifs (gain du PGA à 128V/V, vitesse d'échantillonnage de 10 SPS). Compte tenu de la sensibilité de la cellule de force employée (2 mV/V pleine échelle), la limite de détection est meilleure que 1 mgf ($\sim 10 \mu\text{N}$), ce qui permet d'entrevoir des caractérisations mécaniques très précises. En effet, compte tenu de la raideur typique des structures testées, cette limite de détection correspond à un mouvement de la structure de l'ordre de 30 nm.

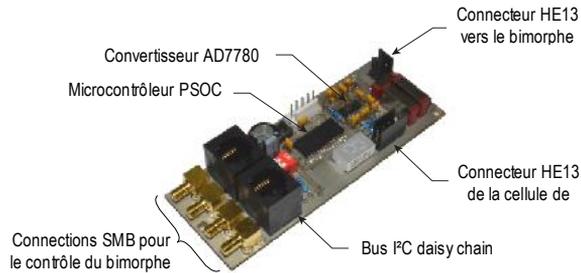


Figure 4. Carte électronique associée à chaque structure pour leur pilotage et l'interfaçage de la cellule de force.

La majorité des pièces mécaniques qui composent le système ont été réalisées par stéréolithographie qui permet d'obtenir des éléments non conducteurs, résistants et légers. Ce dernier point est particulièrement souhaitable dans la mesure où le poids des pièces en mouvement limite la fréquence maximale des oscillations imposées par le pot vibrant pour une amplitude donnée (l'amplitude typique crête à crête des mouvements visés est de l'ordre de 2 mm).

Afin d'être le moins invasif possible, le système de pincement associé avec la cellule de force doit présenter une raideur verticale la plus grande possible (théoriquement infinie pour être parfait). Dans notre cas, la raideur de cet ensemble a été évaluée expérimentalement à plus de 2.5 kN.m^{-1} . Cette valeur est comparée à la raideur des structures piézoélectriques qui est de l'ordre de 350 N.m^{-1} , ce qui nous permet de conclure que l'influence de celui-ci est plus que négligeable et n'influe pas ou très peu sur les mesures.

4. Méthodologie d'investigation électromécanique

Tout au long du test en vieillissement, le pot vibrant est arrêté périodiquement (à chaque million de cycles) pour déterminer les caractéristiques électromécaniques des structures par le biais de deux mesures quasi-statiques bien distinctes :

- Détermination de la raideur propre de la structure à champ nul (structures court-circuitées) par mesure de la force de réaction de l'extrémité maintenue fixe pour un mouvement de la base connu.
- Détermination de la force de blocage à l'extrémité de la structure pour une tension appliquée connue alors que la base est maintenue fixe.

La première mesure nous renseigne directement sur les paramètres mécaniques intrinsèques de la structure comme son module d'Young équivalent mais également des éventuels dommages qui peuvent apparaître (fissures, délaminations ...). La seconde, compte tenu des informations données par la première, nous renseigne directement sur le coefficient piézoélectrique transversal d_{31} des couches piézoélectriques en présence (les couches piézoélectriques sont polarisées verticalement).

Ces deux types de mesure imposent d'utiliser le pot vibrant comme actionneur statique, ce qui interdit d'utiliser l'amplificateur de puissance fourni par le constructeur (B&K)

et qui lui est normalement associé (celui-ci a une fréquence de coupure de quelques Hz). Afin de remédier à ce problème, nous avons réalisé un amplificateur de puissance propriétaire conçu et réalisé au sein du laboratoire.

4.1 Mesure de la force de blocage à déplacement imposé

Comme expliqué précédemment, le module d'Young équivalent E_{eq} est mesuré via la mesure de la force de réaction à l'extrémité de la structure pour un mouvement de la base imposé. Ici, le système de pincement n'est pas sans effet et les deux points de contact sphère/plan impliqués induisent un couple de rappel M qui modifie la raideur effective de la structure k_{eff} qui est mesurée (figure 5).

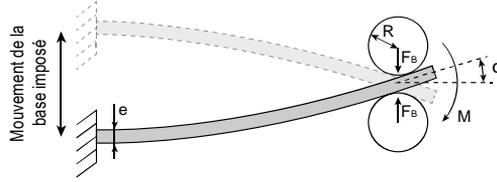


Figure 5. Mesure de la force de blocage à déplacement de la base imposé

Ainsi, dans le cas de petits débattements, le couple de rappel M peut être exprimé comme suit:

$$M(\alpha) = \frac{F_B \cdot (2.R + e) \cdot \tan(\alpha)}{\cos(\alpha)} \approx F_B \cdot (2.R + e) \cdot \tan(\alpha) \quad (2)$$

Où α , e , F_B , R sont respectivement l'angle de rotation de l'extrémité par rapport à l'horizontal, l'épaisseur totale de la structure, la force de pincement et le diamètre des billes. En utilisant le formalisme d'Euler-Bernoulli (la structure est assimilée à une poutre encastree/libre menée par rapport aux autres dimensions) [9], il est possible de calculer la raideur effective k_{eff} .

$$k_{eff} = k_0 \cdot \left[1 - \frac{9}{4} \cdot \frac{F_B \cdot (2.R + e)}{L^2 \cdot k_0 + 3 \cdot F_B \cdot (2.R + e)} \right]^{-1} \quad (3)$$

Où k_0 est la raideur intrinsèque de la structure. On notera que pour F_B grand, la raideur k_{eff} tend, comme attendu, vers celle d'une poutre à encastrement simple dont la rotation est bloquée ($k=4 \cdot k_0$). Dans notre cas, compte tenu des ressorts utilisés, la raideur effective des structures testées est augmentée d'environ 10% par le couple de rappel et il convient d'en tenir compte afin d'extraire leur module d'Young équivalent E_{eq} tel que :

$$E_{eq} = \frac{k_0 \cdot L^3}{3 \cdot I} \quad (4)$$

Où I est le moment quadratique de la structure, L sa longueur effective (longueur entre son encastrement et le point de pincement) et k_0 la raideur intrinsèque de la structure calculée à partir de (3) après avoir déterminé expérimentalement k_{eff} .

4.1 Mesure de la force de blocage à tension imposée non nulle

Pour ce qui est du coefficient piézoélectrique d_{31} , il peut être déterminé à partir de la mesure de la force de blocage à l'extrémité de la structure pour une tension appliquée connue (Figure 6).

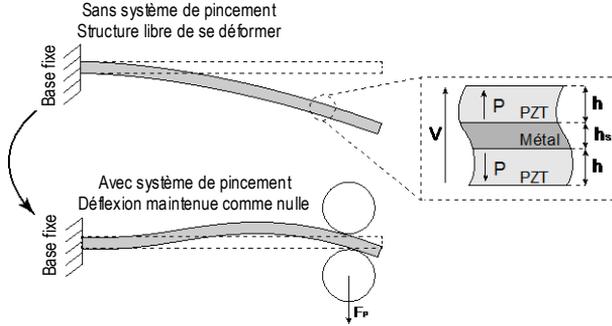


Figure 6. Mesure de la force de blocage à tension imposée.

Comme montré dans [8], pour un bimorphe de section symétrique tel est le cas ici, en ne tenant compte que l'effet piezoélectrique (l'effet de la force de blocage n'est pas pris en compte pour le moment), l'inverse du rayon de courbure λ est constant quelle que soit la position le long de la structure et est égal à :

$$\lambda = -\frac{12.d_{31} \cdot (h + h_s) \cdot s_s}{2h \cdot (3h_s^2 + 6.h.h_s + 4.h^2) \cdot s_s + h_s^3 \cdot s} \cdot V \quad (5)$$

Où V , h , s , h_s , s_s sont respectivement la tension appliquée au bimorphe, l'épaisseur et la souplesse des deux couches PZT, l'épaisseur et la souplesse de la couche structurale métallique. Ici, la valeur négative λ sous-entend que la structure fléchit vers le bas compte tenu de la polarisation des deux couches piezoélectriques. En tenant compte des conditions d'encastrement (déflexion et dérivée de cette dernière nulle à la base), il est alors facile de déterminer la déflexion δ au bout de la structure quand celle-ci est libre :

$$\delta = \lambda \cdot L^2 \quad (6)$$

L'expression de la force de blocage F_p est alors déterminée en appliquant le principe de superposition qui consiste à considérer que la force réaction du support de pincement est telle que la déflexion à ce niveau est maintenue comme nulle. Soit encore :

$$F_p = \delta \cdot k_{eff} = \lambda \cdot L^2 \cdot k_{eff} \quad (7)$$

Cette dernière expression permet alors de déterminer la valeur de d_{31} compte tenu de la valeur de k_{eff} déterminée précédemment par mesure de la force de blocage à déplacement imposé.

$$d_{31} = - \frac{2h_s(3h_s^2 + 6h_s h_s + 4h_s^2) \cdot s_s + h_s^3 \cdot s}{12 \cdot (h + h_s) \cdot s_s \cdot L^2 \cdot k_{eff}} \cdot \frac{F_p}{V} \quad (8)$$

5. Résultats expérimentaux

Un certain nombre de tests encore préliminaires ont été effectués en utilisant des structures provenant du fabricant PiezoSystems. Un ensemble de mesures de la force de réaction pour un déplacement donné de la base et la force de blocage pour une tension d'excitation donnée est représentée sur la Figure 7.

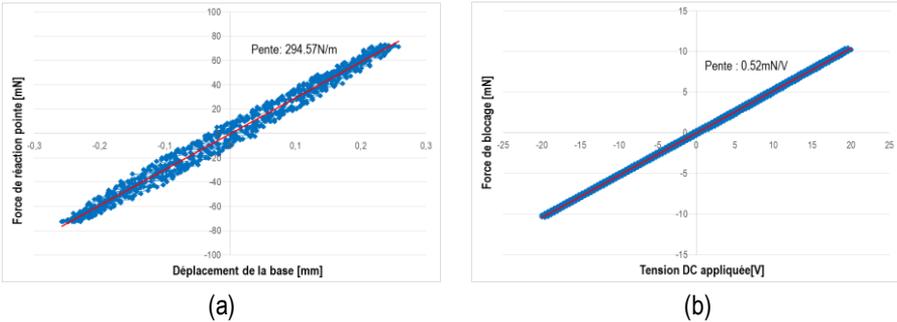


Figure 7. Force de blocage en fonction du déplacement de la base (a). Force de blocage à tension imposé et base fixe (b).

La raideur de la structure et le coefficient de force de blocage ont été extraits par ajustement de courbe et comparés aux valeurs théoriques calculées en utilisant les paramètres matériau fournis par le fabricant. Toutes ces données sont résumées dans le tableau 1 ci-dessous:

Tableau 1. Valeurs expérimentales comparées aux valeurs théoriques

Paramètres	Théorie	Mesures	Ecart
Raideur structure [N.m ⁻¹]	359	294 ± 10	19,7%
Coefficient force de blocage [mN.V ⁻¹]	0,618	0,52 ± 0.05	17,1%
Coefficient piézoélectrique transverse d ₃₁ [pC/N]	-320	-329 ± 40	2,7%

Les différentes courbes ont été tracées après plusieurs cycles de chargement et mettent en évidence l'apparition d'un léger cycle d'hystérésis. Ceci pourrait être expliqué, entre autres, par les dérives et l'éventuel frottement sec existant entre les billes et la surface de la structure. En ce qui concerne la variation théorique de la raideur à l'égard de la force de pincement, ce phénomène ne peut pas être vérifié en raison de l'incertitude sur la longueur libre de structure qui joue un rôle crucial dans le calcul (la raideur est proportionnelle à L⁻³).

6. Conclusion

Cet article présente un banc de test de vieillissement massivement parallèle qui permet d'investiguer sur la fiabilité des micro-dispositifs de récupération d'énergie

piézoélectriques (jusqu'à 36 dispositifs testés simultanément). L'intégrité mécanique des structures, mais aussi l'évolution du vieillissement des différents matériaux et assemblages peuvent être suivis par le biais d'une investigation mécanique directe basée sur la mesure de la raideur à champ nul et de la force de blocage. Ces mesures sont rendues possibles via un système de maintien jusqu'alors inédit qui est utilisé également pour imposer aux structures les déformations équivalentes à celles qu'elles subiront lors de l'utilisation finale. Cette démarche nous permet en particulier d'étudier le comportement en grand débattement à la différence de la spectroscopie d'impédance couramment utilisée pour ce type de système tel que rapporté dans la littérature. Cependant, la méthode présentée ici ne permet pas d'obtenir le module d'Young de chaque matériau composant la structure, mais seulement la valeur effective de la structure globale. De même, la spectroscopie d'impédance est toujours nécessaire si la connaissance de la permittivité électrique est requise. Malgré cela, les résultats préliminaires réalisés sur des structures non-endommagées montrent que les valeurs expérimentales et celles prévues sont proches démontrant la pertinence et l'efficacité de cette méthode de caractérisation.

Les travaux futurs se concentreront sur l'analyse de l'impact du système de pincement en particulier sur la surface de la structure qui pourrait être endommagée par le contact sphère/plan. Un effort particulier sera également fait pour automatiser les différentes mesures afin d'étudier, pour cette fois, la fiabilité à long terme d'un lot complet de 36 structures.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet ANR LAUREAT soutenu par l'Agence Nationale de Recherche sous la référence ANR-14-CE17-0010.

Bibliographie

- [1] Deterre M, Lefeuvre E, Dufour-Gergam E: 2012 *Smart Materials and Structures* 21.
- [2] Swee-Leong Kok: *Sustainable Energy Harvesting Technologies - Past, Present and Future*, December 2011, 210.
- [3] Mitcheson P D, Green TC, Yeatman E M: 2007 *Microsystem Technologies* 13 1629.
- [4] Meninger S, Mur-Miranda J O, Amirtharajah R, Chandrakasan A P, Lang J H: 2001 *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 9 64.
- [5] Horowitz S B, Sheplak M, Cattafesta L, Nishida T: 2006 *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16 174.
- [6] Iizumi S, Kimura S, Tomioka S, Tsujimoto K, Uchida Y, Tomii K, Matsuda T, Nishioka Y: 2011 *Euroensors XXV Procedia Engineering* 25 187.
- [7] Barsoukov E, Macdonald J R: *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, Second Edition (John Wiley & Sons, Inc., Publication).
- [8] Dunsch R, Breguet J M: 2006 *Sensors and Actuators A* 134 436
- [9] Kwon Y W, Bang H C: *The Finite Element Method Using MATLAB*, Second Edition (CRC Mechanical engineering series)