



HAL
open science

Qualité d'un micro-convertisseur mécano-électrique en vue d'une application de récupération d'énergie

Hichem Nouria, Ludek Heller, Bruno Cavallier, Emmanuel Foltete, Laurent Hirsinger, Sylvain Ballandras

► To cite this version:

Hichem Nouria, Ludek Heller, Bruno Cavallier, Emmanuel Foltete, Laurent Hirsinger, et al.. Qualité d'un micro-convertisseur mécano-électrique en vue d'une application de récupération d'énergie. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-00019992

HAL Id: hal-00019992

<https://hal.science/hal-00019992>

Submitted on 28 Apr 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Qualité d'un micro-convertisseur mécano-électrique en vue d'une application de récupération d'énergie

Hichem Nouira⁽¹⁾, Ludek Heller⁽¹⁾, Bruno Cavallier⁽²⁾,
Emmanuel Foltête⁽¹⁾, Laurent Hirsinger⁽¹⁾, Sylvain Ballandras⁽²⁾

Institut FEMTO-ST,

⁽¹⁾ Dept LMARC, 24 Chemin de l'Épitaube F-25000 Besançon, France

⁽²⁾ Dept LPMO, 32 Avenue de l'Observatoire F-25044 Besançon Cedex, France

laurent.hirsinger@univ-fcomte.fr

Résumé :

Ce travail s'inscrit dans le cadre général de l'étude et de la conception de micro-convertisseurs d'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique utilisant des matériaux piézoélectriques. Dans cet article, le micro-convertisseur étudié est constitué d'une poutre assemblée par 4 vis à son encastrement autour de matériaux piézoélectriques. Son comportement vibratoire non linéaire –évolutions de sa fréquence propre et de son amortissement modal en fonction de l'amplitude de vibrations- est étudié dans l'objectif de le qualifier. Pour cela, un dispositif expérimental sous pression d'air variable et un traitement temps-fréquence utilisant la transformée en ondelettes sont développés. Il est montré que cette analyse est rapide et intéressante pour qualifier ces micro-convertisseurs.

Abstract :

This work lies within the general scope of the study and the design of micro-converters of vibration mechanical energy in electric power using piezoelectric materials. In this article, the studied micro-converter consists in a beam assembled by 4 screws at its clamping around piezoelectric materials. Its nonlinear vibration behavior -evolutions of its eigen frequency and its modal damping according to the amplitude of vibrations- is studied in the objective to qualify it. For that, an experimental device under of variable air pressure and a time-frequency treatment using the ondelette transformation are developed. It is shown that this analysis is fast and interesting to qualify these micro-converters.

Mots clefs :

**Récupération d'énergie mécanique vibratoire ; Microsystème ;
Caractérisation expérimental ; Transformée en ondelettes**

1 Introduction

Depuis quelques années, il y a un intérêt croissant pour le domaine des capteurs miniaturisés et leurs applications, par exemple, comme implants médicaux, capteurs enfouis dans les bâtiments etc... Dans ce domaine, un aspect semble avoir été oublié : il s'agit de la manière d'alimenter en électricité ces capteurs et leur électronique associée [1]. L'apport externe de la puissance électrique par des sources conventionnelle via des fils d'alimentation ou des réserves de puissance telles que des piles est une manière de répondre au besoin. Une autre voie très intéressante et prometteuse consiste à utiliser l'énergie mécanique vibratoire (ou des mouvements du corps humain) qui est toujours disponible en grande quantité dans l'environnement de certain capteur. Il s'agit alors de convertir cette énergie mécanique en énergie électrique à l'aide d'une petite génératrice. Pour des équipements de petite taille, des petites génératrices électromagnétiques sont déjà disponible dans le commerce. L'exemple le plus répandu est celui des montres Kinetic™ de la marque SEIKO qui utilise une génératrice classique à aimant miniaturisée. D'autres méthodes de génération de

courant électrique employant des matériaux piézoélectriques pour réaliser la conversion mécano-électrique d'énergie sont aujourd'hui étudiées [1][2][3][4].

Ce travail fait partie de ces nouvelles études. Sa finalité est de réaliser une petite génératrice de courant électrique destinée à remplacer des piles pour des systèmes qui nécessitent un stockage provisoire de l'énergie pour des applications ponctuelles (par exemple pour des télécommandes nécessitant un apport ponctuel de l'énergie pour transférer une information) voire de très longue durée (par exemple pour des capteurs autonomes abandonnés dans l'environnement). Dans une première partie, cet article présente différentes architectures de micro-convertisseur d'énergie utilisant des matériaux piézoélectriques pour la conversion mécano-électrique. Une deuxième partie est consacrée à la qualité de ces micro-convertisseurs, et notamment, à la caractérisation des sources de perte d'énergie dans ces architectures. Un dispositif expérimental de caractérisation sous pression d'air variable et une nouvelle méthode d'identification des comportements vibratoires non linéaires par transformée en ondelettes sont présentés. Un exemple de caractérisation d'une architecture particulière est ensuite présenté. Les évolutions de sa fréquence de résonance et de son amortissement modal (qui représente la dissipation d'énergie) sont déterminés, et, ils permettent de qualifier la qualité de ces micro-convertisseurs.

2 Micro-convertisseur d'énergie mécano-électrique

Actuellement, deux architectures de micro-convertisseur utilisant des matériaux piézoélectriques s'opposent (cf. figure 1). Une architecture bimorphe où la poutre est recouverte d'un film mince de matériaux piézoélectriques (cf. figure 1a) [5], et, une architecture où la poutre est bridée en sandwich entre deux matériaux piézoélectriques à son encastrement (cf. figure 1b) [4]. La première architecture résulte d'une technique de fabrication issue de la microélectronique (par exemple par pulvérisation cathodique), alors que la deuxième, est un assemblage traditionnel (par vissage ou par collage) de matériaux massifs (même amincis).

Le micro-convertisseur fonctionne de la manière suivante : l'énergie mécanique est fournie par les mouvements ou les vibrations mécaniques de son boîtier. La poutre est excitée selon son premier mode propre via les forces inertielles exercées sur elle. Vibrant en flexion, elle sollicite alternativement les matériaux piézoélectriques qui convertissent de manière dynamique l'énergie élastique en électricité disponible à leurs électrodes.

Un bon rendement de conversion est assuré par des matériaux ayant un bon facteur de qualité (peu dissipatif), et, une bonne efficacité de conversion est obtenue avec des matériaux piézoélectriques possédant des facteurs élevés de couplage mécano-électrique [5][6]. Comme les matériaux massifs (même amincis) ont en général de meilleurs facteurs de qualité et des propriétés garanties par rapport aux matériaux élaborés par des techniques de fabrication issues de la microélectronique, l'architecture assemblée de la figure 1b est de ce point de vue meilleure que l'architecture bimorphe présentée en figure 1a.

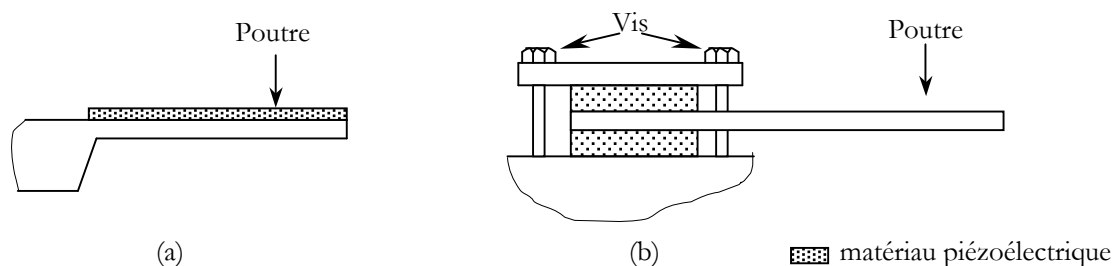


FIG. 1 – Architecture de micro-convertisseur utilisant une poutre encastree :
a) structure bimorphe, b) structure assemblée

Pour ces architectures, les sources de pertes d'énergie sont bien identifiées. Il s'agit :

- du frottement fluide dû aux vibrations de la poutre dans l'air ambiant,
- du frottement sec à l'interface entre la poutre (qui se déforme) et les matériaux en contact avec elle,
- du rayonnement d'énergie vibratoire par l'encastrement,
- de la dissipation intrinsèque dans les matériaux utilisés.

3 Caractérisation expérimentale d'une structure assemblée

Dans cette partie, nous nous proposons de quantifier les différentes sources de pertes d'énergie dans le micro-convertisseur proposé en figure 1b . Un dispositif expérimental de caractérisation sous vide d'air a été mis au point (cf. figure 2) pour s'affranchir des pertes par frottement avec l'air et faire ressortir les autres sources de pertes. Deux caractérisations ont été réalisées, l'une, par une approche pas à pas qui correspond à un balayage en fréquence d'une excitation sinusoïdale, et l'autre, par une approche temps-fréquence utilisant la transformation en ondelettes à partir de la réponse à un lâcher.

3.1 Dispositif expérimental sous pression d'air variable

Le dispositif expérimental utilisé est présenté en figure 2. Il est composé :

- du micro-convertisseur instrumenté par un accéléromètre au niveau de l'encastrement et un vibromètre laser pointé sur l'extrémité de la poutre (mesure de vitesse),
- d'un excitateur électromagnétique pour faire vibrer la poutre,
- d'une cellule à pression d'air variable constituée d'un grand hublot, d'une pompe, d'une vanne, d'un manomètre, d'un connecteur électrique...permettant de l'affranchir du frottement fluide.

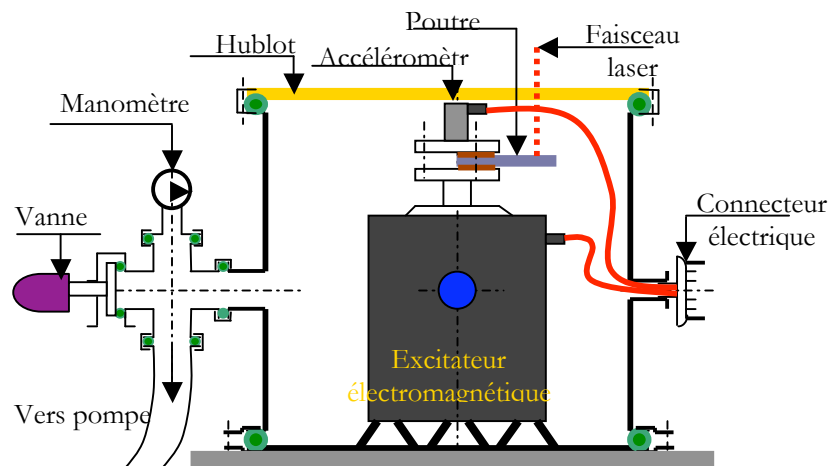


FIG. 2 – Schémas du dispositif expérimental.

3.2 Caractérisation du comportement vibratoire non-linéaire

Le comportement dynamique d'une structure faiblement non-linéaire se traduit par une dépendance de la fréquence et de l'amortissement à l'amplitude des vibrations. Sur le micro-convertisseur, des caractérisations sous excitation sinusoïdale d'amplitude constante et fréquence variable ont été réalisées dans un premier temps. Il a été identifié un comportement non linéaire en présence d'air (ce qui est bien connu) mais aussi

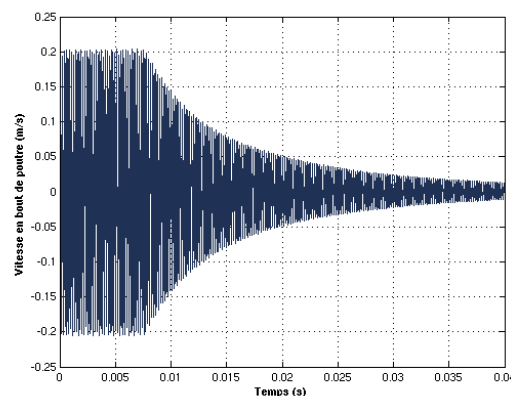


FIG. 3 – Réponse libre de la poutre suite à un lâcher : vitesse à l'extrémité de la poutre.

en l'absence d'air (ce qui l'est moins). Il est à noter que l'inconvénient de cette méthode de caractérisation est de donner une quantité réduite d'information pour un important temps de mesure.

Pour palier ce problème, une approche temps-fréquence en réponse libre a été utilisée dans un deuxième temps. Elle présente l'avantage de fournir une description quasi continue des paramètres à partir d'une seule mesure temporelle. Le principe est simple : il s'agit de traiter la réponse libre de la structure comme la réponse d'un oscillateur non-linéaire à un degré de liberté. En arrêtant l'alimentation électrique de l'excitateur électromagnétique par un bruit blanc, la réponse vibratoire libre de la poutre est mesurée de la forme décroissance avec le temps (cf. figure 3). Elle permet de « balayer » en une seule mesure toute une gamme d'amplitudes. Une transformation en ondelettes de cette réponse est ensuite appliquée pour identifier la fréquence et l'amortissement instantanés ou correspondant à une amplitude donnée.

3.2.1 La transformée en ondelettes

La transformée en ondelettes peut être expliquée par analogie avec la transformée de Fourier (voir par exemple [7]). Dans les deux cas, le signal considéré est représenté par une combinaison linéaire de fonctions de base. Pour la transformée de Fourier, les fonctions de base sont des fonctions trigonométriques (sinus et cosinus) couvrant tout l'intervalle de temps considéré, plus ou moins dilatées par un paramètre fréquentiel. Pour la transformée en ondelettes, les fonctions de base sont déduites d'une fonction de référence appelée ondelette mère finie dans le temps. Une fonction de base couramment utilisée est l'ondelette de Morlet modifiée :

$$\Psi(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-t^2/N} \quad (1)$$

où ω_0 est la pulsation de l'ondelette et N le paramètre qui commande sa forme, influençant l'équilibre entre les résolutions temporelle et fréquentielle. Les fonctions de base sont déduites de l'ondelette mère par dilatation (paramètre d'échelle s) et translation (paramètre temporel τ) :

$$\Psi_{s,\tau}(t) = \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2)$$

La transformée en ondelettes d'un signal $x(t)$ est alors donnée par :

$$W_x(s,\tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (3)$$

Il s'agit d'une quantité complexe dont le module décrit une surface dans l'espace temps-fréquence (cf. figure 4). On montre que si le signal est asymptotique, ce module est maximal le long d'une courbe appelée « arête ». Les valeurs de la transformée le long de l'arête constituent son squelette.

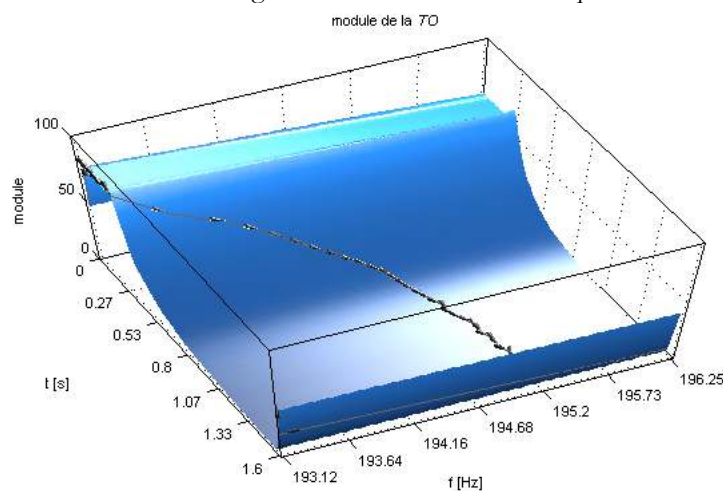


FIG. 4 – Module de la transformée en ondelettes d'un lâcher dynamique dans le plan temps-fréquence (surface) et son arête (courbe).

3.2.2 Identification des paramètres non-linéaires

Le squelette de la transformée en ondelettes permet d'identifier à chaque instant fréquence et amortissement instantanés du signal [7]. La fréquence est obtenue par dérivation temporelle de la phase de la transformée, l'amortissement est calculé à partir du décrétement logarithmique de l'arête.

La seconde étape consiste à identifier l'enveloppe du signal afin d'obtenir les informations souhaitées : les évolutions de la fréquence et de l'amortissement en fonction de l'amplitude (cf. figure 5). Si, les mesures sont réalisées par un vélocimètre ou un accéléromètre, il est alors nécessaire d'intégrer une ou deux fois le signal afin de travailler avec une enveloppe en déplacement.

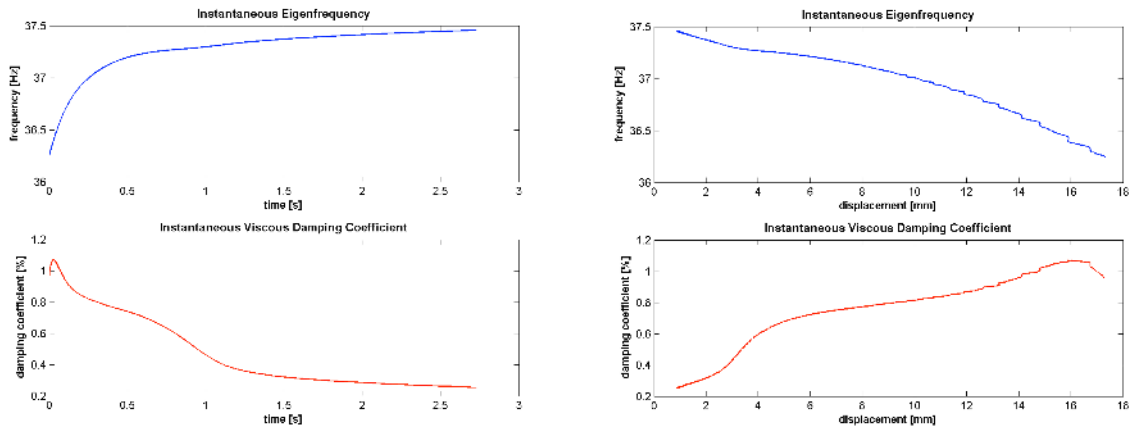


FIG. 5 – Exemple d'évolution de la fréquence (en haut) et de l'amortissement (en bas) en fonction du temps (à gauche) et de l'amplitude de vibration (à droite) suite à un lâcher dynamique.

3.2.3 Résultats de caractérisation

La méthode d'identification des paramètres non-linéaires à partir d'enregistrements de lâchers dynamiques est appliquée à l'assemblage présentée précédemment. Une poutre en quartz (de longueur libre 7,8 mm et encastree 7,2 mm, de largeur 3,6 mm et d'épaisseur 0,36 mm) est assemblée conformément à la figure 1b, sauf pour, les matériaux piézoélectriques qui ont été remplacés par des feuilles de cuivre garantissant ainsi un assemblage par 4 vis sous forte pression de serrage sans risquer d'endommager cette poutre. L'analyse par transformée en ondelettes permet d'identifier sa fréquence et son amortissement modal pour une amplitude de vibration donnée. Leurs évolutions en fonction de l'amplitude des vibrations à l'extrémité de la poutre sont présentées en figure 6 pour différents niveaux de pression de l'air ambiant.

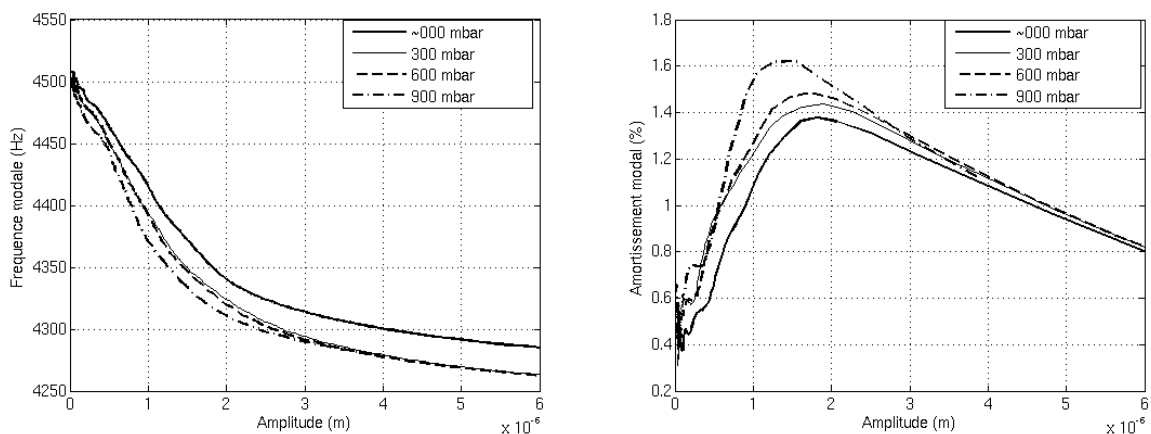


FIG. 6 – Evolution de la fréquence (à gauche) et de l'amortissement modal (à droite) d'une poutre en quartz en fonction de son amplitude des vibrations à son extrémité suite à un lâcher dynamique.

Les courbes présentées en figure 6 mettent en évidence :

- un amortissement non négligeable pouvant atteindre 1,6 %.
- une évolution non linéaire et monotone de la fréquence modale (ou de résonance) avec l'amplitude des vibrations à l'extrémité de la poutre. Le fréquence diminue progressivement avec l'amplitude pour

baissier d'environ 225 Hz (soit 5,5 % en relatif) pour 6 μm d'amplitude en bout de poutre. Une asymptote d'environ 4250 Hz semble ressortir à forte amplitude.

- une évolution non linéaire de l'amortissement modal avec un maximum d'amplitude de 1,4 à 1,6 % pour 1,5 μm d'amplitude à l'extrémité de la poutre. Avant l'extremum, l'amortissement semble proportionnel à l'amplitude des vibrations, alors qu'au delà, il semble inversement proportionnel.
- par différence entre les courbes à 0 mbar et 900 mbar, un léger effet non linéaire de l'air apparaît sur la fréquence et l'amortissement modal. L'amortissement augmente au maximum de 0,2 % pour 1,5 % en moyenne avec la pression de l'air ambiant, et, la fréquence diminue progressivement avec l'amplitude pour baisser d'environ 25 Hz pour 6 μm d'amplitude de vibration en bout de poutre.

De ces résultats expérimentaux, quelques lignes directrices peuvent être déduites. D'une part, pour l'architecture de micro-convertisseur assemblée par vis, nous avons la confirmation que la dissipation d'énergie est assez importante. Nous trouvons par ailleurs une évolution de l'amortissement en fonction de l'amplitude analogue à celle identifiée sur des plus grosses structures assemblées par vis [8][7]. Pour ces structures, le mécanisme de dissipation de l'énergie est connu pour être essentiellement du stick-slip (collage-glisement) à l'encastrement entre les matériaux en contact. Nous pensons qu'il en est de même dans ce micro-convertisseur, et, nous envisageons de le vérifier. D'autre part, le décalage de la fréquence de résonance en fonction de l'amplitude peut être un inconvénient majeur pour une application de conversion d'énergie : le micro-convertisseur peut se désaccorder de la fréquence de sa source d'excitation. Travaillant à une fréquence différente mais voisine de sa résonance, il aura alors une efficacité fortement diminuée. Pour cette raison, nous cherchons à concevoir un micro-convertisseur stable en fréquence, c'est à dire, avec de « bons » matériaux, une « bonne » technique d'assemblage et sans air environnant.

4 Conclusion

Ces premières caractérisations par transformée en ondelettes montrent que l'analyse s'avère rapide et très intéressante pour identifier fréquences et amortissements d'un micro-convertisseur d'énergie mécano-électrique. Il est envisagé pour la suite de qualifier différents matériaux constituant la poutre (silicium monocristallin, nubiote de lithium), différents matériaux piézoélectriques et différentes techniques d'assemblage (vissage, collage). Par ailleurs, des simulations par éléments finis du phénomène de stick-slip (collage-glisement) à l'encastrement sont en cours pour expliquer l'évolution de l'amortissement mesuré en fonction de l'amplitude des vibrations à l'extrémité de la poutre pour des assemblages vissés.

Remerciements :

Ce travail est financé, d'une part, par la Commission Européenne à travers le projet STREP VIBES (IST-1-507911) (VIBration Energy Scavenging) du 6^e programme, et d'autre part, par l'Action Concertée Energie du CNRS & du Ministère de la Recherche.

References

- [1] Petit L, Conception d'un microgénérateur pour l'alimentation électrique des microsystèmes, Rapport de stage de DEA Instru. & Microélec. Conception Systèmes Intégrés, Univ. de Strasbourg I, février 2003.
- [2] Roundy P.K., Wright P.K., Rabaey J.M., A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, Computer Communications, Elsevier Science B.V., Vol. 26, pp 1131-1144, 2003.
- [3] Roundy S., Wright P.K., Rabaey J.M., Energy scavenging for wireless sensor networks with special focus on vibrations, Kulwer Academic Publishers, I-4020-7663-0, 2004.
- [4] Cavallier B., Nouria H., Foltete E., Hirsinger L., Ballandras S., Energy storage of vibrating structure: application to a shock system, DTIP of MEMS & MOEMS, Montreux, Switzerland, 3 p., 01-03 June 05.
- [5] Wang Q.M., Du X.H., Xu B., Cross L.E., Electromechanical coupling and output efficiency of piezoelectric bending actuators, IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 46, N°3, may 1999.
- [6] Funasaka T., Furuhashi M., Hashimoto Y., Nakamura K., Piezoelectric generator using a LiNbO₃ plate with an inverted domain, IEEE Ultrasonics symposium, 1998.
- [7] Foltête E., Heller L., Identification expérimentale de l'amortissement modal non-linéaire dans des poutres boulonnées, CMSM'2005, Hammamet, 11p., 23-25 mars 2005.
- [8] Goodman L.E., Klumpp J.H., Analysis of slip damping with reference to turbine-blade vibration, Journal of Applied Mechanics, September 1956.