

Application in situ d'un capteur autonome alimenté par un générateur piézoélectrique

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'aspect applicatif de notre dispositif dans un cas réel. Nous avons choisi une potentielle application industrielle pour notre récupérateur d'énergie vibratoire : la récupération d'énergie vibratoire sur un système de CVC (chauffage, ventilation et climatisation) pour alimenter un capteur communicant sans fil.

Notre démarche commence par la caractérisation du comportement vibratoire de la source via la mesure de son accélération. Il est crucial de connaître le niveau de l'accélération et la gamme de fréquences de la source vibratoire sur laquelle nous allons installer notre dispositif afin de le dimensionner en conséquence. Ensuite, nous appliquons notre modèle EF ainsi que la démarche d'optimisation du générateur développé dans le chapitre 4 pour concevoir notre récupérateur d'énergie. Enfin, un prototype de capteur autonome sans fil est développé.

Après avoir conçu et prototypé le générateur, nous le caractérisons avec la vibration réelle reproduite sur le banc de test de vibration.

Caractérisation d'un système de CVC

Le marché des systèmes de CVC est un marché important avec une croissance annuelle stable ces dernières années. La maintenance préventive de tels systèmes demande beaucoup d'efforts et d'argent. Des capteurs sont placés sur un système test, ils permettent d'acquérir les informations de ce système et de nous informer des éventuels défauts ou variations dans ses vibrations mécaniques. La récupération d'énergie vibratoire de la machine CVC pour alimenter un capteur sans fil est une solution durable pour ce type d'application. Nous évaluons notre dispositif sur une machine CVC afin de déterminer s'il est capable de récupérer suffisamment d'énergie pour alimenter un système de capteur autonome sans fil dans un réseau de capteurs sans fil. Un bloc de climatisation en environnement industriel est choisi comme système de référence pour faire l'évaluation de notre générateur (cf. figure 5.1). La vibration de ce bloc de climatisation est mesurée par un accéléromètre PCB 393B05 dont la sensibilité est de 9,91 V/g. Le signal généré par l'accéléromètre est acquis par un oscilloscope Tektronix 3034B.

Les paramètres d'acquisition sont les suivants :

- Durée d'acquisition : 10 secondes
- Fréquence d'échantillonnage : 1 kHz
- Résolution fréquentielle : 0,1 Hz

La vibration mesurée du bloc de climatisation dans le domaine temporel est présentée dans la figure 5.2 et sa FFT est présentée dans la figure 5.3. Nous observons que le signal de la vibration du bloc de climatisation est plutôt un signal harmonique avec une fréquence fondamentale à 43,3 Hz. D'autres contributions se situent à 86,6 Hz, 195,5 Hz et 368,5 Hz. A la fréquence fondamentale 43,3 Hz, le niveau de l'accélération mesurée est de 150 mg.



Figure 5.1 : Photo du bloc de climatisation en environnement industriel.

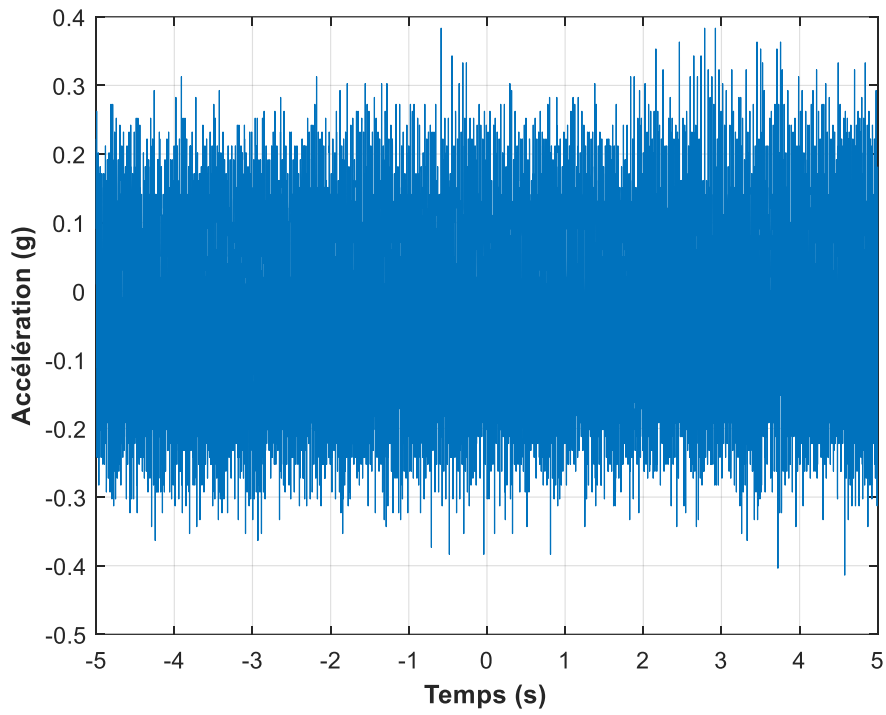


Figure 5.2 : Représentation temporelle des vibrations du bloc de climatisation.

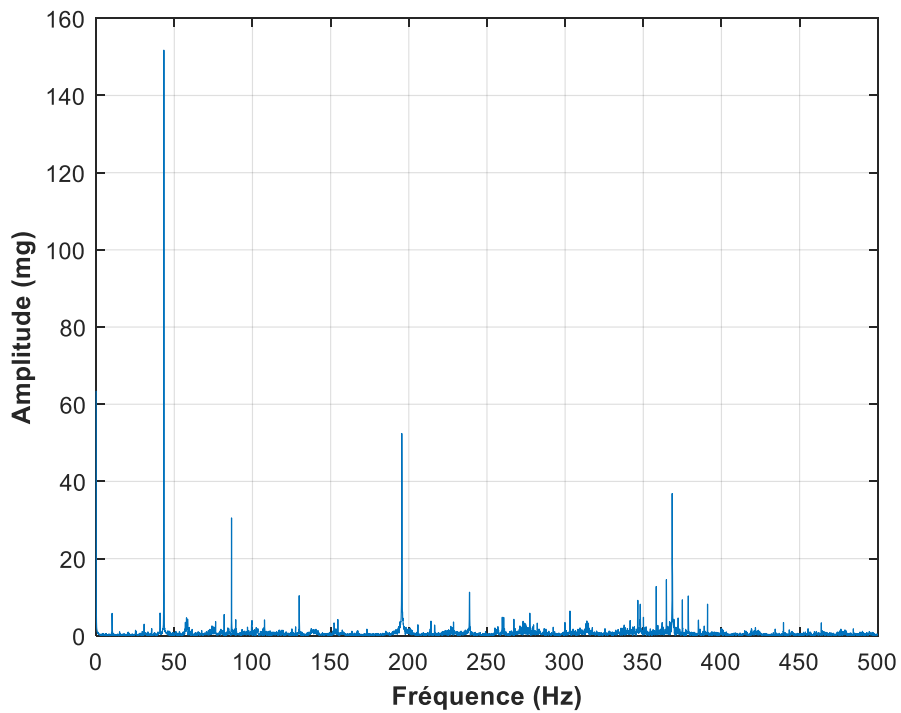


Figure 5.3 : Représentation fréquentielle des vibrations du bloc de climatisation.

2. Conception du module autonome

Une fois la source de vibration correctement caractérisée, nous avons besoin de connaître l'encombrement maximal autorisé pour concevoir un générateur adapté. Nous avons donc fixé un cahier des charges qui prend en compte également les composants électroniques nécessaires pour assurer l'ensemble du fonctionnement d'un capteur autonome sans fil.

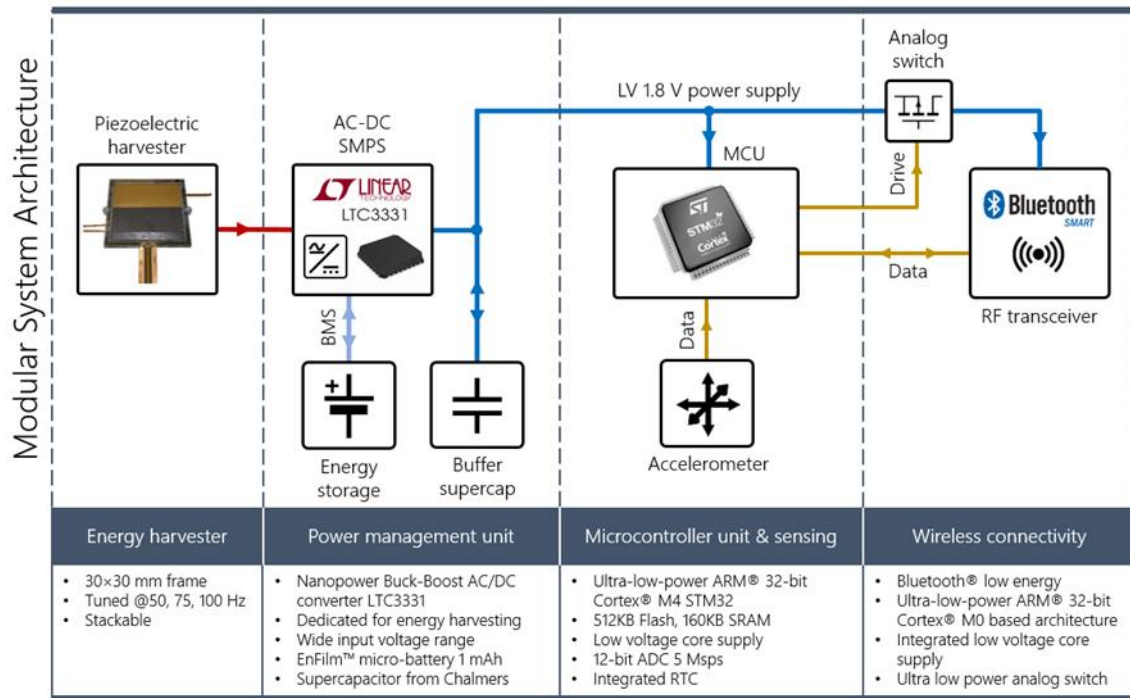


Figure 5.4. Architecture générale du capteur autonome.

La conception et la réalisation de la partie électronique ont été exécutées par Monsieur Maxime BENCHEMOUL, ingénieur électronique de Vermon. L'architecture générale du capteur autonome et communiquant est présentée dans la figure 5.4. Le système se compose d'un générateur piézoélectrique qui sert de source d'énergie du système, d'un circuit de gestion de la puissance, d'un élément de stockage (supercondensateur ou batterie rechargeable) faisant office de source d'énergie secondaire au système, d'un microcontrôleur, d'un accéléromètre, et d'un émetteur-récepteur radiofréquence (RF) Bluetooth® Low Energy.

Nous présentons d'abord les composants électroniques nécessaires constituant notre générateur pour former un capteur autonome. Des composants électroniques ayant une faible

consommation électrique et une grande compacité sont préférés pour une application de récupération d'énergie.

2.1. Unité de gestion de l'alimentation

Dans la plupart des applications, une tension continue (de 1,8 V à 3,6 V) est requise pour alimenter des composants électroniques. Or la tension électrique à la sortie du générateur est de forme alternative (AC), il est donc nécessaire de mettre en place un circuit électronique pour rendre l'énergie électrique récupérée utilisable. Les étapes de la conversion de tension d'entrée AC vers une tension DC sont illustrées dans la figure 5.5.

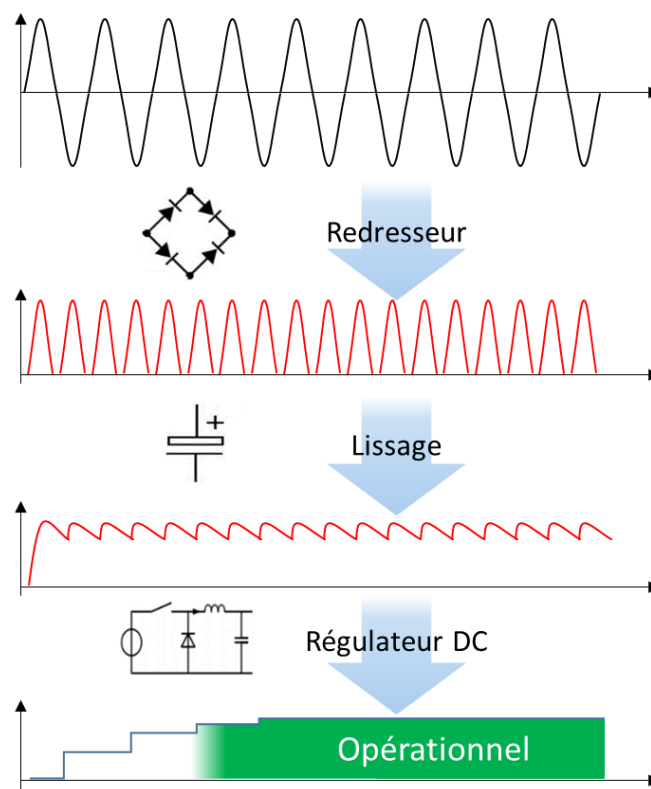


Figure 5.5 : Etapes de la conversion de tension d'entrée AC vers une tension DC utilisable pour les composants électroniques.

Les deux premières étapes de la conversion sont le redressement de la tension alternative en sortie du générateur puis le lissage capacitif afin d'obtenir un signal de tension le plus continu possible. Le circuit constitué d'un pont de diodes et d'un condensateur est le montage le plus simple pour faire cette conversion. D'autre part, il existe dans la littérature des montages plus complexes et plus efficaces. Depuis ces dix dernières années, des équipes de recherche essaient

de concevoir des CGPs qui permettent d'optimiser et d'extraire le plus d'énergie possible des générateurs piézoélectriques. Ces CGPs peuvent être basés sur des circuits passifs, des circuits semi-actifs non linéaires SSHI (Synchronized Switched Harvesting on Inductor en anglais), SSHC (Synchronized Switched Harvesting on Capacitor en anglais), SECE (Synchronous Electric Charge Extraction en anglais), ou des méthodes actives. Plus de détails sur différentes techniques d'extraction de l'énergie se trouvent dans [152]–[157].

La dernière étape est de réguler la tension continue et de maintenir automatiquement un niveau de tension constant. C'est une des étapes les plus importantes dans l'unité de gestion de l'alimentation. Le régulateur DC-DC fournit une tension continue constante, contrôle les fluctuations de puissance et évite d'endommager les circuits intégrés connectés ; ce qui signifie que la tension de sortie de l'unité de gestion de l'alimentation reste constante, quelles que soient les modifications de sa tension d'entrée ou des conditions de charge [158].

Dans certains cas d'application où l'énergie mécanique peut être récupérée de façon intermittente, un élément de stockage d'énergie électrique est nécessaire. Cet élément est souvent une micro-batterie ou un supercondensateur à faibles pertes.

Il existe des CGPs commerciaux dédiés aux systèmes de récupération d'énergie. Ces CGPs intégrés contiennent tous les éléments comme un redresseur, un étage DC-DC et même un circuit de gestion de l'élément de stockage. Le tableau 5.1 présente quelques-uns de ces produits.

Tableau 5.1 : Principales caractéristiques de quelques CGPs commerciaux.

Caractéristiques techniques	LTC3331	MB39C811	MAX17710
Package	5mm×5mm QFN-32	6mm×6mm BSC	3mm×3mm DFN
Courant de repos d'entrée	950 nA	1500 nA	625 nA
Courant de repos d'entrée en cas de sous tension (UVLO)	450 nA	550 nA	450 nA
Gamme de la tension d'entrée V_{in}	2,7 V à 20 V	2,6 V à 23 V	> 5,7 V

Redresseur en pont intégr�� � faibles pertes	Oui	Oui	Oui
Tension de sortie V_{out}	1,8 V - 3,6 V	1.5 V - 5.0 V	4.1 V
Intensité de sortie I_{out}	100 mA	100 mA	> 1 A
Régulateur DC/DC	Oui	Oui	Oui
Régulateur de protection	25 mA � $V_{in} \geq 20$ V	100 mA � $V_{in} \geq 21$ V	50 mA � $V_{in} \geq 5.3$ V

Nous avons choisi le LTC3331 car il représente un bon compromis pour notre application : la plage de tension d'entrée est  lev e et sa consommation de courant est très faible. Le LTC3331 est un convertisseur ultra faible puissance dédié aux applications de récupération d'énergie. Il intègre également un convertisseur Buck et un convertisseur Buck-Boost ; ces derniers sont capables de gérer la recharge de la batterie et la régulation de la tension de sortie.

2.1.1. Spécifications du LTC3331

Le circuit intègre un pont redresseur à double alternance très faibles pertes. Le générateur piézoélectrique peut être connecté directement au circuit via les broches 8 et 9 (cf. figure 5.6). La tension alternative du générateur est redress e et l'énergie est stock e dans un élément de stockage connecté via la broche 10 VIN avec une tension d'entrée comprise entre 3 V et 19 V.

La puce a un courant de repos ultra-faible de 950 nA à vide qui convient bien à la récupération d'énergie. Le circuit est très polyvalent grâce à plusieurs registres de contrôle permettant différents modes de fonctionnement selon le type de source d'énergie récupérée et de charge connect e au convertisseur. Les fonctions principales des broches du LTC3331 sont les suivantes :

- AC1 (broche 8) : connexion d'entrée pour l'élément piézoélectrique.
- AC2 (broche 9) : connexion d'entrée pour l'élément piézoélectrique.
- VIN (broche 10) : tension d'entrée redress e. Un condensateur sur cette broche permet de lisser la tension redress e et sert de réservoir d'énergie. C'est également l'entrée du régulateur Buck. La tension VIN est fix e en interne à un maximum de 20V (typique).

- VOUT (broche 13) : tension de sortie régulée par le convertisseur Buck ou Buck-Boost (dépend du mode de fonctionnement interne du LTC3331).
- UV3, UV2, UV1, UV0 (broches 4, 5, 6, 7) : bits de sélection de UVLO (Verrouillage de sous-tension) pour le régulateur Buck. Le seuil de chute UVLO doit être supérieur au niveau de régulation VOUT sélectionné.
- OUT0, OUT1, OUT2 (broches 30, 31, 32) : bits de sélection de la tension VOUT.
- FLOAT1, FLOAT0 (broches 23, 24) : broches de sélection de la tension flottante¹. Cette fonctionnalité permet de sélectionner la tension de flottement de la batterie de 3,45 V, 4,0 V, 4,1 V et 4,2 V.

¹ La tension à laquelle une batterie est maintenue après une charge complète pour maintenir cette capacité en compensant l'autodécharge de la batterie et sans surcharger la batterie.

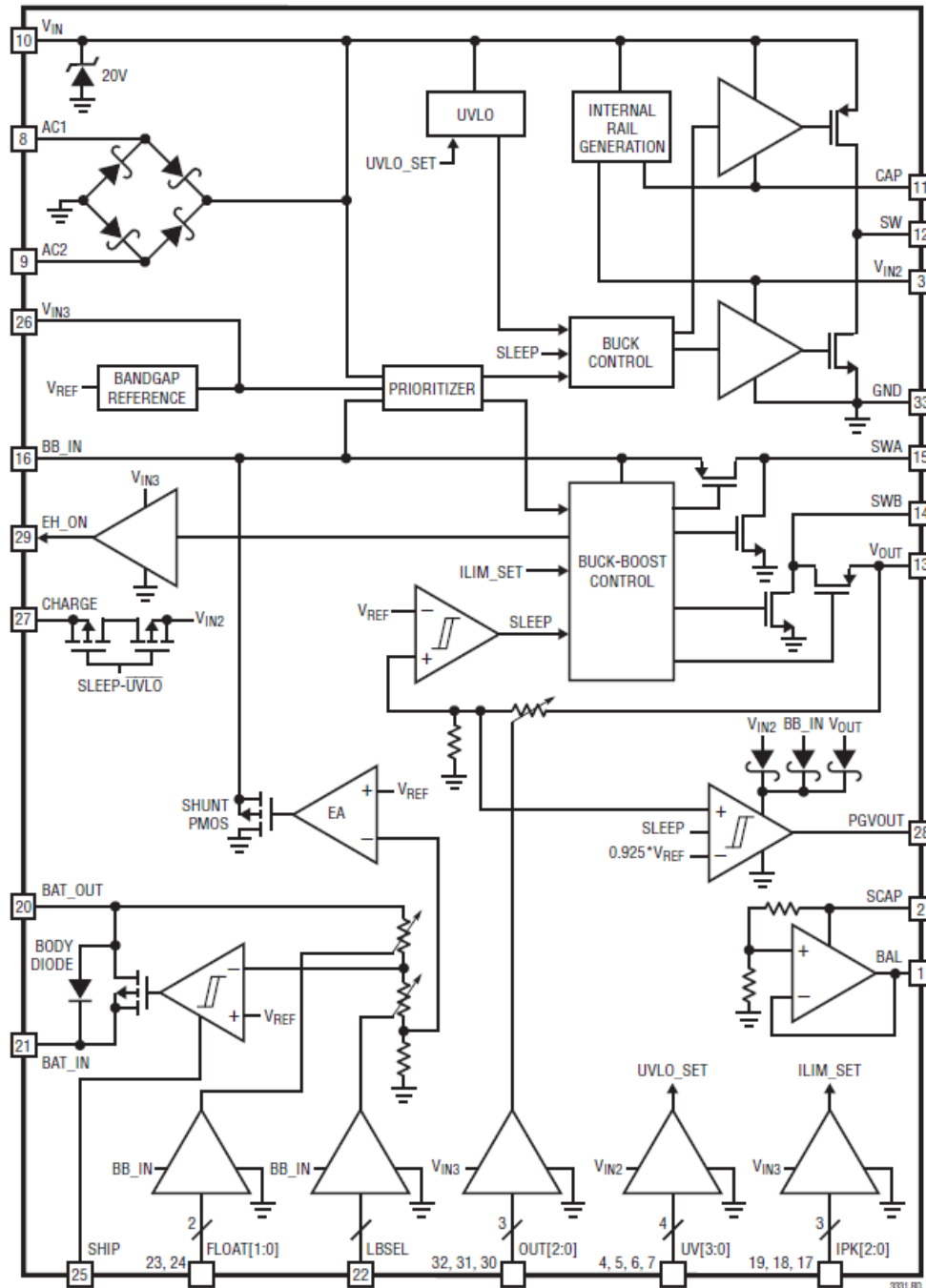


Figure 5.6 : Schéma de principe interne du LTC3331 [159].

2.1.2. Configuration du circuit LTC3331

Les registres de contrôle sont définis par défaut avec les caractéristiques suivantes :

- Tension flottante = 4,1 V,
- Seuils de verrouillage sous tension = 3 à 4 V,

- Tension de sortie = 1,8 V.

Pour garantir un fonctionnement correct pendant les phases de forte consommation d'énergie, une micro-batterie rechargeable à film mince Lithium (EFL1K0AF39RL de STMicroelectronics – 3 V à 4,2 V, 1 mAh) est connectée au LTC3331. La micro-batterie peut également fournir de l'énergie lorsque la source d'énergie vibratoire ne permet pas d'alimenter à elle seule l'électronique du capteur communicant. En plus de la micro-batterie, un supercondensateur de 2000 μ F à très faible courant de fuite (inférieur à 1 μ A après 1 minute, puis présentant une fuite de 200 nF à 300 nA à 1,9V) est connecté au bus de tension sortie du LTC3331 (1,8 V). La valeur de tension flottante de 4,1 V est choisie afin de protéger la micro-batterie d'une tension de surcharge et d'une tension de sous-charge lorsque la tension descend à 3,2 V.

2.2. Unité de traitement et de communication

2.2.1. Microcontrôleur à très basse consommation

Pour l'unité de traitement, nous avons choisi le microcontrôleur ultra basse consommation STM32L442KC² de STMicroelectronics [160]. La série STM32L4 offre des microcontrôleurs à très hautes performances ainsi qu'une multitude de périphériques tout en étant très basse consommation.

Selon la configuration de la source d'horloge interne du microcontrôleur, l'alimentation et le mode de fonctionnement (1,71 V à 3,6 V), le STM32L442 peut atteindre une consommation d'énergie extrêmement faible (une note ULPBench® de 176,7 [160]). Avec une alimentation typique de 3,3 V, le microcontrôleur peut descendre à 8 nA en mode « Shutdown » (2 entrées d'interruption de réveil), à 28 nA en mode « Standby » (2 entrées d'interruption de réveil), voire à 280 nA en mode « Standby » avec RTC [160]. En mode d'exécution, la consommation de courant peut baisser de 84 μ A/MHz. En ce qui concerne les mémoires, le

² Le microcontrôleur sélectionné intègre différentes sources d'horloge avec différentes manières de les connecter. L'horloge temps réel RTC (« real-time clock » en anglais) peut être utilisée avec un oscillateur à cristal externe à basse vitesse LES (low-speed external en anglais) de 32,768 kHz ou avec l'oscillateur RC interne de faible puissance à 32 kHz. Il existe également un oscillateur RC interne à 16 MHz, un oscillateur interne à plusieurs vitesses de 100 kHz à 48 MHz ajusté automatiquement par LSE, un oscillateur interne à 48 MHz avec récupération de l'horloge et deux boucles à verrouillage de phase PLL (Phase-Locked Loop en anglais) pour l'horloge système, les ports USB, audio et ADC.

STM32L442 intègre 256 Ko de mémoire flash unique, 64 Ko de mémoire SRAM, dont 16 Ko avec contrôle de parité matérielle et une interface de mémoire SPI quad.

De nombreuses configurations sont possibles et il existe jusqu'à 26 entrées / sorties rapides. Le microcontrôleur est disponible dans un package UFQFPN32. Enfin, il s'agit d'un microcontrôleur très polyvalent, à très faible consommation d'énergie et qui répond parfaitement à nos besoins.

2.2.2. Processeur Bluetooth basse consommation

Le processeur Bluetooth basse consommation BlueNRG-MS, également de STMicroelectronics, est utilisé pour l'unité de communication. Le BlueNRG-MS est conforme à la spécification Bluetooth® v4.1 et intègre une pile de protocoles Bluetooth® à faible consommation d'énergie.

La tension d'alimentation du BlueNRG-MS est comprise entre 1,7 V et 3,6 V, la consommation de courant sous 3 V peut baisser à 1,7 μ A avec une pile Bluetooth à basse consommation BLE (« Bluetooth Low Energy » en anglais) active.

Le convertisseur DC-DC Buck intégré permet de réduire considérablement la consommation (presque deux fois moins) pendant les phases de réception (RX) ou de transmission (TX) et ne coûte que deux composants passifs supplémentaires [161]. En mode TX @0dBm et inférieur à 3 V, le courant maximal est de 8,2 mA. Il inclut également des modes à basse consommation. Concernant les sources d'horloge, la BlueNRG-MS comprend un oscillateur en anneau interne à 32 kHz et un oscillateur en anneau interne à 12 MHz. Il est possible de les remplacer respectivement par un oscillateur à cristal externe de 32,768 kHz et un oscillateur à cristal externe de 16 ou 32 MHz.

La communication entre la BlueNRG-MS et le microcontrôleur se fait par un bus SPI (interface de contrôleur d'application propriétaire).

Globalement, il s'agit d'une puce facile à utiliser avec la pile BLE. Elle est disponible aux formats QFN32 ou WLCSP34, ce qui permet de construire un système compact.

2.2.3. Accéléromètre intégré

L'accéléromètre est directement intégré sur la carte. Il s'agit d'un accéléromètre IIS2DH à 3 axes ultra-basse consommation avec interface de sortie numérique (SPI ou I2C). Plus de détails techniques se trouvent dans [162].

Afin de minimiser la consommation en courant, deux commutateurs (ADG842 de Analog Devices) sont utilisés pour couper les rails de tension de l'émetteur-récepteur BLE et ceux de l'accéléromètre. L'ADG842 possède des caractéristiques de consommation ultra-basse (consommation typique de 3 nA sous 1,8 V) et de résistance très faible (280 mΩ), et permet d'obtenir un courant jusqu'à 300 mA (valeur relativement élevée pour notre application).

2.2.4. Consommation énergétique du capteur autonome

La figure 5.7 présente un cycle de consommation d'énergie typique du capteur autonome (l'échelle ne reflète pas la réalité). Le fonctionnement d'un cycle typique est suivant :

- Réveil du circuit et initialisation (microcontrôleur, accéléromètre, BLE),
- 10 acquisitions sur 3 axes XYZ et post-traitement,
- envoi de données,
- retour en mode sommeil.

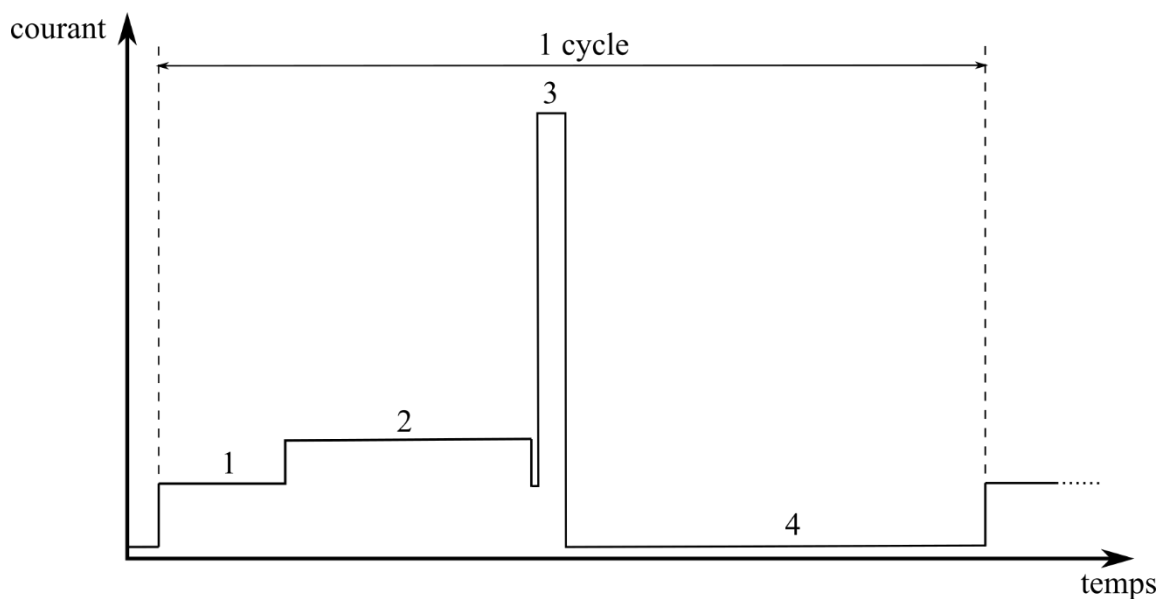


Figure 5.7 : Cycle de consommation typique du capteur autonome, 1) réveil et initialisation, 2) acquisitions et post-traitement, 3) transmission et/ou réception de données, 4) veille.

Pour la démonstration de notre application nous calculons le budget de consommation minimal pour faire fonctionner un capteur autonome sans fil (cf. tableau 5.2). L'énergie minimale pour faire fonctionner le capteur correctement est de $43,33 \mu\text{J}$, ce qui est équivalent à $43,33 \mu\text{W}$ dans le cas d'une période de fonctionnement de 1 seconde. Le budget production-consommation d'énergie est équilibré en tenant compte de la quantité de données à transférer, du traitement du signal et du cycle de travail. Des routines plus complexes peuvent être mises en œuvre dans la gestion et le traitement des données, ce qui implique une consommation d'énergie plus élevée. L'algorithme réglant le rapport cyclique peut être modifié pour adapter la consommation d'énergie en fonction de l'énergie ambiante disponible. Cela offre plusieurs degrés de liberté pour optimiser le mode de fonctionnement du capteur communicant et donc sa consommation.

Tableau 5.2 : Exemple de consommation d'énergie du capteur autonome

Composant	Consommation (sur une période totale de 1 seconde)			
	Phase d'exploitation	Courant moyenne	Temps	Energie
STM32L442	Fonctionne à faible puissance (2 MHz)	211 μ A	54,03 ms	20,52 μ J
	Veille (RTC activé)	280 nA	945,97ms	477 nJ
BlueNRG-MS	Envoie sur 1 canal, 31 octets (-14 dBm)	6,08 mA	1,53 ms	16,74 μ J
IIS2DH	10 acquisitions (12-bit, 400 Hz)	73 μ A	42,5 ms	5,58 μ J
ADG842	Fonctionnement continu	6 nA	1000 ms	5,4 nJ
Total				43,33 μ J

2.3. Générateur piézoélectrique

2.3.1. Conception et prototypage du générateur

Selon la conception des circuits dans les unités de gestion de l'alimentation, du microprocesseur, de communication et également selon les caractéristiques de la source vibratoire, nous fixons le cahier des charges suivant en termes d'encombrement pour concevoir notre générateur :

- Largeur maximale : 26 mm
- Longueur maximale : 27,5 mm
- Epaisseur du shim : 12 μ m
- Dimension de la masselotte maximale : 26 mm x 1 mm x 4 mm, pour gagner en volume (donc avoir une meilleure densité de puissance), une masselotte en tungstène est choisie.

Un générateur est conçu en appliquant le guide de conception développé dans le chapitre 4. Ses caractéristiques sont présentées dans le tableau 5.3. La longueur et la largeur du générateur sont fixées aux valeurs maximales autorisées. Une masselotte en tungstène est collée au bout du générateur (poutre vibrante). En raison des contraintes de fabrication, la largeur de la masselotte est fixée à 26 mm et sa longueur est fixée à 3,9 mm. L'épaisseur de la masselotte est mise à sa valeur maximale pour maximiser l'énergie électrique récupérée ; le poids total de la masselotte est de 3,68 g.

Tableau 5.3 : Description du générateur piézoélectrique conçu

	Matériau actif	Shim	Masselotte
Matériau	PZT dur	Laiton	Tungstène
Largeur (mm)	26	26	26
Longueur (mm)	25,75	25,75	3,9
Epaisseur (μm)	85	12	940

Le générateur est fabriqué selon la méthode décrite précédemment. Le générateur est encastré grâce à un système de cadre en FR4 et les connecteurs électriques sont faits avec des câbles flexibles dédiés (cf. figure 5.8).

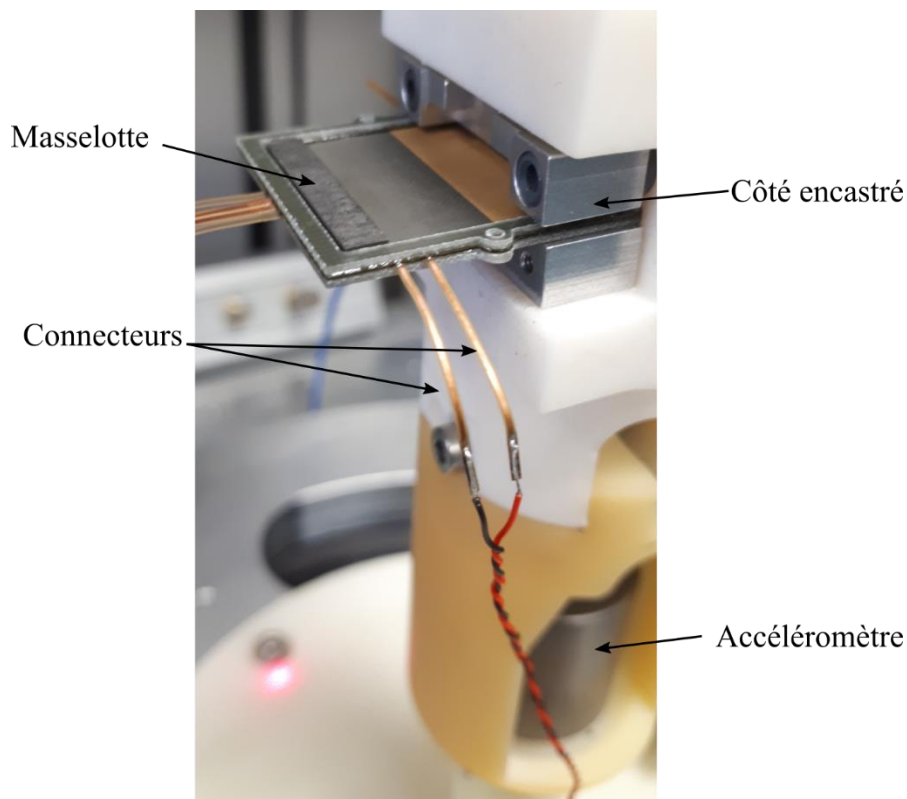


Figure 5.8 : Photo du générateur fixé sur le banc de test en vibration.

2.3.2. Caractérisation fonctionnelle du générateur

La figure 5.9 présente la prédiction du modèle EF et la mesure de l'impédance électrique du générateur en condition encastré-libre. Nous pouvons constater que qualitativement le modèle EF a bien prédit la réponse électromécanique du générateur. Effectivement, les écarts entre les fréquences de résonance et d'anti-résonance sont inférieurs à 0,7%. Toutefois, les

écarts entre les impédances théorique et mesurée sont grands, 82 % et 487 % pour les modules Z_r et Z_a respectivement.

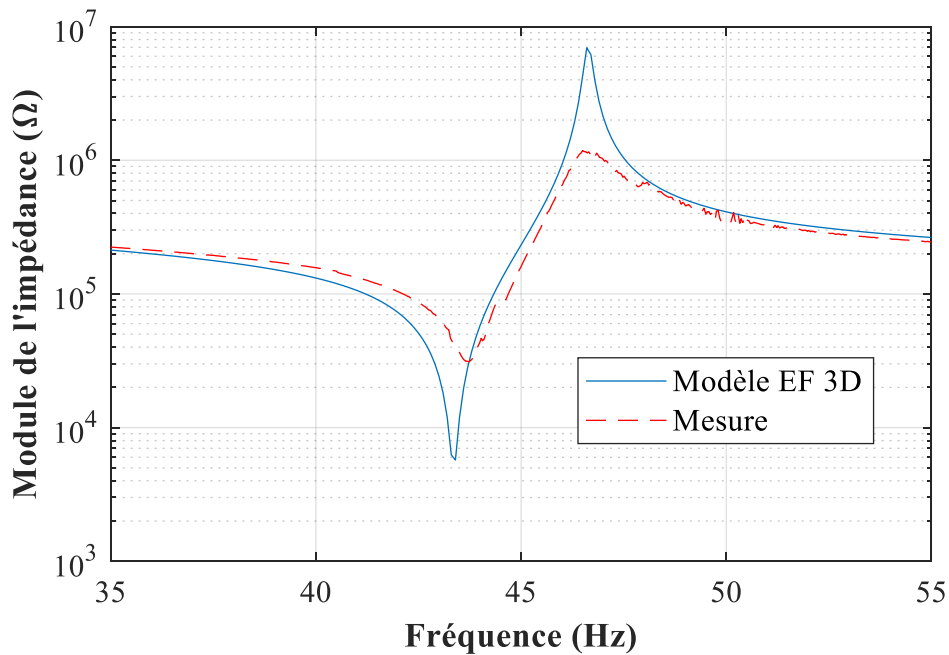


Figure 5.9. Impédance électrique du générateur : modèle EF 3D et mesure.

Concernant la réponse vibratoire, les fréquences de résonance en vibration prédite par la simulation EF et mesurée sont de 43,1 Hz et 42,2 Hz respectivement, soit un écart de 2,1 % (cf. figure 5.10). Le modèle a donc correctement prédit la fréquence de résonance du générateur mais en termes de puissance électrique récupérée, celle-ci a été surestimée avec un écart de 277,4 % entre le résultat simulé et celui mesuré (1360 μ W contre 360,4 μ W). Cet écart provient de l'effet ramollissant (« softening effect » en anglais) non-linéaire. En effet, quand l'accélération devient trop importante, la fréquence de résonance diminue, les pertes augmentent et donc la puissance récupérée diminue [163]. Malgré cet écart important, notre modèle reste utile pour optimiser le générateur dans le domaine linéaire. D'ailleurs, grâce à un ajustement sur la mesure vibratoire du générateur nous pourrions affiner notre modèle, pour autant ce n'est pas l'objectif du présent travail.

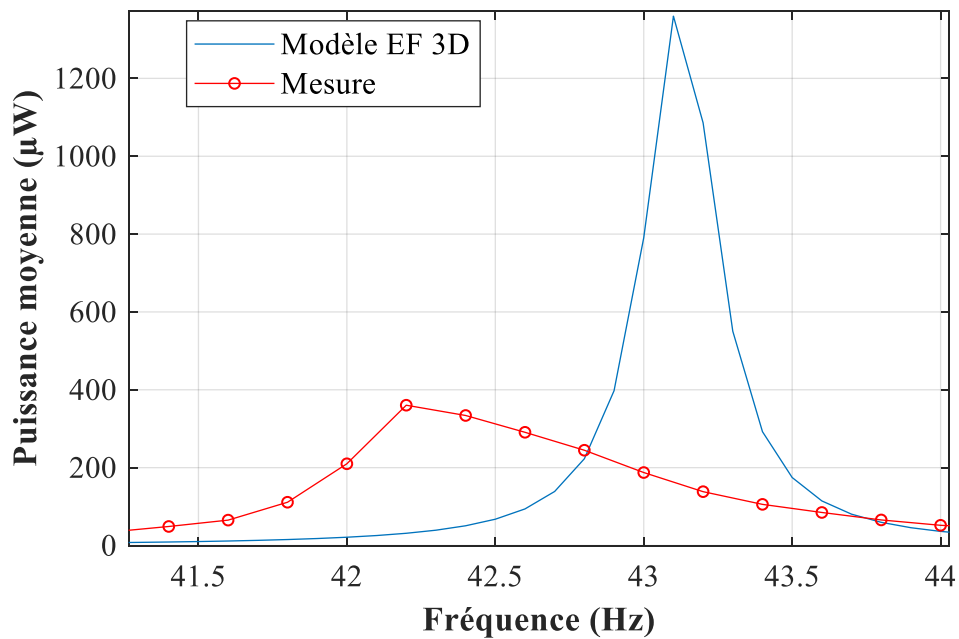


Figure 5.10. Puissance électrique récupérée par le générateur à 150 mg de l'accélération : prédiction du modèle EF 3D et mesure sur le prototype.

En termes de performances, nous faisons apparaître notre générateur dans le graphe représentant la figure de mérite NPD, présenté au chapitre 1 sur la figure 1.9. Comme on le constate sur la figure 5.11, notre générateur se positionne très bien par rapport à l'état de l'art. La NPD de notre générateur calculée à 150 mg et 44,2 Hz est de $11,6 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$.

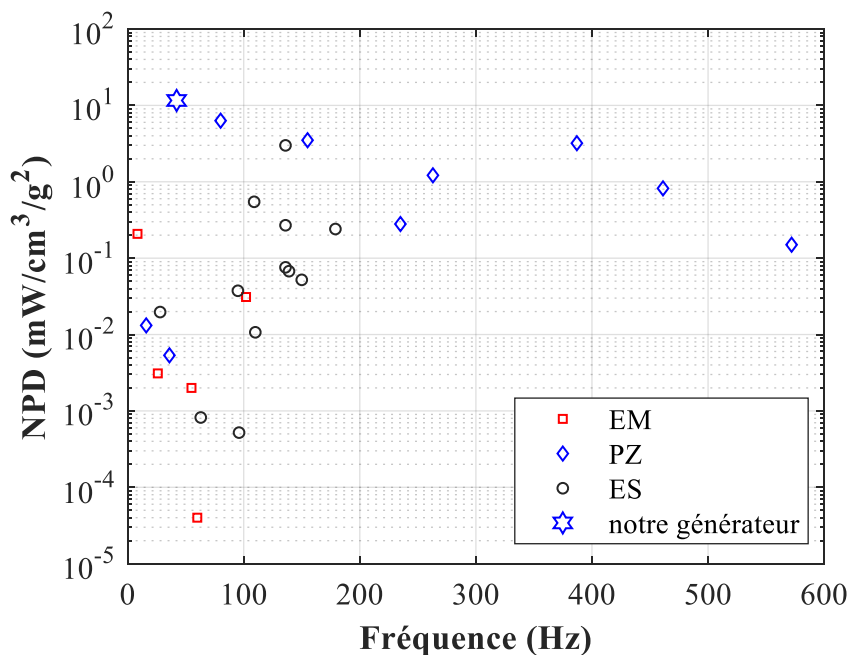


Figure 5.11. Positionnement de notre générateur par rapport à l'état de l'art (cf. figure 1.9).

2.4. Intégration du capteur autonome

A partir des unités et du générateur définis dans les sections précédentes, un module de capteur autonome sans fil est développé et fabriqué avec une approche de conditionnement modulaire 3D : il est composé de plusieurs couches, ce qui maintient le facteur de forme bien inférieur au volume de deux piles AA (environ $3,3 \times 3 \times 1,4 \text{ cm}^3$). Grâce à sa conception modulaire, chaque fonction principale peut être interchangée et adaptée en fonction de l'installation et de son environnement (caractéristiques de vibration ambiante, détection, protocole sans fil, etc.).

La figure 5.12 présente l'architecture du module de capteur autonome sans fil. L'unité de gestion de l'alimentation (UGA) comprend la puce LTC3331 de Linear Technology, ses composants périphériques et les éléments de stockage (micro-batterie) qui sont intégrés dans un circuit imprimé ou PCB (« Printed Circuit Board » en anglais). L'unité de traitement et de communication (UTC) comprend le microcontrôleur, l'antenne Bluetooth, et ses composants périphériques qui sont intégrés dans un autre PCB. Les cales en FR-4 sont insérées entre les couches PCB et le générateur. Elles servent à créer la place pour que la masselotte puisse se déplacer librement.

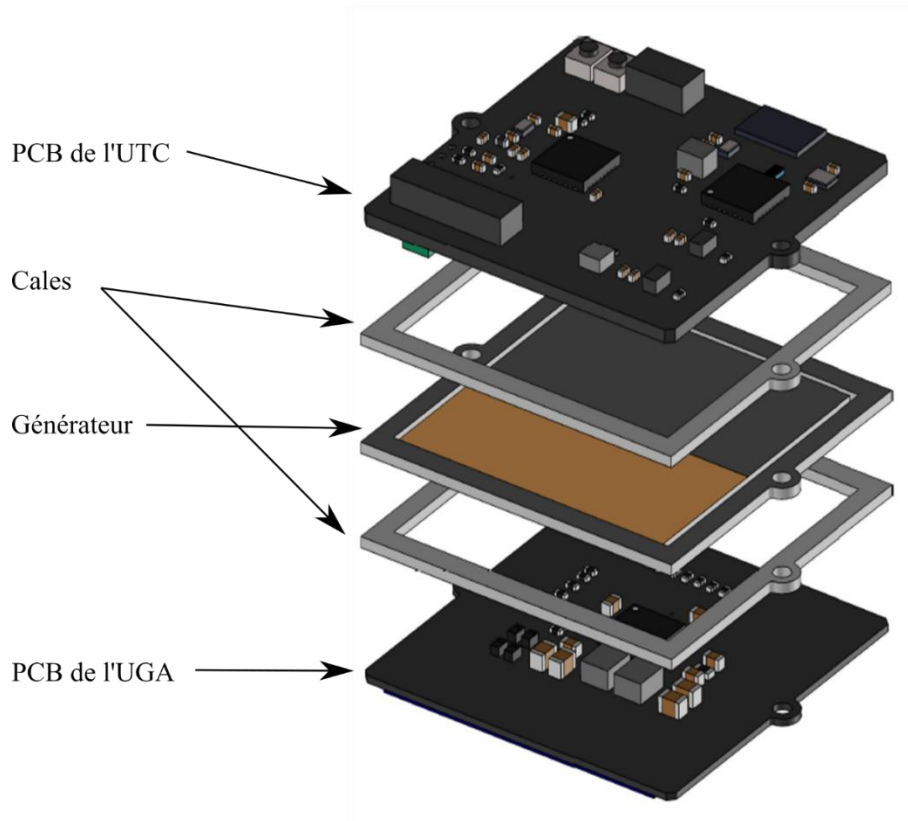


Figure 5.12 : Architecture du module du capteur autonome sans fil.

2.5. Caractérisation fonctionnelle du capteur autonome

Le générateur piézoélectrique est connecté au PCB de l'UGA, puis le tout est caractérisé sur le banc de vibration pour différentes accélérations. Afin d'évaluer les performances de l'UGA, une charge résistive est connectée à sa sortie, la puissance (P) maximale à la sortie du convertisseur est calculée avec la formule suivante :

$$P_{\max} = \frac{U^2}{R_{\min}} \quad (43)$$

où U, la tension de sortie du LTC3331 (1,8 V en DC) et R est la charge résistive connecté à la sortie du LTC3331. La puissance maximale est calculée à partir de la valeur minimale de la résistance (R_{\min}) tout en gardant le bon fonctionnement du convertisseur ($U = 1,8 \text{ V}$). La figure 5.13 présente le résultat de la caractérisation. Pour une accélération de 0,3 g crête-à-crête le module récupère une puissance électrique de 231 μW à 42,2 Hz (soit un rendement de 64 % pour le module électronique seul, puisque la puissance délivrée en sortie du générateur piézoélectrique est de 360 μW). Cette puissance électrique récupérée est supérieure à la

puissance consommée par le module (cf. tableau 5.2) pendant 1 seconde : l'applicabilité de ce dispositif autonome pour la mise en œuvre de techniques de maintenance préventive d'un système CVC est ainsi démontrée. Le module décrit dans la section 2.4 est assemblé et installé dans un boîtier réalisé en impression 3D (cf. figure 5.14).

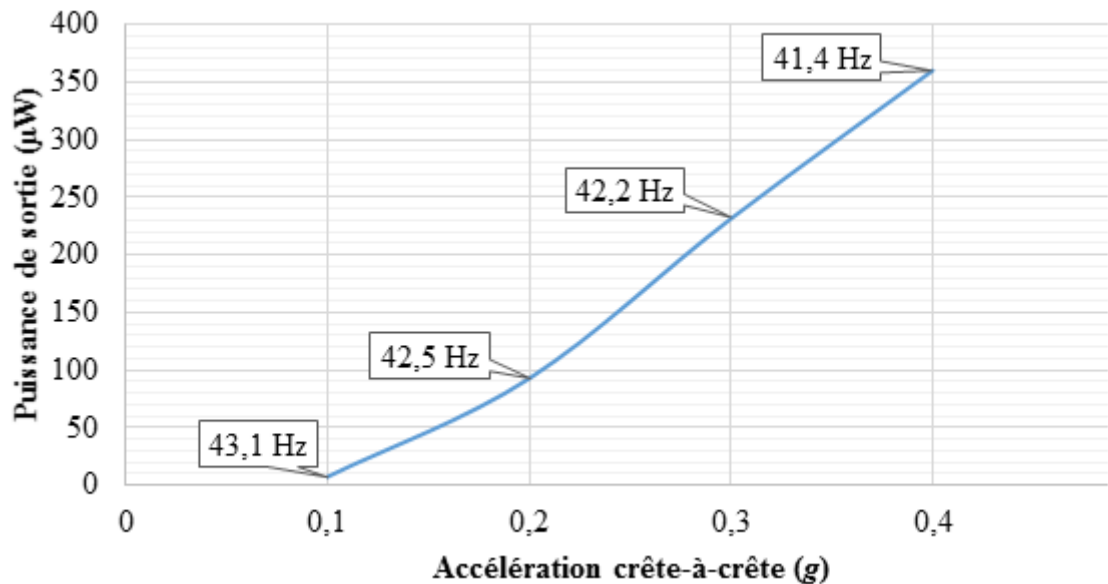


Figure 5.13. Puissance de sortie maximale par rapport à l'accélération sur charge résistive optimale.

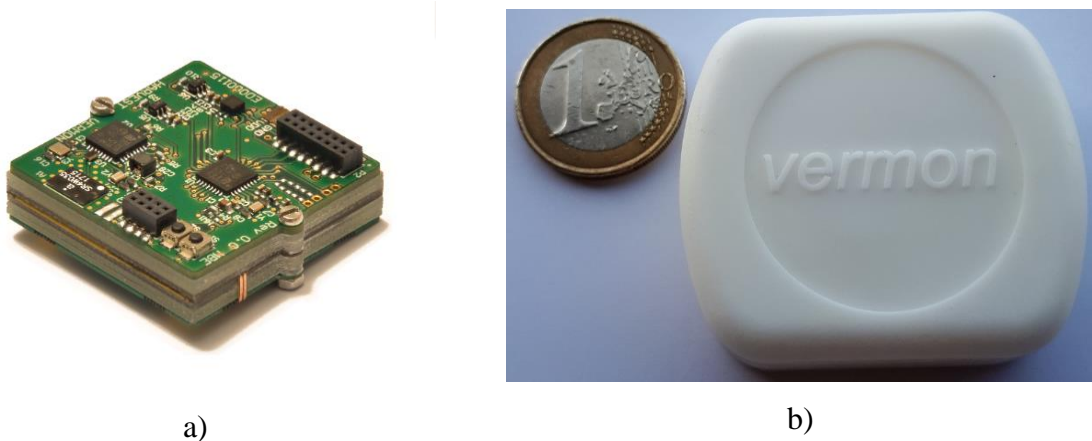


Figure 5.14. Photos a) du module intégré et b) de son boîtier.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le module d'un capteur autonome sans fil autoalimenté par un dispositif de récupération d'énergie vibratoire pour l'application de maintenance préventive. Il est composé d'un générateur piézoélectrique qui a été conçu et optimisé selon le guide de conception donné au chapitre 4, d'un circuit de management de puissance de Linear Technology LTC3331, d'éléments de stockage d'énergie, d'un

accéléromètre, d'un microcontrôleur ainsi que d'une communication BLE. L'avantage de ce module est qu'il est compact, modulaire et interchangeable. La caractérisation du générateur piézoélectrique et de son circuit CGP montre qu'il est capable de fournir suffisamment de puissance électrique pour satisfaire aux besoins énergétiques d'un capteur autonome pour une application de maintenance préventive.

Afin de réaliser un module de récupération d'énergie vibratoire, au-delà d'un générateur performant, le choix des composants électroniques joue un rôle important dans la réduction de l'énergie consommée par le circuit et permet d'en améliorer le rendement. Malgré la validation du fonctionnement des circuits UTC et UGA, testés indépendamment, nous avons rencontré un problème de chute de tension au démarrage quand les deux circuits sont connectés, empêchant le circuit UGA d'établir une tension de sortie stable. En effet, à chaque premier démarrage du LTC3331, la tension d'entrée (V_{IN}) doit dépasser un certain seuil (cf. la fiche de spécifications [159]) afin d'activer la gestion interne de la batterie. Or à chaque premier démarrage le microcontrôleur se réinitialise et consomme beaucoup de courant pendant une très courte durée (le temps de se mettre dans le mode « low power »), empêchant le LTC3331 d'atteindre la tension de seuil nécessaire à sa propre initialisation interne. Ce phénomène ne permet pas d'activer l'alimentation par la batterie pour compenser l'énergie fournie par le générateur au démarrage et donc le microcontrôleur ne peut fonctionner en mode normal. Un circuit commutateur piloté par un comparateur devra être considéré dans le circuit de l'UGA (à la sortie V_{OUT}) pour palier à cette difficulté.

Au niveau de l'intégration du générateur piézoélectrique dans le module, nous avons remarqué que le cadre en FR-4 et la fixation par les deux vis sur deux côtés ne sont pas suffisants pour assurer un bon encastrément du générateur. Des améliorations du système de fixation sont à envisager.

Au-delà des applications industrielles comme la maintenance préventive, les solutions de récupération d'énergie vibratoire développées ont également servi à rendre autonome des dispositifs médicaux implantés visant la mesure et le suivi au cours de temps de biomarqueurs comme la température, la pression artérielle ou autres. Des preuves de concept basées sur notre technologie sont en cours de test sur des modèles animaux.

Conclusion

Nous avons introduit dans cette thèse les enjeux et les technologies de récupération d'énergie ambiante. La récupération d'énergie vibratoire propose une solution alternative prometteuse pour alimenter des objets autonomes communicants. En réduisant la dépendance aux piles, elle participe à l'accélération du développement des objets sans fil communicants, en pleine croissance depuis près de dix ans. Le défi de ce type de technologie est de concevoir et fabriquer un dispositif adapté à des sources vibratoires environnantes ayant une fréquence fondamentale très basse et une amplitude relativement faible. De plus, la miniaturisation de ces dispositifs est requise dans certaines applications. Après une synthèse de l'état de l'art des technologies de récupération d'énergie vibratoire, nous avons présenté dans cette thèse la technologie basée sur des matériaux piézoélectriques pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. La structure de type poutre encastrée-libre s'est révélée être la meilleure candidate pour des sources vibratoires à faible accélération et basse fréquence. La fabrication des générateurs piézoélectriques par l'approche de l'amincissement des matériaux piézoélectriques massifs a été présentée dans cette thèse comme une technologie judicieuse pour fabriquer des générateurs efficaces.

Afin de concevoir un générateur piézoélectrique miniaturisé pour les applications de récupération d'énergie vibratoire basse fréquence, nous nous sommes orientés vers la modélisation par la méthode des éléments finis en tridimensionnel. Cela permet, d'un point de vue industriel, de réaliser la conception en 3D de nos dispositifs, ce qui s'avère nécessaire au niveau de l'intégration dans un module autonome. La modélisation par éléments finis a été utilisée pour mettre en place un outil de conception du générateur piézoélectrique. Nous avons d'abord fait la caractérisation fonctionnelle d'une couche piézoélectrique amincie afin de déterminer ses paramètres effectifs utiles pour la modélisation EF. Puis l'outil de simulation EF 3D de notre générateur piézoélectrique a été développé par étapes, en augmentant la complexité de la structure à partir de la couche PZT jusqu'au bimorphe. En confrontant nos modèles EF 3D avec des expériences menées en appliquant différentes conditions aux limites mécaniques et électriques, nous avons obtenu des modèles fiables qui permettent de prédire le comportement électromécanique de notre générateur piézoélectrique. Plusieurs paramètres d'intérêt pour la conception d'un générateur piézoélectrique ont ainsi été évalués, tels que la

puissance électrique récupérée, la tension aux bornes d'une charge résistive connectée au générateur, et le déplacement en bout de dispositif.

Grâce au modèle EF développé, nous avons proposé une démarche d'optimisation de notre générateur selon un cahier des charges fixé. Concernant la sélection des matériaux pour faire le générateur piézoélectrique, nous avons employé les FOMs (Figure Of Merit) intrinsèques du générateur, notamment la FOM à la résonance de Priya. Une céramique piézoélectrique dure a été sélectionnée pour le matériau actif, et le laiton comme raidisseur mécanique. Au niveau de la géométrie du générateur, des études paramétriques sur plusieurs paramètres de conception ont été faites en respectant le cahier des charges, y compris la fréquence de résonance et l'encombrement du dispositif. Suite à ces études, quelques recommandations sur la conception d'un générateur piézoélectrique ont été proposées pour en optimiser la performance :

- Les dimensions latérales du générateur doivent être maximisées dans l'espace latéral autorisé. La longueur est à privilégier, plutôt que la largeur.
- Les épaisseurs des différentes couches constitutives du dispositif sont à optimiser pour ajuster la fréquence de résonance du générateur égale à la valeur de consigne.
- La masse de la masselotte doit être maximisée, dans la gamme de valeurs autorisées. Toutefois, une étude sur la contrainte maximale doit être réalisée pour s'assurer que celle du dispositif en fonctionnement ne dépasse pas la limite élastique du matériau.

Au dernier chapitre de cette thèse, nous avons présenté une application réelle d'un dispositif de récupération d'énergie vibratoire piézoélectrique. Il s'agit d'un capteur autonome sans fil qui mesure l'accélération d'un système CVC pour la maintenance préventive de la machine. Concrètement, le module est composé d'un générateur piézoélectrique (optimisé selon un cahier des charges dont les données d'entrée sont la vibration mesurée sur le climatiseur), du circuit de gestion de la puissance LTC3331 de Linear Technology, d'éléments de stockage d'énergie, d'un accéléromètre, d'un microcontrôleur ainsi que d'une communication BLE. Nous avons démontré qu'il est capable de fournir une puissance électrique de $231 \mu\text{W}$ à partir d'une accélération de $0,3 \text{ g}$ crête-à-crête à la fréquence de $42,2 \text{ Hz}$, ce qui est satisfaisant pour les besoins énergétiques et le bon fonctionnement du capteur autonome avec un cycle de travail d'une seconde.

En résumé, nous avons présenté dans cette thèse une démarche de modélisation et de conception d'un générateur piézoélectrique qui a pour but d'adresser les besoins énergétiques d'applications réelles. Dans notre démonstration, le générateur développé est très performant en ce qui concerne sa NPD, pourtant sa bande passante est relativement faible. De ce fait, notre dispositif est moins efficace quand la vibration de la source varie, c'est-à-dire quand la fréquence de résonance du générateur sort du spectre vibratoire. En effet, le spectre vibratoire dans une application réelle peut varier en fonction du temps, ou des conditions de fonctionnement. Dans ces situations, cela nécessite de développer des techniques plus adaptées comme des générateurs non-linéaires ou des techniques de réglage de la fréquence de résonance. Des circuits de gestion de la puissance plus avancés sont aussi à envisager pour maximiser l'extraction d'énergie électrique récupérée par le générateur et permettre l'adaptation de la fréquence de fonctionnement.

Dans la perspective d'une poursuite de ce travail, des voies d'amélioration, notamment en ce qui concerne la modélisation du générateur sont immédiatement envisageables. Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle EF 3D, mais il s'agit uniquement d'un modèle linéaire qui est de fait limité pour prédire le comportement du générateur dans le domaine non-linéaire lorsque l'accélération est élevée (cf. chapitre 5). Par conséquent, une modélisation dans le domaine non-linéaire est fortement souhaitée pour prédire fidèlement le comportement du générateur. Une autre voie d'amélioration consiste en la modélisation du générateur couplé avec son circuit de gestion de la puissance, au lieu d'une charge résistive, pour permettre le dimensionnement d'un système complet. Du point de vue de l'électronique, nous envisageons de tester des circuits de gestion de la puissance présentés dans l'état-de l'art sur notre dispositif. En ce qui concerne les matériaux, d'autres céramiques piézoélectriques sont également à tester sur notre dispositif permettant d'avoir des générateurs plus efficaces. De plus, des matériaux sans plomb sont en cours d'essai pour développer un générateur respectueux de l'environnement.

Avec les progrès des technologies de récupération d'énergie en général et de la technologie de récupération d'énergie vibratoire par la piézoélectricité en particulier, nous espérons que dans un avenir proche des capteurs/objets communicants pourront être rendus entièrement autonomes. Et pour voir ce jour arriver, il nous semble également pertinent d'approfondir les aspects sur le vieillissement et la robustesse du dispositif dans le temps.

Bibliographies

- [1] www.gartner.com, 2017. [04-Sep-2018], <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2017-02-07-gartner-says-8-billion-connected-things-will-be-in-use-in-2017-up-31-percent-from-2016>.
- [2] Shaikh, F. K. and Zeadally, S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Mar. 2016. vol. 55. pp. 1041–1054.
- [3] Othman, M. F. and Shazali, K. Wireless Sensor Network Applications: A Study in Environment Monitoring System. *Procedia Engineering*. Jan. 2012. vol. 41. pp. 1204–1210.
- [4] Dargie, W. and Poellabauer, C. *Fundamentals of wireless sensor networks : theory and practice*. Wiley, 2010, 311.
- [5] Koydemir, H. C. and Ozcan, A. Wearable and Implantable Sensors for Biomedical Applications. *Annual Review of Analytical Chemistry*. Jun. 2018. vol. 11, no. 1. pp. 127–146.
- [6] Boisseau, S., Despesse, G., and Ahmed, B. Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting, in *Small-Scale Energy Harvesting*, InTech, 2012, pp. 91–134.
- [7] Yang, Z., Erturk, A., and Zu, J. On the efficiency of piezoelectric energy harvesters. *Extreme Mechanics Letters*. Sep. 2017. vol. 15, no. May. pp. 26–37.
- [8] www.silabs.com. [24-Nov-2018], <https://www.silabs.com/products/mcu/32-bit>.
- [9] www.st.com. [24-Nov-2018], <https://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>.
- [10] www.ti.com. [24-Nov-2018], <http://www.ti.com/microcontrollers/msp430-ultra-low-power-mcus/overview.html#>.
- [11] Roundy, S., Wright, P. K., and Rabaey, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*. Jul. 2003. vol. 26, no. 11. pp. 1131–1144.
- [12] Beeby, S. P. and O'Donnell, T. Electromagnetic Energy Harvesting, in *Energy Harvesting Technologies*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 129–161.
- [13] Mitcheson, P. D., Yeatman, E. M., Rao, G. K., Holmes, A. S., and Green, T. C. Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. *Proceedings of the IEEE*. Sep. 2008. vol. 96, no. 9. pp. 1457–1486.
- [14] Defosseux, M. *Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes*, Université de Grenoble, 2011, 209.

- [15] Risquez, S. *Microsystème électrostatique tridimensionnel de récupération d'énergie pour alimenter un stimulateur cardiaque sans sonde*, Université Paris- Saclay, 2017, 220.
- [16] Wei, C. and Jing, X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Jul. 2017. vol. 74, no. November 2016. pp. 1–18.
- [17] Roundy, S. J. *Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion*, University of California, Berkeley, 2003, 287.
- [18] kinergizer.com. [30-Apr-2019], <http://kinergizer.com/#home-products-header>.
- [19] revibeenergy.com. [30-Apr-2019], <https://revibeenergy.com/product-overview/>.
- [20] perpetuum.com. [30-Apr-2019], <https://perpetuum.com/technology/>.
- [21] Khan, F. U. and Qadir, M. U. State-of-the-art in vibration-based electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Oct. 2016. vol. 26, no. 10. p. 103001.
- [22] www.offgridenergyindependence.com. [27-May-2019], <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/6741/compact-vibration-harvester-power-supply-with-highest-efficiency>.
- [23] Calìò, R. *et al.* Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. *Sensors*. Mar. 2014. vol. 14, no. 3. pp. 4755–4790.
- [24] piezo.com. [02-May-2019], https://piezo.com/collections/piezoelectric-energy-harvesters?_pf&pf_t_quantity=Quantity__1.
- [25] www.piceramic.com. [02-May-2019], <https://www.piceramic.com/en/applications/energy-harvesting/>.
- [26] www.tekceleo.com. [02-May-2019], <http://www.tekceleo.com/technologies/vibration-energy-harvesting/>.
- [27] www.8power.com. [02-May-2019], <https://www.8power.com/vibration-energy-harvesting-technology/>.
- [28] www.wsstec.com. [02-May-2019], <https://www.wsstec.com/#>.
- [29] www.qortek.com. [02-May-2019], http://www.qortek.com/en/products/energy_harvesting/demeter-high-performance-piezoelectric-energy-harvesters/.
- [30] Beeby, S. P. *et al.* A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Jul. 2007. vol. 17, no. 7. pp. 1257–1265.

- [31] Zhang, Y., Wang, T., Luo, A., Hu, Y., Li, X., and Wang, F. Micro electrostatic energy harvester with both broad bandwidth and high normalized power density. *Applied Energy*. Feb. 2018. vol. 212, no. February. pp. 362–371.
- [32] Poulin, G., Sarraute, E., and Costa, F. Generation of electrical energy for portable devices. *Sensors and Actuators A: Physical*. Oct. 2004. vol. 116, no. 3. pp. 461–471.
- [33] Foisal, A. R. M., Hong, C., and Chung, G.-S. Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever. *Sensors and Actuators A: Physical*. Aug. 2012. vol. 182. pp. 106–113.
- [34] Yang, B. and Lee, C. Non-resonant electromagnetic wideband energy harvesting mechanism for low frequency vibrations. *Microsystem Technologies*. Jun. 2010. vol. 16, no. 6. pp. 961–966.
- [35] Sardini, E. and Serpelloni, M. An efficient electromagnetic power harvesting device for low-frequency applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*. Dec. 2011. vol. 172, no. 2. pp. 475–482.
- [36] Galchev, T., McCullagh, J., Peterson, R. L., and Najafi, K. A Vibration Harvesting System for Bridge Health Monitoring Applications, in *Proc. of PowerMEMS 2010, Leuven, Belgium, 2010*, pp. 3–6.
- [37] Wang, P., Tanaka, K., Sugiyama, S., Dai, X., Zhao, X., and Liu, J. A micro electromagnetic low level vibration energy harvester based on MEMS technology. *Microsystem Technologies*. Jun. 2009. vol. 15, no. 6. pp. 941–951.
- [38] Aktakka, E. E., Peterson, R. L., and Najafi, K. A CMOS-compatible piezoelectric vibration energy scavenger based on the integration of bulk PZT films on silicon, in *2010 International Electron Devices Meeting, 2010*, no. 2, pp. 31.5.1–31.5.4.
- [39] Elfrink, R. *et al.* Vibration energy harvesting with aluminum nitride-based piezoelectric devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Sep. 2009. vol. 19, no. 9. p. 094005.
- [40] Lei, A. *et al.* MEMS-based thick film PZT vibrational energy harvester, in *2011 IEEE 24th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2011*, no. June 2015, pp. 125–128.
- [41] Shen, D., Park, J.-H., Ajitsaria, J., Choe, S.-Y., Wickle, H. C., and Kim, D.-J. The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. May 2008. vol. 18, no. 5. p. 055017.

- [42] Tang, Q. C., Yang, Y. L., and Li, X. Bi-stable frequency up-conversion piezoelectric energy harvester driven by non-contact magnetic repulsion. *Smart Materials and Structures*. Dec. 2011. vol. 20, no. 12. p. 125011.
- [43] Liu, H., Tay, C. J., Quan, C., Kobayashi, T., and Lee, C. Piezoelectric MEMS Energy Harvester for Low-Frequency Vibrations With Wideband Operation Range and Steadily Increased Output Power. *Journal of Microelectromechanical Systems*. Oct. 2011. vol. 20, no. 5. pp. 1131–1142.
- [44] Aktakka, E. E. and Najafi, K. Three-axis piezoelectric vibration energy harvester, in *2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2015, vol. 2015-Febru, no. February, pp. 1141–1144.
- [45] Aktakka, E. E. and Najafi, K. A Micro Inertial Energy Harvesting Platform With Self-Supplied Power Management Circuit for Autonomous Wireless Sensor Nodes. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. Sep. 2014. vol. 49, no. 9. pp. 2017–2029.
- [46] Crovetto, A., Wang, F., and Hansen, O. An electret-based energy harvesting device with a wafer-level fabrication process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Nov. 2013. vol. 23, no. 11. p. 114010.
- [47] Wang, F., Wang, Y., Sun, D., Wang, L., Yang, J., and Jia, H. High performance $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ prepared in molten KCl-NaCl for rechargeable lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*. Feb. 2014. vol. 119. pp. 131–137.
- [48] Chiu, Y. and Lee, Y.-C. Flat and robust out-of-plane vibrational electret energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Jan. 2013. vol. 23, no. 1. p. 015012.
- [49] Guillemet, R., Basset, P., Galayko, D., Cottone, F., Marty, F., and Bourouina, T. Wideband MEMS electrostatic vibration energy harvesters based on gap-closing interdigitated combs with a trapezoidal cross section, in *2013 IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2013, pp. 817–820.
- [50] Cottone, F., Basset, P., Guillemet, R., Galayko, D., Marty, F., and Bourouina, T. Non-linear MEMS electrostatic kinetic energy harvester with a tunable multistable potential for stochastic vibrations, in *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, 2013, pp. 1336–1339.

- [51] Suzuki, Y., Miki, D., Edamoto, M., and Honzumi, M. A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Oct. 2010. vol. 20, no. 10. p. 104002.
- [52] Minakawa, Y., Chen, R., and Suzuki, Y. X-shaped-spring enhanced MEMS electret generator for energy harvesting, in *2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, 2013, pp. 2241–2244.
- [53] Tao, K., Lye, S. W., Miao, J., Tang, L., and Hu, X. Out-of-plane electret-based MEMS energy harvester with the combined nonlinear effect from electrostatic force and a mechanical elastic stopper. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. Oct. 2015. vol. 25, no. 10. p. 104014.
- [54] Asanuma, H., Hara, M., Oguchi, H., and Kuwano, H. Nonlinear restoring force of spring with stopper for ferroelectric dipole electret-based electrostatic vibration energy harvesters. *AIP Advances*. Jul. 2016. vol. 6, no. 7. p. 075206.
- [55] Siddique, A. R. M., Mahmud, S., and Heyst, B. Van. A comprehensive review on vibration based micro power generators using electromagnetic and piezoelectric transducer mechanisms. *Energy Conversion and Management*. 2015. vol. 106. pp. 728–747.
- [56] Siang, J., Lim, M. H., and Salman Leong, M. Review of vibration-based energy harvesting technology: Mechanism and architectural approach. *International Journal of Energy Research*. 2018. vol. 42, no. 5. pp. 1866–1893.
- [57] Panda, P. K. and Sahoo, B. PZT to lead free piezo ceramics: A review. *Ferroelectrics*. 2015. vol. 474, no. 1. pp. 128–143.
- [58] Levassort, F. A matrix method for modeling electroelastic moduli of 0-3 piezo-composites. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Mar. 1997. vol. 44, no. 2. pp. 445–452.
- [59] Ueberschlag, P. PVDF piezoelectric polymer. *Sensor Review*. Jun. 2001. vol. 21, no. 2. pp. 118–125.
- [60] Kuang, Y., Daniels, A., and Zhu, M. A sandwiched piezoelectric transducer with flex end-caps for energy harvesting in large force environments. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Aug. 2017. vol. 50, no. 34. p. 345501.
- [61] Kim, H. W. *et al.* Energy harvesting using a piezoelectric “cymbal” transducer in dynamic environment. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*. 2004. vol. 43, no. 9 A. pp. 6178–6183.

- [62] Zhou, M., Al-Furjan, M. S. H., Zou, J., and Liu, W. A review on heat and mechanical energy harvesting from human – Principles, prototypes and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. vol. 82, no. October 2016. pp. 3582–3609.
- [63] Xu, T.-B. *et al.* Energy harvesting using a PZT ceramic multilayer stack. *Smart Materials and Structures*. Jun. 2013. vol. 22, no. 6. p. 065015.
- [64] Chen, X., Yang, T., Wang, W., and Yao, X. Vibration energy harvesting with a clamped piezoelectric circular diaphragm. *Ceramics International*. Jan. 2012. vol. 38, no. SUPPL. 1. pp. S271–S274.
- [65] Mane, P., Mossi, K., Green, C., and Bryant, R. Studying the effects of temperature on energy harvesting using pre-stressed piezoelectric diaphragms, in *Proceedings of SPIE*, 2007, vol. 6526, p. 65260K.
- [66] Wang, W., Yang, T., Chen, X., Yao, X., and Qifa Zhou. Vibration energy harvesting using piezoelectric circular diaphragm array, in *2011 International Symposium on Applications of Ferroelectrics (ISAF/PFM) and 2011 International Symposium on Piezoresponse Force Microscopy and Nanoscale Phenomena in Polar Materials*, 2011, vol. 59, no. 9, pp. 1–4.
- [67] Xiao, Z., Yang, T. Q., Dong, Y., and Wang, X. C. Energy harvester array using piezoelectric circular diaphragm for broadband vibration. *Applied Physics Letters*. 2014. vol. 104, no. 22. pp. 1–5.
- [68] Shen, Z., Liu, S., Miao, J., Woh, L. S., and Wang, Z. Spiral electrode d33 mode piezoelectric diaphragm combined with proof mass as energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2015. vol. 25, no. 3. p. 035004.
- [69] Kim, H. S., Kim, J.-H., and Kim, J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. Dec. 2011. vol. 12, no. 6. pp. 1129–1141.
- [70] Toprak, A. and Tigli, O. Piezoelectric energy harvesting: State-of-the-art and challenges. *Applied Physics Reviews*. Sep. 2014. vol. 1, no. 3. p. 031104.
- [71] Saadon, S. and Sidek, O. A review of vibration-based MEMS piezoelectric energy harvesters. *Energy Conversion and Management*. Jan. 2011. vol. 52, no. 1. pp. 500–504.
- [72] Priya, S. *et al.* A Review on Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*. Jan. 2017. vol. 4, no. 1. pp. 3–39.
- [73] Kang, M. G., Jung, W. S., Kang, C. Y., and Yoon, S. J. Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies. *Actuators*. 2016. vol. 5, no. 1. p. 5.

- [74] Li, H., Tian, C., and Deng, Z. D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*. Dec. 2014. vol. 1, no. 4. p. 041301.
- [75] Bowen, C. R., Kim, H. A., Weaver, P. M., and Dunn, S. Piezoelectric and ferroelectric materials and structures for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.* 2014. vol. 7, no. 1. pp. 25–44.
- [76] Anton, S. R. and Sodano, H. a. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures*. Jun. 2007. vol. 16, no. 3. pp. R1–R21.
- [77] Park, J.-H., Ahn, H., Kim, S.-B., Kim, S.-H., and Kim, D.-J. Comparison of Transduction Efficiency for Energy Harvester between Piezoelectric Modes, in *Proulx T. (eds) MEMS and Nanotechnology, Volume 2. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, vol. 2, Springer, New York, NY, 2011, pp. 33–39.
- [78] Todaro, M. T. *et al.* Piezoelectric MEMS vibrational energy harvesters: Advances and outlook. *Microelectronic Engineering*. Nov. 2017. vol. 183–184, no. October. pp. 23–36.
- [79] Kong, L. B., Li, T., Hng, H. H., Boey, F., Zhang, T., and Li, S. Waste Mechanical Energy Harvesting (I): Piezoelectric Effect, in *Waste Energy Harvesting*, vol. 24, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 19–133.
- [80] Kanda, K., Hirai, S., Fujita, T., and Maenaka, K. Piezoelectric MEMS with multilayered Pb(Zr,Ti)O₃ thin films for energy harvesting. *Sensors and Actuators A: Physical*. Oct. 2018. vol. 281. pp. 229–235.
- [81] He, X., Wen, Q., Lu, Z., Shang, Z., and Wen, Z. A micro-electromechanical systems based vibration energy harvester with aluminum nitride piezoelectric thin film deposited by pulsed direct-current magnetron sputtering. *Applied Energy*. Oct. 2018. vol. 228, no. April. pp. 881–890.
- [82] Nielsen-Lonn, M., Harikumar, P., Wikner, J. J., and Alvandpour, A. Design of efficient CMOS rectifiers for integrated piezo-MEMS energy-harvesting power management systems, in *2015 European Conference on Circuit Theory and Design (ECCTD)*, 2015, pp. 1–4.
- [83] White, N. M., Glynne-Jones, P., and Beeby, S. P. A novel thick-film piezoelectric micro-generator. *Smart Materials and Structures*. Aug. 2001. vol. 10, no. 4. pp. 850–852.
- [84] Gentry, K. L., Zara, J. M., Sang-Don Bu, Chang-Beom Eom, and Smith, S. W. Thick film sol gel PZT transducer using dip coating, in *2000 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium (Cat. No.00CH37121)*, 2000, vol. 2, pp. 977–980.
- [85] Feuillard, G., Kuscer, D., Tran-Huu-Hue, L. P., Clezio, E. Le, Kosec, M., and Lethiecq, M. Electroacoustic performance of high frequency PZT based transducer fabricated by

electrophoretic deposition: comparison with screen printing technique, in *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2009, pp. 1138–1141.

[86] Qin, L. *et al.* Fabrication and characterization of thick-film piezoelectric lead zirconate titanate ceramic resonators by tape-casting. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Dec. 2012. vol. 59, no. 12. pp. 2803–2812.

[87] Baba, S., Tsuda, H., and Akedo, J. Thickness dependence of electrical properties of PZT films deposited on metal substrates by laser-assisted aerosol deposition. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. May 2008. vol. 55, no. 5. pp. 1009–1016.

[88] Colin, M., Basrour, S., Rufer, L., Bantignies, C., and Nguyen-Dinh, A. Highly Efficient Low-frequency Energy Harvester Using Bulk Piezoelectric Ceramics. *Journal of Physics: Conference Series*. Dec. 2013. vol. 476. p. 012133.

[89] Nguyen, H. H., Van Minh, L., Oguchi, H., and Kuwano, H. Development of highly efficient micro energy harvesters with MgHf-codoped AlN piezoelectric films, in *2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2018, pp. 222–225.

[90] Le Van Minh, Hara, M., Yokoyama, T., Nishihara, T., Ueda, M., and Kuwano, H. Highly piezoelectric MgZr co-doped aluminum nitride-based vibrational energy harvesters [Correspondence]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Nov. 2015. vol. 62, no. 11. pp. 2005–2008.

[91] Muralt, P., Marzencki, M., Belgacem, B., Calame, F., and Basrour, S. Vibration Energy Harvesting with PZT Micro Device. *Procedia Chemistry*. Sep. 2009. vol. 1, no. 1. pp. 1191–1194.

[92] Won, S. S. *et al.* Lead-free Mn-doped (K_{0.5},Na_{0.5})NbO₃ piezoelectric thin films for MEMS-based vibrational energy harvester applications. *Applied Physics Letters*. Jun. 2016. vol. 108, no. 23. p. 232908.

[93] Wang, P. and Du, H. ZnO thin film piezoelectric MEMS vibration energy harvesters with two piezoelectric elements for higher output performance. *Review of Scientific Instruments*. Jul. 2015. vol. 86, no. 7. p. 075002.

[94] Tang, G. *et al.* Piezoelectric MEMS generator based on the bulk PZT/silicon wafer bonding technique. *physica status solidi (a)*. Dec. 2011. vol. 208, no. 12. pp. 2913–2919.

[95] Yi, Z. *et al.* High performance bimorph piezoelectric MEMS harvester via bulk PZT thick films on thin beryllium-bronze substrate. *Applied Physics Letters*. Jul. 2017. vol. 111, no. 1. p. 013902.

- [96] Tian, Y., Li, G., Yi, Z., Liu, J., and Yang, B. A low-frequency MEMS piezoelectric energy harvester with a rectangular hole based on bulk PZT film. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2018. vol. 117, no. February. pp. 21–27.
- [97] Janphuang, P., Lockhart, R., Uffer, N., Briand, D., and de Rooij, N. F. Vibrational piezoelectric energy harvesters based on thinned bulk PZT sheets fabricated at the wafer level. *Sensors and Actuators A: Physical*. Apr. 2014. vol. 210. pp. 1–9.
- [98] Aktakka, E. E., Peterson, R. L., and Najafi, K. Thinned-PZT on SOI process and design optimization for piezoelectric inertial energy harvesting, in *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2011, pp. 1649–1652.
- [99] Quintero, A. V., Besse, N., Janphuang, P., Lockhart, R., Briand, D., and de Rooij, N. F. Design optimization of vibration energy harvesters fabricated by lamination of thinned bulk-PZT on polymeric substrates. *Smart Materials and Structures*. Apr. 2014. vol. 23, no. 4. p. 045041.
- [100] Ferin, G., Thien Hoang, Bantignies, C., Hung Le Khanh, Flesch, E., and An Nguyen-Dinh. Powering autonomous wireless sensors with miniaturized piezoelectric based energy harvesting devices for NDT applications, in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2015, pp. 1–4.
- [101] Williams, C. B. and Yates, R. B. Analysis of a micro-electric for microsystems. *Sensors and actuators*. Mar. 1996. vol. 52, no. 1–3. pp. 8–11.
- [102] Erturk, a and Inman, D. J. Issues in mathematical modeling of piezoelectric energy harvesters. *Smart Materials and Structures*. 2008. vol. 17, no. 6. p. 065016.
- [103] Richards, C. D., Anderson, M. J., Bahr, D. F., and Richards, R. F. Efficiency of energy conversion for devices containing a piezoelectric component. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2004. vol. 14, no. 5. pp. 717–721.
- [104] DuToit, N. E. and Wardle, B. L. Experimental Verification of Models for Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *AIAA Journal*. 2007. vol. 45, no. 5. pp. 1126–1137.
- [105] Roundy, S. and Wright, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures*. Oct. 2004. vol. 13, no. 5. pp. 1131–1142.
- [106] Erturk, A. and Inman, D. J. A Distributed Parameter Electromechanical Model for Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters. *Journal of Vibration and Acoustics*. 2008. vol. 130, no. 4. p. 041002.

- [107] Erturk, a. and Inman, D. J. On Mechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2008. vol. 19, no. 11. pp. 1311–1325.
- [108] Erturk, A. and Inman, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Materials and Structures*. 2009. vol. 18, no. 2. p. 025009.
- [109] Lin, J. H., Wu, X. M., Ren, T. L., and Liu, L. T. Modeling and simulation of piezoelectric mems energy harvesting device. *Integrated Ferroelectrics*. Dec. 2007. vol. 95, no. 1. pp. 128–141.
- [110] Chen, S.-N., Wang, G.-J., and Chien, M.-C. Analytical modeling of piezoelectric vibration-induced micro power generator. *Mechatronics*. Sep. 2006. vol. 16, no. 7. pp. 379–387.
- [111] Lu, F., Lee, H. P., and Lim, S. P. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart Materials and Structures*. Feb. 2004. vol. 13, no. 1. pp. 57–63.
- [112] Yu, S., He, S., and Li, W. Theoretical and experimental studies of beam bimorph piezoelectric power harvesters. *Journal of Mechanics of Materials and Structures*. 2010. vol. 5, no. 3. pp. 427–445.
- [113] Amini, Y., Fatehi, P., Heshmati, M., and Parandvar, H. Time domain and frequency domain analysis of functionally graded piezoelectric harvesters subjected to random vibration: Finite element modeling. *Composite Structures*. Feb. 2016. vol. 136. pp. 384–393.
- [114] Upadrashta, D. and Yang, Y. Finite element modeling of nonlinear piezoelectric energy harvesters with magnetic interaction. *Smart Materials and Structures*. Apr. 2015. vol. 24, no. 4. p. 045042.
- [115] Benasciutti, D., Moro, L., Zelenika, S., and Brusa, E. Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes. *Microsystem Technologies*. 2010. vol. 16, no. 5. pp. 657–668.
- [116] Meiling Zhu, Worthington, E., and Njuguna, J. Analyses of power output of piezoelectric energy-harvesting devices directly connected to a load resistor using a coupled piezoelectric-circuit finite element method. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. Jul. 2009. vol. 56, no. 7. pp. 1309–1317.

- [117] Mohamed, R., Sarker, M. R., and Mohamed, A. An optimization of rectangular shape piezoelectric energy harvesting cantilever beam for micro devices. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. Mar. 2016. vol. 50, no. 4. pp. 537–548.
- [118] Delaunay, T., Le Clezio, E., Guennou, M., Dammak, H., Mai Pham Thi, and Feuillard, G. Full tensorial characterization of PZN-12%PT single crystal by resonant ultrasound spectroscopy. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. Feb. 2008. vol. 55, no. 2. pp. 476–488.
- [119] Wasa, K., Kanno, I., and Kotera, H. Fundamentals of thin film piezoelectric materials and processing design for a better energy harvesting MEMS, in *Power MEMS 2009*, 2009, vol. 61, pp. 61–66.
- [120] Feuillard, G., Bavencoffe, M., Fortineau, J., Jaber, N., Negulescu, B., and Wolfman, J. Measurement of the effective piezoelectric coefficient on PZT film integrated structures using laser interferometry, in *Electroceramics for End-users VII, Piezo 2013*, 2013.
- [121] Bavencoffe, M., Tembhurnikar, N., Negulescu, B., Wolfman, J., and Feuillard, G. Modelling and experimental measurements of the mechanical response of piezoelectric structures from millimetre to micrometre. *Advances in Applied Ceramics*. Jul. 2018. vol. 117, no. 5. pp. 285–290.
- [122] Brissaud, M. *Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2007, 448.
- [123] Hoang, T. *et al.* Characterization of a thin piezoelectric material before integration into a cantilever-based mechanical energy harvester, in *IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS*, 2016, vol. 2016-Novem, pp. 31–34.
- [124] Hoang, T. *et al.* Parametric study of a thin piezoelectric cantilever for energy harvesting applications. *Advances in Applied Ceramics*. May 2018. vol. 117, no. 4. pp. 231–236.
- [125] Byrd, R. H., Hribar, M. E., and Nocedal, J. An Interior Point Algorithm for Large Scale Nonlinear Programming. *SIAM J. of Opt.* 2000. vol. 9, no. 4. pp. 877–900.
- [126] Hoang, T. *et al.* Modeling and Electrical Characterization of a Cantilever Beam for Mechanical Energy Harvesting, in *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2018, pp. 1–4.
- [127] Goodfellow.com. [19-Jan-2019], <http://www.goodfellow.com/>.
- [128] Aglietti, G. S. and Cunningham, P. R. Is a Simple Support Really That Simple ? *Journal of Sound and Vibration*. 2002. vol. 257. pp. 321–335.

- [129] Guillon, S. *et al.* Effect of non-ideal clamping shape on the resonance frequencies of silicon nanocantilevers. *Nanotechnology*. 2011. vol. 22, no. 24. p. 245501.
- [130] Ritto, T., Aguiar, R., Sampaio, R., and Cataldo, E. How to match theoretical and experimental boundary conditions of a cantilever beam, in *7th European Conference on Structural Dynamics*, 2008, pp. 1–13.
- [131] someco.fr. [22-Jan-2019], <https://www.someco.fr/>.
- [132] Hoang, T. *et al.* Modeling Of The Clamping Fixture Of A Piezoelectric Cantilever-type Energy Harvesting Device, in *COMSOL Conference*, 2017, pp. 2–4.
- [133] Roundy, S. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16, no. 10. pp. 809–823, 2005.
- [134] Priya, S. Criterion for material selection in design of bulk piezoelectric energy harvesters. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2010. vol. 57, no. 12. pp. 2610–2612.
- [135] Takeda, H., Mihara, K., Yoshimura, T., Hoshina, T., and Tsurumi, T. Effect of Material Constants on Power Output in Piezoelectric Vibration-Based Generators. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. 2011. vol. 58, no. 9. pp. 1852–1859.
- [136] Wasa, K., Matsushima, T., Adachi, H., Kanno, I., and Kotera, H. Thin-film piezoelectric materials for a better energy harvesting MEMS. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2012. vol. 21, no. 2. pp. 451–457.
- [137] Chauhan, A. and Vaish, R. Material Selection for Piezoelectric Devices. *Advanced Science, Engineering and Medicine*. Jul. 2013. vol. 5, no. 7. pp. 715–719.
- [138] Liu, W. Q., Badel, A., Formosa, F., and Wu, Y. P. A new figure of merit for wideband vibration energy harvesters. *Smart Materials and Structures*. Dec. 2015. vol. 24, no. 12. p. 125012.
- [139] Erturk, A. *Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters*, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009, 291.
- [140] Shahab, S., Zhao, S., and Erturk, A. Soft and Hard Piezoelectric Ceramics and Single Crystals for Random Vibration Energy Harvesting. *Energy Technology*. May 2018. vol. 6, no. 5. pp. 935–942.
- [141] Kim, M., Dugundji, J., and Wardle, B. L. Efficiency of piezoelectric mechanical vibration energy harvesting. *Smart Materials and Structures*. 2015. vol. 24, no. 5. p. 55006.

- [142] Andosca, R. *et al.* Experimental and theoretical studies on MEMS piezoelectric vibrational energy harvesters with mass loading. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2012. vol. 178. pp. 76–87.
- [143] Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M., and Holmes, A. S. Architectures for vibration-driven micropower generators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2004. vol. 13, no. 3. pp. 429–440.
- [144] Al Majid, A. *Dissipation de l'énergie en mécanique vibratoire - opérateur d'hysteresis - phénomène métrique*, INSA de Lyon, 2002, 169.
- [145] Mevada, H. and Patel, D. Experimental Determination of Structural Damping of Different Materials. *Procedia Engineering*. Jan. 2016. vol. 144. pp. 110–115.
- [146] Zhang, J., Perez, R. J., and Lavernia, E. J. Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials. *Journal of Materials Science*. 1993. vol. 28, no. 9. pp. 2395–2404.
- [147] Kim, M., Hoegen, M., Dugundji, J., and Wardle, B. L. Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance. *Smart Materials and Structures*. 2010. vol. 19, no. 4.
- [148] Tang, L. and Wang, J. Size effect of tip mass on performance of cantilevered piezoelectric energy harvester with a dynamic magnifier. *Acta Mechanica*. Nov. 2017. vol. 228, no. 11. pp. 3997–4015.
- [149] Ruiz, R. O. and Meruane, V. Uncertainties propagation and global sensitivity analysis of the frequency response function of piezoelectric energy harvesters. *Smart Materials and Structures*. 2017. vol. 26, no. 6.
- [150] Karimi, M., Karimi, A. H., Tikani, R., and Ziaei-Rad, S. Experimental and theoretical investigations on piezoelectric-based energy harvesting from bridge vibrations under travelling vehicles. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2016. vol. 119, no. July. pp. 1–11.
- [151] Khan, A., Abas, Z., Soo Kim, H., and Oh, I. K. Piezoelectric thin films: An integrated review of transducers and energy harvesting. *Smart Materials and Structures*. 2016. vol. 25, no. 5. p. 0.
- [152] Wu, Y., Badel, A., Formosa, F., Liu, W., and Agbossou, A. E. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Aug. 2013. vol. 24, no. 12. pp. 1445–1458.
- [153] Lallart, M., Garbuio, L., Petit, L., Richard, C., and Guyomar, D. Double synchronized switch harvesting (DSSH): a new energy harvesting scheme for efficient energy extraction.

IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Oct. 2008. vol. 55, no. 10. pp. 2119–2130.

[154] Lefeuvre, E. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Oct. 2005. vol. 16, no. 10. pp. 865–876.

[155] Badel, A., Guyomar, D., Lefeuvre, E., and Richard, C. Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Oct. 2005. vol. 16, no. 10. pp. 889–901.

[156] Guyomar, D., Badel, A., Lefeuvre, E., and Richard, C. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*. Apr. 2005. vol. 52, no. 4. pp. 584–594.

[157] Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., Petit, L., and Guyomar, D. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors and Actuators, A: Physical*. Feb. 2006. vol. 126, no. 2. pp. 405–416.

[158] Wu, Y. *Récupération d'énergie vibratoire large bande à partir de transducteurs piézoélectriques*, Université de Grenoble, 2014, 169.

[159] www.analog.com. [23-Oct-2018], <https://www.analog.com/en/products/ltc3331.html#product-overview>.

[160] www.st.com. [01-Aug-2019], <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l442kc.pdf>.

[161] www.st.com. [01-Aug-2019], <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bluenrg-ms.pdf>.

[162] www.st.com. [23-Oct-2018], <https://www.st.com/resource/en/datasheet/iis2dh.pdf>.

[163] Triplett, a. and Quinn, D. D. The Effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2009. vol. 20, no. 16. pp. 1959–1967.



Annexe 1 :

Parametric study of a thin piezoelectric cantilever for energy harvesting applications

T. Hoang^{a,b}, G. Poulin-Vittrant^b, G. Ferin^a, F. Levassort^b, C. Bantignies^a, A. Nguyen-Dinh^a and M. Bavencoffe^b

^aAdvanced Research Department, Vermon S.A., Tours, France; ^bGREMAN UMR7347, Université de Tours, INSA-CVL, CNRS, Blois, France

ABSTRACT

Nowadays, bimorph piezoelectric cantilevers are commonly used in ambient vibrational piezoelectric energy harvesting. They are constituted of two thin layers of piezoelectric material separated by an inner shim material. To help the design process of these energy harvesting devices, analytical and numerical models have been developed. This work presents a parametric study to determine the effective coefficients of a thinned piezoelectric layer. To this aim, a one-dimensional analytical model and a three-dimensional finite element (FE) model are investigated: a thinned layer of PZT material in free mechanical boundary conditions is considered. The one-dimensional analytical admittance model allows the determination of the elastic, dielectric and piezoelectric coefficients ($s_{11}^E, \varepsilon_{33}^T, d_{31}$) of the piezoelectric layer. Then, in order to determine the influence of all coefficients of the compliance, dielectric and piezoelectric tensors, a FE model is investigated.

ARTICLE HISTORY

Received 11 April 2017
Accepted 26 October 2017

KEYWORDS

Energy harvesting;
parametric study;
piezoelectricity; finite
element model; electrical
impedance; functional
characterisation

Introduction

Ambient vibration energy harvesting by piezoelectric materials has been an area of extensive research over the last decade [1,2]. This technology enables to convert mechanical energy available in the environment into useful electrical energy. This is a promising solution for reducing the battery dependency in autonomous wireless sensors networks, structural health monitoring applications [3], or implantable medical devices [4].

Many demonstrations in literature have been presented using piezoelectric thin or thick films deposited on silicon or glass substrates by MEMS process [5]. Unfortunately, such MEMS devices operate at high frequencies (>200 Hz) while most ambient vibrations exhibit lower frequencies (1–200 Hz) [6]. To overcome this limitation, a mechanical thinning process of bulk PZT material is a promising alternative solution. This technology proposes an efficient and miniaturised piezoelectric energy harvesting operating at low frequency (<100 Hz) [3]. As a matter of fact, the most common structure used in vibration energy harvesting is a clamped/free piezoelectric bimorph cantilever beam, which is constituted of two piezoelectric layers separated by an inner shim material (cf. Figure 1(a)). First, two plates made of hard PZT ceramic are bonded on the two opposite faces of a thin brass layer using epoxy adhesive. Second, each face of the bimorph is grinded to the desired thickness. Then, the square bimorph is metallised: electrode materials made of chromium and gold are deposited on each face of the

device. Finally, the bimorph is cut into several rectangular bimorphs with the desired dimensions. To understand and predict the behaviour of such cantilever-based mechanical energy harvester, analytical and numerical models are developed [7,8]. However, it is commonly known that material properties of piezoelectric thin films differ from bulk ones [9,10]. This can be a significant source of error for the device simulation, using analytical models or finite element (FE) models. The accurate evaluation of the material parameters is a key issue which led to the development of various methods [11–13]. The present work is an original method for determination of the effective parameters, in order to get an accurate three-dimensional (3D) FE model of piezoelectric bimorph cantilevers.

First, a one-dimensional (1D) analytical model is used to identify the effective parameters of the PZT layer. Second, the full three tensors of material are evaluated using the 3D FE modelling. Third, a thinned PZT layer at free/free boundary conditions is characterised to get an accurate set of parameters for the 3D FE modelling. Finally, experimental results are compared to numerical results.

Identification of the effective parameters of electrical admittance using 1D analytical model

A 1D analytical model was developed by Brissaud [14] based on the IEEE resonance method [14,15].

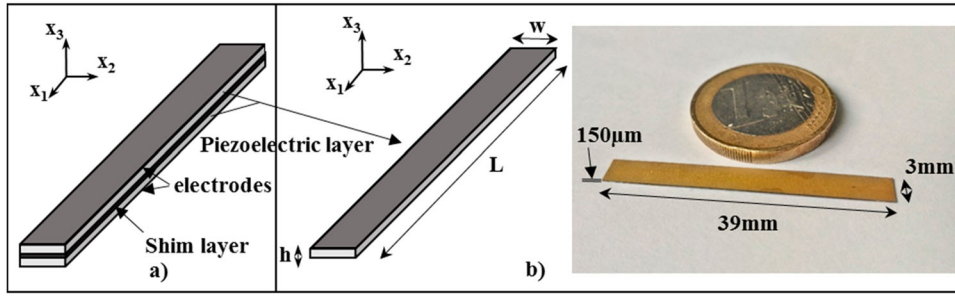


Figure 1. Scheme of the bimorph (a), scheme and photograph of the PZT sample (b).

This model is used in the present work in order to calculate the admittance of a thin layer of PZT material vibrating in the length extensional mode. The test sample must satisfy the assumption that the length (L) is much longer than the width (w) and the thickness (h) ($L \gg w, h$) (cf. Figure 1(b)). Moreover, the test sample is considered at free/free boundary conditions and poled in the thickness direction.

The device is electrically stimulated by an AC voltage source. As the top and bottom surfaces of the sample are covered by electrodes, the electric field E_3 is considered constant along the thickness and the following components of the electric displacement and the electric field are, in a first approximation, null: $D_1 = D_2 = 0$, $E_1 = E_2 = 0$. Then, the plane wave propagating along x_1 axis is confined between two equipotential surfaces and the propagation is occurring at constant field.

Assuming that $L \gg w, h$, the propagating plane wave generates a stress $T_1 \neq 0$ along x_1 axis and the two other stresses T_2 and T_3 (along x_2 axis and x_3 axis, respectively) are very weak compared to T_1 . Then, in a first approximation, T_2 and T_3 can be neglected in comparison to T_1 . As a plane wave does not generate shear components, the components T_4, T_5, T_6 and S_4, S_5, S_6 are assumed to be zero.

So the reduced constitutive equations are

$$\begin{cases} S_1 = s_{11}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ S_2 = s_{12}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ S_3 = s_{13}^E T_1 + d_{31} E_3 \\ D_3 = d_{31} T_1 + \epsilon_{33}^T E_3 \end{cases} \quad (1)$$

The electrical admittance (Y) in the considered length extensional mode is [14]

$$Y = jC_0 \omega \left[1 + \frac{k_{31}^2}{1 - k_{31}^2} \frac{\tan \frac{\alpha_1 L}{2}}{\frac{\alpha_1 L}{2}} \right] \quad (2)$$

The impedance Z is the inverse of the admittance Y

$$Z = \frac{1}{Y} \quad (3)$$

In Equation (2), α_1 is the wave number and C_0 is the blocking capacitance defined by [14]

$$C_0 = \epsilon_{33}^T (1 - k_{31}^2) \frac{wL}{h} \quad (4)$$

where k_{31} is the electromechanical coupling coefficient in the length extensional mode

$$k_{31} = \frac{\sqrt{\frac{-\pi f_a}{2f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2f_r}\right)}}{\sqrt{1 - \frac{\pi f_a}{2f_r} \cot\left(\frac{\pi f_a}{2f_r}\right)}} \quad (5)$$

In which f_r is the resonance frequency at which the value of the impedance is minimum (Z_r), and f_a is the anti-resonance frequency at which the electrical impedance is maximum (Z_a).

This model allows the identification of the effective values of s_{11}^E , d_{31} and ϵ_{33}^T coefficients, as summarised in Figure 2.

By measuring the resonance frequency f_r and the anti-resonance frequency f_a of the length extensional mode, the compliance coefficient is determined with the following formula:

$$s_{11}^E = \frac{1}{4\rho(Lf_r)^2} \quad (6)$$

Then the piezoelectric coefficient is determined as

$$d_{31}^2 = k_{31}^2 s_{11}^E \epsilon_{33}^T \quad (7)$$

where the electromechanical coupling k_{31} is determined using Equation (5) and the permittivity ϵ_{33}^T is estimated using (4) and C_0 measurement at $2f_r$ (at this frequency, the tangent part in Y is null). It should be noted that the same value of ϵ_{33}^T was obtained by measuring the sample's static capacitance at low frequency (1 kHz) [15].

Thanks to the 1D analytical model, some effective coefficients of the piezoelectric material can be evaluated. But the other effective components of the elastic compliance, piezoelectric coefficient and dielectric permittivity tensors have not yet been identified. Therefore, a 3D FE model is developed to evaluate the effect of all the other components on the impedance

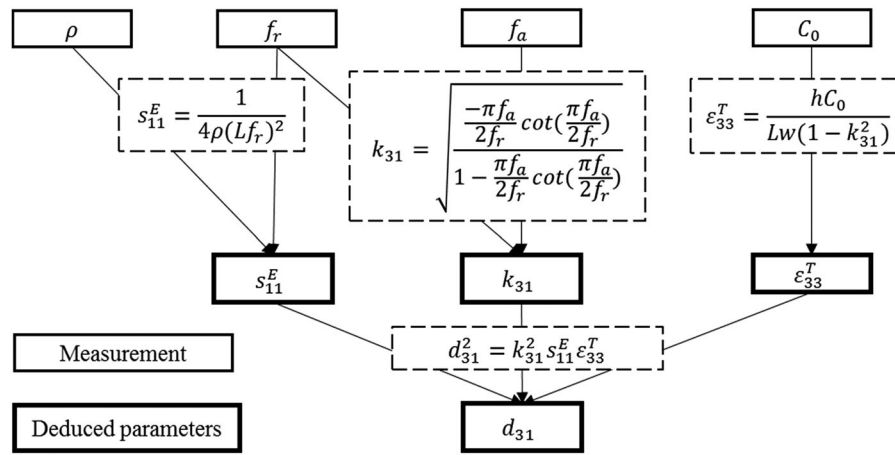


Figure 2. Scheme of coefficient determination method.

in the length extensional mode. This model is implemented thanks to COMSOL Multiphysics® software with structural mechanics and AC/DC modules.

Parametric study of the electrical admittance by 3D FE modelling

For the 3D FE modelling, the tensors of compliance, piezoelectric and permittivity constants of the considered material have to be completed (cf. Figure 3).

A parametric study is carried out on the three tensors components, except the components identified thanks to the 1D model, in order to evaluate their influence on the electrical impedance in length extensional mode. To this aim, a 3 mm × 39 mm × 150 μm thinned PZT layer is modelled in 3D with a hexahedral mesh made of 500 elements with dimension 0.6 × 0.78 × 0.075 mm³. Free/free mechanical boundary conditions are imposed on the thin film extremities (faces parallel to (x₂, x₃) plane), which are connected to an alternative voltage source. Then, frequency domain studies are carried out. For these studies, apart from the already evaluated coefficients, all the other coefficients vary within [20–200%] of the manufacturer's values.

The correlation coefficient between the impedance curves obtained with the 1D analytical model and the 3D FE model is assessed in the following section. To this end, we introduce a normalised coefficient defined as the ratio (η) of the evaluated coefficient value to the initial manufacturer's value, thus η is varying between

Elastic tensor						Piezoelectric tensor					
s_{11}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	0	0	0	0	0	0	0	d_{15}	0
s_{21}^E	s_{22}^E	s_{23}^E	0	0	0	0	0	0	d_{31}	d_{31}	0
s_{31}^E	s_{32}^E	s_{33}^E	0	0	0	0	0	0	d_{33}	0	0
0	0	0	s_{44}^E	0	0	Permittivity tensor					
0	0	0	0	s_{55}^E	0	ϵ_{11}^T	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	s_{66}^E	0	ϵ_{11}^T	0	0	0	0
$s_{11}^E = s_{22}^E, s_{13}^E = s_{23}^E, s_{44}^E = s_{55}^E, s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E)$						0	0	ϵ_{33}^T	0	0	0

Figure 3. Material coefficient tensors.

0.2 and 2. Meanwhile all other parameters are set to datasheet values.

Elastic tensor

Figure 4 shows the correlation coefficient (R) as a function of the normalised value of each coefficient of the compliance matrix. This correlation coefficient decreases when s_{12}^E coefficient increases. Concerning the $s_{13}^E, s_{33}^E, s_{44}^E$ and s_{66}^E coefficients, R remains constant at 96.3%.

Therefore, only the s_{12}^E coefficient seems to have an influence on the impedance response of the piezoelectric sample.

Figure 5 presents the impedance modulus curves for different normalised values of the s_{12}^E coefficient.

Even if the s_{12}^E coefficient seems to have an influence on the impedance response of the piezoelectric sample, this influence is very weak as reported in Table 1.

Piezoelectric tensor

As showed on Figure 6, the d_{33} and d_{15} coefficients have no effect on the impedance in the length extensional mode as R remains constant at 96.3%.

Permittivity tensor

The ϵ_{11}^T coefficient has also no effect on the impedance in the length extensional mode as R remains constant at 96.3% (cf. Figure 7).

In summary, the FE model has shown that only the parameters surrounded in Figure 8 have a strong influence on the electrical impedance behaviour in the length extensional mode and should be carefully determined. All other coefficients have a weak or negligible effect. As a consequence, the manufacturer's values can be used for the other constants, provided that the geometrical assumptions of the 1D model are respected.

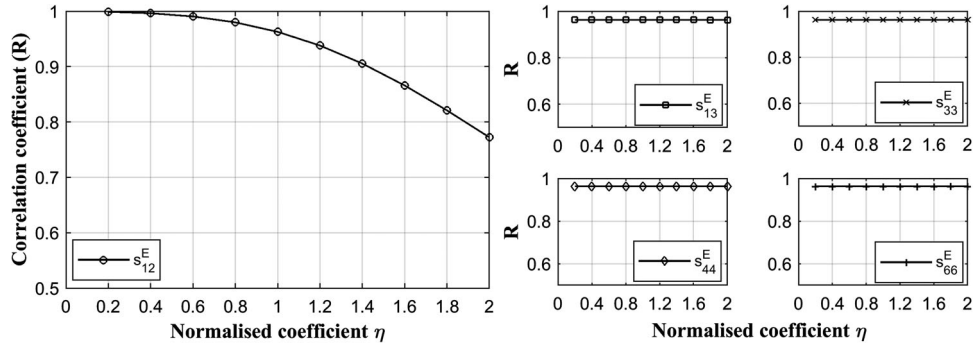


Figure 4. Correlation coefficient R as a function of normalised coefficients η for the five independent elastic parameters.

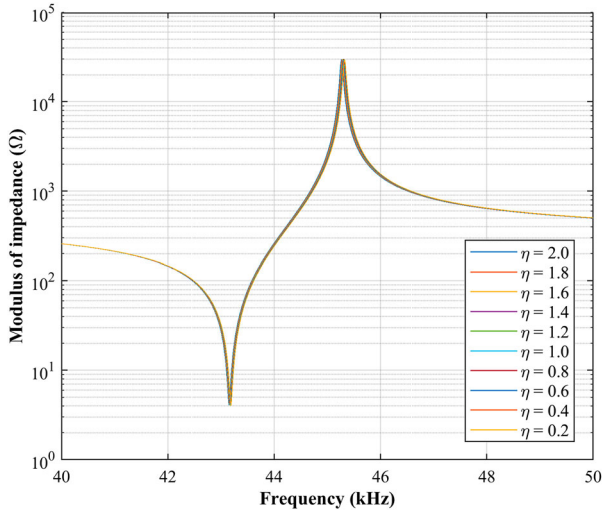


Figure 5. Impedance modulus as a function of frequency with an evolution of normalised s_{12}^E coefficients (from 20 to 200%).

Table 1. Maximum variation of f_r , f_a , Z_r and Z_a for a variation of η between 0.2 and 2 for s_{12}^E parameters.

Parameter	f_r	f_a	Z_r	Z_a
Maximum variation (%)	0.06	0.11	1.72	1.93

Comparison between experimental and numerical results

In this study, a thinned PZT layer whose dimensions respect the theoretical assumptions ($3 \text{ mm} \times 39 \text{ mm} \times 150 \text{ }\mu\text{m}$) is studied experimentally. The electrical impedance of the sample is measured using a HIOKI© impedance analyser. The test bench is controlled with Matlab® instrumentation control toolbox. The experimental set-up is presented in Figure 9.

The electrical impedance measurements are compared in Figure 10 to the 1D and 3D models in the length extensional mode. An adjustment process described in [16] is used to adjust theoretical curves with the experimental one. For this adjustment process, in order to reduce the gap between the modelling results and the experiment, elastic losses and

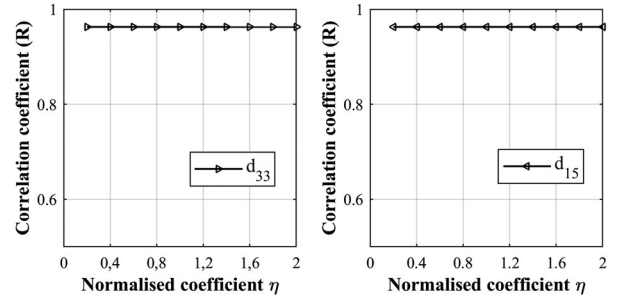


Figure 6. Correlation coefficient R as a function of normalised coefficients η for the two independent piezoelectric parameters.

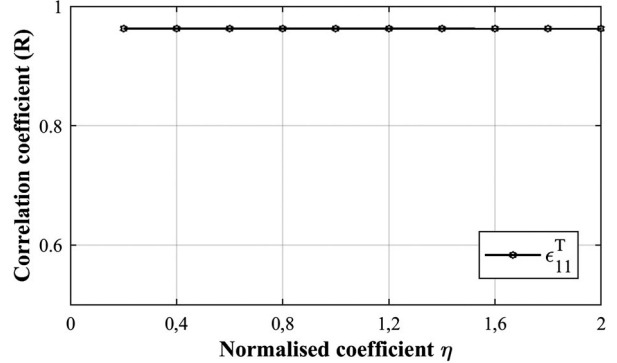


Figure 7. Correlation coefficient R as a function of normalised coefficient η for ϵ_{11}^T parameter.

dielectric losses are introduced using complex coefficients [13]

$$s_{11}^E = s_{11r}^E(1 - j\theta s_{11}^E) \quad (8)$$

$$\epsilon_{33}^T = \epsilon_{33r}^T(1 - j\theta \epsilon_{33}^T) \quad (9)$$

where θs_{11}^E and $\theta \epsilon_{33}^T$ are the mechanical and dielectric losses factor, respectively. Their values were measured by the manufacturer, following IEEE standard [15], and are indicated in the material's data-sheet (cf. Table 2).

After the optimisation process on s_{11}^E , ϵ_{33}^T , d_{31} , θs_{11}^E and $\theta \epsilon_{33}^T$ parameters, a very good agreement is

$$\begin{array}{c}
 \text{Elastic tensor} \\
 \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix} \\
 s_{11}^E = s_{22}^E, s_{13}^E = s_{23}^E, s_{44}^E = s_{55}^E, s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \text{Piezoelectric tensor} \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 \text{Permittivity tensor} \\
 \begin{bmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix}
 \end{array}$$

Figure 8. Parameters of interest for the calculation of electrical impedance in the length extensional mode.

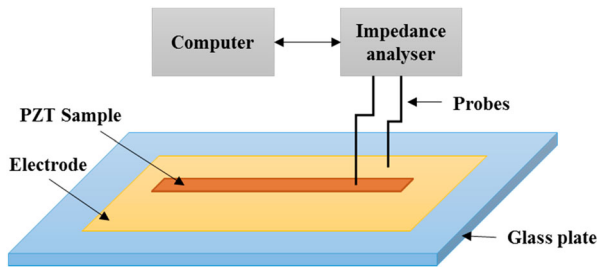


Figure 9. Scheme of the experimental set-up.

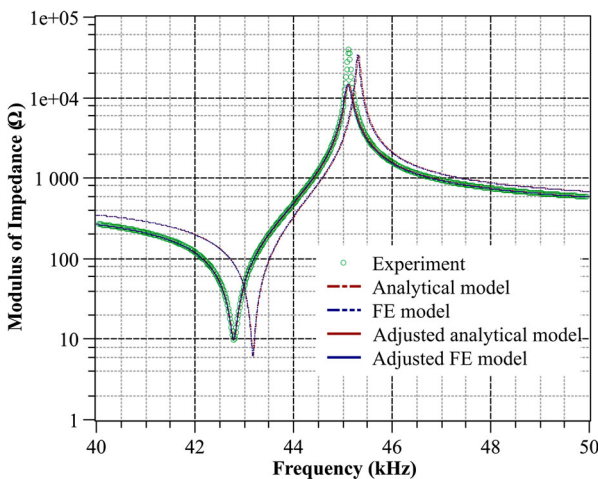


Figure 10. Experiment and models comparison before and after adjustments on electrical impedance.

Table 2. Comparison between manufacturer's datasheet and adjusted values.

Parameters	Manufacturer's values	Adjusted values	Variation (%)
s_{ij}^E [$\text{m}^2 \text{N}^{-1}$]	1.12e-11	1.14e-11	1.8
$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	1054	1264	19.9
d_{31}^T [pC N^{-1}]	-109	-126	15.6
$\theta \epsilon_{33}^T$	0.002	0.005	150.0
θs_{11}^E	0.0011	0.0023	109.1

observed between the different curves (cf. Figure 10). The correlation coefficients between the models and the experimental curves are close to 93%. Table 2 shows the comparison between the manufacturer's values and the adjusted values of s_{11}^E , ϵ_{33}^T , d_{31}^T , θs_{11}^E and $\theta \epsilon_{33}^T$ parameters.

In conclusion, f_r and f_a frequencies and Z_r amplitude obtained by theoretical models present a better

matching with the experimental values (up to 97%). However there is still a mismatch with Z_a amplitude. The effect of this mismatch is currently studied in ongoing work dedicated to the bimorph theoretical and experimental study when it is vibrating and generating electrical energy.

Conclusion and future works

By using both 1D analytical model and 3D FE model, the important components of material properties tensors are determined, i.e. the mechanical coefficient s_{11}^E , the dielectric permittivity ϵ_{33}^T , and the piezoelectric coefficient d_{31}^T . Except these parameters, the other components of compliance, electromechanical coupling and permittivity tensors have a weak influence on the electrical impedance, when assumptions on 1D geometrical dimensions are respected. Thanks to this simple but efficient method, requiring only the measurement of the electrical impedance in the length extensional mode, the set of effective parameters of the considered PZT material is accurately characterised, taking into account mechanical and dielectric losses.

The effective coefficients obtained by the present method will be assessed in a 3D FE model of a piezoelectric bimorph cantilever for the purpose of designing energy harvesting devices, in response to specific applications.

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Funding

This work was supported by the French National Research Agency [ANR LabCOM "TMEMS" N° ANR-14-LAB5-0004-01] and the National Association for Research and Technology (ANRT).

References

- [1] Sodano HA, Inman DJ, Park G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock Vib Dig.* 2004;36(3):197–205. doi:10.1177/0583102404043275
- [2] Kang MG, Jung WS, Kang CY, et al. Recent progress on PZT based piezoelectric energy harvesting technologies. *Actuators.* 2016;5(1):5. doi:10.3390/act5010005
- [3] Ferin G, Hoang T, Bantignies C, et al. Powering autonomous wireless sensors with miniaturized piezoelectric based energy harvesting devices for NDT applications. *Proceedings of the 2015 IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS 2015; 2015 Oct 21–24; Taipei: IEEE; 2015.* p. 1–4.
- [4] Deterre M, Lefevre E, Dufour-Gergam E. An active piezoelectric energy extraction method for pressure energy harvesting. *Smart Mater Struct.* 2012;21(8):085004. doi:10.1088/0964-1726/21/8/085004

- [5] Shen D, Park JH, Ajitsaria J, et al. The design, fabrication and evaluation of a MEMS PZT cantilever with an integrated Si proof mass for vibration energy harvesting. *J Micromech Microeng.* 2008;18(5):055017. doi:10.1088/0960-1317/18/5/055017
- [6] Cook-Chennault KA, Thambi N, Sastry AM. Powering MEMS portable devices – a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Mater Struct.* 2008;17(4):043001. doi:10.1088/0964-1726/17/4/043001
- [7] Erturk A, Inman DJ. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Mater Struct.* 2009;18(2):025009. doi:10.1088/0964-1726/18/2/025009
- [8] Kuang Y, Zhu M. Design study of a mechanically plucked piezoelectric energy harvester using validated finite element modelling. *Sensors Actuators A Phys.* 2017;263:510–520. doi:10.1016/j.sna.2017.07.009
- [9] Feuillard G, Bavencoffe M, Fortineau J, et al. Measurement of the effective piezoelectric coefficient on PZT film integrated structures using laser interferometry. *Proceeding of the Electroceramics End-Users VII, Piezo 2013*;2013 Mar 17–20;Les Arcs, France.
- [10] Bavencoffe M, Tembhurnikar N, Negulescu B, et al. Modeling of the mechanical response of piezoelectric structures from millimeter to micrometer. *Proceedings of the Electroceramics for End-Users IX, Piezo 2017*; 2017 Feb 19–22; Cercedilla (Madrid), Spain.
- [11] Rouffaud R, Hladky-Hennion AC, Levassort F. A combined genetic algorithm and finite element method for the determination of a practical elasto-electric set for 1-3 piezocomposite phases. *Ultrasonics.* 2017;77:214–223. doi:10.1016/j.ultras.2017.02.015
- [12] Pérez N, Carbonari RC, Andrade MAB, et al. A FEM-based method to determine the complex material properties of piezoelectric disks. *Ultrasonics.* 2014;54(6):1631–1641. doi:10.1016/j.ultras.2014.03.006
- [13] González AM, García Á, Benavente-Peces C, et al. Revisiting the characterization of the losses in piezoelectric materials from impedance spectroscopy at resonance. *Materials.* 2016;9(2):72. doi:10.3390/ma9020072
- [14] Brissaud M. *Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration [Piezoelectric materials: characterization, modeling and vibration]*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes; 2007; French.
- [15] 176-1987 IEEE standard on piezoelectricity. *IEEE 1988.* doi:10.1109/IEEESTD.1988.79638
- [16] Hoang T, Ferin G, Rosinski B, et al. Characterization of a thin piezoelectric material before integration into a cantilever-based mechanical energy harvester. *Proceedings of the IEEE International Ultrasonics Symposium, IUS 2016*;2016 Sep 18–21;Tours: IEEE; 2016. p. 31–34. doi:10.1109/ULTSYM.2016.7728652

Annexe 2 : Modeling Of The Clamping Fixture Of A Piezoelectric Cantilever-type Energy Harvesting Device

T. Hoang^{1,2}, G. Poulin-Vittrant², G. Ferin¹, F. Levassort², C. Bantignies¹, A. Nguyen-Dinh¹, M. Bavencoffe²

1. Advanced Research dept., VERMON S.A., Tours, France

2. GREMAN UMR7347, Université François-Rabelais de Tours, INSA Centre Val de Loire, CNRS, Blois, France

Introduction

Over the last decade, ambient vibration energy harvesting by piezoelectric materials has been an area of extensive research^{1,2}. This technology enables to convert wasted mechanical energy available in our environment into useful electrical energy for autonomous wireless sensors supply³, in structural health monitoring applications, or implantable medical devices⁴.

The most common structure used in vibration energy harvesting is a clamped/free piezoelectric bimorph cantilever beam, which is constituted of two thinned-bulk piezoelectric layers separated with an inner shim material. Firstly, two plates made of hard PZT ceramic are bonded on the two opposite faces of a thin brass layer using epoxy adhesive. Secondly, each face of the bimorph is grinded to the desired thickness. Then, the square bimorph is metallized: electrode materials made of chromium and gold are deposited on each face of the device. Finally, the bimorph is cut into several rectangular bimorphs with desired dimensions. To understand and predict the behaviour of such a cantilever-based mechanical energy harvester, analytical and numerical models are developed^{5,6}.

In our work, the pursued goal is to build an effective three-dimensional (3D) finite element model (FEM) for the design of a cantilever-based mechanical energy harvester in vibration. To this end, a thinned layer of PZT material is first considered and a particular attention is paid on the clamping fixture modeling issue.

Experimental setup

Before its integration into a piezoelectric bimorph cantilever (Figure 1), the characterization of the 4mm x 39mm x 150.5 μ m thinned PZT layer has been carried out⁷.

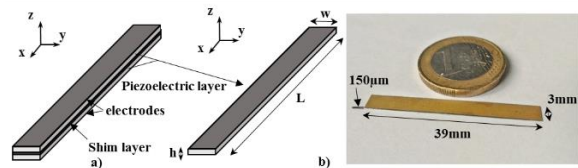


Figure 1. a) Scheme of the bimorph and PZT layer inside the bimorph, b) scheme and photograph of the PZT sample.

The functional characterization of this PZT layer is made using a dedicated vibration test bench composed by a function generator Tektronix AFG3101, an oscilloscope Tektronix TDS3034B, a laser Keyence LK-5000, an accelerometer PCB PIEZOTRONICS 393B and a loudspeaker Dayton audio RSS315HF-4 (Figure 2).

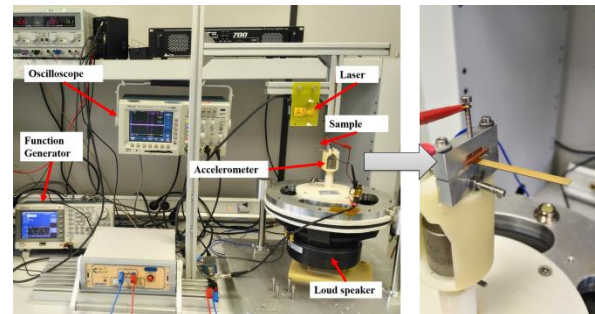


Figure 2. The vibration energy harvesting test bench.

As shown in Figure 3, the clamped cantilever beam is mechanically excited by applying a displacement at its fixed end, generated by the loudspeaker. The vibration amplitude and spectrum are controlled by a function generator. The accelerometer is used to monitor the generated vibration. The displacement at the free end of the cantilever beam is measured by the laser sensor. The signals from the accelerometer and the laser sensor are acquired with the

oscilloscope. The whole acquisition chain is controlled by the computer that enables to automatically scan over a wide range of vibration frequencies and amplitudes thanks to a virtual instrumentation developed in MATLAB.

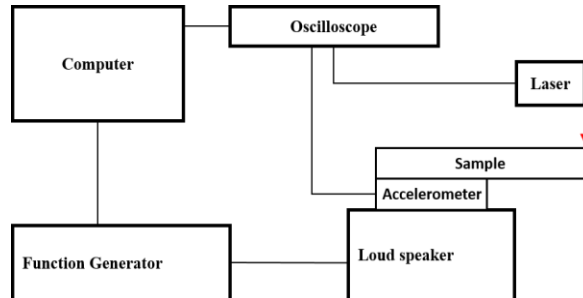


Figure 3. The vibration energy harvesting test bench – interconnection diagram.

Finally, Figure 4 is obtained and presents the amplitude of the displacement at the free end of our device as a function of the frequency. A maximum of amplitude is detected at 65.4Hz.

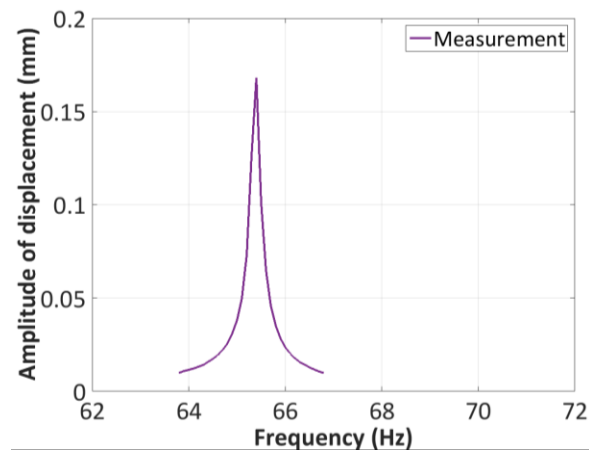


Figure 4. Amplitude of the displacement at the free end of the device as a function of the frequency.

Comparison between experimental and numerical results

Thanks to COMSOL Multiphysics® FEA software, the 4mm x 39mm x 150.5µm thinned PZT layer is modelled in 3D with a hexahedral mesh made of 500 elements with dimensions 0.8 x 0.78 x 0.075mm³ using the *Piezoelectric Devices* interface of the *Structural Mechanics Module*.

Ideal clamped-free boundary conditions are applied over a length of 3 mm at one end of the device and a frequency domain study is performed. Then the displacement at the free end of the device can be calculated at a given frequency (Figure 5).

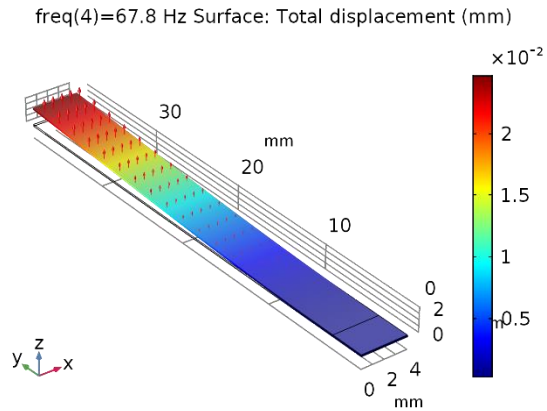


Figure 5. Simulated displacement of the device at 67.8Hz.

Figure 6 presents the comparison between simulation and measurement results on the amplitude of the displacement at the free end of the device. Even if there is a good accordance of the two curves, a gap of 3.67% is observed in frequency, and a difference of 12.98% in displacement amplitude.

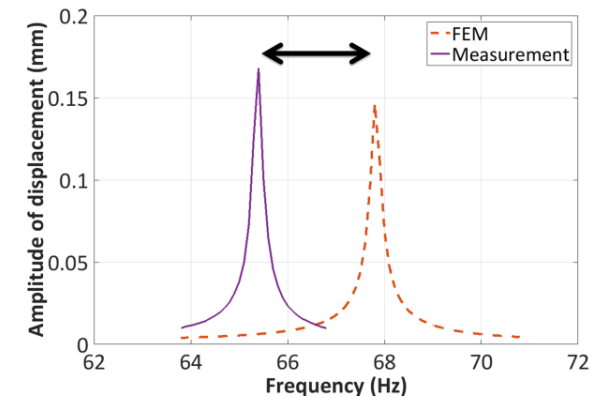


Figure 6. Comparison between simulation and measurement results.

Discussion on the clamping fixture issue

As a discrepancy between simulation and measurement results is observed, different ways of modeling the clamping fixture of the beam are considered.

In modal analysis, the study deals with configurations of increasing complexity, from the ideal clamped-free boundary condition up to the 3D FEM model of the fixture system imported from the CAD CAM integrated software TOPSOLID by using the *CAD import Module*.

Table 1 summarizes the different investigated cases illustrated in Figure 7.

As shown in Table 1, the 5th model presents a discrepancy of less than 0.01% with the measurement

results. In this case, the clamping fixture is modelled by a spring in domain with adapted stiffness⁸.

Table 1: Comparison between simulation and measurement results for different clamping fixtures of the beam.

Model of clamping fixture	Frequency of the 1 st mode of vibration (Hz)	Δ (%)
1. Fixed constraint in domain	68.07	4.08
2. Fixed constraint on two surfaces	68.06	4.07
3. Fixed constraint on bottom surface	67.90	3.81
4. Fixed constraint on bottom surface + top surface load 2.10^7N/m^2	67.92	3.85
5. Spring $k=7.3.10^6\text{N/m}$ in domain	65.40	0.003
6. 3D FEM model of the real fixing system	67.96	3.92

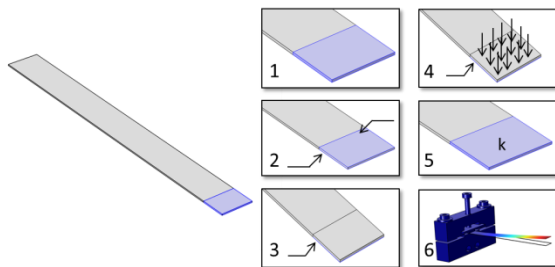


Figure 7. The different investigated clamping fixtures of the beam.

Conclusions

The vibrational response of a thinned layer of PZT has been simulated thanks to COMSOL Multiphysics® FEA software using the *Piezoelectric Devices* interface of the *Structural Mechanics Module* and compared to experimental data.

In order to reduce the discrepancy between simulation and measurement results, different ways of modeling the clamping fixture of the beam have been considered, from the ideal clamped-free boundary condition up to the 3D FEM model of the fixture system imported from the CAD CAM integrated software TOPSOLID by using the *CAD import Module*.

For each investigated fixture model, the comparison of its results and the experiment for predicting the first resonance mode of the piezoelectric samples shows a difference inferior to 5%. However, in the

case of a clamping fixture modelled by a spring in domain with adapted stiffness, the gap between numerical and experimental results is reduced to less than 0.01%.

We then recommend the use of this functional design tool to improve the modeling of the piezoelectric cantilever-type energy harvesting device.

References

- 1.Roundy, S., Wright, P. K. & Rabaey, J. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Comput. Commun.* **26**, 1131–1144 (2003).
- 2.Yan, Z. & He, Q. A Review of Piezoelectric Vibration Generator for Energy Harvesting. *Appl. Mech. Mater.* **44–47**, 2945–2949 (2010).
- 3.Ferin, G. *et al.* Powering autonomous wireless sensors with miniaturized piezoelectric based energy harvesting devices for NDT applications. in *2015 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* 1–4 (IEEE, 2015). doi:10.1109/ULTSYM.2015.0534
- 4.Lewandowski, B. E., Kilgore, K. L. & Gustafson, K. J. in *Energy Harvesting Technologies* 389–404 (Springer US, 2009). doi:10.1007/978-0-387-76464-1_15
- 5.Erturk, A. & Inman, D. J. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. *Smart Mater. Struct.* **18**, 25009–18 (2009).
- 6.Benasciutti, D., Moro, L., Zelenika, S. & Brusa, E. Vibration energy scavenging via piezoelectric bimorphs of optimized shapes. *Microsyst. Technol.* **16**, 657–668 (2010).
- 7.Hoang, T. *et al.* Characterization of a thin piezoelectric material before integration into a cantilever-based mechanical energy harvester. in *2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* 1–4 (IEEE, 2016). doi:10.1109/ULTSYM.2016.7728652
- 8.Chevallier, G., Ghorbel, S. & Benjeddou, A. A benchmark for free vibration and effective coupling of thick piezoelectric smart structures. *Smart Mater. Struct.* **17**, 65007 (2008).

Acknowledgements

This work was supported by the French National Research and Technology Association (ANRT) and the National Research Agency (ANR LabCOM “TMEMS” N°ANR-14-LAB5-0004-01).

Dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique : modélisation, fabrication et caractérisation

Résumé

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet Lab-TMEMS, une collaboration entre le laboratoire GREMAN et l'entreprise VERMON. Le but de ce projet est de réaliser des générateurs piézoélectriques miniaturisés convertissant l'énergie de vibrations basses fréquences, pour alimenter des composants électroniques utilisés notamment dans des applications biomédicales. L'objectif de cette thèse est donc de proposer une stratégie de conception et d'optimisation de tels dispositifs. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons développé une démarche originale de modélisation par la méthode des éléments finis en tridimensionnel, pour modéliser l'ensemble de la structure du générateur. Après avoir été validé expérimentalement, notre outil de conception est utilisé pour optimiser le générateur piézoélectrique selon un cahier des charges spécifique. Cet outil de conception s'appuie sur des études paramétriques géométriques, en considérant un régime de fonctionnement linéaire. Grâce à cette méthode, nous avons conçu, fabriqué et caractérisé un générateur piézoélectrique optimisé et l'avons ensuite intégré dans un capteur communicant utilisé pour la maintenance préventive d'une machine tournante industrielle. Nous avons ainsi démontré que la puissance fournie par le générateur puis convertie par un circuit électronique dédié est suffisante pour alimenter le capteur et le rendre ainsi autonome.

Mots clés : récupération d'énergie, piézoélectricité, modélisation, fabrication, caractérisation, méthode des éléments finis

Résumé en anglais

This thesis is part of the Lab-TMEMS project, a collaboration between the GREMAN laboratory and the VERMON Company. The goal of this project is to realize miniaturized piezoelectric devices harvesting energy from low frequency vibrations in order to supply devices used in biomedical applications, for example. Thus, the objective of this thesis is to propose a strategy for the design and optimization of such devices. In order to achieve this objective, we have developed an original approach of modeling by finite element method in three-dimensional space in order to model the whole structure of the harvester. After being validated experimentally, our design tool is used to optimize the piezoelectric harvester according to given specifications. This design tool for linear piezoelectric harvesters design was developed based on geometrical parametric studies in linear domain. By using this tool, we have designed, fabricated and characterized the optimized piezoelectric harvester. Then we integrated it into an autonomous wireless sensor used for the preventive maintenance of an industrial rotating machine. The power recovered from the harvester, coupled with its power management circuit, is sufficient to power the sensor, making it autonomous.

Keywords: energy harvesting, piezoelectricity, modeling, manufacturing, characterization, finite element method