

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.

1. 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.

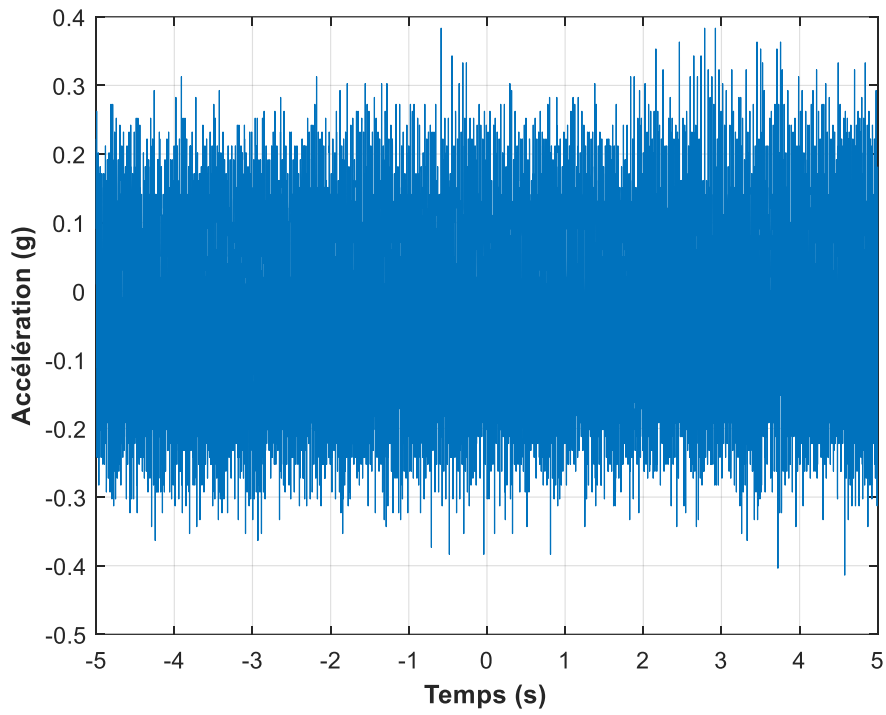


Figure 5.2 : Représentation temporelle des vibrations du bloc de climatisation.

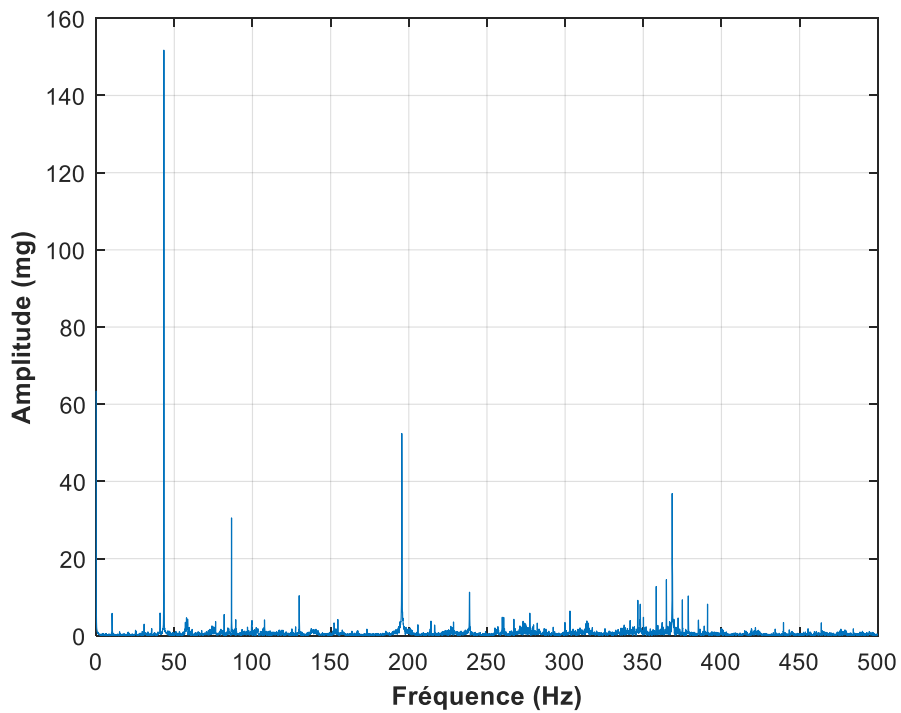


Figure 5.3 : Représentation fréquentielle des vibrations du bloc de climatisation.

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.

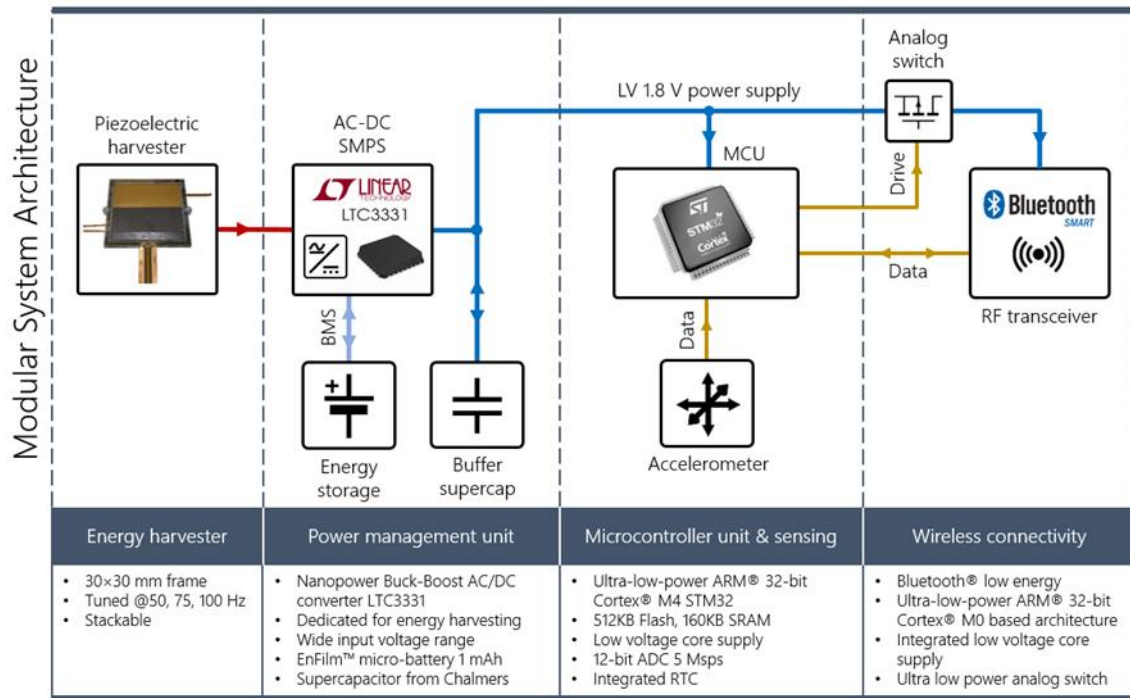


Figure 5.4. Architecture générale du capteur autonome.

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.

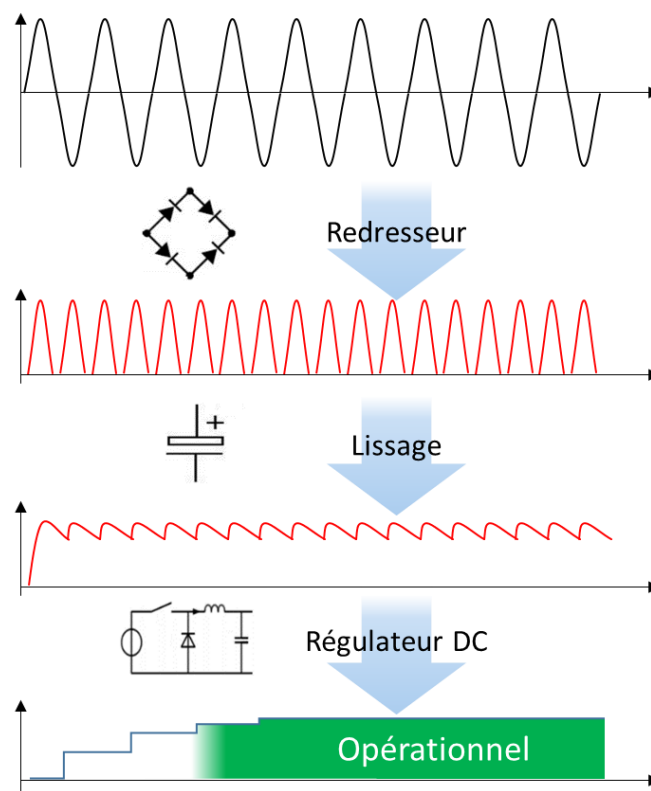


Figure 5.5 : Etapes de la conversion de tension d'entrée AC vers une tension DC utilisable pour les composants électroniques.

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.

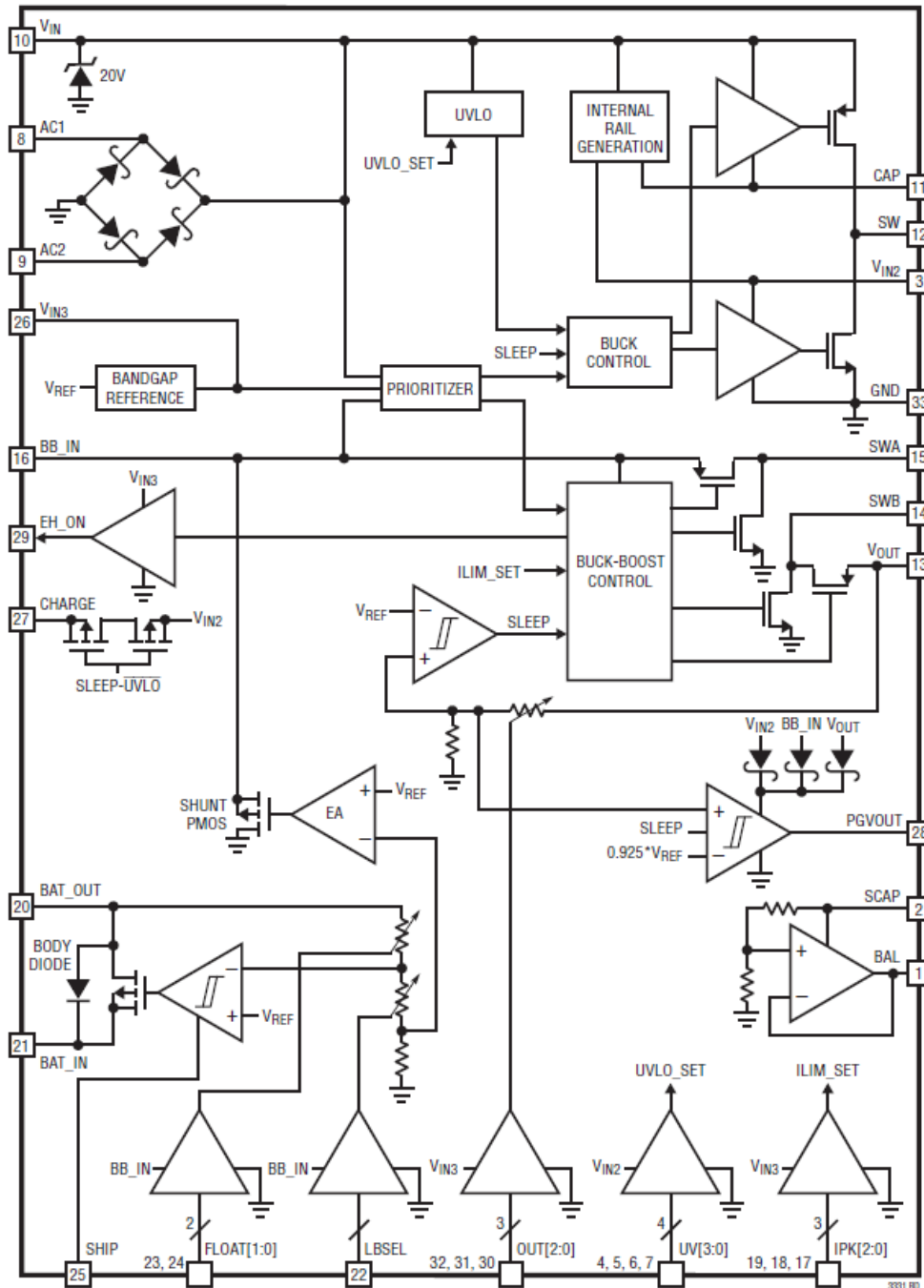


Figure 5.6 : Schéma de principe interne du LTC3331 [159].

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 μF à très faible courant de fuite (inférieur à 1 μA 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 $\mu\text{A}/\text{MHz}$. 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.

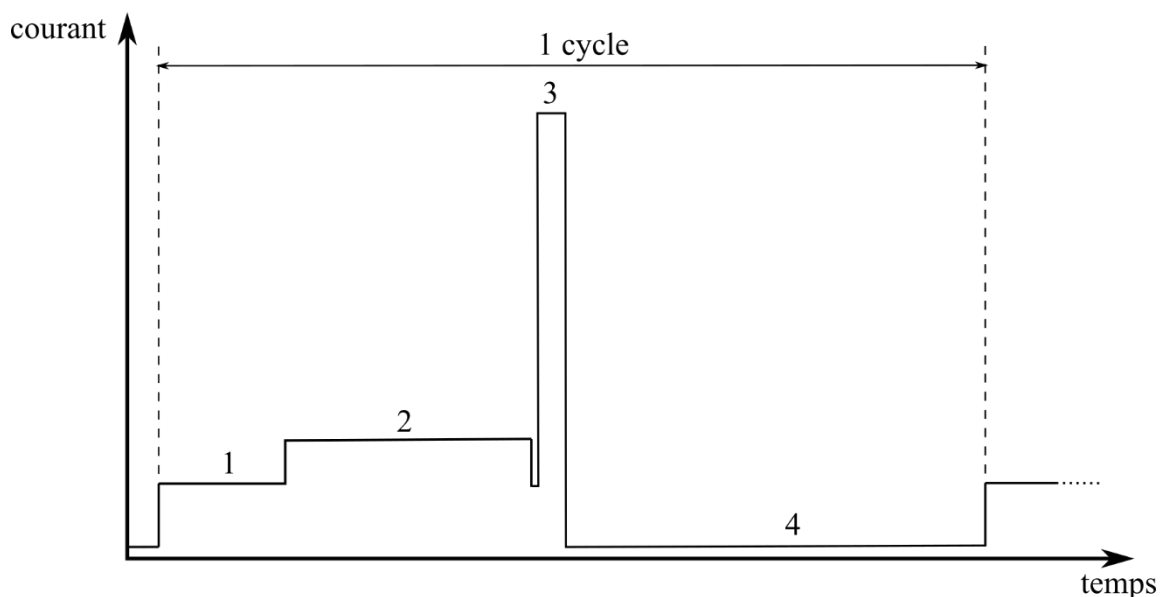


Figure 5.7 : Cycle de consommation typique du capteur autonome, 1) réveil et initialisation, 2) acquisitions et post-traitement, 3) transmission et/ou réception de données, 4) veille.

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).

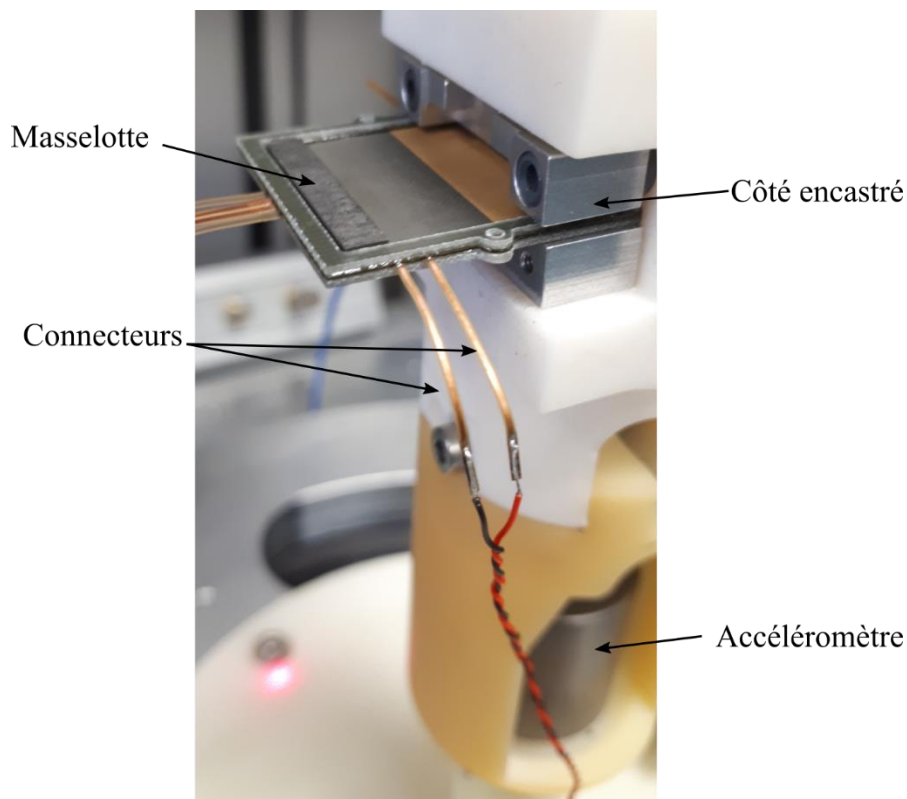


Figure 5.8 : Photo du générateur fixé sur le banc de test en vibration.

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.

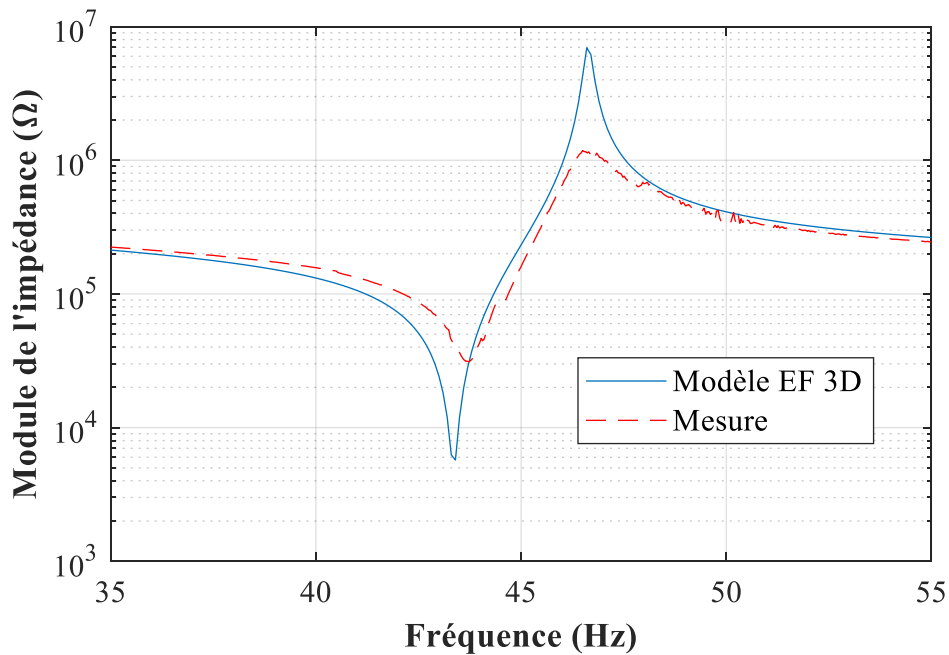


Figure 5.9. Impédance électrique du générateur : modèle EF 3D et mesure.

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.

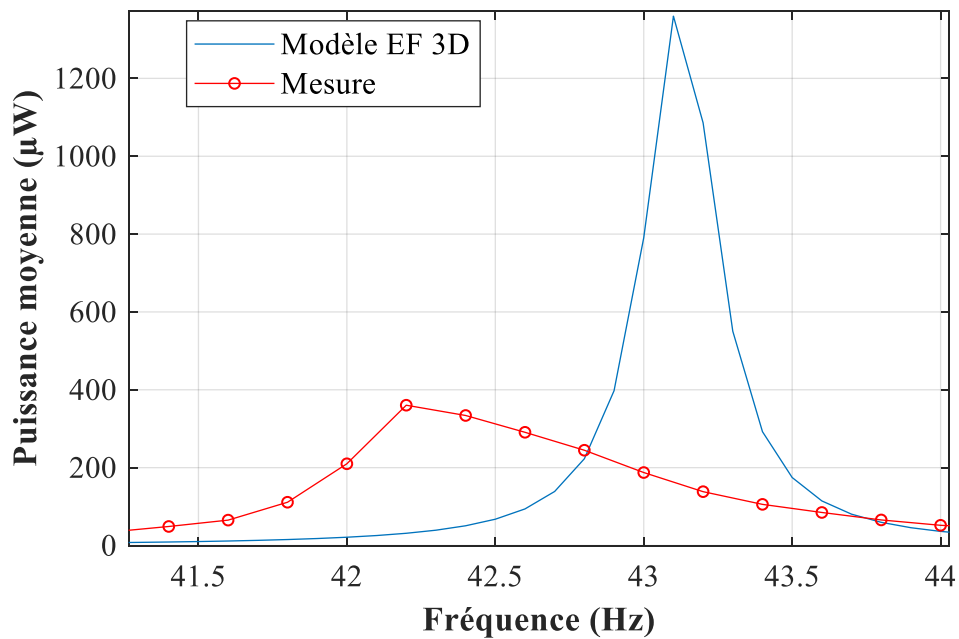


Figure 5.10. Puissance électrique récupérée par le générateur à 150 mg de l'accélération : prédiction du modèle EF 3D et mesure sur le prototype.

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 $11,6 \text{ mW/cm}^3/\text{g}^2$.

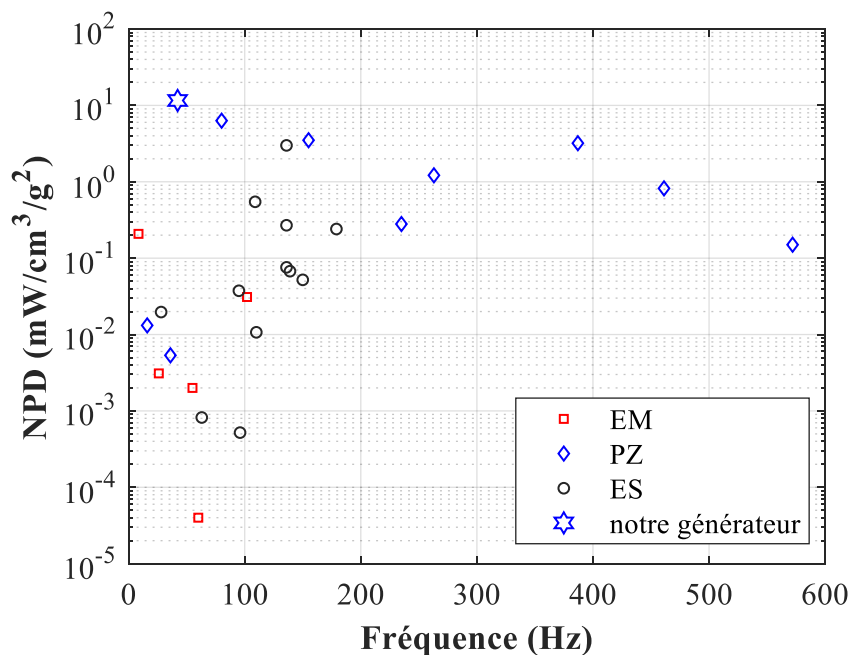


Figure 5.11. Positionnement de notre générateur par rapport à l'état de l'art (cf. figure 1.9).

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.

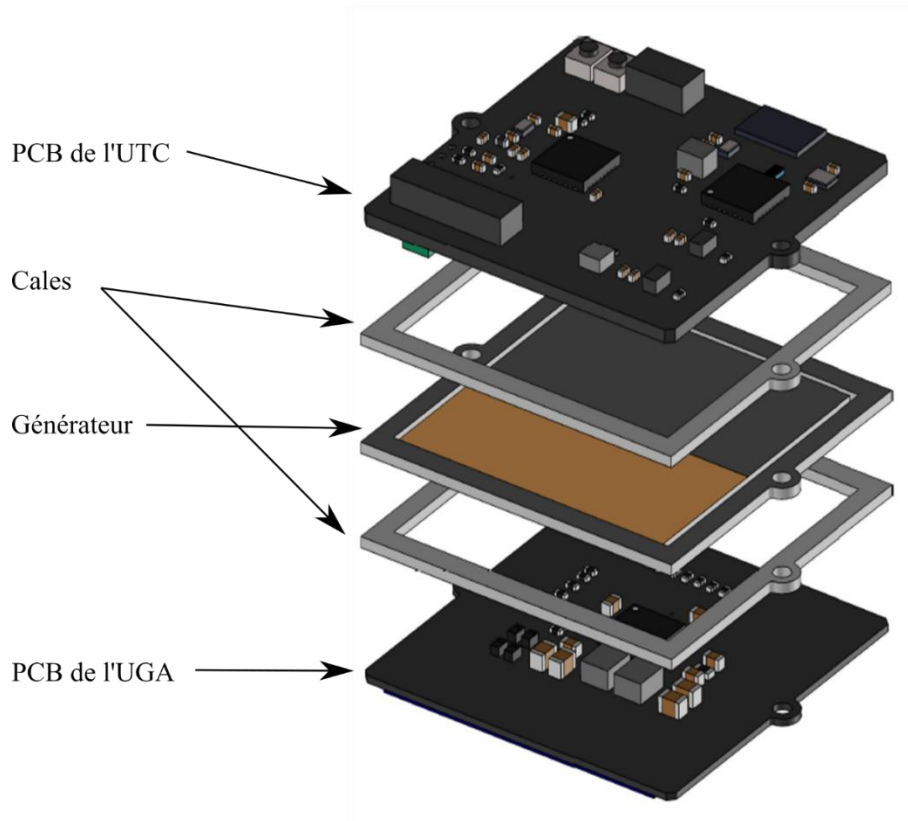


Figure 5.12 : Architecture du module du capteur autonome sans fil.

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).

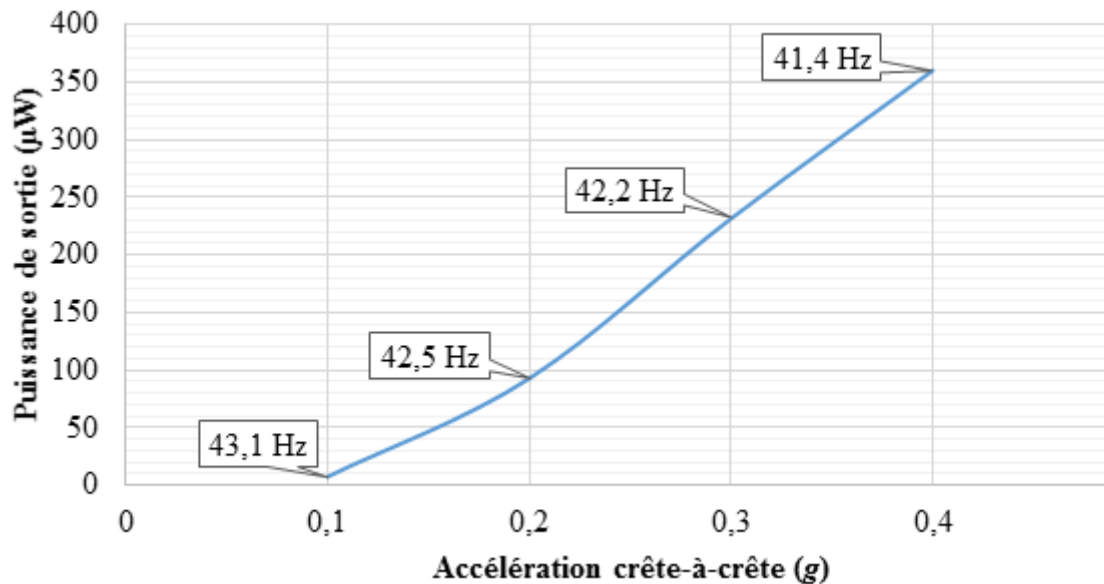


Figure 5.13. Puissance de sortie maximale par rapport à l'accélération sur charge résistive optimale.

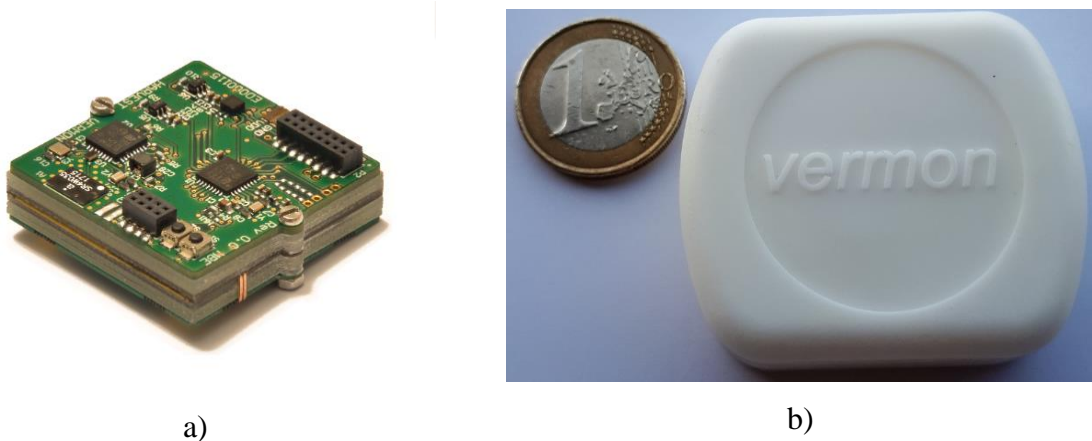


Figure 5.14. Photos a) du module intégré et b) de son boîtier.

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 encastrement 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.