

# Récupération d'énergie : enjeux et technologies

Ce chapitre aborde d'abord les enjeux – et les applications potentielles – de la récupération d'énergie vibratoire, notamment à basse fréquence. Il présente ensuite l'état de l'art des techniques de récupération d'énergie vibratoire, leurs avantages et leurs limites, en particulier pour les générateurs piézoélectriques. Enfin nous montrons l'importance et les difficultés de disposer d'outils de conception de telles structures, qui font l'objet de cette thèse.

## 1. Récupération d'énergie vibratoire basse fréquence

Depuis quelques années, le nombre d'objets connectés ne fait que croître de façon considérable. En 2016, on trouvait 6,4 milliards d'objets connectés dans le monde entier et ils devraient être au nombre de 20,4 milliards en 2020 [1]. Récemment, des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks – WSN en anglais) ont commencé à être reconnus comme une technique essentielle pour de nouvelles applications [2], notamment le contrôle d'intégrité des structures (Structural Health Monitoring – SHM en anglais) telles que les voies ferrées, les éoliennes, les avions... ; la maintenance préventive de machines industrielles ; ou des dispositifs ou des capteurs autonomes utilisés dans les applications biomédicales comme la surveillance et des soins en continu du patient. Ces capteurs autonomes sont proposés pour être mis en œuvre dans plusieurs secteurs [3], [4] : militaire, industriel, agriculture, BTP, surveillance de l'environnement... La figure 1.1 donne deux exemples d'utilisation.

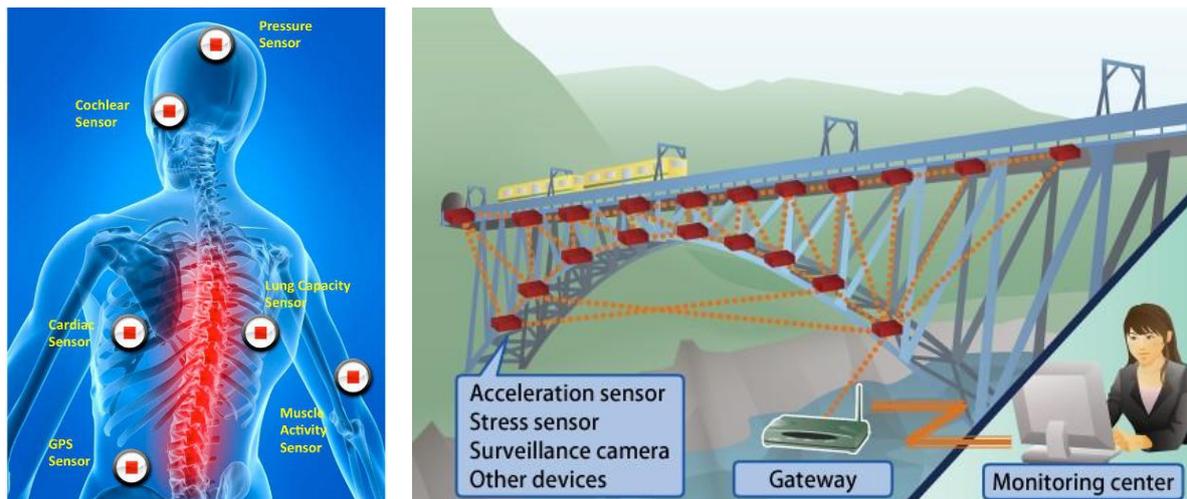


Figure 1.1 : Exemples d'applications des réseaux de capteurs sans fil dans a) le secteur médical, b) le BTP.

Le domaine médical suit cette tendance avec l'apparition et l'utilisation de plus en plus fréquente de capteurs biomédicaux implantés, notamment pour la surveillance de la pression artérielle, les pompes et les turbines cardiaques, les stimulateurs (pacemakers, implant cérébraux),... [5].

Comme le montre la figure 1.2, un capteur est composé de quatre composantes de base : une unité de capture, une unité de traitement, une unité de communication, et une unité d'énergie [6].

- L'unité de capture sert à mesurer des grandeurs physiques comme la température, la pression, l'accélération... Le signal analogique mesuré est ensuite converti en signal numérique adressé à l'unité de traitement.
- L'unité de traitement est composée de microcontrôleurs et de microprocesseurs ayant pour rôle de traiter les données acquises et de les enregistrer dans une unité de stockage de données.
- L'unité de communication comporte généralement une partie émission et une partie réception interagissant par ondes radio (dont le spectre est situé entre 3 kHz et 300 GHz).
- L'unité d'énergie sert à alimenter tous les systèmes électroniques du capteur ; elle est donc vitale pour le bon fonctionnement de ce dernier. Cette unité est constituée de batteries rechargeables ou non.

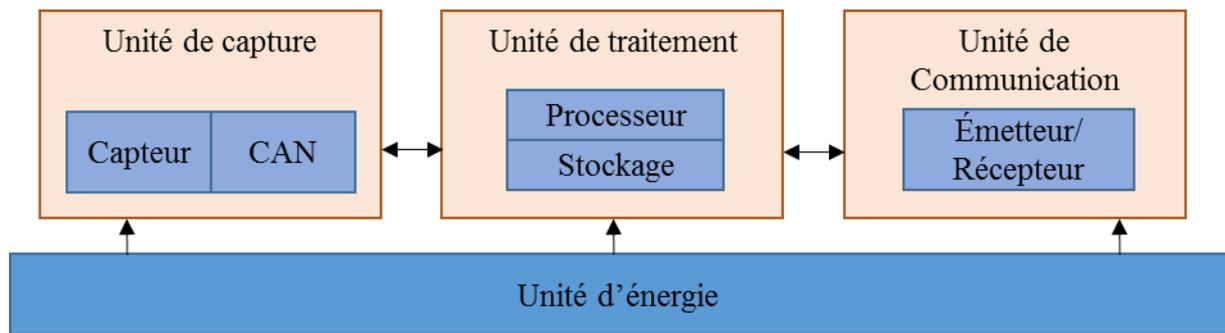


Figure 1.2 : L'architecture d'un capteur autonome sans fil.

Une longue durée de vie du capteur est nécessaire pour une infrastructure qui dure plusieurs dizaines d'années ou pour le corps humain. Pour augmenter la durée de vie d'un capteur, une gestion optimisée de la consommation d'énergie est essentielle. De gros progrès ont été faits depuis ces dix dernières années dans le domaine électronique pour réduire la consommation électrique des composants dans un capteur [7]. Les composants électroniques de faible puissance, ou d'ultra faible puissance, ont été spécialement conçus, développés et commercialisés dans cette optique [8]–[10]. Ainsi, grâce aux efforts pour réduire la consommation d'énergie du capteur, une solution alternative peut entrer en jeu pour remplacer la batterie : la récupération d'énergie ambiante, qui permet de convertir les sources d'énergie présentes dans notre environnement en énergie électrique. En effet, comme le montre la figure 1.3, la puissance initiale récupérée des sources solaires ou vibratoires est comparable à l'énergie fournie par les batteries. Toutefois, la puissance des batteries diminue rapidement au cours du temps et dans des environnements sévères (hautes températures) [11]. Le remplacement de ces batteries au bout de quelques années est coûteux, dangereux dans certaines applications et parfois même impossible [12]. La solution de récupération d'énergie ambiante est donc très prometteuse pour augmenter considérablement la durée de vie des systèmes autonomes sans fil.

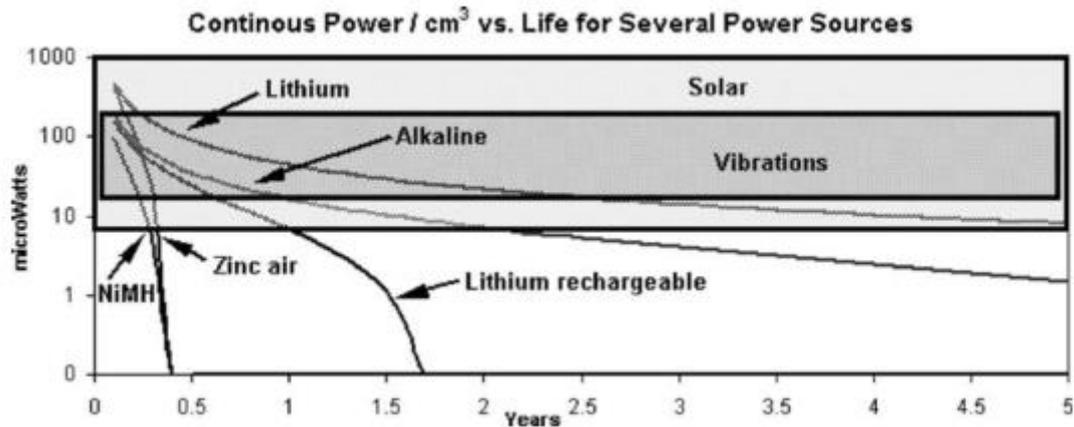


Figure 1.3 : Comparaison de la puissance des vibrations, de l'énergie solaire et de diverses technologies de batteries [11].

La technologie de récupération d'énergie solaire est mature et commercialisée depuis plusieurs années, on voit plus souvent des capteurs alimentés par les panneaux solaires dans certaines applications à l'extérieur. D'autres sources d'énergie existent : thermique - gradients ou variations de température ; rayonnante - infrarouge, RF ; chimique – réaction chimique, biochimique. Au risque d'énoncer des évidences, notons toutefois que la récupération d'énergie solaire n'est pas possible dans l'obscurité, la récupération d'énergie thermique ne fonctionne pas quand il n'y a pas de gradient de température ou la récupération des vibrations n'est pas réalisable lorsqu'il n'y a pas de mouvement... En conséquence, il faut noter qu'aucune solution de récupération d'énergie ambiante universelle n'existe à notre connaissance, il faut donc soigneusement choisir la technologie de récupération d'énergie en fonction de la source d'énergie prépondérante dans l'environnement [6], [13]. La récupération d'énergie vibratoire est moins mature et la récupération d'énergie vibratoire basse fréquence est encore un domaine qui mérite une phase de recherche et de développement plus intense pour la rendre utilisable dans les applications réelles.

Dans le cadre de notre thèse, nous nous orientons vers la technologie de récupération d'énergie vibratoire basse fréquence. Cette technologie peut être utile dans les applications où l'environnement vibratoire est présent, par exemple le SHM, la maintenance préventive de machines industrielles ou encore les applications biomédicales. Dans ces cas, des sources d'énergies vibratoires sont présentes et récupérables à des fins d'alimentation électrique.

## 1.1. Récupération d'énergie vibratoire

Là où il y a de la vie, il y a du mouvement ! Le mouvement est omniprésent : le mouvement humain ou celui des animaux, le mouvement des véhicules, ou encore des machines dans l'industrie, .... Très souvent, ce mouvement éloigne, puis ramène à une position de départ, il s'agit alors d'un mouvement d'oscillation mécanique autrement appelé une vibration. Elle est généralement caractérisée par son amplitude d'accélération (en  $m/s^2$  ou  $g$ , unité d'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre) et son spectre de fréquence (en Hz). La figure 1.4 montre un exemple de la vibration d'un cœur avec son spectre et son amplitude d'accélération [14]. Le tableau 1.1 montre la caractérisation de différentes sources vibratoires en termes de fréquence et d'amplitude de l'accélération du mode fondamental [11]. Nous pouvons constater que les fréquences fondamentales des sources vibratoires réelles sont relativement basses ( $< 200$  Hz) et que les amplitudes d'accélération sont faibles ( $< 1 g$ ). En conséquence, pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante pour des applications réelles, il faut réaliser des générateurs fonctionnant à des fréquences inférieures à 200 Hz.

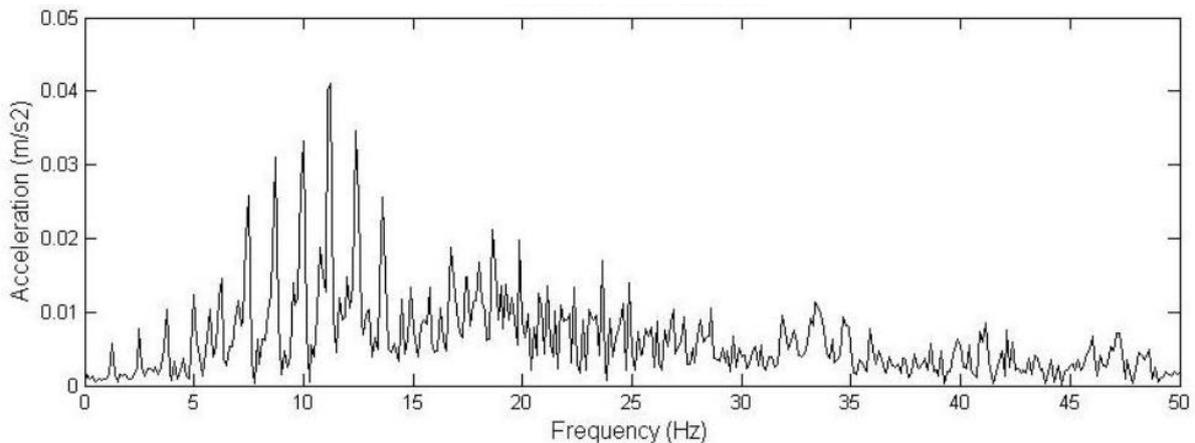


Tableau 1.1 : Amplitude d'accélération et fréquence fondamentale de vibrations de différentes sources [11].

| Vibration source                    | $A$ (m/s <sup>2</sup> ) | $F_{\text{peak}}$ |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------|
| Car engine compartment              | 12                      | 200               |
| Base of 3-axis machine tool         | 10                      | 70                |
| Blender casing                      | 6.4                     | 121               |
| Clothes dryer                       | 3.5                     | 121               |
| Person nervously tapping their heel | 3                       | 1                 |
| Car instrument panel                | 3                       | 13                |
| Door frame just after door closes   | 3                       | 125               |
| Small microwave oven                | 2.5                     | 121               |
| HVAC vents in office building       | 0.2–1.5                 | 60                |
| Windows next to a busy road         | 0.7                     | 100               |
| CD on notebook computer             | 0.6                     | 75                |
| Second story floor of busy office   | 0.2                     | 100               |

De plus, dans certaines applications telles que des dispositifs biomédicaux, des dispositifs portables, des capteurs autonomes dans un réseau communicant, la miniaturisation des dispositifs est un enjeu important.

Pour ces dernières applications, les dispositifs de récupération d'énergie vibratoire doivent s'adapter aux conditions et répondre aux critères suivants :

- une faible accélération ( $< 1 g$ ),
- une gamme de fréquences très basse ( $< 200 \text{ Hz}$ ),
- un encombrement minimal ( $< 1 \text{ cm}^3$  [13]),
- une longue durée de vie ( $> 15 \text{ ans}$  [15]).

## 1.2. Technologies de récupération d'énergie vibratoire

Il y a principalement trois méthodes de récupération d'énergie vibratoire : les transductions électromagnétiques, électrostatiques et piézoélectriques. Nous allons présenter brièvement ces trois méthodes de récupération d'énergie vibratoire dans les sections suivantes.

### 1.2.1. Générateurs électromagnétiques

Ce type de générateur fonctionne grâce à l'effet électromagnétique du mouvement relatif d'un conducteur dans un champ magnétique. La vibration ambiante excite la base du

système, ce qui entraîne un mouvement de translation relatif de l'aimant par rapport à la bobine. Ce mouvement oscillant relatif provoque une variation du flux magnétique à l'intérieur de la bobine [16] (cf. figure 1.5). La tension induite dans la bobine peut être déterminée par la loi de Faraday :

$$\varepsilon = \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (1)$$

où  $\varepsilon$  est la tension induite et  $\Phi_B$  est le flux magnétique.

La tension en circuit ouvert à travers la bobine est donnée par [17] :

$$V_{oc} = N \cdot B \cdot l \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

où  $N$  est le nombre de spires de la bobine,  $B$  est l'induction magnétique,  $l$  est la longueur d'un enroulement, et  $x$  est le déplacement relatif de l'aimant par rapport à la bobine. La puissance électrique récupérée est transmise à la charge  $R_L$ .

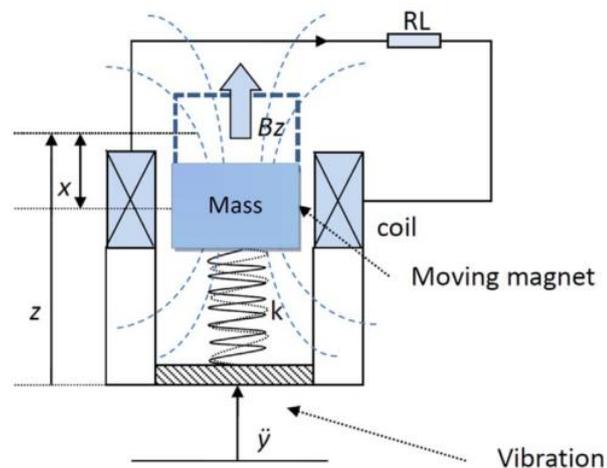


Figure 1.5 : Schéma d'un générateur d'énergie vibratoire électromagnétique à un degré de liberté [16].

Cette technologie est assez mature avec l'apparition de produits sur le marché, notamment dans les applications industrielles utilisant des machines tournantes et dans les applications ferroviaires. Ces produits ont généralement un volume de quelques dizaines de centimètres cubes. Le modèle DICE de la société Kinergizer qui a un volume de 36 cm<sup>3</sup> peut récupérer une puissance maximale de 2,5 mW (en fonction du niveau de vibration < 10 g) [18].

La société suédoise ReVibe Energy propose trois modèles de récupération d'énergie intégrés avec une option de gestion du stockage d'énergie. Le modèle Q a un volume de 15,6 cm<sup>3</sup> et un poids de 60 grammes, il peut récupérer une puissance maximale de 150 mW à 1 g d'accélération [19]. Le modèle PMG la société Perpetuum peut fournir une puissance maximale de 27,5 mW, son volume est de 253 cm<sup>3</sup> et sa masse est d'environ 1 kg [20].

### 1.2.2. Générateurs électrostatiques

On peut également convertir de l'énergie vibratoire en énergie électrique grâce à l'effet électrostatique. Le principe de conversion est simple : un mouvement relatif entre les deux plaques séparées par de l'air ou un milieu diélectrique génère une variation de capacité et donc du nombre de charges électriques, comme montré dans la figure 1.6.

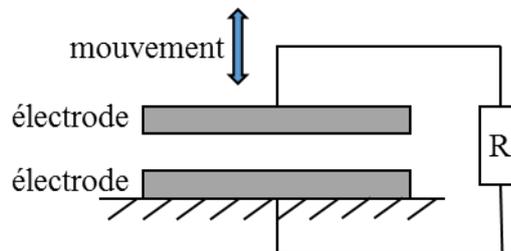


Figure 1.6 : Illustration de la récupération d'énergie vibratoire électrostatique.

D'après Boisseau *et al.* [6], les générateurs électrostatiques peuvent être classés en deux catégories :

- Les convertisseurs électrostatiques sans électret : ils utilisent des cycles de conversion en charges et décharges du condensateur (un circuit électronique actif est alors nécessaire pour appliquer le cycle de charge sur la structure et doit être synchronisé avec la variation de capacité). Ce type de convertisseur à deux modes de fonctionnement : charge imposée ou tension imposée. L'énergie totale convertie s'exprime suivant la formule :

$$E = \frac{1}{2} Q_0^2 \left( \frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}} \right) \quad (3)$$

$$E = V_0^2 (C_{max} - C_{min}) \quad (4)$$

où  $Q_0$  est la charge stockée,  $V_0$  est la tension initiale,  $C_{min}$  est la capacité minimale lorsque la distance entre les deux plaques est maximale,  $C_{max}$  est la capacité maximale lorsque la distance entre les deux plaques est minimale (état initial).

- Les convertisseurs électrostatiques à base d'électret : ils sont assez similaires aux convertisseurs électrostatiques sans électret, la principale différence est que des couches d'électret sont ajoutées à l'une et/ou l'autre des deux plaques conductrices du dispositif. Étant donné que ces couches de matériaux diélectriques présentent un état de polarisation électrique quasi permanent, cette propriété permet au dispositif de convertir directement de l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est à noter que la couche d'électret après le dépôt nécessite un chargement initial pour convertir efficacement les vibrations en énergie électrique [21].

Malgré sa grande compatibilité avec les techniques de fabrication des Micro-Systèmes ElectroMécaniques (MEMS), cette technologie est moins mature. A notre connaissance, aucun produit de récupération d'énergie vibratoire de ce type n'est présent sur le marché. Toutefois, Omron et Holst Center/Imec ont proposé un prototype contenant un générateur électrostatique à base d'électret et un Circuit de Gestion de la Puissance (CGP). Il peut convertir et stocker une énergie vibratoire de l'ordre du  $\mu\text{W}$  avec un rendement élevé. Le prototype ne mesure que  $5 \times 6 \text{ cm}^2$  (cf. figure 1.7).



Figure 1.7 : Prototype d'un générateur électrostatique développé par Omron et Holst Center/Imec [22].

### 1.2.3. Générateurs piézoélectriques

Les générateurs piézoélectriques fonctionnent grâce aux propriétés particulières des matériaux piézoélectriques, notamment la capacité à générer une énergie électrique en réponse à une sollicitation (contrainte ou déformation) mécanique. La figure 1.8 présente brièvement le principe de cette conversion électromécanique. Une tension de même polarité que la tension de polarisation apparaît entre les électrodes lorsque le matériau est comprimé, et la polarité opposée apparaît lorsqu'il est étiré [23]. Le principe de fonctionnement de cette technologie sera détaillé dans la section suivante.

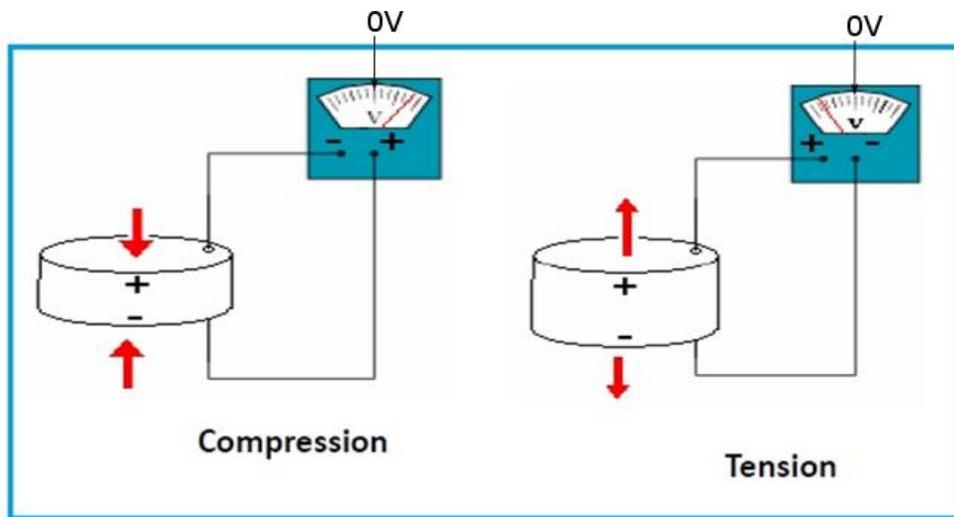


Figure 1.8 : Conversion électromécanique du matériau piézoélectrique.

La technologie de récupération d'énergie basée sur des matériaux piézoélectriques est en plein développement. Des produits proposés sur le marché sont globalement des structures de type poutre. La société Piezo.com propose une large gamme de générateurs piézoélectriques sans CGP [24]. L'entreprise PI piezo technology propose un module d'évaluation avec leur générateur piézoélectrique DuraAct et un CGP. Le module peut fournir une puissance de sortie de 100 mW avec une tension de 3,3 V [25]. La société française Tekceleo propose deux accéléromètres trois axes autonomes avec des générateurs piézoélectriques intégrés, des CGPs et le protocole de communication de BLE (Bluetooth basse énergie) [26]. D'autres produits basés sur la technologie piézoélectrique sont également proposés par les sociétés 8power [27], Microgen [28], Qortek [29], développés spécialement pour une application.



Tableau 1.2 : Comparaison des générateurs électromagnétiques (EM), électrostatiques (ES), piézoélectriques (PZ) [31].

|         | <b>f<sub>0</sub></b><br><b>(Hz)</b> | <b>Accélération</b><br><b>(m/s<sup>2</sup>)</b> | <b>Puissance</b><br><b>(μW)</b> | <b>Masse</b><br><b>(gramme)</b> | <b>Volume</b><br><b>(cm<sup>3</sup>)</b> | <b>NPD</b><br><b>(mW/cm<sup>3</sup>/g<sup>2</sup>)</b> |
|---------|-------------------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|--|--|
| EM [33] | 8,5                                 | 5   | 2090,16                         | –                               | 40,18                                    | 0,208  |
| EM [34] | 60                                  | 19  | 0,4                             | 0,209                           | 2,70                                     | 0,00004  |
| EM [35] | 102                                 | 9,8   | 290                             | 1,5                             | 8,6                                      | 0,031  |
| EM [36] | 26                                  | 9,8   | 210                             | –                               | 68                                       | 0,0031   |
| EM [37] | 55                                  | 14,9  | 0,61                            | 0,031                           | 0,13                                     | 0,002  |
| PZ [38] | 263                                 | 1   | 0,15                            | 0,026                           | 0,0121                                   | 1,215  |
| PZ [38] | 80,1                                | 1   | 0,78                            | 0,217                           | 0,0121                                   | 6,309  |
| PZ [39] | 572                                 | 20  | 60                              | –                               | 0,1                                      | 0,15   |
| PZ [40] | 235                                 | 9,8   | 13,98                           | –                               | 0,05                                     | 0,28   |
| PZ [41] | 461,2                               | 19,6  | 2,15                            | 0,001                           | 0,00065                                  | 0,82   |
| PZ [42] | 16                                  | 10  | 22                              | 4,6                             | 1,67                                     | 0,01317  |
| PZ [43] | 36                                  | 10  | 0,09                            | 0,023                           | 0,016                                    | 0,00534  |
| PZ [44] | ~387                                | 0,5   | 52,9                            | 11,7                            | 6,5                                      | 3,2  |
| PZ [45] | 155                                 | 9,8   | 95                              | –                               | 0,027                                    | 3,5  |
| ES [46] | 179                                 | 0,3   | 0,03                            | 0,06                            | 0,15                                     | 0,2407   |
| ES [47] | 96                                  | 9,8   | 0,15                            | 0,07                            | 0,29                                     | 0,00052  |
| ES [48] | 110                                 | 20  | 20,7                            | 0,267                           | 0,484                                    | 0,0107   |
| ES [49] | 150                                 | 10  | 2,2                             | 0,066                           | 0,042                                    | 0,052  |
| ES [50] | 109                                 | 2,5   | 1,3                             | 0,066                           | 0,038                                    | 0,547  |
| ES [51] | 63                                  | 20  | 1                               | 0,1                             | 0,305                                    | 0,00082  |
| ES [52] | 28                                  | 5   | 1,5                             | 0,5                             | 0,305                                    | 0,0197   |
| ES [53] | 95                                  | 4,2   | 0,95                            | 0,02                            | 0,14                                     | 0,0374   |
| ES [54] | 139                                 | 9,8   | 54                              | 0,088                           | 0,8                                      | 0,0675   |
| ES [31] | 136                                 | 0,9   | 4,95                            | 0,104                           | 0,187                                    | 2,9952   |
| ES [31] | 136                                 | 3,1   | 4,94                            | 0,104                           | 0,187                                    | 0,2695   |
| ES [31] | 136                                 | 6,1   | 5,56                            | 0,104                           | 0,187                                    | 0,0758   |

Le tableau 1.3 présente un récapitulatif des avantages et inconvénients des différentes technologies listées précédemment et donne un aperçu de l'énergie récupérable en pratique en  $\text{mJ/cm}^3$ .

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients des générateurs d'énergie vibratoire [6], [21], [55], [56].

| Type | Densité d'énergie maximale ( $\text{mJ/cm}^3$ ) | Avantages   | Inconvénients  |
|------|---|---|--|
| EM   | 24,8  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible impédance de sortie</li> <li>- Courants de sortie élevés</li> <li>- Longue durée de vie</li> <li>- Robustesse</li> <li>- Flexibilité de conception</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faibles tensions de sortie (<math>&lt; 1 \text{ V}</math>)</li> <li>- Faible efficacité dans les basses fréquences et les petites tailles</li> <li>- Matériaux coûteux</li> <li>- Difficultés pour réduire la taille</li> </ul>   |
| ES   | 4   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensions de sortie élevées</li> <li>- Matériau « intelligent » pas nécessaire</li> <li>- Facilité de redressement de tension et de réglage de fréquence</li> <li>- Compatible avec les techniques de fabrication des microsystèmes électromécaniques (MEMS)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fréquence de résonance élevée</li> <li>- Impédance de sortie élevée</li> <li>- Faibles courants de sortie</li> <li>- Circuit de commutation nécessaire au fonctionnement</li> <li>- Source de tension nécessaire pour la charge initiale dans le cas d'une conversion sans électret</li> <li>- Pertes dues à la capacité parasite</li> <li>- Rupture diélectrique <math>\rightarrow</math> nécessite des stoppeurs mécaniques pour éviter un court-circuit</li> <li>- Besoin de contrôler les dimensions en <math>\mu\text{m}</math></li> </ul> |
| PZ   | 35,4  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Structure simple</li> <li>- Tensions de sortie élevées</li> <li>- Facilité de redressement de tension</li> <li>- Densité d'énergie élevée</li> <li>- Coefficient de conversion élevé</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible courant de sortie.</li> <li>- Impédance de sortie élevée.</li> </ul>   |

Parmi les trois technologies de récupération d'énergie vibratoire, la technologie basée sur la piézoélectricité présente la meilleure densité d'énergie en pratique ( $35,4 \text{ mJ/cm}^3$  – cf. tableau 1.3). De plus, en adaptant la structure mécanique, les générateurs piézoélectriques peuvent atteindre une fréquence de résonance suffisamment basse pour coïncider avec les spectres de vibrations ambiantes (cf. tableau 1.1) et ils offrent également une possibilité de miniaturisation. En conclusion, les générateurs piézoélectriques semblent être un bon compromis et ils répondent bien à notre cahier des charges (basse fréquence, performance et

miniaturisation – cf. §1.1). De ce fait nous avons fait le choix d'étudier ce type de générateur dans le présent travail de thèse.

## 2. Générateurs piézoélectriques : structure et champs applications

### 2.1. Généralité sur la piézoélectricité

Comme introduit au paragraphe §1.2.3, les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui permettent de convertir les efforts mécaniques en charges électriques. Le préfixe grec piezo signifie : serrer ou presser. Ce phénomène est appelé « effet direct ». Ces matériaux ont aussi un effet dit « inverse » : ils peuvent se déformer mécaniquement lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. Ces propriétés sont très employées pour plusieurs applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Ainsi, les capteurs de pression et de force utilisent l'effet direct de la piézoélectricité pour détecter et mesurer les efforts appliqués en mesurant la tension électrique générée. L'effet inverse est mis en œuvre dans le cas des actionneurs qui génèrent des déformations mécaniques quand on leur applique une tension électrique.

A l'échelle microscopique, l'effet piézoélectrique est lié au déplacement du barycentre des charges constituant le matériau. Quand le matériau est au repos, les charges électriques sont en équilibre (cf. figure 1.10, a). L'effet piézoélectrique direct vient de l'effort mécanique  $\vec{F}$  qui écarte le barycentre des charges positives du barycentre des charges négatives, ce qui crée une polarisation  $\vec{P}$  dans le matériau (cf. figure 1.10, b). L'effet piézoélectrique inverse traduit le fait qu'un champ électrique  $\vec{P}$  écarte le barycentre des charges positives du barycentre des charges négatives, ce qui crée une déformation mécanique  $\vec{F}$  (cf. figure 1.10, b).

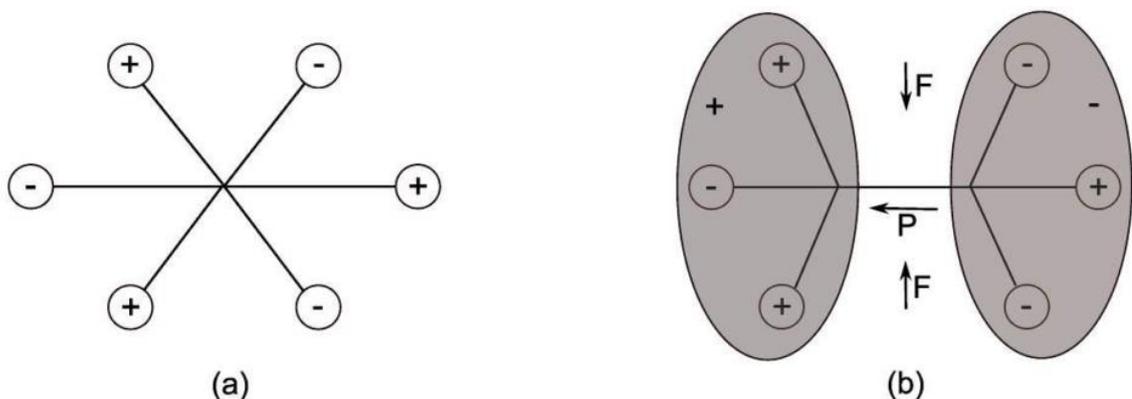


Figure 1.10 : Effet piézoélectrique à l'échelle microscopique [14].

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux et peuvent être classés selon leur composition chimique, leur structure cristallographique ou leur intérêt scientifique ou industriel :

- Les cristaux naturels : forme naturelle des matériaux piézoélectriques, comme le quartz, la tourmaline, la topaze.
- Les céramiques : matériaux de synthèse composés d'oxydes à structure pérovskite comme le titanate de plomb ( $\text{PbTiO}_3$ ) et, plus communément, le titano-zirconate de plomb ( $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  ou PZT). Leurs propriétés sont globalement bien meilleures que celles des cristaux naturels. Faciles à fabriquer, leurs propriétés peuvent être adaptées en fonction d'une application donnée. Il y a trois principales techniques de fabrication des céramiques piézoélectriques : les céramiques massives, les films épais et les films minces ; nous présenterons plus en détail plus loin ces trois techniques pour l'application de la récupération d'énergie. Du fait de la Directive européenne RoHS (2002/95/CE) qui vise à limiter l'utilisation de six substances dangereuses dont le plomb, les compositions de céramiques sans plomb sont de plus en plus étudiées telles que la ferrite de bismuth ( $\text{BiFeO}_3$ ), le titanate de baryum ( $\text{BaTiO}_3$ ), le sodium niobate de potassium ( $(\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{NbO}_3$ ) [57].
- Les composites : c'est une composition de deux phases, une phase piézoélectrique (souvent une céramique PZT) et une phase non piézoélectrique (typiquement une résine époxy). Certaines de leurs caractéristiques sont meilleures que celles des céramiques conventionnelles, particulièrement dans le domaine des transducteurs acoustiques hautes fréquences pour l'imagerie [58].
- Les polymères : ils offrent une meilleure flexibilité qui convient aux applications portables, de plus ils sont mis en œuvre sous forme de films ce qui convient aux applications haute fréquence (quelques dizaines de MHz). Aujourd'hui, les polymères les plus utilisés dans l'industrie sont le PVDF (polyvinylidène difluorure) [59] et certains de ses copolymères.

Le comportement électromécanique des matériaux piézoélectriques peut être décrit par les deux équations constitutives suivantes :

$$D = d.T + \epsilon^T.E \quad (5)$$

$$S = s^E \cdot T + d^t \cdot E \quad (6)$$

Dans ces expressions,  $D$  est l'induction électrique (en  $C/m^2$ ),  $T$  est la contrainte mécanique (en  $N/m^2$ ),  $E$  est le champ électrique (en  $V/m$ ),  $S$  est la déformation mécanique (en  $m^2/N$ ),  $d$  est la constante piézoélectrique (en  $m/V$  ou  $C/N$ ),  $\varepsilon^T$  est la permittivité électrique à contrainte constante ou nulle (en  $F/m$ ), et  $s^E$  est la souplesse (en  $m^2/N$ ) à champ électrique constant ou nul.

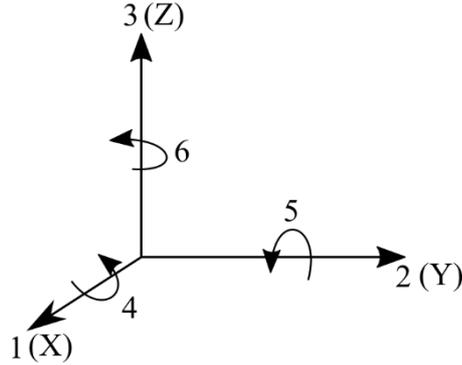


Figure 1.11 : Schéma des directions cristallographiques de classe 6mm.

Les matériaux piézoélectriques sont anisotropes par nature. Ils sont décrits par les matrices de souplesse, piézoélectrique et de permittivité dans la classe de symétrie cristalline hexagonale 6mm pour le cas des céramiques (cf. figure 1.11) avec respectivement les formes suivantes :

$$s^E = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix}$$

Il est donc nécessaire de connaître les coefficients de ces différentes matrices pour modéliser le comportement électromécanique des matériaux piézoélectriques.

Par la suite, nous allons passer en revue les principales technologies de récupération d'énergie vibratoire basées sur l'utilisation de matériaux piézoélectriques.

## 2.2. Revue des générateurs piézoélectriques

### 2.2.1. Générateurs de type « cymbale »

Le générateur de type « cymbale » se compose généralement d'un disque en céramique piézoélectrique et d'un embout en métal de chaque côté (cf. figure 1.12). Cette structure a été développée pour des dispositifs liés à des sources de forte intensité, positionnées par exemple sous les chaussures, sur les autoroutes et les suspensions de véhicules où la force de pression peut atteindre des centaines voire des milliers de Newtons [60]. Concernant l'embout en métal, l'acier est généralement utilisé car il offre une plus grande limite d'élasticité que le laiton et l'aluminium, conduisant ainsi à une capacité de charge plus élevée du générateur. Kim et al [61] ont développé un générateur cymbale basé sur un disque PZT d'un diamètre de 29 mm. Une puissance d'environ 100 mW est produite lorsque le dispositif est actionné par une force cyclique de 70 N à 200 Hz. Cependant, la raideur de la structure des cymbales limite leur utilisation potentielle à des applications ayant des sources de vibrations avec une grande amplitude. Ce type de géométrie ne convient donc pas à la récupération d'énergie à partir de sources de vibrations ambiantes, qui ont par définition une faible amplitude de vibration.

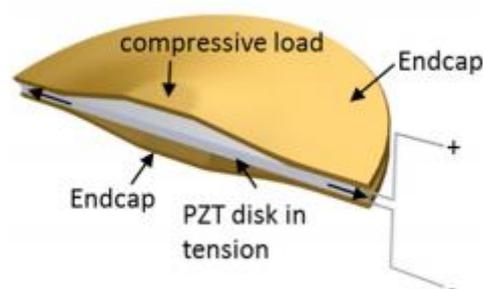


Figure 1.12 : Schéma d'un générateur piézoélectrique « cymbale » (demi vue) [60].

### 2.2.2. Générateurs de type « stack »

La structure du générateur de type « stack » est présentée dans la figure 1.13. Elle est constituée de plusieurs films minces piézoélectriques de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur empilés les uns sur les autres en alternance avec des électrodes en connexion électrique parallèle. En effet, ce dispositif fonctionne en mode  $d_{33}$ , c'est-à-dire que le champ électrique et la force externe sont orientés dans le sens de la polarisation, le coefficient  $d_{33}$  de la matrice piézoélectrique est alors prépondérant. La méthode d'empilement est utilisée pour sommer la quantité de charges collectées au niveau de chaque couche piézoélectrique. Ce type de générateur convient pour récupérer de l'énergie à partir d'une vibration ou d'un mouvement mettant en jeu des forces relativement grandes [62]. Xu et al [63] ont étudié théoriquement et expérimentalement la performance d'un générateur de type stack de dimensions  $32,4 \text{ mm} \times 7,1 \text{ mm} \times 7,6 \text{ mm}$ . Une puissance électrique de 321 mW est obtenue au mode de résonance à 1204 Hz avec une force d'excitation de  $22,15 \text{ N}_{\text{rms}}$ .

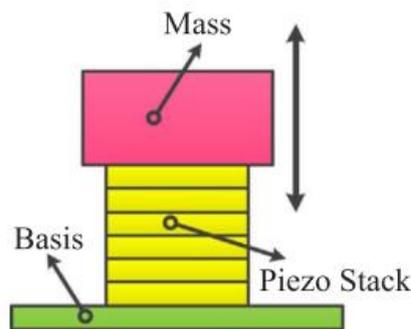


Figure 1.13 : Schéma d'un générateur piézoélectrique de type « stack » [62].

### 2.2.3. Générateurs de type « diaphragme circulaire »

Un générateur de type « diaphragme circulaire » est composé d'un mince disque de céramique piézoélectrique collé sur un substrat métallique. Toute la structure est ensuite encastrée sur le périmètre. Une masselotte est parfois fixée au centre du diaphragme pour améliorer les performances à basses fréquences du générateur d'énergie et augmenter la puissance électrique de sortie. Le schéma typique de ce type de générateur est présenté à la figure 1.14. Différents articles leur sont consacrés [64][65]–[68]. Parmi ceux-ci, les travaux de Chen et al [64] se distinguent : ils montrent qu'une puissance électrique de 12 mW peut être générée à 113 Hz et  $9,8 \text{ m/s}^2$  d'accélération (1 g) avec un générateur de type diaphragme

circulaire de 30 mm de diamètre et d'épaisseur 0,4 mm. Cette structure concerne principalement les capteurs de pression ou de force autonomes.

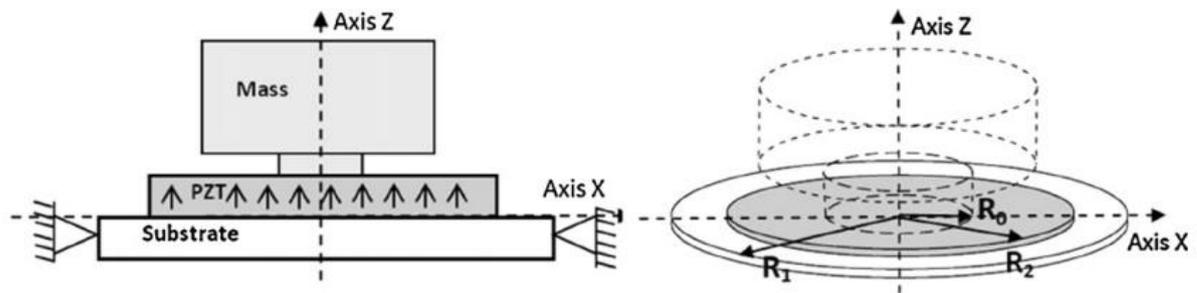


Figure 1.14 : Schéma de principe du générateur de type « diaphragme circulaire » [64].

#### 2.2.4. Générateurs de type « poutre encastrée-libre » (ou cantilever)

Les générateurs de type « cantilever » sont beaucoup étudiés, développés et utilisés dans le domaine de la récupération d'énergie vibratoire par rapport aux autres configurations listées dans les sections précédentes grâce à sa configuration simple et sa capacité d'amplification mécanique [69][70][71][72][73]. La structure de type cantilever permet d'amplifier l'énergie mécanique à l'entrée du système, ce qui se traduit par une meilleure efficacité du dispositif. Ces générateurs d'énergie vibratoire sont généralement des structures de type poutre encastrée libre (un côté est encastré et l'autre côté est libre de toute contrainte mécanique). La poutre est souvent sous forme d'une structure multicouches, un unimorphe ou un bimorphe [74]. L'unimorphe est composé d'une couche de matériau actif piézoélectrique, et d'une couche de substrat élastique appelée *shim* (cf. figure 1.15. a). Le bimorphe est composé de deux couches piézoélectriques séparées par une couche élastique au milieu (cf. figure 1.15. b). Une masselotte peut être attachée du côté libre du cantilever pour ajuster la fréquence de résonance de la structure à la fréquence de la vibration ambiante et augmenter l'énergie cinétique à l'entrée du système (cf. figure 1.15. c).

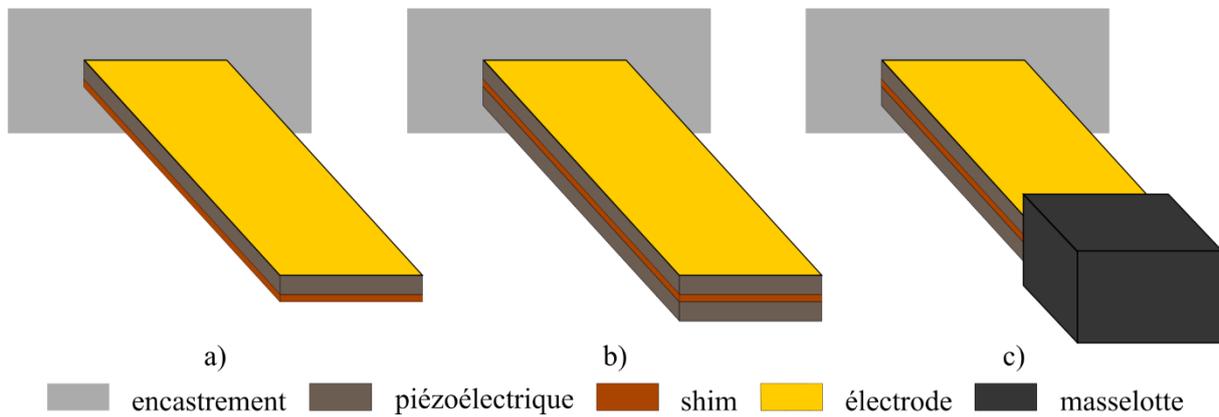


Figure 1.15 : Structure cantilever : a) unimorphe, b) bimorphe, et c) bimorphe avec masselotte.

Le flux d'énergie des générateurs piézoélectriques est présenté schématiquement sur la figure 1.16. En fonctionnement, le générateur piézoélectrique de type cantilever reçoit d'abord l'énergie mécanique à partir de la source d'excitation vibratoire ambiante. Puisque les vibrations ambiantes ont généralement une faible amplitude, un système de résonance mécanique est utilisé. Grâce au phénomène de résonance, l'énergie mécanique à l'entrée du système est amplifiée (cf. figure 1.17). Le déplacement au bout de la poutre est amplifié, son mouvement relatif avec la base encastrée crée une compression d'un côté et une elongation de l'autre côté par rapport au plan neutre de la poutre [75]. Sous l'effet de la contrainte générée dans la poutre, les charges électriques apparaissent sur les électrodes grâce à l'effet direct du matériau piézoélectrique et elles sont récupérées par un circuit électrique externe. Une résistance  $R$  représente la charge, mais en réalité ce sont des circuits électriques plus ou moins complexes qui sont utilisés pour extraire efficacement l'énergie électrique et la stocker dans une micro-batterie ou une super-capacité (cf. figure 1.18).

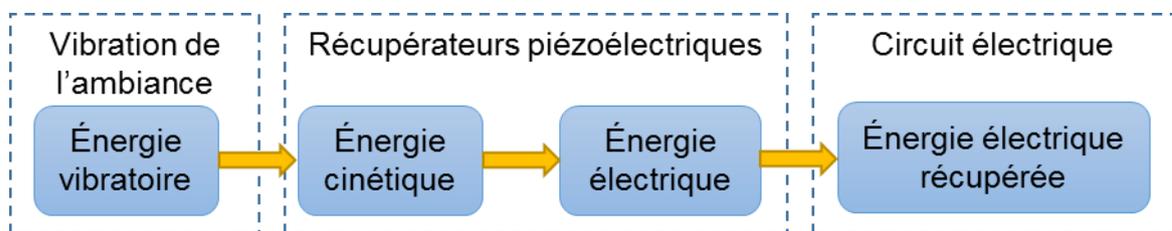


Figure 1.16 : Chaîne de conversion d'énergie mise en jeu dans les générateurs piézoélectriques vibratoires.

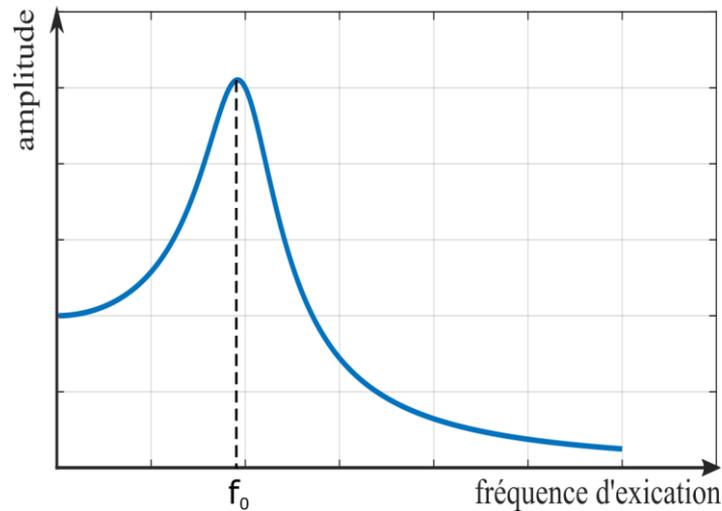


Figure 1.17 : Fonction de transfert d'un système vibrant résonant.

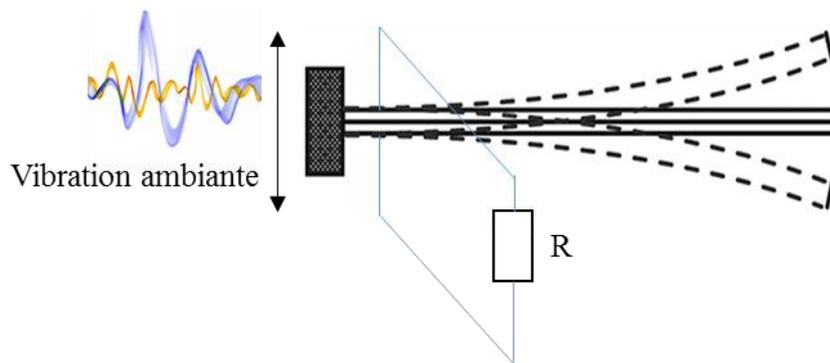


Figure 1.18 : Fonctionnement d'un générateur piézoélectrique de type poutre cantilever.

Pour la récupération d'énergie à l'aide des matériaux piézoélectriques, les deux principaux modes de transduction utilisés sont : le mode 33 et le mode 31 [71][76] (cf. figure 1.19). Par convention, l'axe 3 est orienté suivant la polarisation (P) du matériau. En mode 33, les charges électriques sont collectées sur les électrodes et créent une tension  $V$  lorsque le matériau subit une force de traction ou de compression dans la direction de polarisation « 3 ». En mode 31, les charges sont collectées sur les électrodes lorsque le matériau est sollicité dans la direction « 1 » perpendiculaire à la direction de polarisation. Le mode 33 a un coefficient de couplage électromécanique plus élevé que celui du mode 31 car la valeur du coefficient de la matrice piézoélectrique  $d_{33}$  est plus grande que celle du coefficient  $d_{31}$  [23]. Par contre, dans le cas d'un cantilever, l'utilisation du mode 33, qui donnerait une meilleure conversion, nécessite de concevoir une électrode interdigitée et de polariser le matériau dans le sens d'application de la contrainte. Or, la configuration interdigitée ne permet pas la polarisation efficace du matériau,

ce qui conduit à des performances non optimisées en termes de puissance électrique de sortie [23]. Park *et al.* [77] ont fabriqué et comparé deux générateurs piézoélectriques impliquant les modes  $d_{33}$  et  $d_{31}$ , ayant les mêmes dimensions, la puissance récupérée maximale est de  $0,47 \mu\text{W}$  en mode  $d_{33}$  contre  $6,72 \mu\text{W}$  en mode  $d_{31}$ . Le mode 31 est donc plus souvent utilisé dans des systèmes de récupération d'énergie vibratoire de type cantilever.

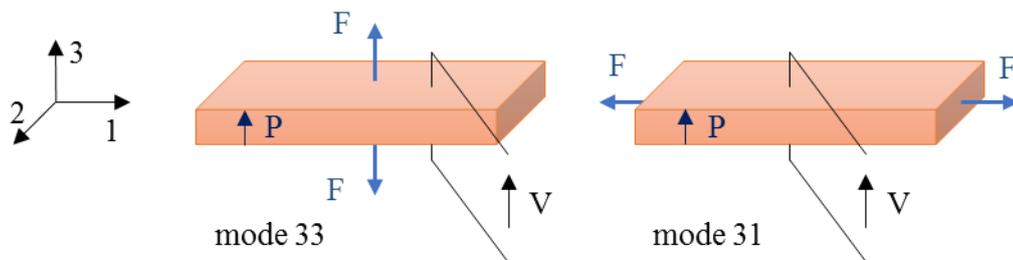


Figure 1.19 : Illustration du mode « 33 » et du mode « 31 » de couplage électromécanique dans les matériaux piézoélectriques.

Grâce à leurs avantages (amplification mécanique et la facilité de mise en œuvre et de miniaturisation), les générateurs de type cantilever sont adaptés aux applications dans lesquelles le niveau de vibration est faible, et la gamme de fréquence est basse (10 Hz – 200 Hz). Ce type de générateur convient donc à notre cahier des charges (cf. §1.1).

### 3. Technologies de fabrication des générateurs piézoélectriques

Dans cette partie, nous faisons une revue de la bibliographie sur des technologies de fabrication des générateurs piézoélectriques de type cantilever. Au regard de notre cahier des charges, nous avons évalué les avantages et les inconvénients de ces technologies pour choisir une technologie adaptée à nos spécifications. Après avoir choisi la technologie, nous présenterons notre approche originale de fabrication des générateurs d'énergie.

#### 3.1. Technologie MEMS

La technologie de micro-usinage MEMS (microsystèmes électromécaniques - MicroElectroMechanical Systems) est fortement employée dans la fabrication des structures de type cantilever principalement pour constituer des capteurs d'accélération, mais aussi des récupérateurs d'énergie vibratoire. Grâce à sa compatibilité avec la technologie CMOS

(Complementary metal oxide semiconductor) les générateurs MEMS sont faciles à intégrer dans les produits micro-électroniques [78].

Les procédés de fabrication des générateurs MEMS en mode 31 et 33 sont présentés dans la figure 1.20. Les générateurs MEMS utilisent le silicium comme substrat, des couches de métal et de matériaux actifs sont ensuite déposées sur cette base. Les matériaux piézoélectriques à base de PZT ou à base de matériau sans plomb peuvent être déposés par des méthodes de dépôt physique ou chimique. Les méthodes de dépôt physique incluent la pulvérisation cathodique, les dépôts physiques en phase vapeur (PVD) et les dépôts laser pulsés (PLD). Les méthodes de dépôt chimique comprennent les dépôts en solution, sol-gel et hydrothermaux et les dépôts chimiques en phase vapeur (CVD). Parmi ces méthodes physiques et chimiques, le sol-gel a été le plus largement utilisé pour déposer des films de PZT, en raison de son efficacité [79].

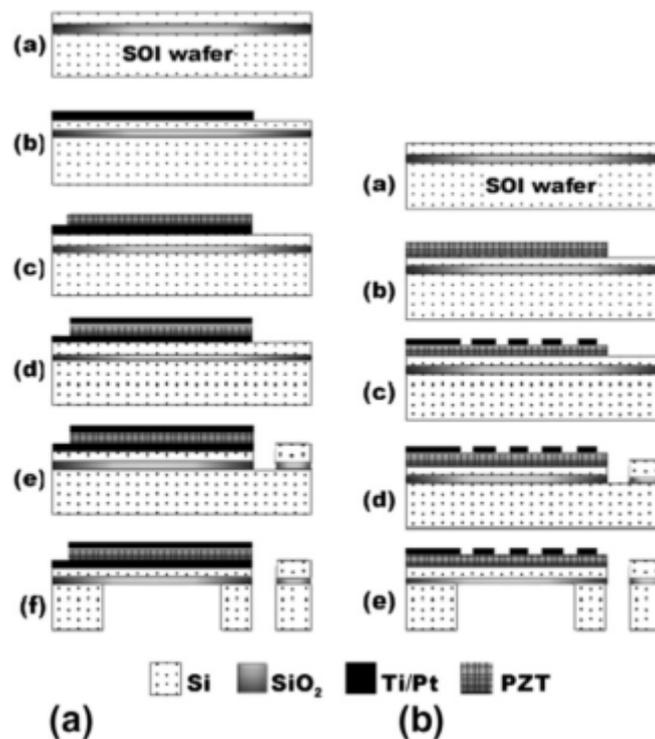


Figure 1.20 : Processus de fabrication des générateurs MEMS en mode : a) 31 et b) 33 [71][73].

La figure 1.21 montre des exemples de générateurs piézoélectriques MEMS basés sur différents matériaux piézoélectriques.

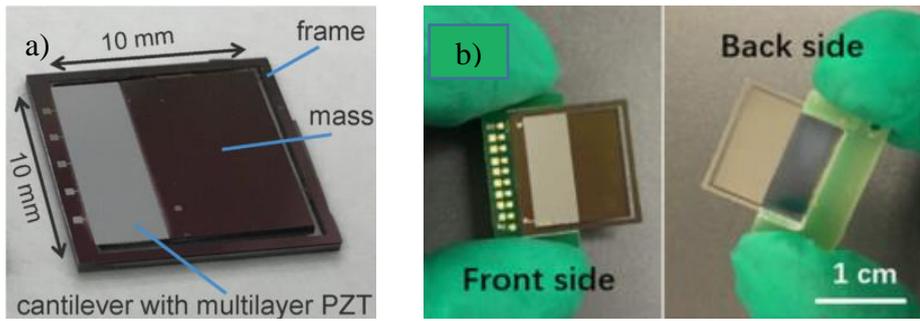


Figure 1.21 : Exemples des générateurs piézoélectriques MEMS basés sur a) un film mince PZT [80] et b) un film mince AlN [81].

Malgré leur compatibilité avec la technologie CMOS, les générateurs MEMS ont de faibles facteurs de forme (l'épaisseur de la couche piézoélectrique est généralement inférieure à  $10\ \mu\text{m}$ ) et la rigidité du matériau Silicium permet difficilement d'atteindre de basses fréquences de résonance dans la gamme des fréquences de vibration des applications réelles ( $< 200\ \text{Hz}$ ). De ce fait, ils ne peuvent fournir qu'une très faible puissance [82].

La technologie de film épais est ainsi proposée pour augmenter l'épaisseur de la couche de matériau actif (de  $10\ \mu\text{m}$  à  $100\ \mu\text{m}$ ) par différentes techniques de dépôt comme la sérigraphie (*screen-printing* en anglais) [83], le procédé sol-gel [84], le dépôt électrophorétique [85], le coulage en bande (*tape-casting* en anglais) [86] ou le dépôt par aérosol (*aerosol deposition method* en anglais) [87]. Les principales faiblesses actuelles de la fabrication de films épais piézoélectriques sont la non-uniformité de l'épaisseur, la fissuration du matériau, une faible densité mécanique, une faible reproductibilité et de faibles performances piézoélectriques [88].

Le tableau 1.4 présente quelques travaux sur ce type de générateurs basés sur la technologie MEMS. Plus de détails sur les générateurs MEMS peuvent être trouvés dans [78].

Tableau 1.4 : Performance des générateurs basés sur la technologie MEMS.

|                  | <b>f<sub>0</sub></b><br><b>(Hz)</b> | <b>Accélération</b><br><b>(g)</b> | <b>Puissance</b><br><b>(μW)</b> | <b>Volume</b><br><b>(cm<sup>3</sup>)</b> | <b>NPD</b><br><b>(mW/cm<sup>3</sup>/g<sup>2</sup>)</b> |
|------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Nguyen 2018 [89] | 926                                 | 0,5                               | 5,8                             | 1,82E-03                                 | 12,72  |
| Le 2015 [90]     | 792                                 | 0,8                               | 1,3                             | 6,59E-04                                 | 3,08   |
| Muralt 2009 [91] | 870                                 | 2                                 | 1,4                             | 2,64E-4                                  | 1,33   |
| Won 2016 [92]    | 132                                 | 1                                 | 3,62                            | 2,00E-03                                 | 1,81   |
| Wang 2015 [93]   | 1300                                | 1,02                              | 0,98                            | 1,15E-02                                 | 0,08   |

### 3.2. Technologie développée

Les céramiques piézoélectriques massives ont une meilleure performance comparée aux films minces ou aux films épais piézoélectriques (cf. tableau 1.5) [38]. Elles sont utilisées pour fabriquer les générateurs d'énergies vibratoires de taille macroscopique par le procédé de collage des couches de matériaux actifs sur une couche de substrat. La figure 1.22 montre des exemples de bimorphes piézoélectriques fabriqués par cette technique.

Tableau 1.5 : Comparaison des processus de micro-fabrication piézoélectrique [38].

|                     | <b>Coef. électromécanique k<sub>31</sub><sup>2</sup></b> | <b>Epaisseur du matériau (μm)</b> |
|---------------------|--|-----------------------------------|
| Céramiques massives | 0,15 – 0,35  | 5 – 100                           |
| Sérigraphie         | < 0,09   | 10 – 100                          |
| PZT sol-gel         | 0,06 – 0,09  | < 4                               |
| PZT pulvérisé       | 0,07   | < 2 – 3                           |
| AlN pulvérisé       | 0,017 – 0,03   | < 2                               |
| ZnO pulvérisé       | 0,049  | < 2                               |

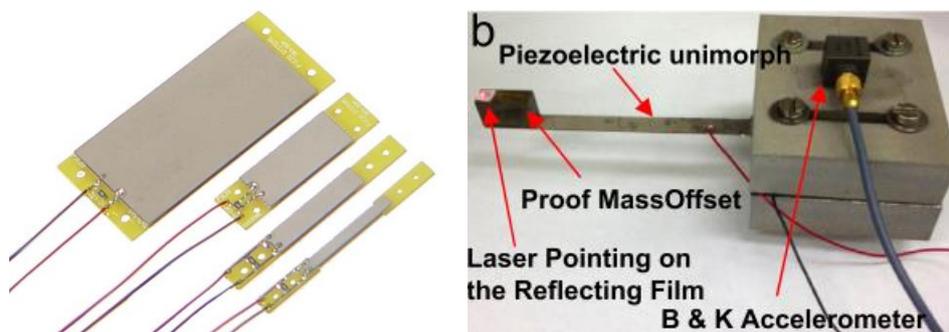


Figure 1.22 : Générateurs d'énergie de taille macroscopique, exemple du produit commercial de PI System [24].

Les générateurs d'énergie vibratoire de taille macroscopique présentent un gros avantage en termes de performances comparés à celles des générateurs MEMS (cf. tableau 1.5) mais ont un inconvénient en termes de miniaturisation qui s'avère être nécessaire pour développer des dispositifs avec électroniques intégrés, dans le cas d'applications biomédicales par exemple. Une autre voie de fabrication des générateurs en matériaux piézoélectriques massifs consiste à amincir une telle structure. Cela permet de miniaturiser les générateurs. Le premier générateur fabriqué par cette approche est présenté en 2010 par Aktakka *et al.* [38]. Cette approche sera notamment poursuivie par une équipe de Recherche de l'Université de Shanghai Jiao Tong [94], [95], [96]. Le tableau 1.6 présente un récapitulatif des générateurs basés sur cette technologie de collage et d'amincissement du matériau actif.

Tableau 1.6 : Performances des générateurs basés sur la technologie de collage et d'amincissement.

|                     | $f_0$<br>(Hz) | Accélération<br>(g) | Puissance<br>( $\mu$ W) | Volume<br>( $\text{cm}^3$ ) | NPD<br>( $\text{mW}/\text{cm}^3/\text{g}^2$ ) |
|---------------------|---------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|---|
| Janphuang 2014 [97] | 96            | 1                   | 82,4                    | 3,47E-01                    | 0,24  |
| Aktakka 2011 [98]   | 154           | 1,5                 | 205                     | 1,80E-02                    | 5,07  |
| Quintero 2014 [99]  | 49,8          | 0,1                 | 6,7                     | 5,73E-02                    | 11,68   |
| Tian 2018 [96]      | 34,3          | 1,5                 | 216,66                  | 1,26E-01                    | 0,76  |
| Yi 2017 [95]        | 77,2          | 3,5                 | 979                     | 3,06E-02                    | 2,61  |

Avec la méthode de l'amincissement de céramiques massives, les fréquences de résonance des générateurs peuvent descendre jusqu'à une gamme de fréquences assez basse

(< 200 Hz). Au contraire, les générateurs MEMS ont des difficultés à adresser cette gamme de fréquences. Pour ces raisons, nous avons choisi l'approche d'amincir le matériau piézoélectrique massif pour fabriquer nos générateurs.

A cette fin, la société VERMON S.A. a développé une technique de micro-usinage des céramiques piézoélectriques pour fabriquer des générateurs d'énergie. La figure 1.23 montre le procédé de fabrication d'un unimorphe ou d'un bimorphe piézoélectrique à partir d'une plaque de céramique piézoélectrique en PZT d'environ 500 µm d'épaisseur (étape 0). Le substrat, ou shim, est ensuite collé sur la ou les couches de céramique en utilisant de la colle époxy pour former un unimorphe ou un bimorphe (étape 1). Le matériau piézoélectrique est ensuite aminci à l'épaisseur souhaitée (étape 2). Ensuite, des couches d'électrodes en Ti/Au de très faible épaisseur (entre 30 nm et 200 nm) sont déposées sur toute la surface de l'échantillon (étape 3). A la dernière étape, l'échantillon est détourné à la dimension souhaitée pour former le dispositif final [100].

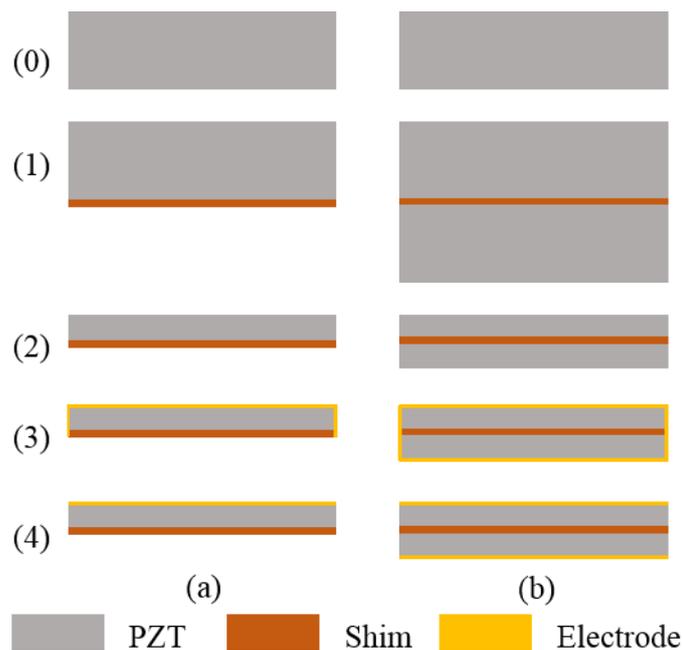


Figure 1.23 : Procédé de fabrication d'un unimorphe a) et d'un bimorphe b).

Des images ont été réalisées à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) sur un bimorphe réalisé par ce procédé. Ces images nous permettent d'apprécier tant l'état de surface que la microstructure de notre échantillon.

Ainsi, la figure 1.24 montre la présence d'inclusions sur la surface de la céramique (figure 1.24, photo de gauche - points noirs). De plus, celle-ci apparaît poreuse : des petits trous sont observés assez régulièrement (figure 1.24, photo de droite). L'effet du polissage de la surface de la céramique est observable sur la figure : des traces de filetage sont visibles par endroits. De plus, l'imagerie MEB nous permet d'estimer la taille des grains constituant la couche de matériau actif entre  $3\ \mu\text{m}$  et  $5\ \mu\text{m}$ . Enfin, la figure 1.25 montre, grâce à une vue en coupe, la légère inhomogénéité de la couche de colle liée principalement à la présence d'inclusions dans les couches de matériau actif et à leur porosité.

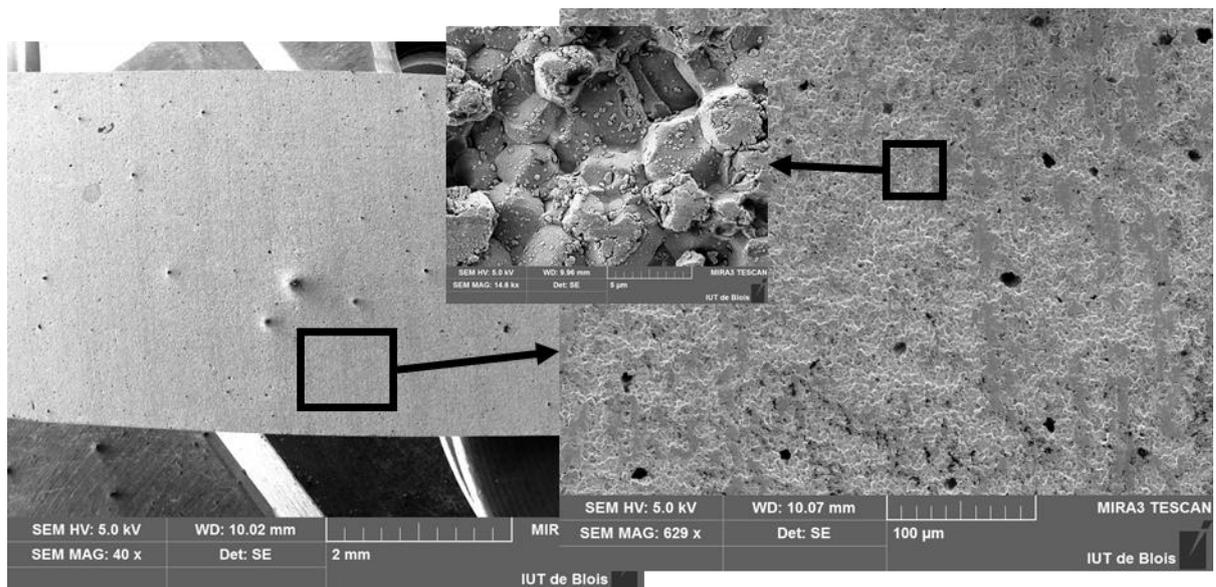


Figure 1.24 : Image au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface d'un bimorphe.

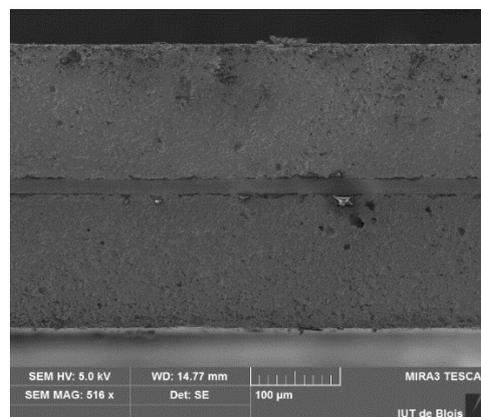


Figure 1.25 : Image MEB sur la tranche d'un bimorphe.

Nous avons ainsi développé un processus de fabrication des générateurs piézoélectriques par l'amincissement des matériaux piézoélectriques massifs. Puisque chaque application a un cahier des charges différent comme la vibration à l'entrée du système ou son encombrement, nous avons besoin d'un outil de conception du générateur qui peut répondre aux spécifications du cahier des charges. La conception d'un tel outil nécessite de modéliser et évaluer l'influence des variables de conception telles que les propriétés des matériaux utilisés, les dimensions (longueur, largeur, épaisseur) des couches ou encore la masse et sa position, sur la quantité d'énergie récupérée.

#### 4. Stratégie de modélisation du générateur d'énergie vibratoire

Dans cette partie nous allons présenter des approches de modélisation existantes, leurs avantages ainsi que leurs limites. Ensuite, nous expliquerons notre approche de modélisation d'un générateur d'énergie vibratoire.

Dans le but de modéliser et de concevoir un générateur d'énergie vibratoire, les chercheurs proposent des modèles analytiques ainsi que numériques. Déjà en 1996, l'idée de la récupération d'énergie vibratoire avait été proposée par William et Yates [101]. Dans leurs travaux, un modèle simple du générateur électromagnétique était proposé. Ils avaient considéré une masse sismique magnétique  $m$  qui oscille à l'intérieur d'une bobine qui joue le rôle de générateur d'énergie vibratoire.

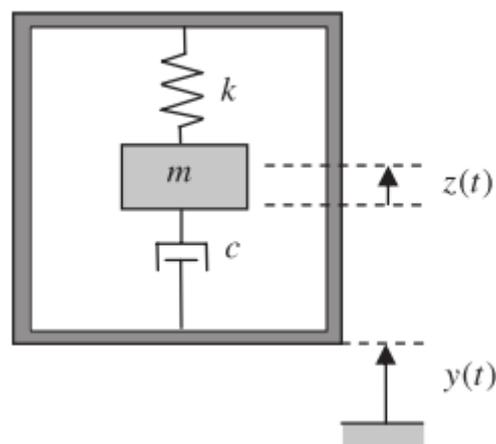


Figure 1.26 : Schéma d'un générateur électromagnétique proposé par Williams et Yates.

Ils avaient utilisé l'équation bien connue d'un système masse ressort à un degré de liberté (1DDL) (cf. figure 1.26) pour décrire le mouvement de la masse sismique par rapport au boîtier du générateur :

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad (7)$$

avec  $m$  est la masse sismique ;  $k$ , la constante du ressort ;  $c$ , le coefficient d'amortissement ;  $y$ , le déplacement du boîtier de générateur, et  $z$ , le déplacement relatif de la masse sismique par rapport au boîtier de générateur. La puissance électrique générée à partir d'une vibration sinusoïdale  $y(t) = Y_0 \cos(\omega t)$  s'exprime alors suivant la formule :

$$P = \frac{m\zeta_t Y_0^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta_t \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2} \quad (8)$$

où  $\zeta_t$  est le facteur d'amortissement du générateur ;  $\omega_n$  la pulsation de résonance ;  $Y_0$  l'amplitude de vibration et  $\omega$  la pulsation de vibration. Cette approche de modélisation suppose que le couplage dans le domaine mécanique est seulement proportionnel à la vitesse. Ainsi, ce modèle convient au générateur électromagnétique dont l'effet électrique dû à la présence d'une charge résistive peut être représenté par un coefficient d'amortissement visqueux dans l'équation du mouvement mécanique [102]. Un générateur piézoélectrique, quant à lui, utilise la transduction piézoélectrique qui est différente de la transduction électromagnétique. Le mécanisme de transduction piézoélectrique est dû aux relations constitutives du matériau lui-même. L'effet du système électrique sur le système mécanique n'est pas nécessairement linéaire et il n'est pas nécessairement proportionnel à la vitesse [11].

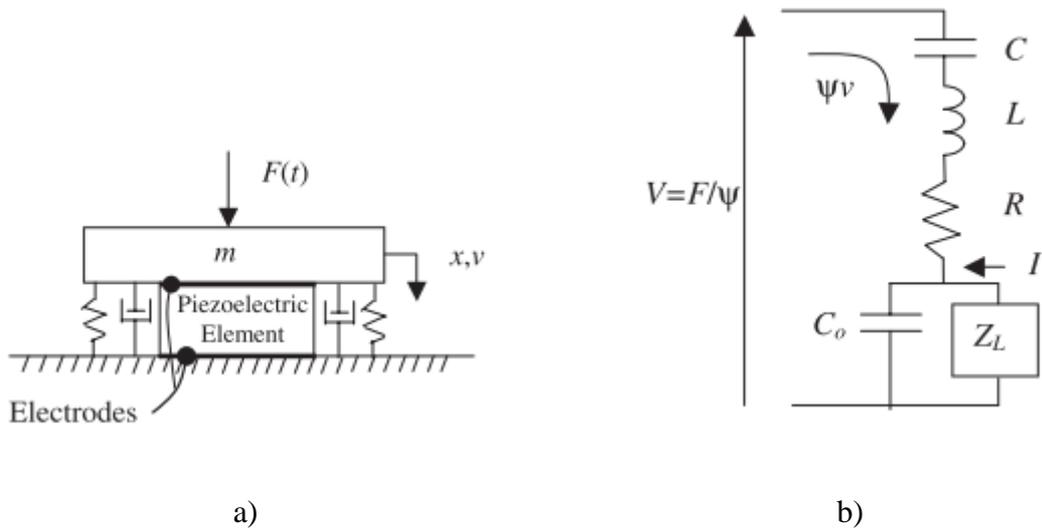


Figure 1.27 : Schéma d'un dispositif de récupération d'énergie piézoélectrique a) et son circuit équivalent b) [103].

L'effet piézoélectrique est pris en compte dans le modèle d'un système à 1DDL de Richards *et al.* [103]. Le dispositif de récupération d'énergie est constitué d'un élément piézoélectrique couplé à une structure mécanique. Une masse  $m$  est couplée à une surface fixe par un ressort de rigidité  $k$ , un amortisseur de coefficient  $c$  et un élément piézoélectrique polarisé selon l'épaisseur (cf. figure 1.27.a). Le système est sollicité par une fore  $F$  et l'énergie peut être extraite en connectant un circuit électrique aux électrodes de l'élément piézoélectrique. Étant donné que la force appliquée est harmonique et en supposant que la force mutuelle interne entre l'élément piézoélectrique et la masse  $m$  est négligée, la loi de Newton pour la masse  $m$  s'écrit :

$$F = j\omega mv + cv + \frac{k}{j\omega} v \quad (9)$$

où  $v$  est la vitesse de la masse  $m$  et  $\omega$  la pulsation de la force  $F$ . La conversion d'énergie du système peut être représentée sous forme d'un circuit électrique équivalent (cf. figure 1.27.b). Dans ce schéma équivalent, la tension appliquée est  $F/\psi$  et le courant est  $\psi v$ . Les équations régissant le fonctionnement d'un générateur piézoélectrique sont de la forme :

$$F = j\omega mv + cv + \frac{k_{eq}}{j\omega} v + \psi V \quad (10)$$

$$j\omega C_o V = I + \psi v \quad (11)$$

où  $k_{eq}$  est la raideur équivalente ;  $\psi$  le facteur de couplage réciproque du système ;  $V$  l'amplitude de la tension aux bornes des électrodes ;  $I$  l'amplitude du courant dans l'élément piézoélectrique et  $C_0$  la capacité statique de l'élément piézoélectrique. Les composants électriques qui modélisent l'impédance mécanique sont l'inductance  $L = m/\psi^2$ , la résistance  $R = c/\psi^2$  et la capacité  $C = \psi^2/k_{eq}$ . On suppose qu'un circuit de charge électrique d'impédance passive  $Z_L$  est relié aux électrodes de l'élément piézoélectrique. La fréquence de résonance et le facteur de qualité du circuit RLC sont respectivement  $\omega_n = (k_{eq}/m)^{1/2}$  et  $Q_{sys} = (mk_{eq})^{1/2}/c$ . Ces deux paramètres sont associés aux propriétés mécaniques du système couplé. Le facteur de couplage électromécanique du système est  $k_{sys}^2 = C/(C_0 + C)$ . Les composants électriques peuvent se réécrire sous les formes  $L = 1/(\omega_n^2 C)$ ,  $R = 1/(Q_{sys}\omega_n C)$ , et  $C_0 = C(1 - k_{sys}^2)/k_{sys}^2$ .

En supposant que l'impédance passive  $Z_L$  est une charge résistive de valeur  $R_L$ , la puissance électrique maximale à la fréquence de résonance  $\omega_n$  à travers une résistance  $R_L = 1/\omega_n C_0$  est écrite sous la forme [103] :

$$P_L = \frac{|F/\psi|^2 |Z_t|^2}{2 |Z|^2 R_L} \quad (12)$$

où  $Z_t$  est l'impédance parallèle de  $C_0$  et  $R_L$  ;  $Z$ , l'impédance totale du circuit.

Les modèles d'un système à 1DDL pour modéliser un générateur piézoélectrique sont également développés par Dutoit *et al.* [104] ainsi que Roundy *et al.* [105]. La modélisation avec l'utilisation d'un système à 1DDL permet d'utiliser des expressions simples pour la description du système. Cependant, elle est approximative et limitée à un seul mode d'oscillation. Cette description ne prend pas en compte des aspects importants du système, tels que la répartition précise des contraintes, la forme du mode et la variation du couplage électromécanique selon l'emplacement de l'électrode [102].

Un autre type de modélisation utilise des paramètres distribués. Basées sur la théorie des poutres d'Euler Bernoulli, des solutions analytiques du système piézoélectrique couplé ont été obtenues dans Erturk et Inman [106], [107], [108]. Dans ces travaux, ils ont développé des solutions analytiques multimodales et des solutions approchées, valables au voisinage du mode fondamental du système piézoélectrique. D'autres modèles basés sur la théorie des poutres d'Euler Bernoulli sont présentés dans [109]–[111].

Les modèles analytiques fournissent une approche de modélisation rapide et simplifiée pour les systèmes de récupération d'énergie piézoélectrique. Ils permettent d'étudier les grandeurs de sortie telles que la puissance électrique récupérée, le déplacement induit en fonction des paramètres d'entrée du système. Malgré ces avantages, les modèles analytiques, y compris le modèle d'1DDL et le modèle des paramètres distribués, restent unidimensionnels ; le cas où l'élément piézoélectrique ne recouvre pas complètement le substrat ne peut pas être étudié avec ces modèles ; la masse sismique est traitée comme une masse ponctuelle, c'est-à-dire que les effets du moment d'inertie et du décalage du centre de masse sont ignorés, ce qui peut mener à une mauvaise estimation de la réponse électromécanique du système [112]. Nous nous intéressons donc dans les chapitres suivants à l'approche de la modélisation du générateur piézoélectrique par la méthode des éléments finis (EF). Certains travaux basés sur cette méthode sont présentés dans [113]–[117].

## 5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les enjeux et les technologies de la récupération d'énergie. La récupération d'énergie vibratoire sert à alimenter des dispositifs autonomes en particulier dans des environnements difficilement accessibles où le remplacement des batteries n'est pas trivial. Les principaux enjeux de la technologie de récupération d'énergie vibratoire sont les suivants : une fréquence de vibration des sources ambiantes est typiquement faible ( $< 200$  Hz voire  $50$  Hz dans certaines applications) ; une miniaturisation est requise dans certaines applications comme par exemple les dispositifs médicaux implantables ( $< 1$  cm<sup>3</sup>).

Parmi les technologies de récupération d'énergie vibratoire, la technologie basée sur les matériaux piézoélectriques s'avère être la plus prometteuse. Les générateurs piézoélectriques sont performants et peuvent être miniaturisés, contrairement aux générateurs électromagnétiques. Des générateurs piézoélectriques avec des structures variées sont proposés par la communauté. Grâce à sa capacité d'amplification mécanique, la structure de type « poutre » figure comme la meilleure candidate en présence de faibles accélérations.

Les générateurs de type MEMS sont intéressants au niveau de la miniaturisation et de leur compatibilité avec la technologie CMOS mais leur performances sont assez faibles dans la gamme des basses fréquences et même s'ils peuvent atteindre des basses fréquences, leur structure est très fragile due à une taille de masselotte importante. Nous présentons dans ce

document une approche alternative basée sur l'amincissement des matériaux piézoélectriques massifs pour fabriquer des dispositifs de récupération d'énergie qui peuvent éventuellement offrir de meilleures performances en termes de puissance électrique récupérée tout en autorisant un certain degré de miniaturisation du dispositif.

Pour modéliser et concevoir un tel dispositif, des modèles analytiques 1D ont été développés. Ce sont des modèles simples et rapides à exploiter mais ils atteignent leurs limites quand le problème modélisé est plus complexe. De son côté, la modélisation par la méthode des éléments finis permet de résoudre des problèmes difficiles dans de nombreux domaines physiques et également de résoudre des problèmes couplés comme c'est le cas pour les récupérateurs piézoélectriques. Nous nous orientons donc vers cette stratégie de modélisation, d'autant plus que, du point de vue de l'industrie, nous avons besoin d'un outil qui puisse réaliser des conceptions tridimensionnelles (3D) de nos dispositifs. Cela s'avère nécessaire en vue de leur intégration dans un module autonome.