

Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité

par **Claire JEAN-MISTRAL** et **Skandar BASROUR**

Les capteurs embarqués ont gagné en précision, fiabilité, robustesse tout en se miniaturisant mais ils sont toujours limités par la durée de vie de leur système d'alimentation électrique. Une alternative prometteuse est de récupérer l'énergie mécanique ambiante afin d'assurer l'autonomie énergétique d'appareils nomades. Cette démarche possède un fort potentiel d'innovation, de miniaturisation, de respect des enjeux écologiques et s'inscrit dans la thématique des énergies renouvelables.

Claire JEAN-MISTRAL est Docteur en Génie électrique de l'Université Joseph Fourier Grenoble et Post-doctorante au laboratoire des Techniques de l'informatique et de la micro-électronique pour l'architecture des systèmes intégrés (TIMA) – Grenoble.

Skandar BASROUR est Professeur à l'Université Joseph Fourier Grenoble et Responsable du groupe micro et nanosystèmes au laboratoire TIMA.

Ils conçoivent et développent des microsystèmes autonomes et communicants, capables de récupérer l'énergie mécanique ambiante, de la convertir pour alimenter un capteur et de transférer des mesures.

la plus haute densité de puissance ($15\,000\ \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$), suivi par les **flux d'air** et les **vibrations mécaniques** ($300\ \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$), et enfin par les **gradients thermiques** ($40\ \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$) [1]. L'énergie mécanique comme source primaire d'énergie, apparaît comme incontournable dans un certain nombre d'applications qui ne sont peu ou pas accessibles à la lumière.

Ainsi, l'énergie solaire n'est pas appropriée pour rendre autonome un capteur de pression au niveau d'un pneu de voiture, contrairement à l'énergie d'origine mécanique disponible lors du roulage.

Les vibrations mécaniques ambiantes sont présentes en abondance à des fréquences inférieures à la centaine de hertz. Les vibrations à hautes fréquences se trouvent généralement générées par des machines outils [1] [2] [3].

1. Récupération de l'énergie mécanique ambiante

1.1 Contexte

Dans notre environnement, diverses sources d'énergie ambiante sont disponibles et leur conversion en énergie électrique est un défi majeur pour accroître l'autonomie de **systèmes isolés ou abandonnés**. À chaque environnement peut correspondre une ou plusieurs sources d'énergie telles que la lumière, le vent, les gradients thermiques, les vibrations mécaniques. Pour chacune de ces sources, un ou plusieurs principes de conversion permettant de générer de l'électricité existent. Parmi ces sources, le **rayonnement solaire** fournit

Exemples

La cadence d'un homme qui marche avoisine 1 Hz.

Les vibrations au sein de l'habitacle d'une voiture sont au-dessous de 30 Hz. Un moteur électrique triphasé tournant à $15\,000\ \text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$ a une fréquence fondamentale autour de 250 Hz tandis qu'une fraiseuse industrielle voit sa fréquence de résonance autour du kHz.

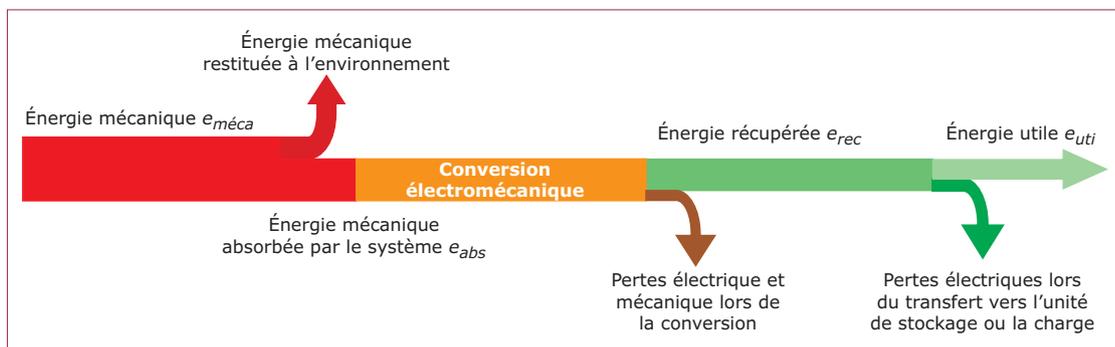


Figure 1 – Énergies mises en jeu lors du processus de récupération d'énergie [8]

Les fréquences associées aux vibrations mécaniques présentes dans notre environnement sont inférieures à 100 Hz avec quelques exemples précis autour du kHz. Rien ne sert alors de développer des systèmes de conversion travaillant en haute ou très haute fréquence (MHz).

La récupération de l'énergie mécanique ambiante est très attrayante pour les microsystèmes car leurs besoins énergétiques sont faibles, de l'ordre d'une centaine de μW à quelques mW, et l'énergie présente dans l'environnement peut alors suffire pour leur autonomie énergétique. Toutefois, certaines applications quotidiennes demandent des niveaux d'énergie plus importants.

Exemple

Recharger son téléphone portable ou son baladeur nécessite environ 1 W.

Les générateurs développés pour de telles applications sont plus volumineux (plusieurs cm^3), et peuvent mettre plusieurs heures pour accumuler l'énergie nécessaire au système [4] [5] [6] [7].

Finalement, récupérer l'énergie mécanique ambiante permet de réduire la taille des éléments de stockage de l'énergie (piles, batteries) qui polluent généralement l'environnement.

La récupération d'énergie mécanique ambiante apparaît pour l'instant bien appropriée pour les microsystèmes à basse consommation.

1.2 Étages de conversion

La figure 1 [8] présente les différents étages de conversion d'un dispositif de récupération d'énergie mécanique [2] :

- $e_{méca}$ est l'énergie mécanique disponible dans l'environnement ;
- e_{abs} est l'énergie mécanique absorbée par la structure ;

- e_{rec} est l'énergie électrique récupérée soit l'énergie électrique produite par la conversion électromécanique ;
- e_{uti} est l'énergie électrique utile et disponible. Cette énergie e_{uti} peut être utilisée directement pour alimenter un système ou stockée dans un élément type pile ou batterie pour une utilisation ultérieure.

Le rendement total d'un tel dispositif est donné par :

$$\eta_{total} = \eta_{abs} \eta_{conv} \eta_{ges}$$

- avec
- η_{abs} coefficient d'absorption mécanique défini par $\eta_{abs} = e_{abs} / e_{méca}$;
 - η_{conv} rendement de conversion électromécanique défini par $\eta_{conv} = e_{rec} / e_{abs}$;
 - η_{ges} rendement de l'étage de gestion électrique défini par $\eta_{ges} = e_{uti} / e_{rec}$.

Dans ce dossier, nous nous intéressons seulement à l'étage de conversion électromécanique.

2. Principe de conversion

2.1 Systèmes résonants

La récupération de l'énergie de vibrations mécaniques est basée sur l'utilisation d'un système inertiel résonant possédant une fréquence propre égale ou proche de celle de l'excitation que subit le système. Usuellement, on différencie trois familles de générateurs [2] :

- les générateurs résonants avec un amortissement proportionnel à la vitesse ;
- les générateurs résonants avec une force d'amortissement ayant une amplitude constante et opposée au déplacement ;
- les générateurs paramétriques fonctionnant hors résonance.

Si la fréquence d'excitation est proche ou supérieure à la fréquence de résonance du système, les

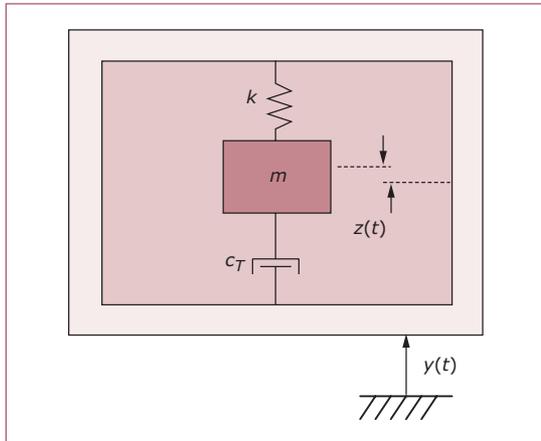


Figure 2 – Schéma et modèle linéaire, développé par Williams et Yates [10]

générateurs à amortissement proportionnel à la vitesse sont les plus performants. Si elle est inférieure, ce sont les générateurs à force d'amortissement constante qui deviennent plus efficaces. Les générateurs paramétriques s'utilisent par exemple si la fréquence de résonance n'est pas connue ou si il est impossible de dimensionner un système résonant à la fréquence d'excitation.

2.1.1 Modèle élémentaire des systèmes inertiels résonants

Un système inertiel, représenté sur la figure 2 [10], est composé d'une masse m mise en mouvement relatif $z(t)$ par rapport à un boîtier lui-même soumis à une vibration extérieure $y(t)$. Cette masse couplée à un ressort de raideur k forme un système linéaire du second ordre ayant un coefficient d'amortissement total c_T . L'amortissement est d'origine mécanique c_m lié aux frottements dans l'air par exemple, et d'origine électrique c_e de telle sorte que l'amortissement total c_T soit la somme de ces deux amortissements [11]. Lorsque le boîtier rigide est soumis à une vibration extérieure sinusoïdale $y(t) = Y \sin(\omega t)$, la masse mobile m effectue un déplacement relatif $z(t)$ par rapport au boîtier. L'équation du mouvement de la masse est donnée par :

$$m\ddot{z}(t) + c_T \dot{z}(t) + kz(t) = -m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

Le déplacement relatif en régime permanent s'écrit alors :

$$z(t) = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\frac{k}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{c_T \omega}{m}\right)^2}} Y \sin(\omega t - \varphi_i) \quad (2)$$

avec φ_i angle de phase donné par $\arctan(c_T \omega / (k - \omega^2 m))$.

2.1.2 Puissance électrique récupérable

La puissance instantanée générée est égale au produit de la vitesse de déplacement de la masse

par rapport au boîtier $\dot{z}(t)$ par la force d'amortissement visqueux $c_T \dot{z}(t)$:

$$p(t) = c_T \dot{z}^2(t) \quad (3)$$

Dans la plupart des cas, le spectre de fréquence de l'application est identifié dès le départ, si bien que le générateur peut être conçu pour résonner à la fréquence des vibrations d'entrée, maximisant ainsi l'énergie extraite de ce transducteur. La pulsation propre ω_n du système est donnée par :

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (4)$$

La puissance totale P_{TOT} moyenne dissipée sous forme mécanique et électrique est décrite par :

$$P_{TOT} = \frac{m \xi_T Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2 \xi_T \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2} \quad (5)$$

avec ξ_T amortissement total réduit défini par $\xi_T = c_T / 2m\omega_n$.

La puissance maximale P_{max} est obtenue quand le système vibre à sa pulsation de résonance et vaut :

$$P_{max} = \frac{mA^2}{4\omega_n \xi_T} \quad (6)$$

avec A amplitude de l'accélération telle que

$$Y = A/\omega^2.$$

La puissance électrique maximale extraite pour ce dispositif est calculable en séparant dans l'amortissement réduit ξ_T les termes d'origine mécanique ξ_m des termes d'origine électrique ξ_e . L'équation (7) donne l'expression de la puissance électrique maximale $P_{e,max}$ que l'on peut extraire d'un système résonant dont la pulsation propre est égale à la pulsation des vibrations d'entrée :

$$P_{e,max} = \frac{m \xi_e A^2}{4\omega_n (\xi_m + \xi_e)^2} \quad (7)$$

D'après cette expression, on constate que la puissance électrique récupérable dépendant de la masse m en mouvement, est proportionnelle au carré de l'accélération d'excitation A et inversement proportionnelle à la pulsation de résonance ω_n .

La puissance augmente en maximisant la masse dans la limite de l'encombrement fixé. Il est à noter que, généralement, plus la pulsation ω augmente et plus l'amplitude A de l'accélération diminue. Au vue de l'équation (7), la puissance électrique récupérable est maximale si l'amortissement réduit électrique ξ_e est égal à l'amortissement réduit mécanique ξ_m , qui doit être le plus faible possible pour minimiser les pertes. Toutefois, un compromis

est à trouver car si on choisit ξ_m très faible, l'amplitude des mouvements $z(t)$ devient alors très importante au risque d'augmenter considérablement l'encombrement du système, et d'introduire des comportements non linéaires. Ces effets peuvent induire des difficultés à maintenir le système à sa fréquence de résonance.

Il semble évident qu'un tel système n'est intéressant que si ce dernier résonne à la pulsation de l'excitation. Si l'on s'éloigne de cette pulsation, la puissance récupérable chute rapidement. Ainsi, si le spectre d'excitation n'est plus une fréquence fixe mais plutôt une large bande de fréquences, il est alors préférable d'augmenter l'amortissement du système pour diminuer sa sélectivité.

2.2 Méthodes de transduction

Il existe essentiellement trois principes de conversion de l'énergie mécanique en électricité pour les systèmes résonants. Ils sont d'origine, soit piézoélectrique, soit électrostatique ou encore électromagnétique.

Les **générateurs piézoélectriques** sont actifs et convertissent directement une contrainte mécanique en charge électrique.

Les **générateurs électromagnétiques** mettent en œuvre l'effet inductif.

Finalement, les **générateurs électrostatiques** utilisent la force électrique générée entre deux armatures chargées d'un condensateur. Plus récemment, des récupérateurs d'énergie combinant deux de ces principes ont permis de réaliser des systèmes hybrides aux performances améliorées.

3. Générateurs piézoélectriques

3.1 Principe de fonctionnement

La piézoélectricité, découverte en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie, est une propriété particulière des corps possédant une anisotropie cristalline. Elle se manifeste par deux effets :

- l'**effet direct** se caractérise par la polarisation du matériau sous l'action d'une contrainte mécanique ;
- l'**effet inverse**, quant à lui, correspond à l'apparition d'une déformation mécanique sous l'effet d'un champ électrique appliqué au matériau.

Le système d'équations (8) récapitule les couplages au sein d'un matériau piézoélectrique [12] [13] :

$$\begin{aligned} S_\lambda &= s_{\lambda\mu}^E T_\mu + d_{i\lambda} E_i \\ D_i &= d_{i\lambda} T_\lambda + \varepsilon_{ik}^T E_k \end{aligned} \quad (8)$$

avec S déformée,
 T contrainte mécanique,

- E champ électrique,
- D déplacement électrique,
- s souplesse,
- d coefficient piézoélectrique,
- ε permittivité électrique du matériau.

λ et μ sont les indices mécaniques contractés (de 1 à 6). i et k , sont les indices électriques correspondant aux trois axes (de 1 à 3). Les exposants E ou T signifient à E ou T constants.

Les matériaux piézoélectriques sont très variés. Ils peuvent être [14] [15] [16] [17] :

- cristallins (quartz...) ;
- céramiques (PZT...) ;
- polymères (PVDF...) ;
- piézocomposites (*Macro Fiber Composite* MFC de Smart-Material Corporation...).

En général, le matériau piézoélectrique est couplé à une structure résonante qui lui impose une déformation ou une vibration. Grâce à l'effet direct, cette déformation est convertie en charge électrique. Plusieurs formes de convertisseurs sont envisageables : membranes [18] [19], poutres encastrées-libres plus ou moins complexes [20] [21].

Le matériau peut être sollicité selon le mode 33 ou le mode 31 selon que la contrainte mécanique est perpendiculaire ou parallèle aux électrodes [12]. Ces dernières sont en général pleines, mais certains dispositifs mettent en œuvre des électrodes interdigitées [23]. Cette solution permet de travailler en mode 33 avec un facteur de couplage plus élevé qu'en mode 31, et d'obtenir ainsi une tension de sortie plus élevée. En effet, le **coefficient de couplage électromécanique** K_{ij} défini par l'équation (9), témoigne de la qualité de la conversion électromécanique :

$$K_{ij}^2 = \frac{\text{énergie électrique}}{\text{énergie mécanique}} \quad (9)$$

En d'autres termes, plus ce coefficient de couplage est grand et plus on récupère de l'énergie électrique. Toutefois, si le choix d'un matériau piézoélectrique est généralement dicté par la valeur de K_{ij} , les pertes d'origine mécanique ou diélectrique au sein du matériau pénalisent la conversion de l'énergie mécanique. Notons par ailleurs que les matériaux cristallins et céramiques qui sont actuellement les plus efficaces en terme de conversion sont aussi les plus fragiles et les plus sensibles aux effets de vieillissement.

Quel que soit le matériau retenu, l'utilisation en température est limitée par la température de Curie au-delà de laquelle les propriétés piézoélectriques disparaissent [12] [13].

3.2 Quelques exemples de structures

Depuis une dizaine d'années, divers générateurs macroscopiques travaillant à des fréquences compatibles avec les fréquences ambiantes ont été développés [1] [14] [15] [16] [19].

PZT : titanate zirconate de plomb
PVDF : fluorure de polyvinylidène

Sur la piézo-électricité :
- *Transformateurs statiques piézo-électriques* [D 3 015] de E. SARRAUTE, D. VASIC et F. COSTA ;
- *Composants piézoélectriques* [E 2 205] de J.P. AUBRY.

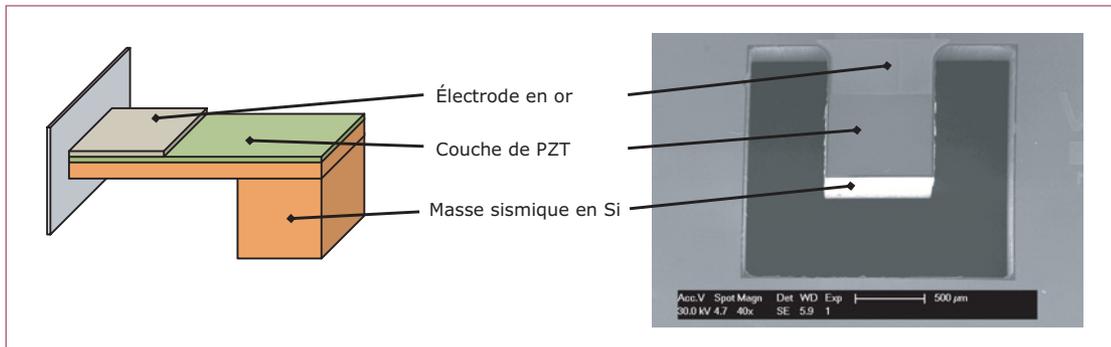


Figure 3 – Schéma et image au microscope électronique à balayage du microconvertisseur piézoélectrique type cantilever de Marzencki [2]

En 2003, S. Roundy a développé un générateur occupant un volume de 1 cm^3 dont la fréquence de résonance est à 120 Hz. Pour une excitation à 120 Hz de $0,25 \text{ g}$ ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$), sur une charge résistive optimale, le dispositif produit $200 \mu\text{W}$ [1] [22].

La miniaturisation de ces générateurs s'accompagne en général d'une augmentation de la fréquence de résonance. Notons toutefois le développement de quelques microgénérateurs qui possèdent une fréquence de résonance compatible avec les fréquences ambiantes [2] [23] [24].

En 2007, M. Marzencki *et al.* ont développé un microgénérateur ($2 \times 2 \times 0,45 \text{ mm}^3$) de type MEMS récupérant $0,265 \mu\text{W}$ à 200 Hz, sous une excitation de $1,5 \text{ g}$ [2] [24] (figure 3). Toutefois, les débattements à de si faibles fréquences, sont importants et induisent un régime non linéaire du microgénérateur. Ainsi, au vu de la faible énergie générée et des non-linéarités, l'auteur a opté pour des dispositifs travaillant à plus hautes fréquences. Pour un même encombrement total mais avec une masse sismique et une longueur de poutre réduites, ces générateurs récupèrent alors quelques μW , à 1,3 kHz pour une accélération de 2 g .

4. Générateurs électrostatiques

4.1 Principe de fonctionnement

Un générateur électrostatique est basé sur la variation de force électrique entre deux armatures d'un condensateur en mouvement relatif l'une par rapport à l'autre. Il existe deux principaux cycles de fonctionnement : à charge constante ou à tension constante.

Par exemple, dans un cycle à charge constante, le condensateur est chargé lorsque sa capacité est maximale puis isolé de sa charge et de la source de

polarisation ; la structure stocke une énergie initiale. Le mouvement mécanique imposé à la structure permet de faire varier la valeur de cette capacité. En effet, lorsque les armatures s'éloignent, la tension aux bornes de cette dernière augmente, vu que la charge est constante ($Q = CV$). Finalement, les charges sont retirées de la structure sous sa capacité minimale. L'énergie électrique ainsi récupérée est plus importante que l'énergie initialement injectée. Ce principe de conversion n'est pas direct comme celui mis en œuvre grâce à la piézoélectricité. L'énergie électrique est amplifiée grâce à l'énergie mécanique [3] [22]. L'équation (10) exprime l'énergie électrique récupérable pour ce type de structure pour les deux cycles particuliers énoncés ci-dessus :

$$E_{V=cte} = \frac{1}{2} V^2 (C_{min} - C_{max}) \quad (10)$$

$$E_{Q=cte} = \frac{1}{2} Q^2 \left(\frac{1}{C_{min}} - \frac{1}{C_{max}} \right)$$

avec C_{min} et C_{max} capacités minimales et maximales de la structure,
 V tension aux bornes de la structure,
 Q charge électrique.

La structure électrostatique est un **condensateur** composé de deux armatures séparées par de l'air, du vide ou un diélectrique. La majeure partie de ces dispositifs électrostatiques est rigide, ont une structure semblable à celle d'un accéléromètre et leur réalisation est tout à fait compatible avec les techniques de microfabrication collective issues de la microélectronique [22] (figure 4).

Les convertisseurs électrostatiques nécessitent une **source extérieure** pour polariser la structure en début de cycle. Cette source est souvent d'une valeur très importante ($> 100 \text{ V}$), ce qui est sans nul conteste un inconvénient majeur. Cette polarisation est nécessaire à chaque début de cycle. Toutefois, on peut envisager un système bouclé : lors du premier cycle, la polarisation est effectuée par une source extérieure puis le système génère de l'électricité dont une partie est stockée ou utilisée directement et l'autre partie sert à effectuer la

MEMS : Micro Electro Mechanical System

Nota : g est l'accélération due à la pesanteur.

Sur les générateurs électrostatiques : Machines électrostatiques
 [D 3 710] de G. FRICK.

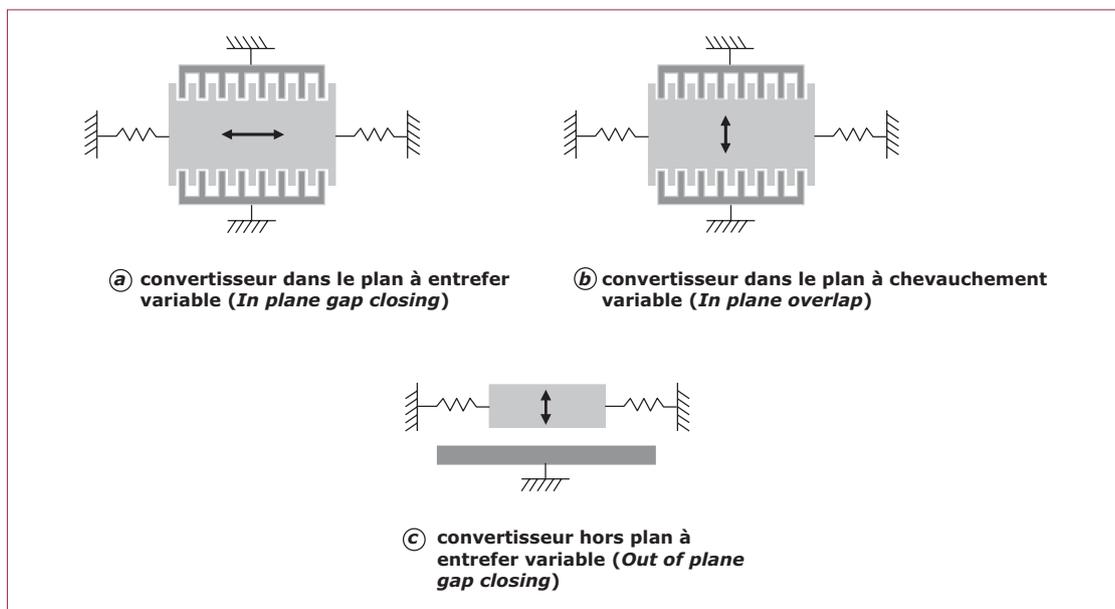


Figure 4 – Structures possibles de convertisseurs électrostatiques [22]

PDMS : polydiméthylsiloxane

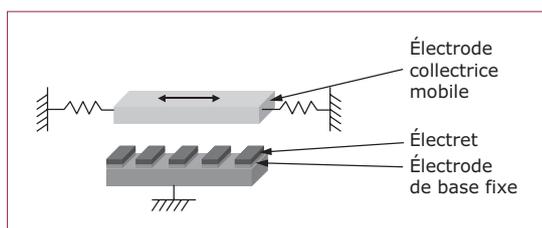


Figure 5 – Convertisseur électrostatique avec électret [30]

polarisation du second cycle, et ainsi de suite [3]. Pour que cette structure ait un rendement positif, un minimum de variation de capacité est nécessaire.

Soulignons que la polarisation de la structure peut aussi être réalisée à l'aide d'un **électret** (figure 5) [30]. Ce type de matériau, au sein duquel des charges sont piégées, assure ainsi une polarisation permanente.

Une autre possibilité consiste à utiliser un **matériau actif** pour réaliser la polarisation, ce matériau pouvant être piézoélectrique par exemple. La structure ainsi réalisée est une structure hybride.

Récemment un démonstrateur de générateur électrostatique **souple à base de polymères diélectriques** a été présenté. Les matériaux mis en œuvre peuvent être des acryliques ou des silicones travaillant à volume constant et qui offrent l'avantage d'être flexibles, adaptables et peu onéreux. Ils développent une meilleure densité d'énergie par rapport à des matériaux piézoélectriques et supportent des champs électriques de claquage plus élevés [8]. Ces structures travaillant en basses fré-

quences, sont donc compatibles avec les fréquences environnantes et sont à ce titre très prometteuses. Depuis peu, la miniaturisation de ce type de générateur est envisageable car des matériaux diélectriques tels que le PDMS sont aussi déposés et intégrés au sein de structures MEMS [26].

4.2 Quelques exemples de structures

Dans la littérature, plusieurs structures macroscopiques sont proposées.

En 2005, **G. Despesse** a développé une structure macroscopique en tungstène de type *in-plane gap closing* avec son électronique de gestion permettant de récupérer 1 mW à 50 Hz, avec un rendement global pour l'application de 60 %. L'amplitude des mouvements est de 120 μm et la tension de sortie élevée autour de 300 V nécessite un conditionnement avant utilisation [3].

Il est beaucoup plus délicat de trouver une structure microfabriquée avec ou sans électret fonctionnant correctement à fréquence ambiante de par la contrainte forte sur la précision d'usinage de la structure [27] [28] [29].

En 2008, **Sakane et al.** ont développé un système complet capable de récupérer 10 μW avec des vibrations de 1 *g* à 20 Hz. Ce prototype a un volume de 20 \times 20 \times 8 mm^3 et utilise un électret de 15 μm d'épaisseur chargé sous 700 V [30].

Concernant l'utilisation de polymères diélectriques, peu de laboratoires travaillent sur des systèmes complets, mais beaucoup sur des points particuliers tels que l'amélioration du matériau ou la modélisation.

Finalement, citons les travaux de C. **Jean-Mistral** [8] qui a développé en 2008 un générateur électrostatique à base de polymères diélectriques. Sa structure

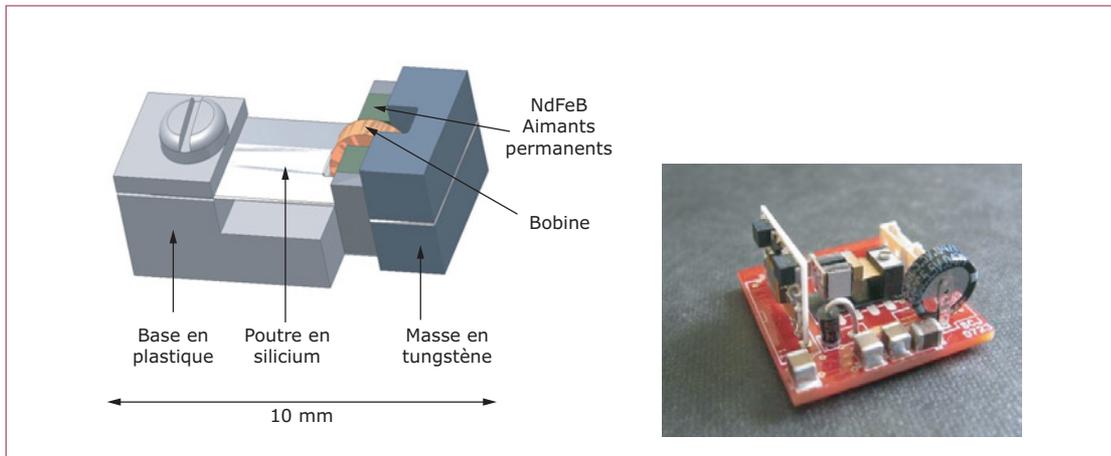


Figure 6 – Générateurs électromagnétiques de Beeby [33]

de $5 \times 3 \times 0,0064 \text{ cm}^3$ est placée derrière le genou et convertit l'énergie mécanique de la marche en électricité. Pour une marche cadencée à 1 Hz, la structure récupère $100 \mu\text{W}$ sous une tension de polarisation de 200 V, et $1,74 \text{ mW}$ sous une tension de polarisation de 1 000 V. Les courants étant très faibles (μA), ce dispositif est sans danger pour l'utilisateur.

5. Générateurs électromagnétiques

5.1 Principe de fonctionnement

Les générateurs électromagnétiques sont quant à eux basés sur l'induction électromagnétique, principe mis en évidence par Faraday. La force électromotrice peut être générée par le mouvement relatif entre une bobine et un aimant créant un champ magnétique fixe, ou par une variation temporelle du champ magnétique.

La valeur de la tension générée est déterminée par :

$$e_m = - \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

avec e_m force électromotrice,
 ϕ champ magnétique,
 t temps.

Les structures les plus simples utilisent un aimant mobile et une bobine fixe, ou inversement. Le coefficient d'amortissement électrique c_e d'un tel système permettant de calculer la puissance récupérable, est donné par :

$$c_e = \frac{(N\ell B)^2}{R_c + R_L + j\omega L} \quad (12)$$

avec N nombre de tours de l'inducteur,
 ℓ longueur de la bobine,

B induction magnétique,
 R_c résistance de charge,
 R_L résistance de la bobine,
 L inductance de la bobine.

Cette équation est une approximation qui n'est théoriquement valable que si la bobine passe d'une zone à champ B maximal à une zone à champ B nul. La résistance de charge R_c permet d'ajuster le coefficient d'amortissement électrique pour extraire le maximum d'énergie ($c_e = c_m$).

5.2 Quelques exemples de structures

Comme pour les autres principes de conversions, de nombreux générateurs macroscopiques ont été développés ces dernières années [31] [32] [33].

En 2007, **S.P. Beeby et al.** ont développé un microgénérateur électromagnétique occupant un volume de $0,15 \text{ cm}^3$ et, capable de récupérer $46 \mu\text{W}$ à 52 Hz pour une accélération de $0,6 g$. Le générateur débite sur une résistance optimale de $4 \text{ k}\Omega$ (figure 6) [33].

Une autre expérience intéressante menée par **J. M. H. Lee** en 2003, a consisté à développer un générateur de la taille d'une pile AA. Ce générateur est capable de produire $830 \mu\text{W}$ pour une amplitude de $150 \mu\text{m}$ à une fréquence de 110 Hz [32].

Depuis 2007, la **société Perpetuum** commercialise entre autre le générateur électromagnétique PMG7 capable de fournir 5 mW avec une excitation de $0,1 g$ à la fréquence de 50 Hz.

Les applications au niveau du corps humain sont variées. On peut citer la réalisation d'un générateur électromagnétique inséré dans un sac à dos [2] ou au niveau d'une genouillère [34].

De nombreux générateurs miniaturisés ou micro-fabriqués ont été développés [35] [36] [37] [38]. Toutefois, leurs performances sont diminuées. Elles sont limitées en particulier :

– par la difficulté de réaliser des microbobines aux performances satisfaisantes ;

- par la nécessité d'utiliser des matériaux exotiques pour les aimants (NeFB, CoPtP...) aux petites dimensions [39] ;
- par les distances faibles à réaliser entre bobines et aimants.

6. Comparaison

Pour comparer entre eux des dispositifs basés sur des principes de conversions différents, une figure de mérite, critère commun à tous les générateurs, peut être définie [2]. Toutefois, cette comparaison ne prend pas en compte la largeur de bande du système mais seulement ses performances à la fréquence d'excitation. Il est aussi possible de comparer l'efficacité de ces générateurs pour un volume donné en exprimant pour chacun le rendement de conversion électromécanique [22]. L'équation (13) donne le coefficient de couplage électromécanique pour la conversion piézoélectrique, électrostatique dans la configuration hors plan et électromagnétique :

$$\begin{aligned} \eta_{\text{piézo-électrique}}^2 &= \frac{d^2 Y_G}{\varepsilon} \\ \eta_{\text{électrostatique}}^2 &= \frac{V_{in}^2 C_{max}^2}{V_{in}^2 C_{max}^2 + m\omega^2 z^2 C(z)} \\ \eta_{\text{électromagnétique}}^2 &= \frac{(B\ell)^2}{k_{sp} L} \end{aligned} \quad (13)$$

- avec d coefficient piézoélectrique,
 Y_G module d'Young,
 ε permittivité électrique,

- V_{in} tension d'entrée,
 C_{max} capacité maximale,
 z déplacement de l'électrode,
 B champ magnétique,
 ℓ longueur de la bobine,
 k_{sp} constante de raideur du ressort,
 L inductance de la bobine.

Ainsi, selon les auteurs des références [2] et [22], les densités d'énergie électrique récupérable sont de $335 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ par piézoélectricité, de $44 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ par principe électrostatique et de $400 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ par électromagnétisme, sur des systèmes macroscopiques. Ces valeurs sont des maxima théoriques que les prototypes sont encore loin d'égaliser. Selon Mitcheson [40], les générateurs développés ces dernières années sont au maximum à 20 % de leurs performances optimales pour des volumes centimétriques et même pas à 1 % pour des volumes millimétriques. Il est à souligner que la fréquence de fonctionnement des dispositifs devient de plus en plus compatible avec les fréquences ambiantes. Le tableau 1 récapitule les avantages et les inconvénients des trois principes de conversion.

La **piézoélectricité** offre une bonne densité d'énergie récupérable et la possibilité d'intégrer les dispositifs. Il faut toutefois souligner que les performances des matériaux en couches minces sont légèrement en deçà de celles des matériaux massifs, les performances du système en seront donc amoindries. Notons aussi que les matériaux piézoélectriques sont fragiles, vieillissent et possèdent une plage d'utilisation en température et en contraintes. Toutefois, ce principe reste le plus facile à mettre en œuvre grâce à des structures

Tableau 1 – Comparaison des trois principes de conversion

Critères	Électrostatique	Électromagnétique	piézoélectrique
Densité d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> Faible à l'échelle macroscopique Augmente avec la diminution du volume 	<ul style="list-style-type: none"> Élevée à l'échelle macroscopique Diminue avec le volume 	<ul style="list-style-type: none"> Élevée à l'échelle macroscopique Diminue à l'échelle microscopique à cause des propriétés des matériaux
Niveau de développement	<ul style="list-style-type: none"> Avancé à l'échelle macroscopique et microscopique 	<ul style="list-style-type: none"> Avancé à l'échelle macroscopique, limité à l'échelle microscopique 	<ul style="list-style-type: none"> Moyen à l'échelle macroscopique et microscopique
Miniaturisation	<ul style="list-style-type: none"> Intégration des matériaux assez facile Problème au niveau de la réalisation de la structure 	<ul style="list-style-type: none"> Difficile au niveau de l'intégration des matériaux 	<ul style="list-style-type: none"> Performances légèrement moindres des matériaux déposés en couches minces
Problèmes spécifiques	<ul style="list-style-type: none"> Nécessité d'une source de polarisation Tension élevée, difficulté pour le circuit de gestion électrique Guidage mécanique 	<ul style="list-style-type: none"> Tension de sortie très faible, problème pour l'électronique de gestion Intégration difficile 	<ul style="list-style-type: none"> Matériaux en couches minces un peu moins performants que les matériaux massifs Rendement limité dû au coefficient de couplage du matériau

simples et à un éventail de matériaux disponibles. Néanmoins, les performances des générateurs sont pour l'instant, limités par le coefficient de couplage du matériau ainsi que par les pertes structurales ou diélectriques. Leur rendement maximal est de l'ordre de 10 %.

Les **dispositifs électrostatiques** macroscopiques récupèrent en théorie le moins d'énergie mais sont aussi les plus facilement intégrables et compatibles avec les technologies CMOS. Ces structures sont bien adaptées à la réduction des dimensions : en effet, la diminution de l'entrefer augmente la valeur de la capacité. Ainsi, si à l'échelle macroscopique les structures électrostatiques ne sont pas intéressantes, elles le deviennent beaucoup plus à l'échelle microscopique. Pour maximiser la puissance récupérable, l'entrefer minimal de la structure doit être faible ($1\ \mu\text{m}$) et le débattement important ($100\ \mu\text{m}$), ce qui entraîne des problèmes de guidage, de tenue mécanique, de parallélisme. Il est à souligner que la réalisation de structures interdigitées (figure 4a et b) de faibles dimensions pose de nombreux problèmes de réalisation au niveau de ces doigts (contrôle difficile de leur forme, tolérance). Enfin, un de leur handicap majeur est la nécessité d'une tension de polarisation souvent très élevée, supérieure à 100 V. La solution est alors l'utilisation de structures hybrides de type électrostatique – électret par exemple.

À l'inverse, les **dispositifs électromagnétiques** récupèrent le plus d'énergie à l'échelle macroscopique. Il est à noter que la densité volumique d'énergie récupérable pour un système électromagnétique diminue avec le volume puisqu'il est possible de créer un champ magnétique microscopique du même ordre de grandeur qu'en taille macroscopique (typiquement 1 T). De manière générale, les systèmes électromagnétiques sont difficiles à miniaturiser. En effet, pour des raisons technologiques, le nombre de spires réalisables est limité. De plus, aux fréquences inférieures à 100 Hz, une bobine a un comportement plus résistif que selfique, ce qui engendre de fortes pertes et limite la valeur de l'amortissement électrique. Le coefficient de couplage mécanique/électrique est alors pénalisé. Finalement, la réalisation d'aimants intégrés ou de très faibles dimensions à base de matériaux exotiques reste une étape délicate [39].

Au vu de cette comparaison, chacune des technologies possède des avantages et des inconvénients et sera en conséquence utilisée pour traiter un problème particulier [41] [42] [43]. Toutefois, des zones de fonctionnement peuvent être mises en place à partir de l'étude des coefficients d'amortissement [40]. De cette étude, il ressort que les générateurs piézoélectriques sont de bons candidats pour des applications basses fréquences type marche humaine par exemple, et que les générateurs électromagnétiques sont plus avantageux à hautes fréquences.

En revanche, quelques règles s'appliquent aux trois technologies. Si l'on souhaite récupérer les vibrations ambiantes pour alimenter un système avec une puissance moyenne de $100\ \mu\text{W}$, le générateur aura alors un volume de l'ordre du cm^3 . Si l'on ne souhaite récupérer qu'une dizaine de microwatt, le générateur peut alors avoir une taille millimé-

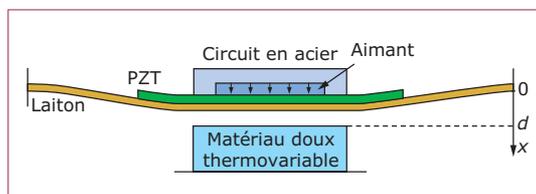


Figure 7 – Structure de convertisseurs piézoélectrique – électromagnétique [47]

CMOS : Complementary Metal Oxide Semi-conductor

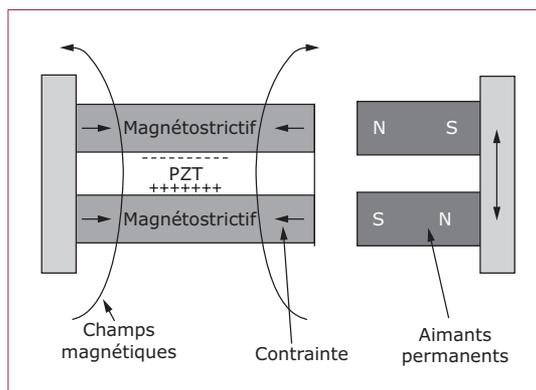


Figure 8 – Structure de convertisseur piézoélectrique – magnétostrictif [48]

trique et fonctionner aux fréquences ambiantes. Il faut noter que plus on réduit la taille du système et plus la fréquence propre de ce dernier augmente. Un moyen de diminuer cette fréquence propre est alors d'augmenter la masse sismique du système ou de faire fonctionner ce dernier en mode non linéaire [2].

Les systèmes résonants sont bien adaptés si la fréquence d'excitation est connue et quasi fixe, ce qui est loin d'être le cas dans beaucoup d'applications pratiques. Les solutions sont alors des systèmes large bande ou des systèmes adaptatifs. Les **systèmes large bande**, de par leur coefficient d'amortissement élevé, récupèrent sur une large bande de fréquences une énergie moindre [3] [44]. À l'inverse, le but d'un **système adaptatif** est de faire correspondre la fréquence d'excitation à la fréquence de résonance du système [45]. Cette dernière approche a un coût énergétique assez élevé, ce qui la disqualifie pour les microgénérateurs qui récoltent très peu d'énergie.

Finalement, pour améliorer les performances du générateur **deux principes de transduction peuvent être combinés** [46] [47] (figure 7). Les deux effets participent à la conversion électromécanique. Cette approche est distincte de l'ajout d'un matériau piézoélectrique à une structure électrostatique qui permet alors de réaliser la première charge de la structure électrostatique. Toujours dans l'optique d'optimiser la transduction, des couplages de matériaux ont aussi été envisagés : piézoélectriques et piézomagnétiques ou piézoélectrique et magnétostrictif [48] (figure 8).

7. Conclusions et perspectives

Étant donné le nombre croissant d'applications autonomes et la volonté de moins polluer en supprimant les piles ou batterie d'alimentation, les générateurs permettant la récupération de l'énergie des vibrations mécaniques sont des candidats très prometteurs. A l'heure actuelle, les microgénérateurs des trois familles récupèrent des énergies de faibles valeurs (< 1 mW) suffisantes pour des microsystèmes tel un capteur de température, mais insuffisantes pour des besoins humains quotidiens comme recharger son téléphone portable. Grâce à l'amélioration incessante des matériaux, des structures de conversion, et à la baisse de la consommation de nombreux appareils électriques, il est fort

probable que dans quelques années des générateurs rechargeront nos appareils électroniques portables. La tendance générale n'est plus à la miniaturisation à outrance de certaines parties d'un système, mais au développement de systèmes complets possédant une autonomie accrue. De plus en plus de systèmes large bande ou multisources voient le jour permettant ainsi de s'adapter à toutes les situations et d'assurer pleinement l'autonomie du système. Au-delà des applications nomades, la problématique de la récupération de l'énergie mécanique se retrouve aussi dans des dispositifs implantables (battements du cœur ou prothèse du genou [25]) ainsi que dans des fermes énergétiques devant produire de fortes puissances de l'ordre du MWh à partir de la houle [6] [7].