

# Microstructures électrostatiques de récupération d'énergie vibratoire pour les microsystèmes

par **Sébastien BOISSEAU**

*Doctorant, CEA-LETI (Grenoble)*

**Ghislain DESPESE**

*Docteur-Ingénieur de recherche, CEA-LETI (Grenoble)*

**Jean-Jacques CHAILLOUT**

*Docteur-Ingénieur de recherche, CEA-LETI (Grenoble)*

et **Docteur Alain SYLVESTRE**

*Maître de conférences,*

*Université Joseph Fourier et laboratoire de Génie électrique de Grenoble (G2ELab)*

**Résumé :** Les MEMS (microsystèmes électromécaniques) sont présents dans de nombreux domaines tels que le transport, la défense ou les télécommunications... et permettent, sur de petites surfaces, de réaliser des fonctions de capteurs et d'actionneurs. Pour ce faire, le MEMS a besoin d'une source d'énergie. Jusqu'à présent, cette fonction est assurée par des batteries dont le principal défaut est la durée de vie limitée. Une solution consiste donc à récupérer l'énergie dans l'environnement immédiat du microsystème. Nous nous intéressons ici à la récupération de l'énergie vibratoire par des systèmes électrostatiques, et en présentons les principes de conversion, ainsi qu'un état de l'art.

**Abstract :** MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) are present in many fields such as transportation, defense and telecommunications... and can, with small dimensions, perform functions of sensors and actuators. To do so, MEMS require a source of energy. So far, this function is provided by batteries whose main fault is the limited lifetime. One solution is to harvest energy in the immediate vicinity of the microsystem. Here we focus on the harvesting of vibrational energy by electrostatic systems, and present the principles of conversion and a state of the art.

**Mots-clés :** MEMS, récupération d'énergie, systèmes autonomes, électrets, systèmes capacitifs, systèmes électrostatiques, vibrations, conversion d'énergie, smart dusts, décharge Corona

**Keywords :** energy harvesting, autonomous systems, electrets, capacitive systems, MEMS, electrostatic systems, vibrations, converters, smart dusts, Corona discharge

## Points clés

**Domaine :** énergie

**Degré de diffusion de la technologie :** Émergence

**Technologies impliquées :** électrets, fabrication microsystèmes, électronique

**Domaines d'application :** systèmes autonomes, capteurs sans fils, récupération d'énergie

**Principaux acteurs français :**

*Centres de compétence :* CEA Grenoble, ESIEE

**Autres acteurs dans le monde :**

IMEC, Université de Tokyo, Caltech, Imperial College London, Omron, Sanyo

## 1. Récupération d'énergie mécanique. Structures électrostatiques

### 1.1 Objectifs de la récupération d'énergie pour les microsystèmes

Les MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) sont des microsystèmes issus de l'industrie de la micro-électronique et composés d'éléments mécaniques et électroniques permettant de réaliser des fonctions de capteurs (pression, accélération, masse...) ou d'actuateurs (moteurs...). Ils sont d'ores et déjà utilisés dans de nombreux domaines tels que les télécommunications, la médecine, l'automobile, l'aéronautique ou encore la biologie.

Grâce aux microsystèmes et à la réduction des dimensions des fonctions élémentaires, il est aujourd'hui possible d'imaginer des systèmes complets, intelligents, capables de récupérer une information (accélération, pression...), de la traiter et de la transmettre. Ces microsystèmes, communément appelés **smart dusts** ou « poussières intelligentes », peuvent alors devenir les briques élémentaires de réseaux de capteurs sans fil [1].

Pour qu'un système électronique puisse fonctionner, il est nécessaire de l'alimenter en électricité, d'où la nécessité de disposer d'une source d'énergie. Pour des raisons de simplicité et de coûts, dans des environnements difficiles d'accès, l'idéal serait que ces sources soient capables de fonctionner pendant des années sans intervention humaine. La récupération d'énergie permet de résoudre ce problème en puisant l'énergie utile à l'application directement dans l'environnement (soleil, vent, vibrations...).

Pour fixer les ordres de grandeurs, le graphique de la figure 1 [2] donne une estimation des puissances nécessaires pour faire fonctionner des systèmes de la vie courante.

À l'heure actuelle, les systèmes de récupération d'énergie visent principalement les applications dont les besoins en puissances sont inférieurs à 100  $\mu\text{W}$ , et cela, essentiellement pour des raisons de dimensions. En effet, pour des systèmes intégrés ( $\sim 1 \text{ cm}^3$ ), la puissance générée peut atteindre de l'ordre de quelques dizaines de microwatts comme le montre

le graphique de la figure 2 pour la récupération des vibrations et pour le photovoltaïque.

Il est également à noter que, pour des dimensions équivalentes, une pile est capable de fournir une puissance comparable pendant 5 ans. Les systèmes de récupération d'énergie deviennent donc intéressants pour des fonctionnements sur de longues périodes (typiquement supérieures à 5 ans).

### 1.2 Récupération d'énergie vibratoire

De nombreuses formes d'énergie sont disponibles dans notre environnement et sont potentiellement récupérables pour alimenter un microsysteme : des différences de températures (entre la peau et l'air, de part et d'autre d'une vitre...), des vibrations (machines industrielles, bâtiments, ponts, voitures...), des déformations mécaniques dues à des pressions ou à des forces (talons des chaussures...), de la lumière, du bruit, des flux d'air ou d'eau, des bactéries...

Actuellement, une des technologies en plein essor est celle de la récupération d'énergie mécanique issue des vibrations. Cette énergie peut être récupérée par des systèmes piézoélectriques, électromagnétiques ou électrostatiques.

**Nota :** pour plus d'informations, se référer au dossier [RE 135] et à la bibliographie [4].

### 1.3 Intérêt des structures électrostatiques

Les systèmes électrostatiques font partie des systèmes de récupération d'énergie mécanique vibratoire et sont basés sur l'utilisation d'une structure de type condensateur variable, composée de deux armatures métalliques espacées d'un gap d'air (ou d'un diélectrique (isolant) plus généralement) permettant de convertir l'énergie mécanique issue des vibrations, en énergie électrique. Ces structures sont particulièrement bien adaptées pour récupérer des vibrations basses fréquences et/ou réparties sur une large bande de fréquences car elles permettent d'atteindre, en petites dimensions, des couplages électromécaniques plus élevés que les solutions électromagnétiques ou piézoélectriques. Elles sont également plus aptes à l'intégration, tirant parti de la réduction des échelles.



Figure 1 – Besoins en énergie de dispositifs de la vie courante [2]

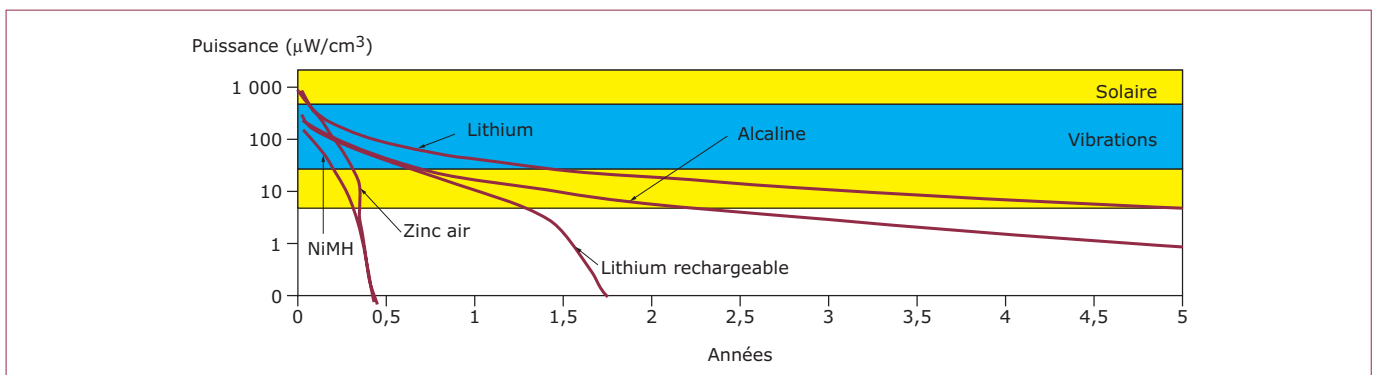


Figure 2 – Puissance disponible par type de source en fonction du temps [3]

Tableau 1 – Sources vibratoires ambiantes

Source de vibrations	Accélération (m/s <sup>2</sup> )	Fréquence (Hz)
Socle d'une machine trois axes	10	70
Robot de cuisine	6,4	121
Sèche-linge	3,5	121
Encadrement de porte après la fermeture de la porte	3	125
Petit four micro-ondes	2,25	121
Ventilations dans un bureau	0,2 à 1,5	60
Parquet avec des personnes qui marchent dessus	1,3	385
Machine à pain	1,03	121
Fenêtre donnant sur l'extérieur à côté d'une rue bruyante	0,7	100
Ordinateur portable en train de lire un CD	0,6	75
Machine à laver	0,5	109
1 <sup>er</sup> étage d'un bâtiment abritant des bureaux	0,2	100
Réfrigérateur	0,1	240

## 2. Principe de la récupération d'énergie mécanique par systèmes électrostatiques

### 2.1 Prérequis : phénomènes vibratoires et systèmes résonants

De nombreuses sources de vibrations sont présentes dans notre environnement de tous les jours. Le tableau 1 en donne quelques exemples [3].

Comme nous pouvons le constater, les fréquences des vibrations sont généralement basses (< 150 Hz) et les accélérations faibles (< 1 g = 9,81 m · s<sup>-2</sup>).

### 2.2 Modélisation des structures résonantes – Application à la récupération d'énergie

Toutes les structures résonantes de récupération d'énergie vibratoire peuvent être modélisées de la façon suivante (figure 3) : une masse mobile  $m$  maintenue dans un cadre par un ressort  $k$  et amortie par des forces électrostatiques et des forces de frottements ( $f_{\text{élec}}$  et  $f_{\text{méca}}$ ). Les vibrations du milieu ambiant  $y(t)$  appliquées au cadre induisent un déplacement relatif  $z(t)$  de la masse mobile  $m$  par rapport au cadre. Une partie de l'énergie cinétique de la masse mobile est perdue du fait de la force d'amortissement mécanique  $f_{\text{méca}}$ , tandis que l'autre partie est convertie en électricité, ce qui est modélisé par une force électrostatique  $f_{\text{élec}}$  de freinage.

D'après le principe fondamental de la dynamique (en négligeant la force de pesanteur) :

$$m\ddot{z} + kz + f_{\text{élec}} + f_{\text{méca}} = -m\ddot{y} \quad (1)$$

Cette **structure de type masse-ressort** permet de tirer parti d'un phénomène de résonance permettant d'amplifier l'amplitude des vibrations du milieu ambiant perçues par la masse mobile.

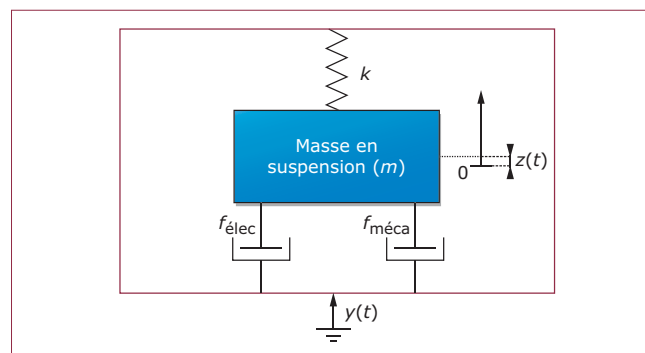


Figure 3 – Modélisation des structures résonantes

La partie mécanique étant décrite, nous pouvons à présent nous intéresser au principe de la conversion.

### 2.3 Principe de la conversion

Physiquement, les systèmes de récupération d'énergie électrostatiques sont des capacités variables dont l'une des armatures se déplace par rapport à l'autre grâce aux vibrations du milieu ambiant, permettant une conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

La difficulté des systèmes électrostatiques réside dans le fait que la conversion n'est pas directe (contrairement aux systèmes piézoélectriques ou électromagnétiques). En effet, pour produire de l'énergie à l'aide d'une structure électrostatique, il ne suffit pas d'avoir une variation mécanique de capacité, il faut aussi lui appliquer des cycles de charge et de décharge électrique synchronisés sur la variation de capacité pour en retirer de l'énergie électrique. Il faut donc un circuit

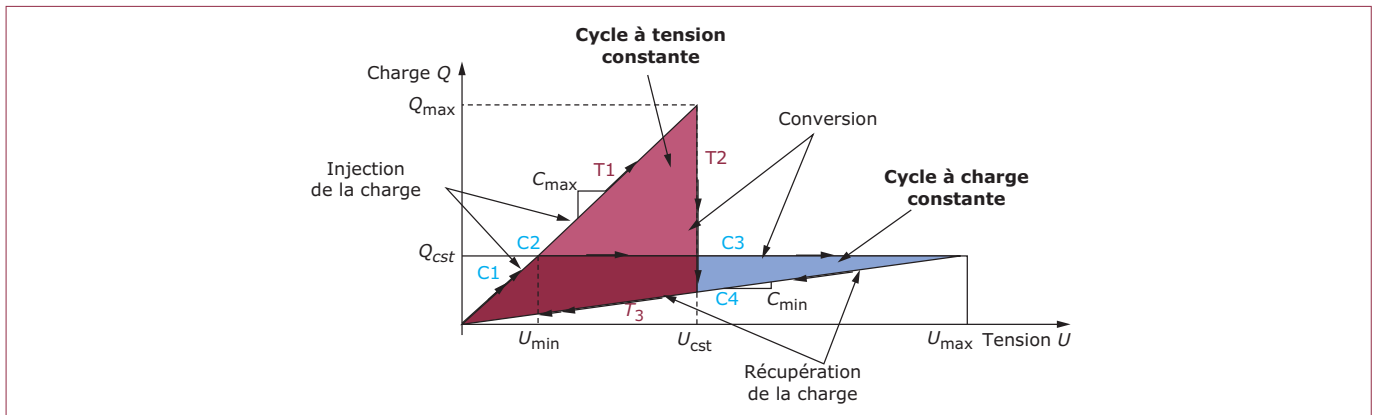


Figure 4 – Cycles de conversion

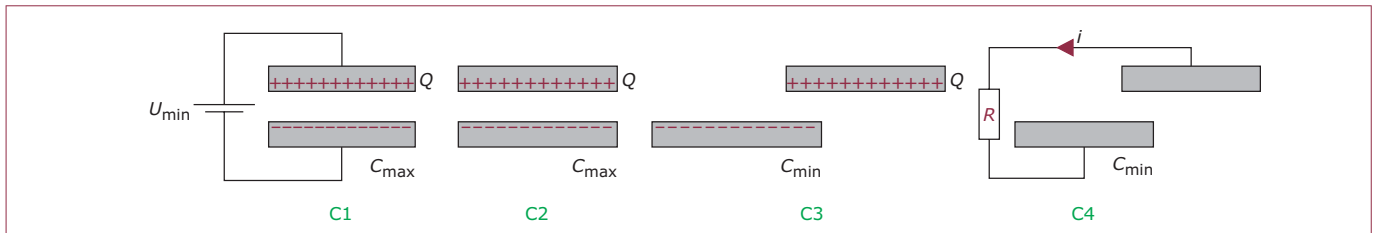


Figure 5 – Cycle à charge constante

de commande électronique plus complexe que dans le cas des autres systèmes de conversion.

Il existe de nombreux cycles électriques de pilotage permettant d'exploiter les structures de conversion électrostatiques, mais les plus simples sont les cycles à « tension constante » et à « charge constante » (figure 4).

Bien que les cycles soient différents, les étapes sont les mêmes :

- (i) une charge est injectée dans la capacité lorsque sa valeur est maximale ;
- (ii) de par la présence de vibrations, la capacité de la structure change et diminue jusqu'à atteindre sa valeur minimale ;
- (iii) l'énergie stockée est récupérée lors de la décharge de la capacité ;
- (iv) la capacité retourne vers sa valeur maximale.

Au niveau mécanique, cela revient à appliquer une force électrostatique qui s'oppose à l'éloignement des électrodes et ainsi à absorber de l'énergie mécanique qui est alors transformée en une augmentation d'énergie potentielle.

### 2.3.1 Cycle à charge constante

Il est donné sur les figures 4 et 5.

Le cycle commence lorsque la valeur de la capacité est maximale ( $C_{max}$ ). La structure est chargée jusqu'à une tension de polarisation  $U_{min}$ . Une charge électrique est donc stockée dans la capacité  $Q_{cst} = U_{min} C_{max}$  V (C1). Cette charge s'effectue en un temps court devant le mouvement mécanique.

Le système électrique est alors laissé en circuit ouvert (C2), la charge électrique stockée dans la capacité est donc constante.

Grâce aux vibrations, l'électrode supérieure se déplace par rapport à l'électrode inférieure. La charge est constante durant cette étape et la capacité diminue pour atteindre une valeur  $C_{min}$  (C3), ce qui entraîne une augmentation de la tension aux bornes de la capacité  $U_{max} = Q_{cst}/C_{min}$ .

Les charges électriques sont alors retirées de la structure (C4).

L'énergie récupérée correspond à l'aire du cycle à charge constante sur la figure 4 :

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

### 2.3.2 Cycle à tension constante

Il est donné sur les figures 4 et 6.

Le cycle commence également lorsque la valeur de la capacité est maximale ( $C_{max}$ ). Une charge électrique est injectée dans la structure via une électronique de gestion à partir d'un élément de stockage, par exemple une batterie (T1).

Les vibrations entraînent un déplacement de l'électrode supérieure par rapport à l'électrode inférieure et une diminution de la capacité. Cette diminution de capacité se fait tout en maintenant la tension de polarisation : la charge diminue  $Q = CU$ , d'où l'apparition d'une circulation de courant en provenance de la capacité et qui recharge la batterie (T2).

Ensuite, lorsque la capacité atteint sa valeur minimale, la charge encore présente dans la capacité est totalement transférée vers la batterie (T3) en un temps bref au regard du mouvement mécanique.

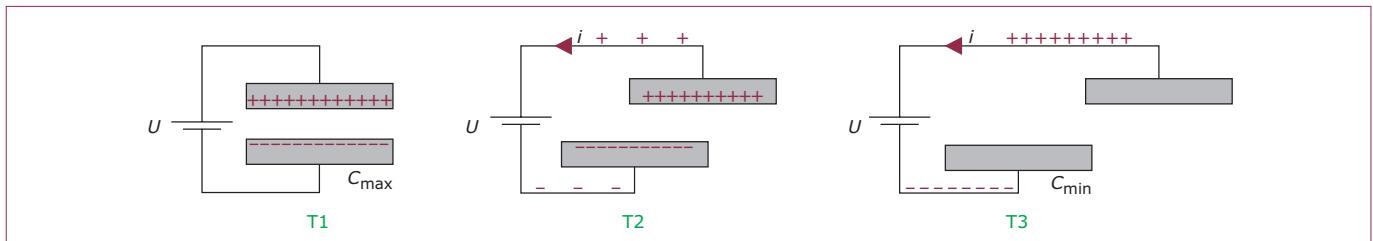


Figure 6 – Cycle à tension constante

L'énergie récupérée correspond à l'aire du cycle à tension constante sur la figure 4 :

$$E_{U=cst} = \frac{1}{2} U^2 (C_{max} - C_{min}) \quad (3)$$

Le défaut majeur des structures électrostatiques présentées ci-dessus est la nécessité de disposer d'une **source d'énergie initiale** (quelques  $\mu\text{J}$ ) permettant de polariser la capacité en début de cycle. Néanmoins, ce défaut ne pose pas de problème pour les applications où l'objectif n'est pas de remplacer la pile mais de prolonger sa durée de vie. De plus, une fois le fonctionnement amorcé, le système est capable de fonctionner sur lui-même, l'énergie récupérée durant un cycle permettant de réaliser la polarisation du cycle suivant [5]. Cette **première polarisation** peut être réalisée par une batterie ou par un piézoélectrique judicieusement placé dans la structure (brevet FR2896635, cf. [Doc. RE 135]) [6]. Le problème se pose vraiment si, à un moment donné, le système n'a plus du tout d'énergie. Une autre solution consiste à utiliser des électrets.

## 2.4 Utilisation des électrets

### 2.4.1 Électrets

#### 2.4.1.1 Qu'est-ce qu'un électret ?

Les électrets sont des matériaux diélectriques (isolants) présentant la propriété d'être dans un état de polarisation électrique quasiment permanent. Le terme d'électret a été choisi par Heaviside en 1892 du fait de la ressemblance de ces matériaux avec les aimants (magnets).

L'électret peut être considéré comme l'analogie de l'aimant dans le domaine électrostatique.

#### 2.4.1.2 Principe de fabrication

Il existe trois catégories d'électrets dont les caractéristiques dépendent de la technique de polarisation ou d'implantation des charges, mais généralement, les électrets utilisés dans les systèmes de récupération d'énergie sont des **électrets à excès de charges** (figure 7).

**Nota :** pour les autres catégories d'électrets, se référer au dossier [E 1 893] *Électrets*.

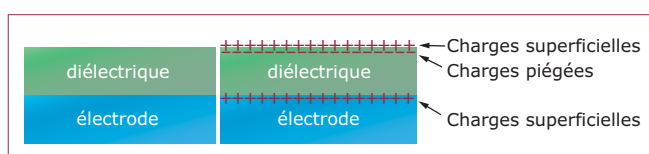


Figure 7 – Électrets à excès de charges

Une des possibilités permettant de polariser le matériau est donc de créer un excès de charge, soit par décharge Corona, soit par implantation électronique ou ionique [7]. D'autres techniques moins standard existent également telles que le chargement par contact humide [7]. Les charges ainsi implantées peuvent être piégées à la surface du matériau, dans son volume ou encore au niveau des interfaces (notamment dans le cas de la structure  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ ) [8] [9].

#### ■ Décharge Corona

La décharge Corona est actuellement la méthode la plus utilisée dans l'industrie du fait de sa simplicité de mise en œuvre pour fabriquer des électrets. Techniquement, il suffit d'un générateur haute tension pour réaliser le dispositif de chargement. En effet, l'effet Corona est une décharge électrique qui apparaît dans l'air (ou plus généralement dans un gaz) lorsque le champ électrique dépasse une certaine valeur mais avec des conditions insuffisantes pour permettre la création d'un arc électrique [10]. Il y a alors ionisation du milieu entourant le conducteur électrique et création d'un plasma. Les ions sont alors accélérés, *via* un champ électrique, vers le diélectrique à charger.

Afin de créer une décharge Corona, on utilise généralement une pointe et une plaque, le but étant de créer des effets de pointe pour augmenter localement le champ électrique (figure 8). Un échantillon de diélectrique est placé sous la pointe. Sa face arrière est recouverte d'une électrode et placée à la masse et sa face avant est laissée libre. Les ions créés par la décharge Corona sont projetés sur la surface de l'échantillon du fait de la différence de potentiel entre la pointe et l'électrode. Leurs charges sont transférées à la surface du matériau et peuvent migrer dans le volume de l'échantillon par la suite.

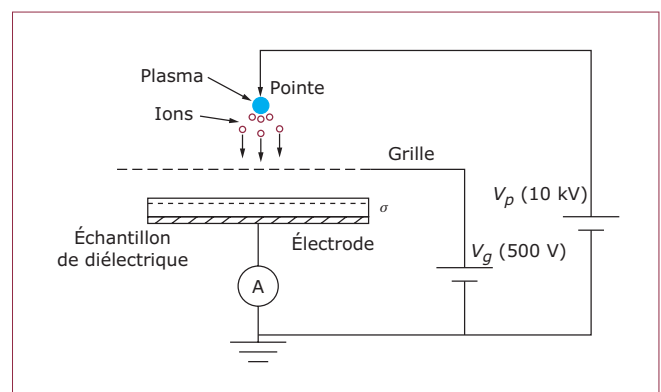


Figure 8 – Dispositif de décharge Corona

**Tableau 2 – Diélectriques permettant d’obtenir des électrets stables**

Matériau	Référence bibliographique	Stabilité	Tension	Épaisseur	Compatibilité microsystème
SiO <sub>2</sub>	[11]	> 350 jours	- 353 V	1 µm	++
SiO <sub>2</sub> /Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	[13]	> 1 000 jours	- 100 V	300 nm/100 nm	++
	[9]	120 ans	250 V	500 nm/100 nm	++
Téflon® AF	[14]	- 3 % en 6 semaines	- 85 V	1,6 µm	+
CYTOP CTL-M	[15]	> 4 000 heures	- 550 V	15 µm	+
Parylène HT	[16]	moyenne	- 650 V	7,32 µm	+
PFCB	[17]	bonne	- 300 V	5 → 15 µm	+
TOPAS	[18]	> 400 ans	500 V	24 µm	+
PTFE speedfilm	[19]	bonne	- 180 V	2 µm	+

Une grille peut être ajoutée afin de contrôler le potentiel de surface et d’homogénéiser la charge implantée dans le diélectrique (principe Corona triode [10]). En effet, le potentiel de surface de l’échantillon est une image des charges présentes dans le matériau, puisqu’en première approximation :

$$V_s = \frac{\sigma d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (4)$$

avec  $V_s$  potentiel de surface de l’électret,  
 $\sigma$  densité surfacique de charge de l’électret,  
 $\epsilon_r$  permittivité relative de l’électret,  
 $d$  épaisseur de l’électret,  
 $\epsilon_0$  permittivité diélectrique du vide.

Cette formule n’est valable que si les charges sont piégées à la surface du matériau.

Au départ, il n’y a pas de charge dans le matériau et le potentiel de surface vaut 0. Au fur et à mesure, grâce à la décharge Corona, des charges sont implantées dans le matériau et le potentiel de surface augmente. Dès que le potentiel de surface de l’échantillon atteint le potentiel de la grille, il n’y a plus de différence de potentiel entre la surface de l’échantillon et la grille, et les charges ne passent plus : le potentiel de surface de l’échantillon prend donc le potentiel de la grille.

**Nota :** pour plus d’informations, se référer à la bibliographie [10].

### ■ Implantation électronique ou ionique

Une autre possibilité consiste à charger le diélectrique à l’aide d’un canon accélérateur à ions ou à électrons. Pour cela, il faut utiliser un canon accélérateur (à ions ou à électrons). Les électrons (ou ions) viennent se placer à une certaine profondeur de la surface en fonction de leur énergie cinétique.

#### 2.4.1.3 Matériaux utilisés

De nombreux diélectriques ont été utilisés pour fabriquer des électrets : les polymères, les céramiques... Les densités surfaciques de charges maximales qui ont été obtenues jusqu’à ce jour sont d’environ 10 mC/m<sup>2</sup> [11] avec des durées de vie estimées à plusieurs centaines d’années dans certains cas [8] [12]. Il n’existe pas de théorie permettant de déterminer la durée de vie des électrets et il n’est toujours pas possible d’expliquer pourquoi certains matériaux conservent leur charge (certains plus de 100 ans selon les publications [8]) et d’autres non, même si des paramètres comme les per-

tes diélectriques ou le caractère hydrophobe du matériau jouent un rôle important.

Le *Téflon* semble tout particulièrement adapté pour créer des électrets stables, tout comme l’oxyde de silicium.

Le tableau 2 présente une liste de matériaux possédant de bonnes propriétés de conservation de charges. Il n’est évidemment pas exhaustif vu le nombre de publications sur le sujet. Nous ne présentons également que les matériaux compatibles avec la technologie silicium dans le but de pouvoir réaliser des structures MEMS en salle blanche.

Il est à noter que des matériaux simples tels que le SiO<sub>2</sub> et la structure SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> sont d’excellents électrets. Cela permet d’envisager des structures utilisant des électrets à bas coûts.

### 2.4.2 Principe de la conversion

Le but de ce paragraphe est de déterminer quels sont les principes en jeu dans la conversion électrostatique à électret d’énergie mécanique et de les mettre en équations.

#### 2.4.2.1 Principe

L’électret sert de source de polarisation permanente dans les structures de conversion électrostatique, il évite ainsi la phase de polarisation électrique dans le cycle classique de fonctionnement. Le système peut alors démarrer sans énergie initiale. Si en électromagnétique le déplacement d’un aimant par rapport à une bobine induit dans cette bobine un courant lorsqu’elle est connectée à une charge électrique, le déplacement d’un électret par rapport à des électrodes induit sur ces électrodes des changements d’influence et une circulation de courant entre ces électrodes si elles sont reliées par une charge électrique.

Dans le système que nous nous proposons d’étudier (figure 9), l’électret a une charge fixe implantée  $Q_i$  et est déposé sur une électrode. Une contre-électrode est placée en face et espacée d’un gap d’air. Pour des raisons d’influence électrostatique et de conservation des charges, à tout instant :

$$Q_i = Q_1 + Q_2$$

avec  $Q_1$  charge présente sur l’électrode,  
 $Q_2$  charge sur la contre-électrode.

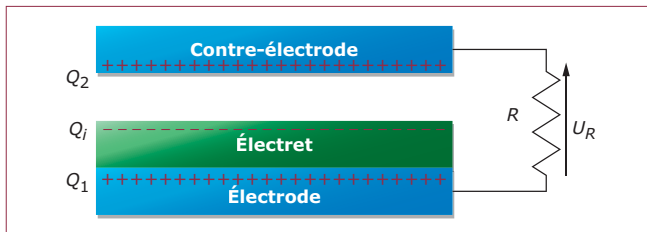


Figure 9 – Système en position initiale

Les vibrations du milieu ambiant induisent des modifications au niveau de la géométrie de la capacité (par exemple, la contre-électrode se déplace parallèlement à l'électrode) et la valeur de la capacité change. Les charges présentes à la surface de la contre-électrode et de l'électrode se réorganisent en passant par la résistance de charge  $R$ . Il y a circulation de charges dans une résistance et donc apparition d'une tension à ses bornes. Ainsi, lorsque la contre-électrode s'écarte de sa position initiale, les charges partent en direction de l'électrode. Le courant circule donc de la contre-électrode vers l'électrode (figure 10a). Inversement, lorsque la contre-électrode revient vers sa position initiale, les charges partent de l'électrode pour se rendre à la contre-électrode, et le courant circule de l'électrode vers la contre-électrode (figure 10b).

On a bien réalisé un convertisseur d'énergie. Il s'agit maintenant d'optimiser la charge de l'électret et la forme des électrodes pour maximiser la puissance de sortie vis-à-vis de la vibration d'entrée.

#### 2.4.2.2 Mise en équation de la partie électrostatique

Dans un premier temps, nous allons déterminer la puissance de sortie en fonction du déplacement relatif de la contre-électrode par rapport à l'électrode. Nous considérons que la contre-électrode se déplace parallèlement à l'électrode (selon  $\vec{e}_y$ ) mais les calculs seraient similaires pour un déplacement dans la direction  $\vec{e}_z$ . Le système peut être paramétré comme sur la figure 11.

$A(t)$  est la surface de coïncidence des deux électrodes.

$d$  est l'épaisseur de l'électret.

$g$  est la largeur du gap entre la contre-électrode et l'électrode.

$C$  est la capacité totale du système et correspond à la mise en série de deux capacités ( $C_1$  et  $C_2$ ), avec  $C_1$  la capacité formée par la couche d'électret et  $C_2$  la capacité formée par le gap d'air.

$R$  est la valeur de la résistance de charge et  $i$  le courant qui y circule.

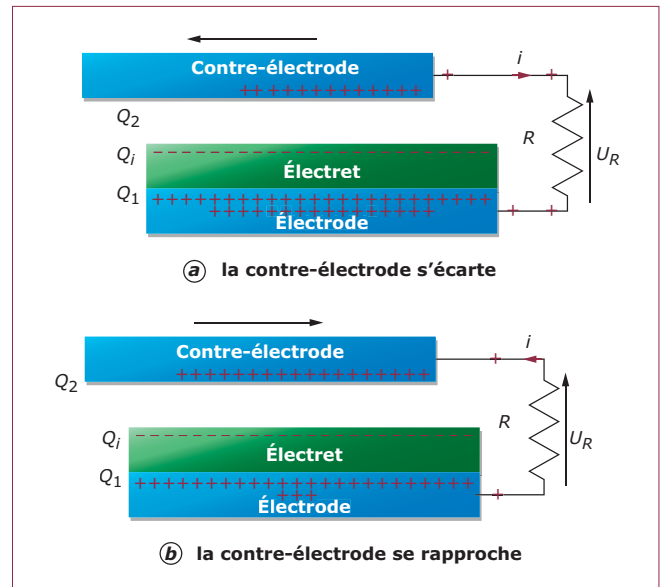


Figure 10 – Déplacements de la contre-électrode

Nous appelons  $\ell$  la longueur du système selon  $\vec{e}_x$  et  $A$  l'aire du système au repos, c'est-à-dire lorsque la contre-électrode est juste au-dessus de l'électrode.  $A$  correspond donc à l'aire maximale de coïncidence des deux plaques.

Pour des raisons d'influence et de conservation de la charge :

$$Q_i = Q_1(t) + Q_2(t) \quad (5)$$

Les capacités  $C_1$  et  $C_2$  sont des capacités planes. La formule théorique de la capacité plane permet d'obtenir :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad \text{où} \quad C_1 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A(t)}{d} \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 A(t)}{g} \quad (6)$$

En appliquant les lois de Kirchhoff au système électrique formé par les deux capacités ( $C_1$  et  $C_2$ ) et la résistance  $R$ , on obtient :

$$\frac{dQ_2}{dt} = \left( \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} \right) \frac{\sigma}{R} - \left( \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{g}{\epsilon_0} \right) \frac{Q_2}{A(t)} \quad (7)$$

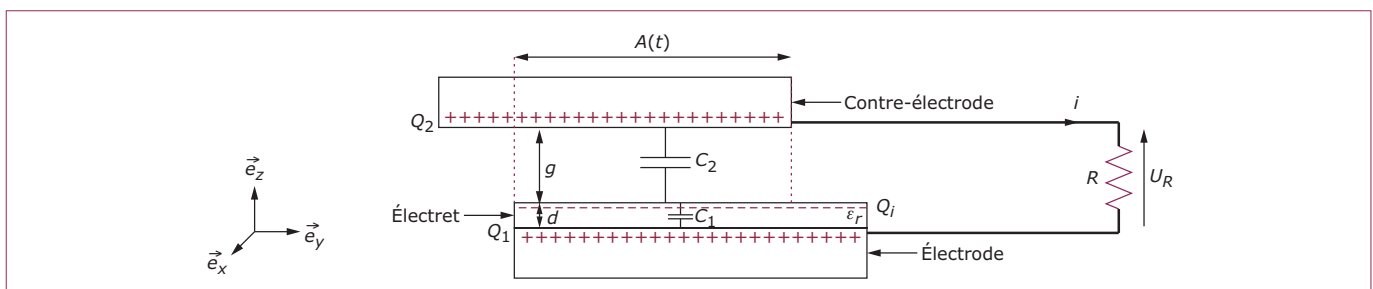


Figure 11 – Paramétrage du système

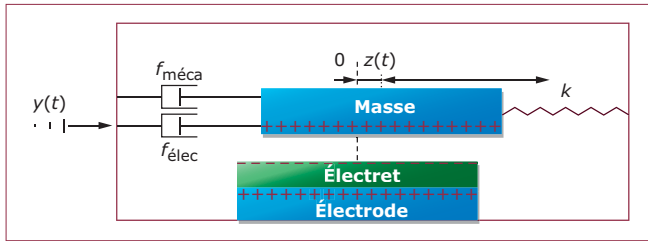


Figure 12 – Modélisation du système complet

Finalement, l'équation régissant le système électrostatique est [20] :

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{V_s}{R} - \left( \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{g}{\epsilon_0} \right) \frac{Q_2}{A(t) R} \quad (8)$$

avec  $V_s$  le potentiel de surface de l'électret en supposant que les charges sont implantées à la surface du matériau, d'après l'équation (4).

La partie électrostatique présentée figure 9, couplée à un système mécanique présenté figure 3 donne le système présenté figure 12.

Le système est alors simplement régi par le système d'équation (9) obtenu à partir de l'équation mécanique (1) et de l'équation électrostatique (8) :

$$\begin{cases} \frac{dQ_2}{dt} = \frac{V_s}{R} - \left( \frac{d}{\epsilon_r \epsilon_0} + \frac{g}{\epsilon_0} \right) \frac{Q_2}{A(t) R} \\ m\ddot{z} + kz + f_{élec} + f_{méca} = -m\ddot{y} \end{cases} \quad (9)$$

La puissance moyenne de sortie du système P est obtenue par :

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \\ &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Ri^2 dt \\ &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R \left( -\frac{dQ_2}{dt} \right)^2 dt \end{aligned} \quad (10)$$

avec  $t_1$  et  $t_2$  temps donnés.

## 3. Structures de récupération d'énergie mécanique par phénomènes électrostatiques

### 3.1 Structures mécaniques de base

Les structures électrostatiques permettant de récupérer de l'énergie ressemblent toutes plus ou moins à l'une des quatre structures de base présentées sur la figure 13.

### 3.2 Structures électrostatiques sans électret

La première structure de récupération d'énergie électrostatique MEMS a été développée au MIT par Chandrakasan et al. en 2001 [21]. Les cycles de fonctionnement (charge

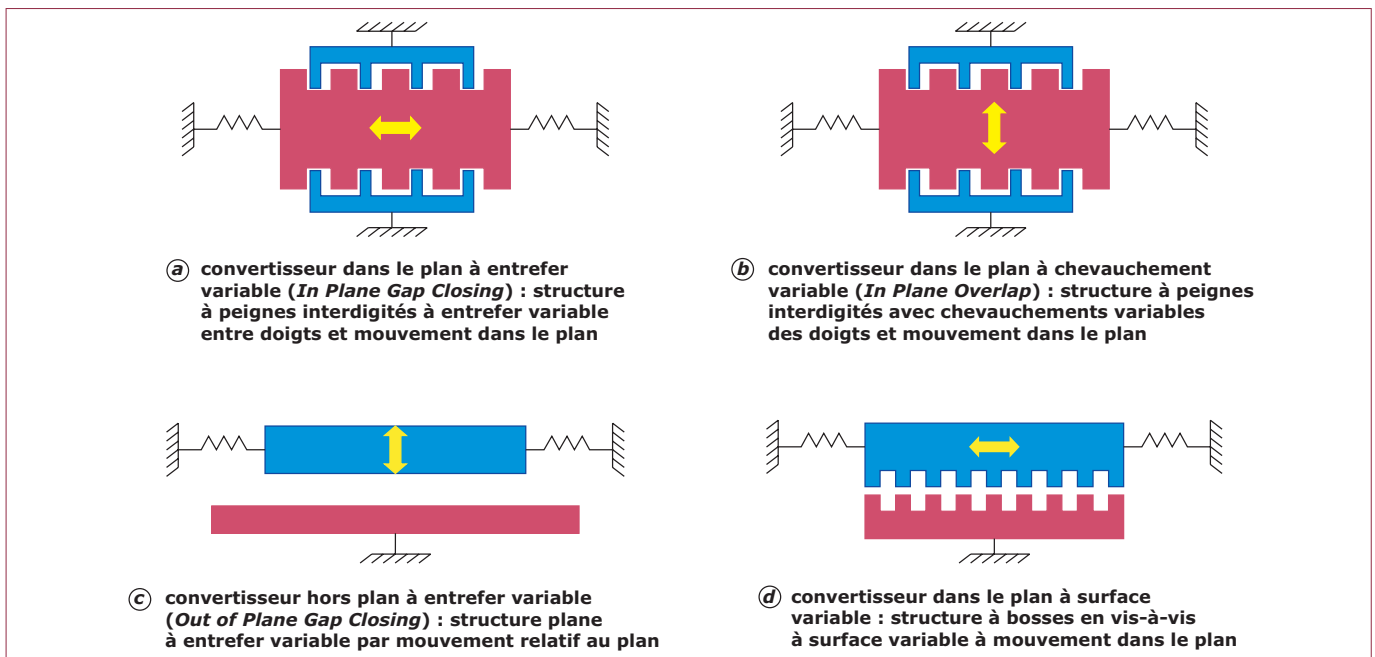


Figure 13 – Convertisseurs électrostatiques



constante et tension constante) sont décrits et il est démontré que le cycle à tension constante permet de maximiser la puissance de sortie dans le cas des structures dans le plan. La structure mécanique choisie était de type *in-plane overlap* (figure 13b). Cette structure a évolué et, bien que le cycle à charge constante ne maximise pas la puissance de sortie, c'est ce mode qui fut choisi pour des raisons de facilité de conception de l'électronique.

Comme nous l'avons vu, les structures électrostatiques peuvent être particulièrement bien adaptées à la récupération d'énergie en basses fréquences (< 100 Hz). Ainsi, en 2002, Tashiro *et al.* [22] ont conçu un pacemaker capable de récupérer de l'énergie à partir des mouvements du cœur. La puissance de sortie du système mesurée sur le cœur d'une chèvre fut de 36  $\mu$ W.

En 2003, Roundy *et al.* [3] prouvent que la meilleure structure électrostatique est la structure *in-plane gap closing* (figure 13a) et qu'elle permettrait de récupérer 100  $\mu$ W/cm<sup>3</sup> avec des vibrations ambiantes (2,25 m/s<sup>2</sup> à 120 Hz). Roundy *et al.* développeront par la suite une structure de type *in-plane gap closing* permettant de récupérer 1,4 nJ par cycle.

En 2005, Despesse *et al.* conçoivent un système macroscopique permettant de travailler à basses fréquences, et capable de récupérer 1 mW à 50 Hz pour une accélération de 0,2 g. Cette structure possède **la plus grande densité de puissance** des systèmes de récupération d'énergie électrostatiques.

D'autres structures de récupération d'énergie électrostatiques sans électret ont suivi et nous citons notamment les travaux de Despesse *et al.* [23], Basset *et al.* [24] et Kloub *et al.* [25].

Cependant, la recherche semble de plus en plus se tourner vers les systèmes de récupération d'énergie électrostatiques à base d'électrets.

### 3.3 Structures électrostatiques à électrets

En réalité, le principe consistant à utiliser des électrets comme source de polarisation pour un système de récupération d'énergie ou un générateur existe depuis longtemps puisque le premier générateur à électrets capable de produire de l'électricité fut obtenu par Jefimenko et Walker en 1978 [26].

Globalement, les premiers générateurs à électrets exploitaient une énergie mécanique de rotation, comme ce fut le cas pour Jefimenko [26], Tada [27], Genda [28] ou encore Boland [20]. Par exemple, Boland *et al.* ont créé un système composé d'un stator et d'un rotor avec des surfaces texturées permettant de créer une variation de capacité lors de la rotation du rotor par rapport au stator (figure 14) [20].

Avec le développement de la récupération d'énergie pour les microsystèmes, la recherche s'est finalement emparée des électrets pour récupérer les vibrations. Dans ce type de systèmes, les vibrations engendrent une variation de géométrie qui permet de produire une énergie électrique.

Nous commençons tout d'abord par faire une distinction entre les structures à électrets « pleine plaque » (les zones avec électrets sont de dimensions millimétriques) et les structures à électrets « texturés » (la structure présente des zones d'électret avec une dimension inférieure à 100  $\mu$ m). Il est en effet à noter que texturer un électret n'est pas une chose aisée (pour des problèmes de stabilité de charge) même si des solutions d'un point de vue matériau existent [8] [9].

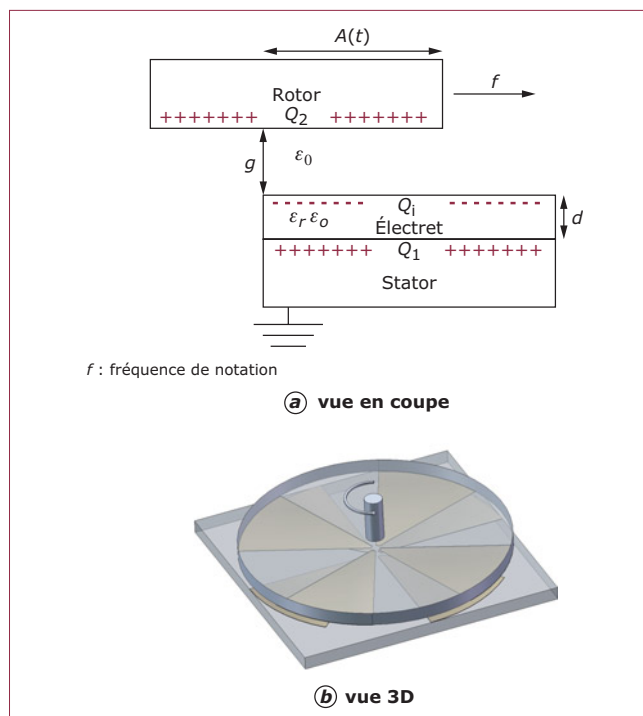


Figure 14 – Récupération des rotations (© IEEE 2003) [20]

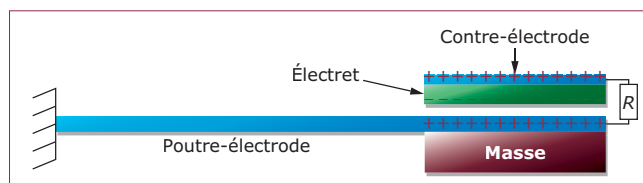


Figure 15 – Structure à base de poutre encastrée libre [29]

#### 3.3.1 Structures à électrets pleine plaque

Les structures à électrets pleine plaque peuvent travailler avec une variation de surface ou une variation de gap. Ainsi, dès 2003, Mizuno [29] présente une structure de type poutre encastrée-libre permettant de créer une structure à variation de gap (figure 13c). Cette structure simple et limitée en termes de récupération d'énergie permet cependant de démontrer rapidement et expérimentalement le principe (figure 15) [29].

Quant aux systèmes à variation de surface, la première structure de ce type est apparue dès 2007. Elle a été développée par Sterken *et al.* de l'IMEC [30]. L'électret est déposé en pleine plaque et polarise l'électrode mobile de la capacité variable ( $C_{var}$ ) (figure 16) [30].

#### 3.3.2 Structure à électrets texturés

La majeure partie des systèmes à électrets étudiés à l'heure actuelle est à électrets texturés et à variation de surface (figure 13d). La première structure de ce type date de 2006 et a été développée par l'université de Tokyo (figure 17) [31].

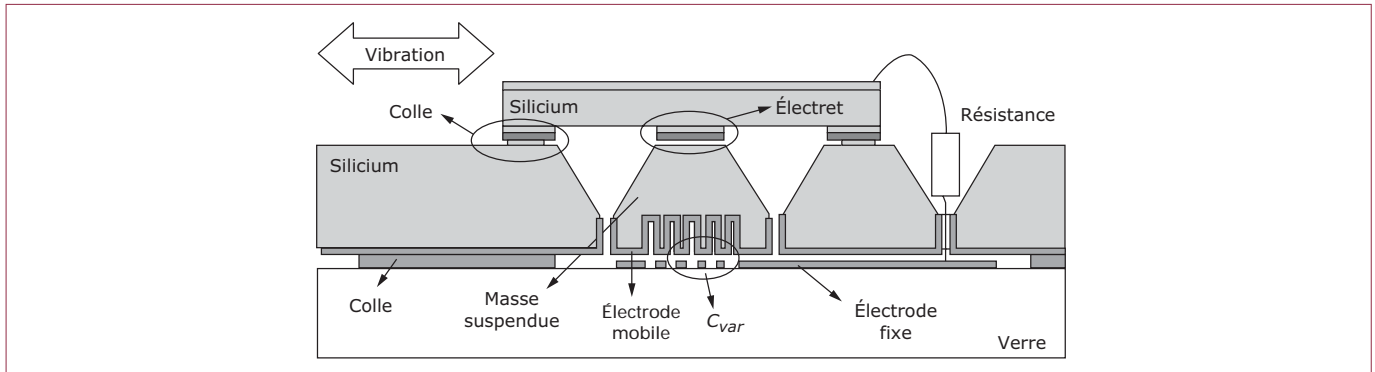


Figure 16 – Structure développée par l’IMEC(© IEEE 2007) [30]

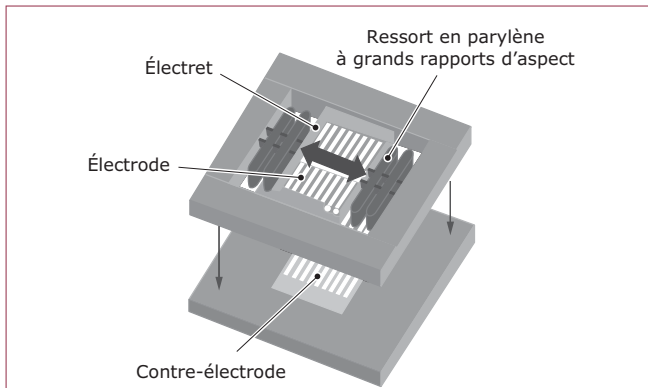


Figure 17 – Structure développée à l’Université de Tokyo (© IEEE 2006) [31]

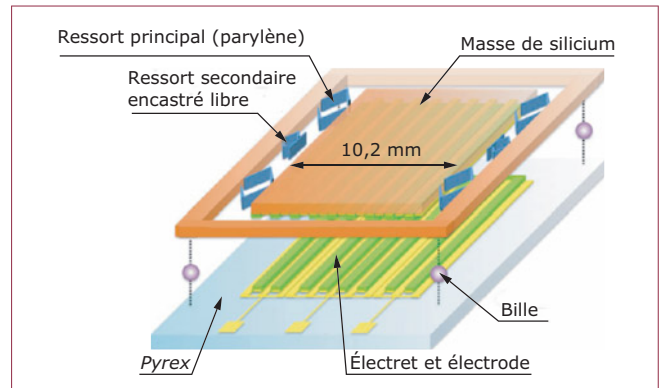


Figure 18 – Utilisation des effets non linéaires et du multiphasage dans un système de récupération d’énergie à électrets (© IEEE 2010) [35]

De nombreuses autres structures de ce type ont suivi [16] [32] [33] [34] [35]. Chacune d’entre elles cherchant à apporter une amélioration à la structure de base. Par exemple, Miki [35] a amélioré la structure en créant un système multiphase et en utilisant des effets non linéaires (figure 18) [35]. L’utilisation d’un système à plusieurs phases permet notamment de limiter les pics de la force électrostatique et ainsi d’éviter des problèmes de blocage de la masse.

### 3.3.3 Structures mécaniques permettant de récupérer des vibrations ambiantes

Une autre difficulté rencontrée par les systèmes de récupération d’énergie est la fréquence de fonctionnement. En effet, nous avons vu que les fréquences de vibrations de notre environnement sont généralement inférieures à 150 Hz. Cela pose des problèmes techniques au niveau de la réalisation des structures et notamment des structures tout silicium (les facteurs de formes requis sont importants et les structures deviennent fragiles). Ainsi, afin de réduire les fréquences de résonance des systèmes de récupération d’énergie à base d’électrets, tout en gardant des dimensions compatibles avec l’intégration, des solutions comme l’utilisation de ressorts de maintien en parylène (figure 17) [31] [36] ont été développées. Une autre possibilité pour assurer le guidage est d’utiliser un système de type glissière à bille qui n’introduit pas d’effet de résonance. Sanyo a déjà montré qu’un tel système

pouvait fonctionner à très basses fréquences (< 2 Hz) et permettait de produire jusqu’à 40  $\mu$ W [37] (figure 19).

Nous dressons dans la partie suivante un état de l’art général sur les systèmes de récupération d’énergie électrostatiques.

## 4. Bilan et limites

### 4.1 Récapitulatif des systèmes existants

Les tableaux 3 et 4 dressent un bilan des systèmes de récupération d’énergie électrostatiques avec et sans électret que l’on peut trouver dans la littérature aujourd’hui.

Le tableau 4 montre ainsi une augmentation importante du nombre de systèmes de récupération d’énergie à base d’électrets depuis 2003 ainsi que l’implication de sociétés comme Sanyo ou Omron dans le développement de ces solutions.

### 4.2 Limites et challenges de ces systèmes

#### 4.2.1 Intégration

La question de l’intégration est une problématique commune à tous les systèmes de récupération d’énergie. En effet, la puissance de sortie d’un système de récupération d’énergie mécanique résonnant est plus ou moins proportionnelle à la

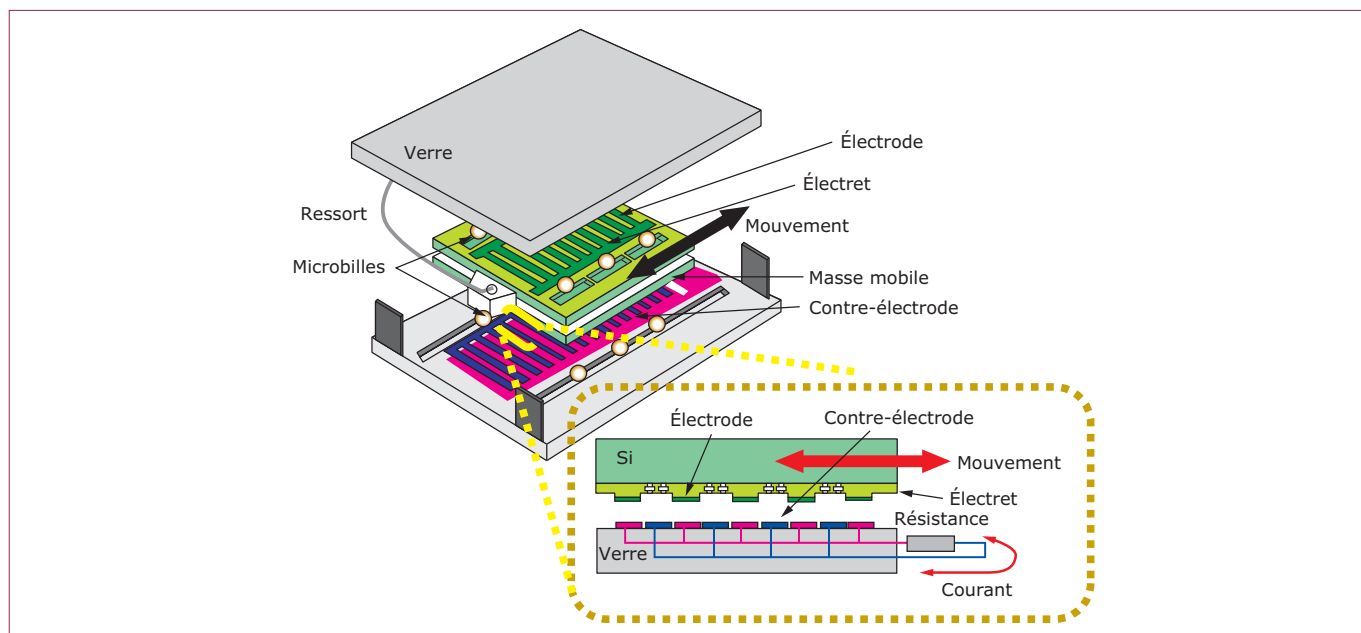


Figure 19 – Structure sur billes (© IOP/JMM 2009) [37]

Tableau 3 – Systèmes de récupération d'énergie sans électrets

Auteur	Référence	Puissance ( $\mu\text{W}$ )	Surface ( $\text{mm}^2$ )	Volume ( $\text{mm}^3$ )	Tension (V)	Accélération ( $\text{m/s}^2$ )	Fréquence (Hz)	Masse (g)
R. Tashiro	[22]	36		15 000		12,8	6	780
S. Roundy	[4]	11	100	100		2,3	100	
P.D. Mitcheson	[38]	24	784	1 568	2 300	4,0	10	
B. C-H. Yen	[39]	1,8	4 356	21 780	6		1 560	
G. Despesse	[23]	1 000	1 800	18 000	3	3,0	50	100

masse mobile et nous retiendrons en premier ordre de grandeur que pour des vibrations ambiantes ( $50 \mu\text{m}_{pp}$  à 50 Hz) la puissance récupérable atteint  $10 \mu\text{W}$  par gramme de masse mobile. Pour des raisons de densités et de stabilité des structures, la masse mobile est liée à la dimension du système ; c'est pourquoi, pour espérer récupérer des puissances de l'ordre de quelques dizaines de microwatts à vibrations ambiantes, il est difficile d'imaginer des systèmes d'une taille inférieure à  $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ .

#### 4.2.2 Fréquences de travail

Les vibrations ambiantes sont généralement de basses fréquences (typiquement inférieures à 150 Hz). De plus, en observant le spectre en fréquence de ces accélérations, on remarque que les vibrations sont étalées en fréquences. Cela implique l'utilisation de systèmes basses fréquences et à larges bandes, ce qui peut poser de nombreux problèmes dans la réalisation des ressorts de maintien de la masse mobile. En effet, un fonctionnement à basses fréquences suppose des poutres de guidage très souples, c'est-à-dire longues et fines, donc fragiles.

#### 4.2.3 Contrôle du gap

La puissance de sortie des systèmes de récupération d'énergie est intimement liée à l'amplitude de la variation de capacité induite par la vibration. Cette variation doit donc être maximisée. Ainsi, il est nécessaire de contrôler avec précision et de minimiser le gap entre les deux armatures tout en prenant en compte les phénomènes de *pull-in* (collage des armatures de la capacité) et de claquage de l'air.

#### 4.2.4 Stabilité des électrets

Dans les systèmes de récupération d'énergie par électrets, la problématique de la stabilité des électrets peut être critique pour deux raisons :

- la stabilité des électrets est intimement liée aux conditions environnementales (humidité, température de  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  à ne pas dépasser) ;
- la structuration de l'électret, en vue de récupérer les vibrations de petites amplitudes, peut réduire significativement la stabilité ou la quantité de charges piégées dans l'électret.

Tableau 4 – Systèmes de récupération d'énergie à électrets

Auteur	Référence	Vibrations/Rotations	Surface active	Potentiel de l'électret	Puissance de sortie
Jefimenko	[26]	6 000 tpm	730 cm <sup>2</sup>	500 V	25 mW
Tada	[27]	5 000 tpm	90 cm <sup>2</sup>	363 V	1,02 mW
Boland	[20]	4 170 tpm	0,8 cm <sup>2</sup>	150 V	25 μW
Genda	[28]	1 000 000 tpm	1,13 cm <sup>2</sup>	200 V	30,4 W
Boland	[40]	1 mm <sub>pp</sub> à 60 Hz	0,12 cm <sup>2</sup>	850 V	6 μW
Tsutsumino	[31]	2 mm <sub>pp</sub> à 20 Hz	4 cm <sup>2</sup>	1 100 V	38 μW
Lo	[41]	2 mm <sub>pp</sub> à 60 Hz	4,84 cm <sup>2</sup>	300 V	2,26 μW
Sterken	[30]	2 μm <sub>pp</sub> à 500 Hz	0,09 cm <sup>2</sup>	100 V	5 μW
Lo	[16]	1 mm <sub>pp</sub> à 50 Hz	6 cm <sup>2</sup>	1 500 V	17,98 μW
Omron	[42]	1,2 mm <sub>pp</sub> à 20 Hz	4 cm <sup>2</sup>	700 V	10 μW
Zhang	[32]	2 mm <sub>pp</sub> à 9 Hz	4 cm <sup>2</sup>	100 V	0,13 pW
Yang	[43]	5 μm <sub>pp</sub> à 560 Hz	0,3 cm <sup>2</sup>	400 V	46,14 pW
Suzuki	[36]	2 mm <sub>pp</sub> à 37 Hz	2,33 cm <sup>2</sup>	450 V	0,28 μW
Sakane	[33]	1,2 mm <sub>pp</sub> à 20 Hz	4 cm <sup>2</sup>	640 V	0,7 mW
Sanyo	[37]	50 mm <sub>pp</sub> à 2 Hz	20 mm × 45 mm		40 μW
Halvorsen	[44]	5,7 μm <sub>pp</sub> à 596 Hz	8 mm × 6 mm		1 μW
Edamoto	[34]	1 mm <sub>pp</sub> à 21 Hz	18,5 mm × 16,5 mm	600 V	12 μW
Miki	[35]	0,25 mm <sub>pp</sub> à 63 Hz	18,5 mm × 16,5 mm	180 V	1 μW
Honzumi	[45]	18,7 μm <sub>pp</sub> à 500 Hz	1 mm × 1 mm	52 V	90 pW

tpm : tour par minute.  
pp : pic à pic.

## 5. Conclusion et perspectives

Les systèmes de récupération d'énergie mécanique électrostatiques connaissent un essor depuis le début des années 2000 avec la réalisation de nombreux prototypes dans les laboratoires de recherche. L'intégration des électrets a permis de pallier le problème de la charge initiale et également de simplifier l'électronique associée.

Bien que ces structures présentent de nombreux intérêts en termes d'intégration et de densités de puissance, aucun système n'est commercialisé à l'heure actuelle, contrairement aux systèmes piézoélectriques et électromagnétiques. La raison principale est que le principe électrostatique n'est intéressant qu'en petites dimensions. Or, à l'heure actuelle, les besoins en énergie des applications (~ 1 mW) ne sont pas encore tout à fait en adéquation avec ce que peut fournir une microsource d'énergie (quelques dizaines de microwatts) et il

est donc plus simple de développer des solutions macroscopiques piézoélectriques ou électromagnétiques. Il est toutefois probable que des solutions complètement intégrées pour capter des informations simples telles que la pression ou la température fassent leur apparition dans un avenir proche. Les puissances nécessaires ne dépassent alors pas la centaine de microwatts et les structures électrostatiques peuvent devenir une solution efficace pour la récupération d'énergie.

Ainsi, on peut s'attendre, dès 2012, à un passage de la phase de recherche à la phase industrielle des structures électrostatiques de récupération d'énergie. Des sociétés comme Sanyo [46] ou Omron [46] sont déjà fortement impliquées dans le domaine. Contrairement aux systèmes piézoélectriques ou électromagnétiques, les structures de récupération d'énergie électrostatiques peuvent être réalisées à partir de matériaux simples (absence d'éléments piézoélectriques, absence d'aimants...), ce qui permet d'imaginer des structures de récupération d'énergie à bas coûts et en grand nombre.