



**HAL**  
open science

# Conception d'un dispositif de récupération d'énergie vibratoire ambiante

Mohamed Aymen Ben Ouanes

► **To cite this version:**

Mohamed Aymen Ben Ouanes. Conception d'un dispositif de récupération d'énergie vibratoire ambiante. Electronique. Université Paris-Est; École polytechnique de Tunisie (La Marsa), 2019. Français. NNT : 2019PESC2087 . tel-03382760

**HAL Id: tel-03382760**

**<https://theses.hal.science/tel-03382760v1>**

Submitted on 18 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université de Carthage  
École Polytechnique de Tunisie

UNIVERSITÉ —  
— PARIS-EST

École doctorale  
Mathématiques, Sciences de l'Information  
et de la Communication (MSTIC)

Thèse de Doctorat en Co-tutelle  
Pour l'obtention du grade de Docteur de

l'École Polytechnique de Tunisie  
Spécialité : Mécanique appliquée

L'Université Paris-Est  
Spécialité : Électronique, Optronique et  
Systèmes

# Conception d'un dispositif de récupération d'énergie vibratoire ambiante

par

Mohamed Aymen BEN OUANES

Soutenue le 11 novembre 2019 à l'École Polytechnique de Tunisie

devant le jury composé de :

<b>Mme. Najiba BELLAJ,</b>	Professeur, ISI, Université Tunis El Manar :	Présidente
<b>M. Chokri BOURAOUI,</b>	Professeur, ENISo, Université de Sousse :	Rapporteur
<b>M. Sébastien BOISSEAU,</b>	Ingénieur-Chercheur, CEA Leti :	Rapporteur
<b>M. Dimitri GALAYKO,</b>	Maitre de conférence, Sorbonne Université, LIP6 :	Examineur
<b>M. Hatem SAMAALI,</b>	Maitre assistant, ISTIC, Université de Carthage :	Examineur
<b>M. Philippe BASSET,</b>	Professeur, ESIEE, Université Paris-Est, ESYCOM :	Directeur de thèse
<b>M. Fehmi NAJAR,</b>	Professeur, EPT, Université de Carthage :	Co-Directeur de thèse

# Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier mes directeurs de thèse M. Fehmi NAJAR, professeur à l'École Polytechnique de Tunisie, M. Philippe BASSET, Professeur à l'Université Paris-Est et M. Hatem SAMAALI, Maître Assistant à L'Institut Supérieur des Technologies de l'Information et des Communications, pour leur dévouement, leur patience, et leur implication pour le bon déroulement des travaux de recherche.

Je saisis aussi cette occasion pour remercier M. Hubert SIZUN pour son écoute, ses conseils pendant la conception des dispositifs et sa disponibilité pour la fabrication et la modification de ces derniers.

Mes remerciements s'adressent également à mes collègues Ali Ghaffarinejad et Yingxian Lu pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de mes recherches.

J'adresse aussi mes profonds remerciements à mon ami Ameur Zina, dont l'aide et les conseils m'ont été fort précieux pour l'exécution des travaux, et à mes parents qui n'ont pas cessé de m'encourager et de me soutenir tout le long des travaux.

Je remercie également tous les membres du laboratoire LASMAP, au sein de l'université de Carthage, ainsi que les membres du laboratoire ESYCOM, rattachés à l'université Paris-Est.

Finalement, je dois exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes ayant contribué directement ou indirectement à la réussite de mes travaux de recherche.

# Résumé

L'énergie vibratoire ambiante est une source d'énergie prometteuse pour alimenter les dispositifs électroniques à faible consommation.

Se trouvant partout autour de nous, l'énergie vibratoire permet de rendre ces systèmes de plus en plus autonomes sans dépendre d'une source d'énergie extérieure ou un remplacement de leurs batteries.

La communauté scientifique s'est alors penchée sur cette question. Ainsi, un ensemble de récupérateurs d'énergies vibratoires ambiantes a été développé se basant sur le principe de l'électromagnétique, de la piézoélectricité ou de l'électrostatique.

Ces dernières années, le développement des technologies de fabrication des micros systèmes électromécaniques (MEMS) a permis aux transducteurs électrostatiques un accroissement lui permettant une intégration simple à l'échelle microscopique et un coût de mise en œuvre bas. Cependant, l'énergie récupérée reste faible par rapport aux autres transducteurs.

Les travaux qu'on propose dans le cadre de ce projet de thèse consistent à modéliser, concevoir, fabriquer et analyser un récupérateur d'énergie vibratoire ambiante optimisé, dont le principe de fonctionnement se base sur l'automatisation du générateur électrostatique développé par *Abraham Bennet* deux siècles auparavant.

Notre dispositif est composé essentiellement de trois contacteurs mécaniques et de trois armatures placées l'une à côté de l'autre : Celle du milieu y oscille, induisant l'apparition de deux capacités variables évoluant en opposition de phase. La modélisation électrique de notre dispositif est réalisée d'abord pour un système idéal, puis pour un système plus réaliste prenant en compte des pertes électriques au niveau des contacts.



A partir de la modélisation mécanique de notre système, permettant de simuler le comportement dynamique, nous avons développé un algorithme traduisant le comportement électromécanique de notre récupérateur d'énergie vibratoire.

La validation de celui-ci est effectuée par sa confrontation avec les résultats mesurés expérimentalement. L'examen des données obtenues nous a permis d'analyser le fonctionnement et d'expliquer la saturation de récupération d'énergie observé.

Nous avons par la suite expliqué et démontré les avantages liés à l'utilisation de contacteurs mécaniques par rapport aux diodes à travers une comparaison expérimentale entre chaque technique dans les mêmes conditions d'utilisation. L'effet de l'ajout d'une pastille triboélectrique a aussi été analysé expérimentalement à travers la variation du matériau et de son épaisseur. Enfin, l'impact de chaque paramètre extérieur sur les performances dynamiques du dispositif a aussi été étudié.

Par ailleurs, et dans une perspective d'une meilleure optimisation, on a introduit une géométrie d'électrodes basée sur des dentures triangulaires. On a expliqué la technique adoptée pour le dimensionnement des dentures et on a observé l'impact de l'utilisation de cette géométrie sur les performances de notre récupérateur d'énergie vibratoire.

**Mots clés :** Énergie vibratoire, Transducteur électrostatique, Switches mécaniques, Doubleur de Bennet

**Thèse préparée à :**

Laboratoire LASMAP, Rue El Khawarizmi, 2078 La Marsa, Tunisie

Laboratoire ESYCOM, Cité Descartes, 2 Boulevard Blaise Pascal, 93160 Noisy-le-Grand, France

# Abstract

Nowadays, the vibration energy is becoming a promising energy source to supply low consumption electronic devices.

Being everywhere around us, this energy source makes these devices more autonomous without requiring any external power source or replacement of their batteries.

Considering the economic advantages of this energy, scientists have recently developed a vibration energy harvesting devices that allow to supply autonomous low consumption electronic systems. To convert the energy from the mechanical domain into the electrical one, a transducer is used. This one can be based on electromagnetic, piezoelectric or electrostatic transduction mechanism.

Among these ones, the development of the fabrication methods in the micro-scale allowed an increase of the electrostatic transducers. This latter, demonstrate an easily fabrication and implementation in microdevices.

In this work, we propose to model, design, fabricate and analyze, an optimized vibration energy harvesting device based on the Bennet's doubler principle developed 2 centuries ago by *Abraham Bennet*.

Our proposal consists to harvest the vibration energy in low frequency and in large bandwidth by automatization of the Bennet's doubler's cycle, which is realized by introducing self-synchronized mechanical switches. Our vibration energy harvester is composed by three electrodes, two fixed and a central one which moves in between. This creates two out-of-phase variable capacitors.

The electrical modeling of the device is firstly performed for an ideal system, and after

that for a more realistic one, which takes account the contact resistance.

By modeling the mechanical behavior of our device, we developed an electromechanical algorithm that simulate its functioning. Its validation was done by comparing with experimental results.

After that, we combined the numerical and experimental results to analyze the energy harvesting principle and the saturation phenomenon. The advantages of the self-synchronized mechanical switches use is also observed by a comparison with the use of diodes. The device is improved by adding a triboelectric patches, that induce an increase of charge generation. The advantages of the patch using is seen by the variation of the material and its thickness. Finally, we analyze outside parameters that impact the dynamic of the movable mass.

Being on the optimization approach, we improve the efficiency of our harvester by acting on the capacitance variation. We introduce an electrodes based on triangular fingers. This electrode geometry takes the advantages of the gap-closing and area-overlap designs. To ensure an optimal functioning, we sized the geometrics parameters of the fingers. After that, we analyzed the impact of this new electrode geometry on the energy harvested.

**keywords :** Vibration energy harvesting, Electrostatic transducer, Mechanical switches, Bennet's doubler

**Thesis prepared in :**

LASMAP Laboratory, Rue El Khawarizmi, 2078 La Marsa, Tunisie

ESYCOM Laboratory, Cité Descartes, 2 Boulevard Blaise Pascal, 93160 Noisy-le-Grand, France

# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>ii</b>
<b>Abstract</b>	<b>iv</b>
	<b>Page</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 La récupération d'énergie . . . . .	1
1.2 Exemple d'application de l'énergie vibratoire dans la vie courante . . . .	3
1.3 Motivation . . . . .	7
1.4 Organisation du manuscrit . . . . .	10
<b>2 Etude bibliographique</b>	<b>11</b>
2.1 Oscillateurs mécaniques . . . . .	12
2.1.1 Oscillateur en réseau . . . . .	13
2.1.2 Oscillateur Duffing . . . . .	14
2.1.3 Oscillateur à impact . . . . .	15
2.2 Les différents types de transducteurs . . . . .	17
2.2.1 Transducteur électromagnétique . . . . .	17
2.2.2 Transducteur Piézoélectrique . . . . .	18
2.2.3 Transducteur électrostatique . . . . .	20

2.2.4	Comparaison des transducteurs . . . . .	22
2.3	Circuits de conditionnement des transducteurs électrostatiques . . . . .	23
2.3.1	La pompe de charge . . . . .	23
2.3.2	Doubleur de Bennet . . . . .	24
2.4	Conclusion . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Le générateur électrostatique : principe et modélisation</b>	<b>28</b>
3.1	Description du générateur électrostatique à contacteurs mécaniques . . . . .	29
3.2	Analyse du principe de dédoublement de charge . . . . .	32
3.2.1	Principe de base . . . . .	32
3.2.2	Effet des patches triboélectriques . . . . .	36
3.2.3	Évolution des grandeurs électriques . . . . .	37
3.3	Modélisation électromécanique du système . . . . .	40
3.3.1	Modèle mécanique du système . . . . .	40
3.3.2	Modèle électrique du système . . . . .	43
3.3.3	Modèle électromécanique du système . . . . .	46
3.4	Conclusion . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Résultat des simulations du modèle et validation expérimentale</b>	<b>48</b>
4.1	Dispositif expérimental et méthode d'essai . . . . .	49
4.1.1	Fabrication du dispositif . . . . .	49
4.1.2	Méthode d'essai . . . . .	51
4.2	Mesure de la capacité et analyse du comportement du générateur . . . . .	52
4.2.1	Méthode . . . . .	52
4.2.2	Mesures . . . . .	53
4.3	Performances du récupérateur d'énergie vibratoire . . . . .	56
4.3.1	Évolution des grandeurs électriques avec pré-charge initiale . . . . .	56
4.3.2	Évolution des grandeurs électriques sans pré-charge initiale . . . . .	57
4.4	Avantage des contacteurs mécaniques . . . . .	61

4.5	Utilisation des pastilles triboélectriques . . . . .	63
4.5.1	Effet de la variation de matériau . . . . .	63
4.5.2	Effet de la variation de l'épaisseur de la pastille . . . . .	65
4.6	Conclusion . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Analyse du comportement dynamique du générateur électrostatique</b>	<b>67</b>
5.1	Réponse dynamique du dispositif sous différentes conditions d'excitation	68
5.1.1	Effet de variation de la fréquence d'excitation . . . . .	69
5.1.2	Effet de variation de l'accélération . . . . .	71
5.1.3	Impact de l'angle d'inclinaison sur le comportement dynamique	72
5.1.4	Effet de la variation de la capacité sur le comportement du dispositif. . . . .	74
5.2	Analyse analytique du comportement du générateur électrostatique . .	76
5.2.1	Solution numérique du modèle continue . . . . .	78
5.2.2	Solution analytique du modèle continue . . . . .	80
5.3	Conclusion . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Optimisation du générateur électrostatique</b>	<b>86</b>
6.1	Conception proposée . . . . .	87
6.2	Dimensionnement et optimisation des armatures à dentures triangulaires	89
6.3	Conception et fabrication du générateur proposé . . . . .	97
6.4	Performances du générateur électrostatique à dentures triangulaires . .	99
6.4.1	Mesure de la variation de capacité . . . . .	99
6.4.2	Limites rencontrées . . . . .	100
6.4.3	Analyse numérique du dispositif configuré en tant que doubleur de charges . . . . .	100
6.5	Performances du dispositif configuré en tant que pompe de charge . . .	102
6.5.1	Principe de la pompe de charge . . . . .	102

6.5.2	Comparaison de la variation de capacité entre les deux dispositifs fabriqués . . . . .	103
6.5.3	Comparaison de performances électriques des deux dispositifs à plaque parallèle et à dentures triangulaires . . . . .	104
6.6	Conclusion . . . . .	106
<b>7</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>107</b>
7.1	Synthèse des contributions . . . . .	107
7.2	Perspectives . . . . .	109
	<b>Bibliographie</b>	<b>110</b>

# Table des figures

1.1	Processus d'exploitation des énergies renouvelables. . . . .	2
1.2	Télécommande à énergie vibratoire de marque <i>Arveni</i> [12]. . . . .	4
1.3	Lampe à induction [13]. . . . .	5
1.4	Récupérateur d'énergie vibratoire ambiante <i>EnOcean</i> [14]. . . . .	6
1.5	Récupérateur d'énergie vibratoire ambiante <i>MicroStrain MVEH</i> [15].	6
1.6	Représentation de l'oscillateur linéaire. . . . .	7
2.1	Représentation de l'oscillateur développé par <i>Sari</i> [38]. . . . .	13
2.2	Représentation de l'oscillateur à lévitation magnétique développé par <i>Mann</i> [45]. . . . .	15
2.3	Représentation de l'oscillateur à impact développé par <i>Soliman</i> [50]. . .	16
2.4	Représentation de l'oscillateur à impact développé par <i>Bendam</i> [52]. . .	16
2.5	Représentation du transducteur électromagnétique [55]. . . . .	18
2.6	Représentation du transducteur piézoélectrique [59]. . . . .	19
2.7	Transducteur électrostatique à dentures droites (a) [72] et à dentures triangulaires (b) [73]. . . . .	21
2.8	Pompe de charge à contacteurs mécaniques introduit par <i>Samaali</i> [87].	24
2.9	Étapes de multiplication de charges du doubleur de <i>Bennet</i> [26]. . . . .	26
3.1	représentation schématique du doubleur de charges à contacteurs méca- niques constitué de 3 électrodes, 3 contacteurs mécaniques et de patch triboélectrique, et représentation de son circuit électrique équivalent. . .	30



3.2	Étapes du doubleur de charges à contacteurs mécaniques lors de l'application d'une excitation extérieure. (a) : $S_1$ et $S_2$ sont fermés induisant une configuration parallèle des capacités. (b) : $S_3$ est activé induisant la configuration série des capacités. . . . .	32
3.3	Évolution de $\tilde{\alpha}$ par rapport au ratio de capacités $\eta$ . . . . .	38
3.4	Évolution de la tension $V_{res}$ (a) et de l'énergie $E$ (b) en fonction $\eta$ après 2000 cycles. . . . .	38
3.5	Variation de l'énergie $E$ en fonction de la tension $V_{res}$ après 2000 cycles de fonctionnement pour $\eta=4$ . . . . .	39
3.6	Effet de l'addition du patch triboélectrique sur les performances du dispositif. (a) : Évolution de la tension par rapport au nombre de cycles. (b) : L'énergie récupérée résultante en fonction du nombre de cycles. . .	40
3.7	Représentation mécanique du doubleur de charges à contacteurs mécaniques constitué d'une masse mobile dont le mouvement est limité par 2 butées de fin de course. . . . .	41
3.8	Circuit électrique équivalent où $S_2$ est activé et $S_1$ ne l'est pas. . . . .	43
3.9	Circuit électrique équivalent caractérisé par la fermeture des contacteurs $S_1$ et $S_2$ et induisant la configuration parallèle des résistances. . . . .	44
3.10	Circuit électrique équivalent caractérisant l'état du système où tous les contacteurs sont ouverts. . . . .	44
3.11	Circuit électrique équivalent caractérisé par l'état du dispositif ou le contacteur $S_3$ est fermé induisant la configuration série. . . . .	45
3.12	Algorithme d'évolution de l'état électromécanique du doubleur de charges à contacteurs mécaniques. . . . .	47
4.1	Prototype expérimental. (a) : Dispositif numérique. (b) Dispositif réalisé.	49
4.2	Schéma représentatif de la manipulation et des composants utilisés nécessaires à la réalisation des expériences. . . . .	51

4.3	circuit électrique de mesure de la variation dynamique des capacités variables $C_{ba}$ et $C_{bc}$ . . . . .	53
4.4	Variation de capacité de $C_{ba}$ et $C_{bc}$ mesurée expérimentalement et calculée numériquement. . . . .	54
4.5	Simulation de l'évolution de la position de la masse mobile par rapport au nombre de cycles. . . . .	55
4.6	(a) Dispositif réel placé sur le pot vibrant pendant la réalisation des essais. (b) Circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire ambiante. . . . .	56
4.7	Influence de la tension de pré-charge aux bornes de $C_{res}$ sur les performances du dispositif à 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . (a) évolution de la tension et (b) évolution de l'énergie accumulée dans $C_{res}$ en fonction du nombre de cycles. . . . .	57
4.8	Circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire intégrant le diviseur de tension capacitif. . . . .	58
4.9	Superposition numérique et expérimentale de l'évolution de la tension $V_{res}$ aux bornes de $C_{res}$ jusqu'à la saturation pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	59
4.10	(a) Évolution de l'énergie accumulée dans le condensateur $C_{res}$ en fonction du nombre de cycles, tenant compte de la saturation. (b) Variation résultante de l'énergie par cycle et de la puissance . . . . .	59
4.11	Détail sur l'évolution de la position de la masse mobile en fonction du nombre de cycles au moment de la saturation. . . . .	60
4.12	Évolution de la force électrostatique agissant sur l'électrode mobile en fonction du nombre de cycles. . . . .	61
4.13	circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire ambiante permettant de supporter autant les diodes que les contacteurs mécaniques. . . . .	62

4.14	Comparaison expérimentale entre le système se basant sur les contacteurs mécaniques et celui se basant sur les diodes, exprimée sous forme d'évolution de la tension $V_{res}$ (a) et de l'énergie accumulée aux bornes du condensateur de stockage $C_{res}$ (b), en fonction du nombre de cycles, pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	63
4.15	Influence du matériau du patch triboélectrique sur les performances du dispositif. (a) Évolution de l'énergie au niveau du condensateur de stockage. (b) Puissance résultante en fonction du nombre de cycles pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	64
4.16	Variation de l'énergie par cycle par rapport à l'évolution de la tension $V_{res}$ dans le cas d'utilisation du <i>PP</i> et du <i>PTFE</i> pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	65
4.17	Influence de l'épaisseur du patch triboélectrique en <i>PTFE</i> sur les performances du récupérateur d'énergie vibratoire décrite par l'évolution de l'énergie au niveau de $C_{res}$ (a) et par la puissance engendrée (b) en fonction du nombre de cycles, pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	66
5.1	Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile dans les conditions de test standard (0.2 $g_{rms}$ , 5 Hz) en fonction de sa position pendant la récupération d'énergie vibratoire. . . . .	68
5.2	Évolution de la tension au niveau de $C_{res}$ , initialisée avec 2 V, après 10 s de fonctionnement en fonction de la fréquence appliquée et pour 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	69
5.3	Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour plusieurs fréquences appliquées, et pour 0.2 $g_{rms}$ d'accélération. . . . .	70
5.4	Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour différentes accélérations appliquées et pour une fréquence de 5 Hz. . . . .	71

5.5	Variation de la tension après 10 s de fonctionnement au niveau de $C_{res}$ initialisé avec 2 V, en fonction de la fréquence appliquée, et pour différentes accélérations. . . . .	72
5.6	Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour des inclinaisons négatives (a) puis positives (b) avec 5 Hz d'excitation et 0.2 $g_{rms}$ d'accélération. . . . .	73
5.7	Évolution de la tension après 10 s de fonctionnement au niveau de $C_{res}$ , initialisé avec 2 V en fonction de la fréquence, pour différentes distances minimales $d_{min}$ entre les électrodes. . . . .	75
5.8	Modèle dynamique pour l'analyse dynamique en utilisant une raideur continue en fonction de la position. . . . .	76
5.9	Composante $F_k$ de la force de rappel . . . . .	77
5.10	Comparaison portrait de phase pour une accélération de 0.2 $g_{rms}$ pour le modèle continu et discontinu. . . . .	79
5.11	Comparaison de la variation de $\dot{x}_{rms}$ par rapport à la fréquence appliquée pour une accélération de 0.2 $g_{rms}$ pour le modèle continue et discontinue. . . . .	80
5.12	Solution en régime permanent du modèle continue du récupérateur d'énergie vibratoire pour $\epsilon = 0.05$ . Les solutions stables sont représentées par des traits continus et celles instable par des traits discontinus. . . . .	84
6.1	Méthodes de variation de capacités employées dans la littérature. (a) et (c) font référence au système à fermeture de gap alors que (b) et (d) montrent le système de variation de capacité par superposition de zone. . . . .	88
6.2	Représentation des armatures à dentures triangulaires et paramètres géométriques associés. . . . .	89
6.3	Évolution de $C_{max}$ (a) et $C_{min}$ (b) produite en fonction de l'angle d'inclinaison $\alpha$ et variation engendré du ratio de capacité $\eta$ (c). . . . .	92
6.4	Variation de l'écart $g_0$ en fonction de l'angle d'inclinaison $\alpha$ . . . . .	93

6.5	Variation de la capacité entre deux armatures à dentures triangulaires par rapport à la position pour différents angles d'inclinaisons $\alpha$ . . . . .	94
6.6	Variation de capacité par rapport à la position entre deux armatures utilisant les techniques de fermeture de gap (a) et de superposition de zone (b), conservant les proportions d'armatures décrits. . . . .	95
6.7	Simulation du champ électrique apparaissant entre les dentures opposées.	96
6.8	Comparaison dans les mêmes conditions entre la variation de capacité produite de manière analytique et numérique par rapport à la position.	97
6.9	Conception et Modélisation du générateur électrostatique intégrant les dentures triangulaires (a) et zoom sur la nouvelle conception d'armatures (b). . . . .	98
6.10	Générateur électrostatique à dentures triangulaires fabriqué et placé sur le pot vibrant. . . . .	98
6.11	Validation de la variation de capacité de $C_{bc}$ (a) et $C_{ba}$ (b) mesurée expérimentalement et calculée numériquement. . . . .	99
6.12	Simulation de l'évolution de l'énergie accumulée $E$ au niveau du condensateur de stockage $C_{res}$ par rapport au nombre de cycles (a), et puissance résultante $P$ (b) pour le dispositif intégrant les dentures triangulaires et celui à plaques parallèles ayant les mêmes dimensions pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	101
6.13	Évolution de l'énergie par cycle en fonction de la tension $V_{res}$ pour le nouveau dispositif proposé et celui à plaques parallèle ayant les mêmes dimensions pour 5 Hz et 0.2 $g_{rms}$ . . . . .	102
6.14	Circuit électrique de la pompe de charges à contacteurs mécaniques. . .	103
6.15	Comparaison entre la variation de capacité volumique de $C_{bc}$ (a) et de $C_{ba}$ (b) par rapport au temps pour les deux dispositifs fabriqués . . . .	104

6.16 Performances des récupérateurs fabriqués, configurés en tant que pompe de charge à contacteurs mécaniques, présentés à travers l'évolution de la tension au niveau du condensateur de stockage $C_{res}$ (a), la variation de l'énergie volumique (b) et la puissance volumique engendrée (c). . . . .	105
---	-----

# Liste des tableaux

2.1	Tableau de comparaison des points forts et points faibles de chaque type de transducteur. . . . .	23
2.2	Mise en évidence des performances de quelques récupérateurs d'énergies vibratoires à transducteurs électrostatiques, basés sur le doubleur de <i>Bennet</i> . . . . .	27
4.1	variables utilisées pour simuler le comportement du générateur électrostatique et leurs valeurs correspondantes. . . . .	55
5.1	Paramètres utilisées pour simuler le comportement du dispositif en utilisant la méthode de Runge-Kutta ainsi que leurs valeurs correspondante. . . . .	79
6.1	Définition et valeurs des variables géométriques des armatures à dentures triangulaires. . . . .	92

# Chapitre 1

## Introduction générale

Quand on parle d'énergie renouvelable, on évoque souvent les énergies solaire et éolienne, connues et largement employées dans notre société. En réalité, ces dernières ne font pas l'unanimité. Un grand nombre de sources d'énergies pouvant être exploitées par l'homme existe dans la nature. Chacune d'entre elles présente des spécificités les rendant adaptées pour une exploitation bien précise. Parmi ces dernières, on trouve l'énergie vibratoire ambiante, produite par tout corps produisant des vibrations.

Dans ce chapitre d'introduction nous définirons le terme d'énergie vibratoire et nous analyserons les avantages liés à l'utilisation de cette dernière par rapport aux autres sources d'énergies renouvelables connues. Nous présenterons par la suite des exemples d'utilisation de cette énergie dans la vie courante. Enfin, nous exposerons la contribution qu'on propose dans ce sens.

### 1.1 La récupération d'énergie

De nos jours, l'énergie est devenue l'un des piliers de la société moderne. On l'utilise d'une manière quotidienne sans que nous nous en rendions compte. Les énergies fossiles tels que le pétrole ou le gaz naturel dominant largement le marché, malgré les dégâts



importants qu'ils engendrent sur l'environnement [1, 2]. Cependant, des solutions énergétiques alternatives doivent impérativement être trouvées vu que les réserves de ces dernières ne vont plus tarder à être épuisées.

Dans ce sens, on a forgé l'expression "la récupération d'énergie" [3]. Cela signifie l'extraction de l'énergie directement de l'environnement ambiant et la convertir en énergie électrique exploitable.

Pour accéder à cette énergie ambiante, il faut passer par 4 étapes, comme le montre la Figure 1.1.

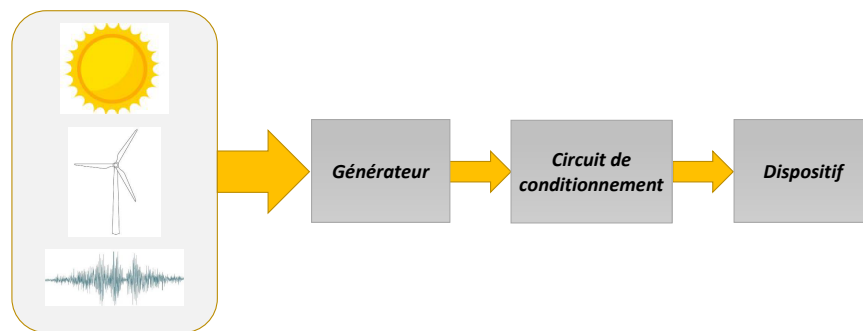


FIGURE 1.1 – Processus d'exploitation des énergies renouvelables.

Tout d'abord, il faut disposer dans un environnement donné d'une source d'énergie ambiante telles que l'énergie solaire, éolienne, géothermique ou vibratoire, etc.. [4, 5]. Une partie de l'énergie contenue dans l'une de ces sources sera captée et convertie par la suite en énergie électrique à travers un générateur. Enfin, avant que l'énergie ne soit exploitée par des dispositifs, un circuit de conditionnement est nécessaire pour l'adapter.

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelables, tout l'intérêt a été porté ces dernières décennies particulièrement sur les deux énergies solaire et éolienne, lesquelles ont vu leurs technologies évoluer très vite [6]. En effet, les panneaux solaires et les générateurs éoliens visent une utilisation de plus en plus diversifiée et ont vu leur rendement augmenter de plus en plus vite.

L'évolution et le perfectionnement des technologies de l'électronique, ainsi que celles des *MEMS* (Micro Electro-Mechanical Systems) ont permis le développement de dispositifs à très faible consommation d'énergie comme les lecteurs mp3, les capteurs, les afficheurs, etc. De telles performances ont conduit la communauté scientifique à réfléchir sur une nouvelle source d'énergie non encore exploitée jusque-là, en vue d'alimenter ces dispositifs électroniques et les rendre surtout beaucoup plus autonomes. Il s'agit d'utiliser l'énergie vibratoire ambiante [7, 8].

Cette énergie se trouve partout autour de nous, allant des équipements domestiques aux moyens de transport, en passant par les ponts et les structures. Autrement dit, tout corps en mouvement est en mesure de produire l'énergie vibratoire [9].

Parmi les dispositifs électroniques à faible consommation, il y a ceux dont le processus de chargement ou de changement de leurs batteries est difficile, voire impossible dans certains cas. Dans ce sens, on peut donner l'exemple des pacemakers, des capteurs inter-corporels ou des capteurs placés à l'intérieur des poutres en béton. L'accès périodique à ces derniers pour un rechargement ou un remplacement de batterie n'est pas envisageable. Ces composants doivent alors générer leur propre énergie à partir de leurs propres vibrations.

Un récupérateur d'énergie vibratoire pourra ainsi être utilisé, seul ou de manière complémentaire avec une batterie, afin de fournir l'énergie nécessaire au bon fonctionnement du composant électronique [10].

## 1.2 Exemple d'application de l'énergie vibratoire dans la vie courante

Un grand nombre d'applications dans la vie courante peut exploiter l'énergie vibratoire ambiante comme source d'énergie. En effet, cette dernière se trouve partout

autour de nous et peut alimenter en énergie les dispositifs électroniques à faible consommation. Son utilisation peut être autant dans le domaine médical que dans le domaine des ponts et chaussées, en passant par l'internet des objets.

L'intérêt d'utiliser cette source d'énergie n'est pas seulement d'ordre économique, mais aussi environnemental. En effet, la limitation de l'utilisation des batteries permet non seulement de réduire les coûts relatifs à leur mise en place, mais aussi de limiter les dégâts environnementaux qu'elles causent après leur usage [11].

Dans cette section, on examinera quelques applications de l'énergie vibratoire ambiante dans la vie courante :

#### **Télécommande de téléviseur sans piles :**

Un grand nombre de dispositifs électroniques qu'on utilise de façon quotidienne comme les téléviseurs, les lecteurs DVD, et les consoles de jeux se contrôlent par des télécommandes alimentées par des piles. Dans chaque maison, on trouve au moins de 2 ou 3 télécommandes, voire plus. Le recours aux vibrations pour alimenter en énergie les télécommandes peut s'avérer une option efficace pour assurer une autonomie d'utilisation performante.

Dans ce cadre, une entreprise de nom de *Arveni*, spécialisée dans la conception et la production de micro générateurs, a conçu en 2011 une télécommande de téléviseur qui utilise l'énergie vibratoire pour s'alimenter et assurer toutes les fonctionnalités sans avoir recours à aucune autre source d'énergie externe [12].



FIGURE 1.2 – Télécommande à énergie vibratoire de marque *Arveni* [12].

**Lampe de poche à induction :**

La lampe de poche à induction, aussi appelée lampe de Faraday, est un exemple de l'utilisation d'une excitation mécanique pour produire de l'énergie. Ce dispositif permet de convertir des oscillations mécaniques en électricité pour alimenter une lampe [13]. Le système permet donc d'obtenir une source de lumière en secouant la lampe. Cette dernière peut s'avérer très pratique pour un large spectre d'usages. Pour fonctionner, la lampe de Faraday contient un générateur électrique linéaire qui charge une batterie semblable à un super-condensateur. Lorsque la lampe est secouée dans le sens de la longueur, un aimant coulissant se déplace et oscille tout le long d'une bobine formant un circuit fermé. Suite à la loi d'induction de Faraday, un courant est induit dans la bobine. L'énergie récupéré permet alors d'alimenter une lampe.



FIGURE 1.3 – Lampe à induction [13].

**capteurs sans-fil :**

En raison de leur faible consommation d'énergie, et de leur caractère autonome, les capteurs sans-fil sont parmi les applications les plus adaptées à utiliser l'énergie vibratoire ambiante comme source d'énergie. En effet, cela leur donne la capacité de se passer d'une source d'énergie extérieure ou d'un changement de batterie, ce qui aura l'avantage de réduire le coût lié à leur exploitation et faciliter ainsi leur utilisation dans un environnement où l'accès est difficile.

On trouve actuellement un certain nombre d'entreprises qui produisent des capteurs sans-fil alimentés par l'énergie vibratoire ambiante.

Parmi eux, on cite d'abord *EnOcean*. Cette entreprise a créé un récupérateur d'énergie vibratoire ambiante nommé *ECO 200*. Le dispositif dont la taille est de 3 cm x 2 cm x 0.7 cm, permet de générer une tension de 2 V pour une énergie allant jusqu'à 210  $\mu\text{J}$  [14]. Ce générateur, destiné à alimenter un module radio produit par la même entreprise, se base sur un oscillateur linéaire.

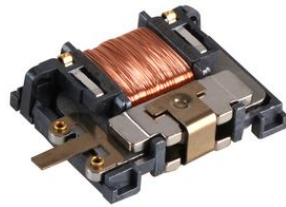


FIGURE 1.4 – Récupérateur d'énergie vibratoire ambiante *EnOcean* [14].

Attirées par ce marché fort fructueux, d'autres entreprises se sont spécialisées dans la conception et la fabrication des récupérateurs d'énergie vibratoire pour le marché des micro-capteurs. C'est le cas de *MicroStrain*. Cette dernière a créé un récupérateur d'énergie vibratoire nommé *MVEH* (MagnetoInductive Vibration energy harvester) [15]. Pour une accélération de 0.2 g et une fréquence comprise entre 15 Hz et 60 Hz, ce générateur permet de fournir une tension de 3.2 V pour une puissance allant à 4 mW.



FIGURE 1.5 – Récupérateur d'énergie vibratoire ambiante *MicroStrain MVEH* [15].

Toutefois, ces applications peuvent rencontrer des problèmes de performances dans le cas où la fréquence de résonance ne coïncide pas avec la fréquence du milieu. Leur rendement chute et leur utilisation peut être obsolète. Pour remédier à ce problème, une nouvelle technologie est apparue ces dernières années permettant de récupérer l'énergie vibratoire en basse fréquence et avec une large bande passante.

### 1.3 Motivation

Un récupérateur d'énergie vibratoire est composé principalement d'un oscillateur, d'un transducteur et d'un circuit de conditionnement [16, 17].

L'oscillateur se constitue généralement, comme le montre la Figure 1.6, d'une masse reliée à la base par un ressort de rigidité  $k$  et par un amortisseur de coefficient d'amortissement  $c$ . La présence de vibrations dans l'entourage de celui-ci entraînera un mouvement oscillatoire amplifié de la masse dans le cas où la fréquence des vibrations de ce milieu correspond à la fréquence de résonance de l'oscillateur.

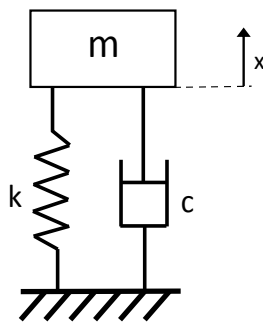


FIGURE 1.6 – Représentation de l'oscillateur linéaire.

Afin d'entamer ce mouvement oscillatoire pour des applications de récupération d'énergie vibratoire ambiante, les méthodes utilisées jusque-là consistent principalement à faire correspondre la fréquence de résonance de l'oscillateur avec celle de son milieu, en agissant sur l'un des paramètres définissant la fréquence de vibration, comme

le montre l'Équation 1.1.

$$w_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.1)$$

Le système décrit ci-dessus est nommé système linéaire. Il permet de récupérer l'énergie vibratoire dans une fréquence bien déterminée. Il est nécessaire alors de connaître préalablement la fréquence à laquelle le dispositif fonctionnera pour faire correspondre sa fréquence de résonance avec celle du milieu environnant.

L'oscillateur linéaire présente des limites qui l'empêchent d'être exploité dans des applications à grande échelle [18]. Cela pour deux raisons principales :

En premier lieu, le fait de calibrer la fréquence de résonance avec la celle du milieu, réduit l'utilisation de ce système sur des plages très restreintes. Là, il est important de souligner qu'une variation même minime de l'excitation du milieu entraîne un décalage entre les deux fréquences. Ce qui aura pour effet de faire chuter le rendement du dispositif de manière importante et d'entraîner même l'arrêt du mouvement oscillatoire.

En second lieu, les oscillateurs linéaires de petite taille sont conçus pour récupérer l'énergie dans les hautes fréquences. Or la majorité des vibrations qu'on trouve dans la nature sont dans l'ordre des basses fréquences (<20Hz). Ce qui signifie que les récupérateurs dont nous disposons jusque-là sont peu fiables quant il s'agit de fonctionner dans un environnement naturel.

Ces limitations ont conduit la communauté scientifique à réfléchir sur de nouveaux concepts afin de résoudre ces problèmes. C'est dans cette perspective que l'oscillateur non linéaire est né [19]. Ce dernier permet de récupérer l'énergie en basse fréquence et sur une large bande passante. Les oscillateurs non linéaires peuvent être décomposés en plusieurs familles : 'l'oscillateur Duffing' [20], 'l'oscillateur à impact' [18] et 'l'oscillateur en réseau' [21].

Une fois un mouvement d'oscillation de la masse est obtenu, Un transducteur permet de convertir cette énergie mécanique en énergie électrique. La conversion d'énergie s'effectue en utilisant soit le principe de l'électrostatique [22], de l'électromagnétique [23] ou celui du piézoélectrique [24].

Il est vrai que de point de vue du rendement, les transducteurs électromagnétiques sont adaptés à des applications à l'échelle macroscopique. Leur réalisation se base sur l'utilisation d'aimants et de bobines. Le fait d'implémenter cette technologie à la micro-échelle pour l'adapter aux composants électroniques fonctionnels, s'avère difficile à réaliser. Dans le cas de réduction d'échelle, leur rendement chute rapidement.

Les transducteurs piézoélectriques se basent sur le principe de génération de charges par déformation d'un matériau spécifique. Les dits transducteurs peuvent être adaptés pour une utilisation à l'échelle microscopique. Cependant, le coût de leur mise en oeuvre reste important et demande des techniques de fabrication avancées.

Les transducteurs électrostatiques sont donc les plus adaptés pour notre utilisation afin d'alimenter des micro-capteurs autonomes à faible consommation d'énergie. En effet, ces derniers sont faciles à fabriquer à l'échelle microscopique et procurent une intégration simple avec les composants électroniques.

Les transducteurs électrostatiques se basent sur la variation d'une ou de plusieurs capacités variables pour générer de l'électricité. Des machines électrostatiques ont alors été développées permettant de convertir l'énergie vibratoire ambiante en énergie électrique [25]. Le doubleur de *Bennet*, développé deux siècles auparavant par *Abraham Bennet* est sans doute le système qui attire le plus d'attention de la part de la communauté scientifique pour les avantages qu'il présente [26].

### **Objectifs :**

Après avoir présenté les différentes contraintes liées à la récupération de l'énergie vibratoire ambiante, on propose dans cette étude des techniques susceptibles de les surmonter afin de permettre la récupération de l'énergie quel que soit l'environnement auquel on est confronté.



Pour ce faire, on a décidé de concevoir, d'étudier et d'optimiser un générateur à transducteur électrostatique, basé sur le dédoublement de charge introduit par *Bennet*, et pouvant convertir l'énergie vibratoire en basse fréquence et en large bande passante.

## 1.4 Organisation du manuscrit

Après avoir présenté les motivations nous incitant à réaliser cette étude, nous commençons par l'analyse des travaux sur la récupération d'énergie vibratoire réalisés antérieurement.

Par la suite, nous procédons à la modélisation et à l'analyse de notre nouveau générateur électrostatique. Nous détaillons alors le principe de conversion d'énergie adopté pour notre système et nous présentons l'algorithme simulant son fonctionnement.

Une fois terminé, nous exposons le récupérateur d'énergie vibratoire ambiante fabriqué et nous validons le modèle développé numériquement par confrontation des résultats avec ceux trouvés expérimentalement, et nous détaillons ses caractéristiques de fonctionnement et ses performances.

Ainsi, nous pouvons analyser le fonctionnement et le comportement dynamique du système à travers la modification des paramètres extérieurs au récupérateur, et ce dans une logique d'optimisation.

Enfin, dans la même optique d'amélioration, nous essayons d'optimiser encore le fonctionnement de notre dispositif en agissant sur la variation de capacité par l'introduction d'une nouvelle géométrie d'électrodes basée sur des dentures triangulaires.

# Chapitre 2

## Etude bibliographique

Le développement des dispositifs électroniques à faible consommation d'énergie a incité ces dernières années la communauté scientifique à se tourner vers l'exploitation de l'énergie vibratoire ambiante, présente partout autour de nous et permettant non seulement d'alimenter en énergie ces nouveaux dispositifs, mais aussi de les rendre beaucoup plus autonomes.

Un récupérateur d'énergie vibratoire se compose d'un oscillateur permettant de traduire les vibrations externes en un mouvement répétitif, d'un transducteur qui transforme l'énergie mécanique de l'oscillateur en énergie électrique et d'un circuit de conditionnement qui permet d'adapter l'énergie récupérée et de la stocker.

Nous analyserons dans ce chapitre les principaux oscillateurs utilisés par la communauté scientifique et nous mentionnerons les caractéristiques de chacun d'entre eux. Nous nous intéresserons par la suite aux transducteurs développés ainsi qu'à leur mode d'emploi. Enfin, nous décrirons les principaux circuits de conditionnements utilisés pour les transducteurs électrostatiques.

## 2.1 Oscillateurs mécaniques

L'un des premiers récupérateurs d'énergie vibratoire ambiante à être fabriqué, est développé en 1996 par *Williams* et *Yates* [27]. Il s'agit d'un récupérateur à base d'oscillateur linéaire permettant de récupérer l'énergie vibratoire quand la fréquence du milieu correspond à la fréquence de résonance du dispositif. En effet, cet oscillateur se compose principalement d'une masse reliée à un ressort et un amortisseur. La présence de vibrations dans le milieu ambiant entrainera l'élément mobile en mouvement quand le système se trouve excité à proximité de sa fréquence de résonance.

Depuis, un ensemble de chercheurs se sont aussi penchés sur la question afin de rendre cette technologie plus optimisée et adaptée à nos besoins. C'est le cas de *Glynn-Jones* [28], *Roundy* [29] et *Cottone* [30]. Leurs travaux sur la récupération de l'énergie vibratoire ambiante à base d'oscillateur linéaire ont permis le développement et la diffusion de celle-ci au sein de la communauté scientifique. Le système développé pour récupérer cette énergie a donné la possibilité à ces derniers de générer jusqu'à quelques mW de puissance [31].

Dans la nature, les vibrations ambiantes sont de faible fréquence ( $<20$  Hz) et sont distribuées sur des larges bandes [32]. Les caractéristiques des oscillateurs linéaires induisant une récupération d'énergie vibratoire dans une haute fréquence et sur une plage restreinte proche de leur fréquence de résonance, rendent donc ces oscillateurs inadaptés pour une application dans les milieux ambiants naturels [33].

Pour remédier à ces problèmes, une nouvelle technologie d'oscillateurs a été développée [34]. Ces derniers permettent de récupérer l'énergie vibratoire ambiante en basse fréquence et sur une large bande. Pour y arriver, ces récupérateurs se basent sur un ensemble de mécanismes. On peut alors les diviser en 3 familles : l'oscillateur en réseau, l'oscillateur Duffing et l'oscillateur à impact.

### 2.1.1 Oscillateur en réseau

Ce type d'oscillateur se base sur l'utilisation de plusieurs sous-oscillateurs mécaniques rassemblés dans un seul dispositif, tel que chacun d'entre eux possède une fréquence de résonance propre à lui [35] [36]. Cela permet de couvrir une grande plage de fréquence exploitable pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante [21]. Ces composants sont choisis de telle sorte que leurs fréquences de résonance se succèdent. Ainsi, on récupère l'énergie sur une large bande successive.

La fréquence de résonance de chacun d'entre eux est calibrée, en agissant sur la raideur du ressort ou sur la valeur de la masse maintenue. A chaque fréquence comprise dans la plage sélectionnée, un des sous-oscillateurs oscille à sa fréquence de résonance [37].

*Sari* a proposé en 2008 un récupérateur d'énergie vibratoire large bande [38] créé à partir de poutres encastrées-libres assemblées l'une à côté de l'autre, comme le montre la Figure 2.1. La fréquence de résonance de chacune d'entre elles est calibrée en agissant sur la géométrie de la poutre et sur la masse maintenue à son extrémité. Son utilisation est réservée pour les hautes fréquences (entre 4.5 KHz et 5 KHz). Cette limitation rend le système inefficace pour la récupération de l'énergie vibratoire dans les milieux ambiants où les basses fréquences sont dominantes.

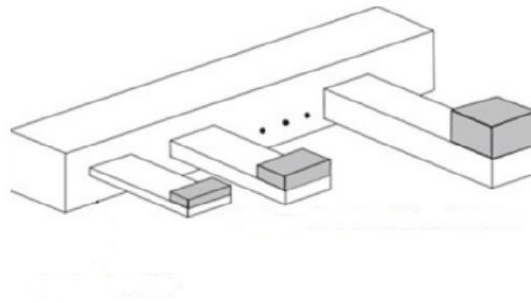


FIGURE 2.1 – Représentation de l'oscillateur développé par *Sari* [38].

Pour remédier à ce problème, *Challa* a proposé une optimisation au dispositif de *Sari*. Celui-ci a développé un récupérateur d'énergie vibratoire ambiante capable de régler sa fréquence de résonance d'une manière autonome [7]. Il se base sur la force magnétique produite par un aimant. Celle-ci agit sur la raideur du système, permettant ainsi de varier la fréquence de résonance.

En utilisant cette technique, l'auteur a pu récupérer l'énergie vibratoire avec une fréquence comprise entre 22 Hz et 32 Hz.

### 2.1.2 Oscillateur Duffing

L'utilisation de l'oscillateur Duffing permet de récupérer l'énergie vibratoire ambiante en basse fréquence et en large bande, en introduisant des ressorts non linéaires [39] [40] ou par l'utilisation d'une force magnétique extérieure qui agit sur la rigidité globale du dispositif [41] [42] [43].

Dans ce sens, *Burrow* a proposé un récupérateur d'énergie vibratoire qui exploite la force magnétique créée par un aimant pour altérer la raideur du ressort linéaire [44]. Facilement réalisable, cette innovation donne la possibilité au système de récupérer l'énergie vibratoire pour une fréquence comprise entre 20 Hz et 60 Hz.

*Mann* a proposé en 2009 un récupérateur d'énergie vibratoire ambiante utilisant un aimant permanent comme masse de l'oscillateur. Celui-ci est maintenu en lévitation magnétique par 2 autres aimants fixés sur la structure, comme le montre la Figure 2.2. La force introduite permet de régler la fréquence de résonance du système, en variant la distance entre les aimants immobiles supérieurs et inférieurs [45].

Après la réalisation de ce dispositif, l'auteur a montré que l'introduction de la lévitation magnétique dans la récupération de l'énergie vibratoire ambiante a entraîné l'apparition d'excitations importantes sur une large plage de fréquences.

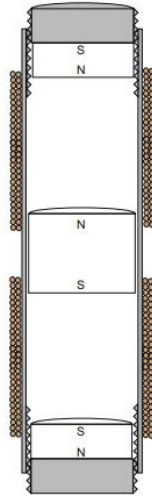


FIGURE 2.2 – Représentation de l’oscillateur à lévitation magnétique développé par Mann [45].

### 2.1.3 Oscillateur à impact

L’oscillateur à impact se base sur l’utilisation de butée de fin de course mécanique pour limiter le déplacement de la masse mobile [46] [47]. L’utilisation de cette technique permet de convertir la raideur globale du dispositif d’une fonction linéaire en une fonction discontinue. Cela favorisera la diminution de la fréquence d’utilisation et entraînera une amélioration du rendement de récupération d’énergie [48] [49].

*Soliman* a conçu un récupérateur d’énergie vibratoire piézoélectrique doté d’une butée de fin course. Son dispositif se compose d’une masse fixée sur une poutre encastrée-libre et qui oscille suite aux excitations externes [50]. L’existence de la butée au-dessus de celle-ci, engendre un changement de raideur au moment du contact. Cela entraîne une récupération d’énergie vibratoire sur des bandes de fréquence plus grandes [51]. La représentation de ce récupérateur est mentionnée dans la Figure 2.3.

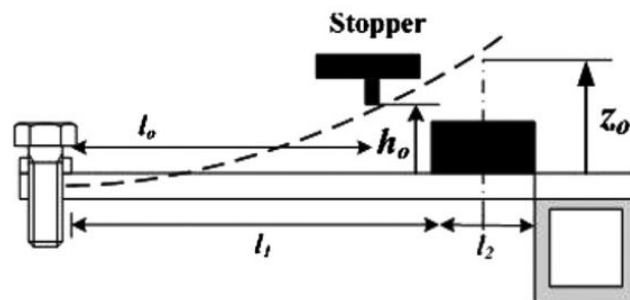


FIGURE 2.3 – Représentation de l'oscillateur à impact développé par *Soliman* [50].

De son côté, *Bendam* propose aussi un récupérateur d'énergie vibratoire ambiante électromagnétique se basant sur la technique de l'oscillateur à impact [52]. Le système qu'il propose est composé d'une masse mobile qui oscille suite aux vibrations externes entre 2 butées de fin de course mécanique moyennant un roulement linéaire placé en dessous, comme l'illustre la Figure 2.4. L'absence de ressort au cours du déplacement de la masse mobile et le recours à 2 butées de fin de course nous emmène vers un dérivé de l'oscillateur à impact dit "à masse libre". A coté de son avantage pour fonctionner à partir de 5 Hz d'excitation et sur une bande allant à 8 Hz, le système développé permet d'atteindre des puissances importantes allant à 12 mW pour une accélération appliquée de 0.5 g.

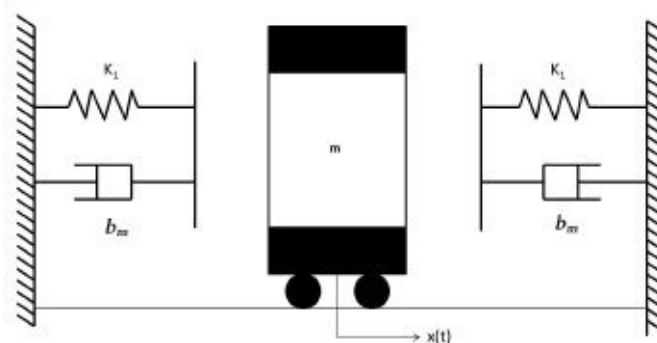


FIGURE 2.4 – Représentation de l'oscillateur à impact développé par *Bendam* [52].

## 2.2 Les différents types de transducteurs

Le principe de la récupération de l'énergie vibratoire ambiante est basé sur l'acquisition du mouvement de la masse mobile de l'oscillateur. Pour convertir l'énergie du domaine mécanique au domaine électrique, on se base sur ce déplacement alterné.

On distingue 3 grandes familles de transducteurs pouvant convertir l'énergie vibratoire en énergie électrique moyennant l'oscillation de la masse. Il s'agit des transducteurs électrostatiques, électromagnétiques et piézoélectriques.

Chacun d'entre eux exploite un phénomène physique particulier le rendant adapté à des conditions d'utilisations spécifiques. Le choix du type de transducteur à implémenter dépend du milieu d'utilisation, de la taille globale du dispositif et de la quantité d'énergie nécessaire à convertir.

Nous proposons une description détaillée, ainsi qu'une comparaison entre ces trois différents types de transducteurs.

### 2.2.1 Transducteur électromagnétique

Les transducteurs électromagnétiques se basent sur le principe d'induction électromagnétique. La loi de Faraday mentionne qu'un courant électrique est induit dans chaque circuit électrique fermé quand un champ magnétique le traverse [53] [54].

Dans la pratique, un transducteur électromagnétique est constitué principalement d'une bobine, d'un aimant pouvant se déplacer permettant de générer le champ magnétique et d'une résistance faisant office de charge, et ce comme mentionné dans la Figure 2.5.

Le déplacement relatif de l'aimant à l'intérieur de la bobine génère un courant dans cette dernière. L'utilisation de ce transducteur pour des applications de récupération d'énergie vibratoire ambiante consiste à associer l'aimant à la masse de l'oscillateur, et à le placer à proximité d'une bobine formant un circuit fermé.



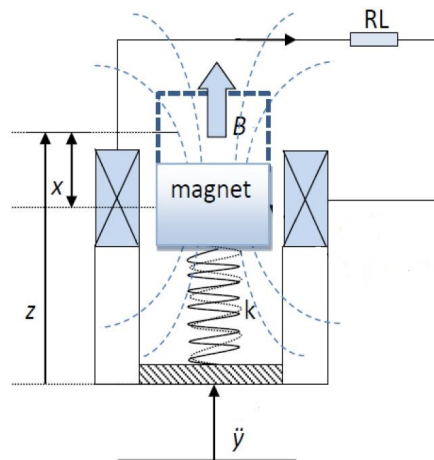


FIGURE 2.5 – Représentation du transducteur électromagnétique [55].

*Bursa* a développé un récupérateur d'énergie vibratoire à transducteur électromagnétique macroscopique ayant la capacité d'atteindre une puissance de 32 mW pour une fréquence de 44 Hz [55]. Dans cette démarche, *Bendam* a développé un autre transducteur électromagnétique où une bobine est placée entre deux aimants. Cette technique lui a permis d'atteindre 5 mW de puissance pour une fréquence d'excitation de 5 Hz [52] [56].

Il est vrai que l'utilisation du transducteur électromagnétique permet de récupérer une énergie importante à l'échelle macroscopique. Cependant, son rendement faible à l'échelle microscopique [57] et son implémentation délicate à cette échelle le rend inadapté pour des applications dans le domaine des *MEMS*.

## 2.2.2 Transducteur Piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont des composants qui produisent une différence de potentiel s'ils sont déformés, et se déforment quand ils sont polarisés [50] [58]. On les trouve sous forme de mono ou de poly-cristal.

Initialement, l'effet piézoélectrique est adopté pour convertir les contraintes mécaniques en énergie électrique ou inversement. Pour des applications de récupération d'énergie vibratoire ambiante, on utilise une poutre encastré-libre sur laquelle on fixe une pastille piézoélectrique au dessus de celle-ci et une masse à son extrémité comme le montre la Figure 2.6 [59]. Quand le dispositif est soumis à des vibrations externes, la masse ajoutée commence à osciller. Cela engendre une déformation mécanique de la poutre et donc du patch piézoélectrique, Ce qui a pour conséquence de générer de l'énergie électrique.

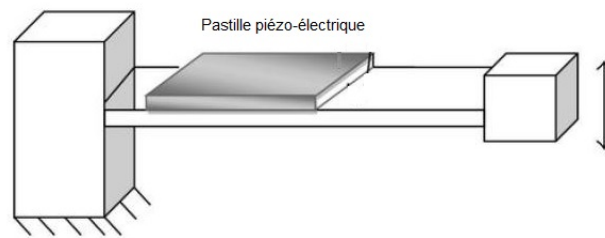


FIGURE 2.6 – Représentation du transducteur piézoélectrique [59].

Ce genre de dispositif est conçu initialement pour récupérer l'énergie vibratoire autour de la fréquence de résonance du dispositif. D'autres travaux d'optimisation ont été réalisés, comme c'est le cas de *Lefevre* qui a atteint une puissance récupérée 400 fois plus importante que le système classique [60].

Il est vrai que l'utilisation du transducteur piézoélectrique permet d'obtenir une énergie suffisante pour alimenter des micro-systèmes électroniques. Cependant, les contraintes de fabrication et d'intégration nécessitent des moyens importants [61] [62].

### 2.2.3 Transducteur électrostatique

Les transducteurs électrostatiques se basent sur la variation de capacité pour générer de l'énergie électrique. Celle-ci est produite grâce à un mouvement relatif d'une plaque conductrice par rapport à une autre, formant une capacité variable, et séparée par l'air, le vide ou par un autre diélectrique [63] [64].

Pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante à l'aide des transducteurs électrostatiques, un mouvement d'oscillation d'une plaque conductrice est produit suite aux vibrations externes. Cela entraîne un mouvement relatif entre les deux plaques constituant la capacité variable [65]. Par conséquent, la valeur de la capacité fait évoluer les charges aux bornes de celle-ci [66] [67].

Pour maximiser le rendement des transducteurs électrostatiques, on agit soit sur la surface commune entre les deux électrodes constituant la capacité variable, soit sur l'écart qui les sépare, et ce comme mentionné dans l'Équation de la capacité 2.1 [66] :

$$C = \frac{\epsilon S}{e} \quad (2.1)$$

tel que  $C$  est la valeur de la capacité engendrée,  $\epsilon$  la permittivité du diélectrique,  $S$  la surface en vis-à-vis des électrodes et  $e$  la distance entre les électrodes.

On distingue dans la littérature plusieurs optimisations apportées sur le transducteur électrostatique afin d'améliorer ses performances.

Le système de variation de capacité par variation de la surface commune est nommé "Superposition de zone" [68]. Cette dernière surface évolue à travers le déplacement d'une électrode par rapport à l'autre dans le sens tangentielle des plans. En utilisant cette technique, la capacité maximale atteignable reste faible par rapport au système de variation de capacité se basant sur l'évolution d'écart entre les deux électrodes "Fermeture de gap" [69] [70]. Dans ce dernier principe, l'armature mobile se déplace dans le sens normal par rapport aux surfaces.

Un dispositif combinant les deux principes a aussi été développé par *Li* [71], permettant d'exploiter les avantages de chaque géométrie.

Pour améliorer les performances du dispositif, *Basset* propose d'utiliser une géométrie d'électrodes à dentures droites qui permet d'augmenter la surface commune entre les deux électrodes [72].

*Lu* et *Hofmann* proposent encore une amélioration des performances à travers l'intégration de dentures triangulaires dans les électrodes permettant d'obtenir une variation en même temps de la surface commune et de l'écart entre les deux électrodes formant la capacité variable [73] [74].

En utilisant la géométrie à dentures triangulaires, on peut bénéficier des avantages liés à l'utilisation des autres techniques.

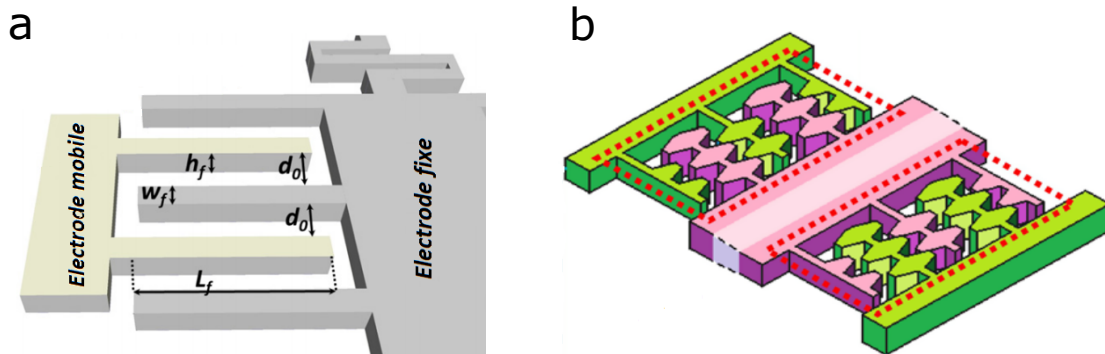


FIGURE 2.7 – Transducteur électrostatique à dentures droites (a) [72] et à dentures triangulaires (b) [73].

L'énergie récupérée à travers un transducteur électrostatique est proportionnelle au rapport de variation de capacité  $\frac{C_{max}}{C_{min}}$ . Il est vrai que l'utilisation de ce dernier transducteur ne permet pas d'atteindre un niveau d'énergie comparable au transducteur électromagnétique, mais son implémentation facilement réalisable à l'échelle microscopique le place aux premiers rangs des transducteurs utilisés dans le domaine des MEMS [25].

### **Intégration du principe de la triboélectricité :**

La triboélectricité est un phénomène physique qui consiste à l'apparition d'un transfert de charges entre deux matériaux de nature différente. Ce principe se réalise lorsque ces deux derniers sont mis en contact [75].

Les charges transférées s'acheminent du matériau ayant le moins d'affinité électronégative vers celui ayant le plus d'affinité selon leur classification dans la Table triboélectrique des matériaux. La quantité transmise dépend principalement de la surface de contact entre les deux matériaux ainsi que de la nature de ces derniers [76] [77].

Récemment, *Wang* a utilisé ce principe pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante [78]. Se basant sur cette technique, un grand nombre d'applications peuvent être envisageables comme par exemple l'exploitation des vibrations induites par les océans [79]. Associer des patches triboélectriques avec des transducteurs électrostatiques, nous donne la possibilité de générer une quantité supplémentaire de charges [80]

#### **2.2.4 Comparaison des transducteurs**

Le choix du type de transducteur à utiliser dépend de l'application demandée et de son environnement. Chaque système présente des caractéristiques spécifiques le rendant performant dans certaines circonstances [17]. Le Tableau 2.1 ci-dessous résume les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation de chaque type de transducteur.

TABLE 2.1 – Tableau de comparaison des points forts et points faibles de chaque type de transducteur.

<b>Transducteur</b>	<b>Point fort</b>	<b>Points faible</b>
Électromagnétique	- Énergie récupérée importante - s'adapte à divers environnements	- Performances très faibles à petite échelle - Fabrication et assemblage délicat
Piézoélectrique	- Compatible avec les MEMS - Energie récupérée importante	- Coût de mise en oeuvre important - Durée de vie limitée suite aux contraintes de fatigues imposées
Électrostatique	- Fabrication simple - Peut être miniaturisé	- Nécessite une source de tension extérieure de pré-charge - Faible énergie récupérée

## 2.3 Circuits de conditionnement des transducteurs électrostatiques

Après avoir décrit et analysé les caractéristiques des différents transducteurs utilisés, nous proposons de nous intéresser aux transducteurs électrostatiques pour les opportunités d'amélioration qu'ils offrent.

Se basant sur la variation de capacité produite entre deux armatures afin de créer de l'énergie, ce système nécessite un circuit de conditionnement afin d'adapter l'énergie convertie du domaine mécanique au domaine électrique. On analysera alors dans cette section quelques circuits relatifs aux transducteurs électrostatiques.

### 2.3.1 La pompe de charge

Parmi les circuits de conditionnement destinés aux transducteurs électrostatiques, on trouve la pompe de charge. Moyennant deux étages, ce système permet l'adaptation de l'énergie électrique récupérée principalement à travers l'utilisation d'une alimentation et d'un condensateur de stockage [81] [82].

Lorsque la capacité variable atteint sa valeur maximale, celle-ci se relie à l'alimentation et se charge. Par la suite, la valeur de la capacité décroît suite à l'éloignement d'une armature par rapport à l'autre, induit par les vibrations externes. Dans cette étape, la capacité variable se décharge dans le condensateur de stockage [83]. Ce cycle se répète jusqu'à atteindre une tension optimale au niveau de ce dernier composant. A ce niveau, un deuxième circuit s'active permettant de décharger ce condensateur de stockage avant sa saturation. Ainsi, le cycle se répète de nouveau.

Pour contrôler les différentes étapes du cycle de l'adaptation de l'énergie, on utilise des diodes [84] [85] [25]. Récemment, *Chui* [86] et *Samaali* [87] ont proposé une amélioration au système de pompe de charge classique à travers l'utilisation des contacteurs mécaniques auto-synchronisés à la place des diodes (Figure 2.8), afin de surmonter les problèmes de tension seuil et de courant de fuite existant dans ces composants.

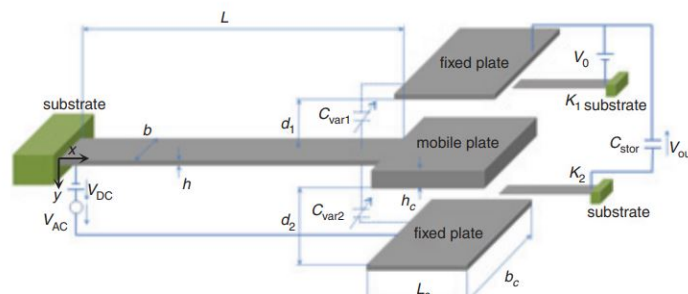


FIGURE 2.8 – Pompe de charge à contacteurs mécaniques introduit par *Samaali* [87].

### 2.3.2 Doubleur de Bennet

Le système de pompe de charge, décrit ci-haut, est communément appelé pompe de charge stable [88] [89] vue que la capacité de stockage se sature après un certain nombre de cycles de fonctionnement.

Une pompe de charge instable, où la capacité de stockage ne se sature pas, a été développée. Elle se base sur le principe de dédoublement de charge introduit par *Abraham Bennet* en 1787 [26]. Ce système permet un accroissement exponentiel de la tension au niveau du condensateur de stockage par rapport au nombre de cycles, moyennant une ou deux capacités variables, suite à une série de raccordements et d'isolements.

Le principe de dédoublement de charge, introduit par *Bennet* et permettant d'observer cet accroissement de tension, se base sur l'utilisation de 3 plaques conductrices nommées A, B et C placées l'une au dessus de l'autre, et dont les surfaces latérales sont couvertes d'un enduit isolant (Figure 2.9). Les charges se multiplient alors au niveau de ces dernières moyennant une séquence de contact bien précise :

On suppose initialement l'existence de charge  $+Q$  dans l'électrode A due au bruit électromagnétique ambiant. Le cycle commence lorsque l'électrode B se positionne près de A. Dans cette configuration, B est reliée à la masse. Suite au phénomène d'influence électrostatique, des charges  $-Q$  apparaissent dans cette dernière.

Par la suite, B se déplace et vient se loger à proximité de l'électrode C. Cette dernière électrode se relie à la masse, et par le même phénomène, des charges opposées à celles existantes dans B apparaissent dans C ( $+Q$ ).

Pour la dernière étape du cycle, l'électrode B revient se positionner près de A et se met à la masse. En même temps, les deux autres électrodes se relient électriquement. Dans cette configuration, suite au phénomène d'influence, les charges opposées à celles existantes dans A et C apparaissent dans B ( $-2Q$ ).

Ainsi, nous avons obtenu la multiplication des charges au niveau des électrodes. Les deux dernières étapes se répèteront par la suite un grand nombre de fois jusqu'à atteindre une haute tension.



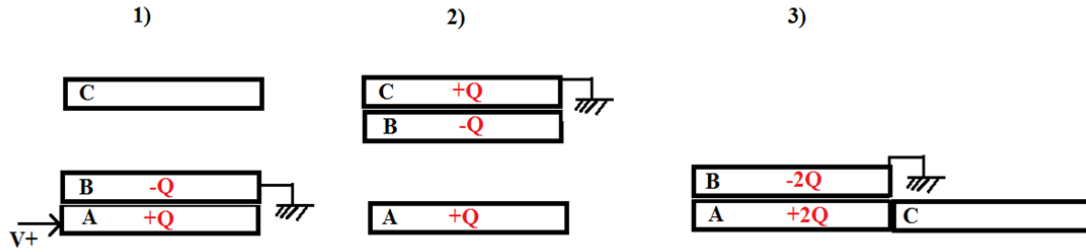


FIGURE 2.9 – Étapes de multiplication de charges du doubleur de *Bennet* [26].

*Queiroz* s'est inspiré de ce principe pour l'appliquer à la récupération de l'énergie vibratoire ambiante [90]. Le système développé se base sur l'utilisation des diodes à la place des contacts effectués manuellement, et ce afin d'automatiser le processus de multiplication des charges. Les résultats obtenus à travers l'utilisation de ce principe ont suscité l'intérêt de la communauté scientifique, poussant *Dorzhiiev* à l'appliquer à un récupérateur d'énergie vibratoire à l'échelle microscopique et fonctionnant à travers une seule capacité variable à dentures droites [91].

Depuis, plusieurs chercheurs s'y sont aussi intéressés afin d'optimiser ces performances. C'est le cas de *Le* à l'échelle microscopique [92] et *Ouanes* à l'échelle macroscopique [93] [94] qui proposent d'une manière indépendante de remplacer les diodes par des contacteurs mécaniques auto-synchronisés afin d'éviter les courants de fuite et la tension de seuil imposée par l'utilisation des diodes [95].

Afin d'améliorer encore les performances des transducteurs électrostatiques basés sur le doubleur de *Bennet*, le recours aux patches triboélectriques a été proposé. En effet, *Ghaffarinejad* propose en [88] d'implémenter ce dernier circuit en se basant sur une seule capacité variable, où les surfaces actives ont été recouvertes par ces patches. *Zhang* propose lui aussi une amélioration dans ce sens [96]. Les résultats obtenus ont permis d'améliorer les performances du récupérateur.

Le tableau 2.2 résume les performances obtenus par quelques auteurs qui ont appliqué ce dernier principe pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante.

TABLE 2.2 – Mise en évidence des performances de quelques récupérateurs d'énergies vibratoires à transducteurs électrostatiques, basés sur le doubleur de *Bennet*.

<b>Auteur</b>	<b>Fréquence d'excitation</b>	<b>Puissance récupéré</b>
<i>Queiroz</i> [90]	17 Hz	12.8 $\mu\text{W}$
<i>Dorzhiiev</i> [91]	150 Hz	2.3 $\mu\text{W}$
<i>ghaffarinejad</i> [88]	5 Hz	455 nW
<i>zhang</i> [96]	5 Hz	50 $\mu\text{W}$

## 2.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exploré différentes techniques employées pour récupérer l'énergie vibratoire ambiante. En effet, exploiter cette énergie nécessite une connaissance du milieu auquel le dispositif sera placé afin de bien choisir l'oscillateur mécanique et le transducteur associé. Dans le cas des transducteurs électrostatiques, quelques circuits de conditionnement ont été présentés, permettant l'amélioration progressive des performances.

Dans ce qui suit, on utilisera le transducteur électrostatique associé au principe de la machine électrostatique développée par *Bennet*, et cela en raison de ses performances et de ses opportunités d'amélioration.

# Chapitre 3

## Le générateur électrostatique : principe et modélisation

Le doubleur de *Bennet* a été inventé il y a deux siècles par *Abraham Bennet* [26]. Ce système permet une multiplication des charges en utilisant trois électrodes métalliques mises en contact successivement. Ce principe est repris par *Queiroz* en utilisant des diodes pour synchroniser les séquences de contacts des électrodes [90].

Dans ce qui suit, on propose un dispositif similaire basé sur un transducteur électrostatique et des contacteurs mécaniques auto-synchronisés. Les contacteurs employés à la place des diodes permettent de supprimer les courants de fuites dans ces derniers composants et annuler leur tension seuil. L'effet triboélectrique est aussi employé afin de démarrer le cycle de conversion plus rapidement à partir du bruit ambiant.

Dans ce présent chapitre, nous commençons par décrire notre générateur électrostatique puis nous détaillons la technique de multiplication des charges.

Enfin, on présente un modèle électromécanique du générateur de charges ainsi que l'algorithme mis en œuvre pour simuler son fonctionnement.

### 3.1 Description du générateur électrostatique à contacteurs mécaniques

La Figure 3.1 mentionne la représentation fonctionnelle du doubleur de charges à contacteurs mécaniques ainsi que son circuit électrique équivalent. Notre dispositif se compose de 3 électrodes ( $A$ ,  $B$  et  $C$ ). Leur disposition est agencée de telle façon que les électrodes  $A$  et  $C$  sont fixes. L'électrode  $B$ , quant à elle, est libre de se déplacer entre les deux autres grâce à l'excitation externe. Le déplacement de cette électrode, assuré par un guidage linéaire, induit la création de deux capacités variables  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ , produites respectivement entre les électrodes  $B-A$  et  $B-C$ . On ajoute au récupérateur un autre condensateur dédié au stockage d'énergie qu'on nomme  $C_{res}$ .

On trouve aussi dans notre dispositif trois contacteurs mécaniques  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  auto-synchronisés avec le déplacement de l'électrode  $B$ . Ces contacteurs interconnectent les trois capacités entre elles lors du déplacement de l'électrode centrale  $B$ , dont le mouvement est produit par les vibrations périodiques externes. Le dispositif permet alors de reproduire le comportement de la machine électrostatique inventée par *Bennet*.

Les contacteurs  $S_1$  et  $S_3$  permettent de relier respectivement  $B$  et  $C$  avec  $C_{res}$ , tandis que  $S_2$  permet de relier  $A$  avec  $C$ . Cela engendre du point de vue électrique l'alternance entre la configuration série et parallèle des trois capacités  $C_{ba}$ ,  $C_{bc}$  et  $C_{res}$ . De plus,  $S_1$  et  $S_3$  jouent aussi le rôle de butées de fin de course et limitent le déplacement de l'électrode  $B$  entre  $A$  et  $C$ .

Une discontinuité de la raideur globale du système est ainsi créée. Notre dispositif se place alors dans la famille des récupérateurs à impact permettant de récupérer l'énergie en basse fréquence et en large bande passante.

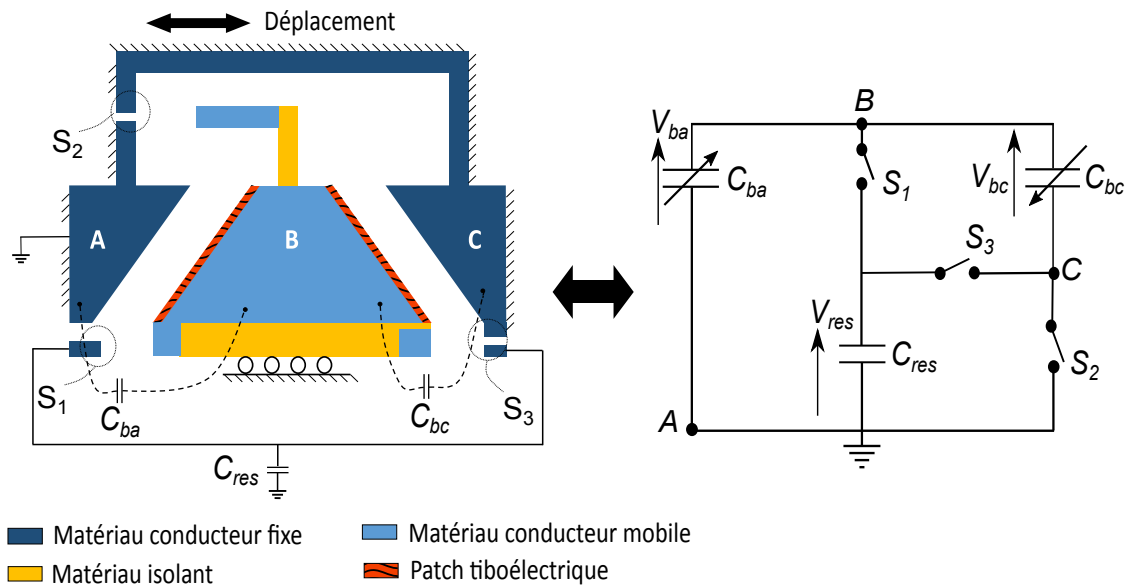


FIGURE 3.1 – représentation schématique du doubleur de charges à contacteurs mécaniques constitué de 3 électrodes, 3 contacteurs mécaniques et de patch triboélectrique, et représentation de son circuit électrique équivalent.

Afin d'optimiser les performances de notre dispositif, on intègre sur les surfaces actives latérales de l'électrode centrale  $B$  des pastilles spécifiques permettant une génération supplémentaire de charges par effet triboélectrique [96] [97]. Le choix de ce matériau isolant doit être pris en adéquation avec la nature du matériau constituant l'électrode, et de leur classification dans la table triboélectrique des matériaux.

A chaque position extrême de l'électrode centrale  $B$ , une des deux pastilles triboélectriques sera en contact et comprimée sur une des électrodes fixes. La différence d'affinité électronégative entre le matériau constituant l'électrode et celui du patch engendrera un transfert de charge entre ces derniers.

Cela nous permet de générer une quantité supplémentaire de charges et nous donne aussi la possibilité de commencer le cycle de multiplication plus rapidement.

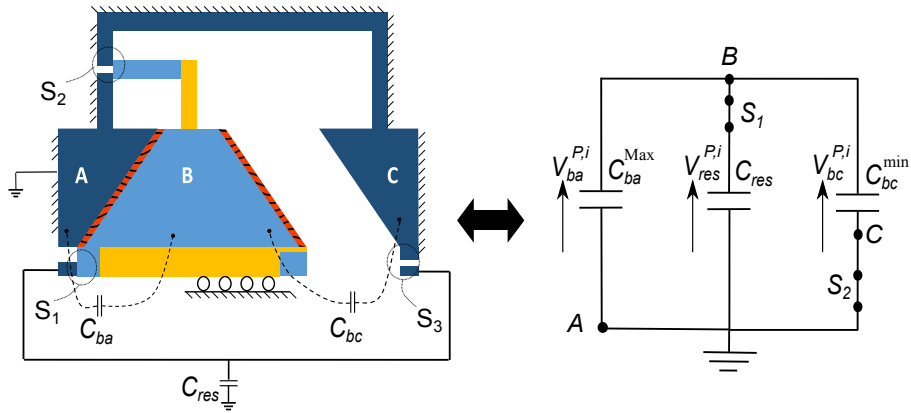
De point de vue du fonctionnement, le déplacement de l'électrode mobile entre  $A$  et  $C$  engendre l'obtention de 3 configurations.

1) D'abord, lorsque l'électrode  $B$  est positionnée près de  $A$ , les contacteurs  $S_1$  et  $S_2$  s'activent (Figure 3.2a). Dans cette configuration, les capacités variables se positionnent avec le condensateur de stockage en configuration parallèle. De plus, la capacité  $C_{ba}$  se met à sa valeur maximale  $C_{ba}^{Max}$  et  $C_{bc}$  à sa valeur minimale  $C_{bc}^{Min}$ . Aussi, le patch triboélectrique se trouvant du côté gauche se mettra en contact avec l'électrode  $A$ .

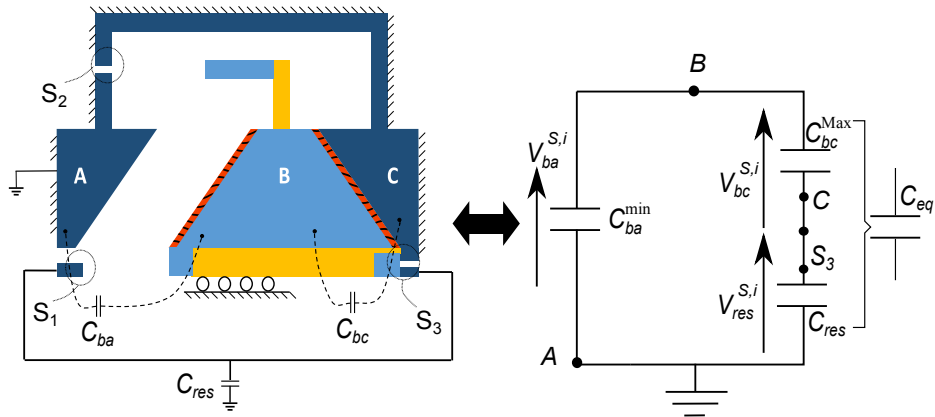
2) Ensuite, Lors du déplacement de l'électrode  $B$ , engendré par l'excitation externe, tous les commutateurs se trouvent en position ouverte (Figure 3.1). Cette configuration se caractérise par la conservation des charges et la variation de la valeur des capacités  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ .

3) Finalement, lorsque  $B$  atteint  $C$ , le contacteur  $S_3$  se ferme et induit la configuration en série des capacités. Ici,  $C_{bc}$  passe à sa valeur maximale  $C_{bc}^{Max}$  et  $C_{ba}$  à sa valeur minimale  $C_{ba}^{Min}$  (Figure 3.2b). De plus, le patch triboélectrique se trouvant sur le côté droit de l'électrode mobile induit un transfert supplémentaire de charge entre les électrodes, lorsque celui-ci est mis en contact avec l'électrode  $C$ .

Lorsque notre dispositif est soumis à une excitation externe, le mouvement oscillatoire de l'électrode mobile  $B$  induit la réalisation du cycle cité ci-dessus de manière répétitive jusqu'à l'atteinte des hautes tensions.



(a): L'électrode B est positionné près de A



(b): L'électrode B est positionné près de C

FIGURE 3.2 – Étapes du doubleur de charges à contacteurs mécaniques lors de l'application d'une excitation extérieure. (a) :  $S_1$  et  $S_2$  sont fermés induisant une configuration parallèle des capacités. (b) :  $S_3$  est activé induisant la configuration série des capacités.

## 3.2 Analyse du principe de dédoublement de charge

### 3.2.1 Principe de base

Afin d'assimiler le principe de la récupération d'énergie mis en œuvre et la manière dont les charges évoluent dans les électrodes, nous allons analyser dans cette sous-section l'évolution des charges dans les condensateurs à chaque étape du cycle.

Nous proposons d'entamer notre étude par l'examen de l'électrode mobile  $B$  lorsqu'elle se trouve déjà près de  $A$ . En se référant à la sous-section ci-dessus, nous nous trouvons alors dans la configuration où toutes les capacités sont en parallèle : La valeur de  $C_{ba}$  est maximale et celle de  $C_{bc}$  est minimale (Figure 3.2a). Ces derniers ont alors le même potentiel électrique que  $V^{P,i}$

$$V^{P,i} = V_{ba}^{P,i} = V_{bc}^{P,i} = V_{res}^{P,i} = \frac{Q_{ba}}{C_{ba}^{Max}} = \frac{Q_{bc}}{C_{bc}^{min}} = \frac{Q_{res}}{C_{res}} \quad (3.1)$$

Tel que  $P$  indique la configuration parallèle et  $i$  le nombre de cycle mécanique auquel on se réfère.

Notons aussi  $Q_{ba}$ ,  $Q_{bc}$  et  $Q_{res}$ , les charges associées respectivement aux condensateurs  $C_{ba}$ ,  $C_{bc}$  et  $C_{res}$ .

Par la suite, lorsque  $B$  se déplace de  $A$  vers  $C$  suite aux vibrations externes, tous les contacteurs s'ouvrent. Ainsi, le dispositif se met en mode de charge constante. Dans cette configuration,  $C_{ba}$  commence à diminuer tandis que  $C_{bc}$  augmente. Conformément à la loi de conservation de charge,  $V_{ba}$  augmente,  $V_{bc}$  diminue et  $V_{res}$  reste égale à  $V^{P,i}$ . On peut alors écrire le système des Équations 3.2 suivantes qui modélisent l'instant juste avant la fermeture du contacteur  $S_3$ .

$$\begin{cases} Q_{bc}^{S^-,i} = V^{P,i} \cdot C_{bc}^{min} = V_{bc}^{S^-,i} \cdot C_{bc}^{Max} \\ Q_{ba}^{S^-,i} = V^{P,i} \cdot C_{ba}^{Max} = V_{ba}^{S^-,i} \cdot C_{ba}^{min} \\ Q_{res}^{S^-,i} = V^{P,i} \cdot C_{res} = V_{res}^{S^-,i} \cdot C_{res} \Rightarrow V^{P,i} = V_{res}^{S^-,i} \end{cases} \quad (3.2)$$

Tel que  $S^-$  indique le moment juste avant l'activation du contacteur  $S_3$ , donc juste avant le passage à la configuration série des condensateurs.

Au moment  $S^+$ , correspondant au moment juste après l'activation de  $S_3$ , toutes les capacités se positionnent en configuration série (Figure 3.2b). Nous supposons ici que les potentiels en  $C_{bc}$ ,  $C_{ba}$  et  $C_{res}$  restent les mêmes que ceux à l'instant  $S^-$ . Par conséquent :



$$\begin{cases} V_{res}^{S^-,i} = V_{res}^{S^+,i} \\ V_{bc}^{S^-,i} = V_{bc}^{S^+,i} \\ V_{ba}^{S^-,i} = V_{ba}^{S^+,i} \end{cases} \quad (3.3)$$

Dans cette configuration en série, on considère que le condensateur  $C_{ba}$  charge le réseau des condensateurs ( $C_{bc}$ ,  $C_{res}$ ). Pour ce faire, il est nécessaire que la tension aux bornes de celui-ci soit supérieure à celle du réseau, comme le montre l'Équation 3.4 ci-dessous :

$$\begin{aligned} V_{ba}^{S^+,i} &> V_{bc}^{S^+,i} + V_{res}^{S^+,i} \\ \Leftrightarrow V^{P,i} \cdot \frac{C_{ba}^{Max}}{C_{ba}^{min}} &> V^{P,i} \cdot \frac{C_{bc}^{min}}{C_{bc}^{Max}} + V^{P,i} \\ \Leftrightarrow \frac{C_{ba}^{Max}}{C_{ba}^{min}} &> \frac{C_{bc}^{min}}{C_{bc}^{Max}} + 1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Quant à la charge totale présente dans le système au moment  $S^+$ , elle est donnée par :

$$Q_{tot}^{S^+,i} = V_{ba}^{S^+,i} \cdot C_{ba}^{min} + \left( V_{bc}^{S^+,i} + V_{res}^{S^+,i} \right) \cdot C_{eq} \quad (3.5)$$

$$\text{Tel que } C_{eq} = \frac{C_{bc}^{Max} \cdot C_{res}}{C_{bc}^{Max} + C_{res}}$$

Cependant, à l'état d'équilibre de la configuration série noté  $S$ , la charge totale dans le système est donnée par :

$$Q_{tot}^{S,i} = V_{ba}^{S,i} \cdot (C_{ba}^{min} + C_{eq}) \quad (3.6)$$

En appliquant la loi de conservation de charge, on a :

$$Q_{tot}^{S^+,i} = Q_{tot}^{S,i} \quad (3.7)$$

En égalisant les Équations 3.5 et 3.6 , tout en utilisant les Équations 3.2 et 3.3, nous obtenons :

$$V_{ba}^{S,i} = V^{P,i} \cdot \frac{(1 + \frac{C_{bc}^{\min}}{C_{bc}^{Max}}) \cdot C_{eq} + C_{ba}^{Max}}{C_{ba}^{\min} + C_{eq}} \quad (3.8)$$

Ainsi, nous pouvons déterminer la charge  $\Delta Q^{S,i}$  donnée par  $C_{ba}^{Min}$  au réseau de capacité  $(C_{bc}, C_{res})$  :

$$\Delta Q^{S,i} = Q_{ba}^{P,i} - Q_{ba}^{S,i} = V^{P,i} \cdot C_{ba}^{Max} - V_{ba}^{S,i} \cdot C_{ba}^{\min} \quad (3.9)$$

En remplaçant 3.8 dans 3.9, nous obtenons :

$$\Delta Q^{S,i} = V^{P,i} \cdot \left[ C_{ba}^{Max} - \frac{(1 + \frac{C_{bc}^{\min}}{C_{bc}^{Max}}) \cdot C_{eq} + C_{ba}^{Max}}{(C_{ba}^{\min} + C_{eq})} \cdot C_{ba}^{\min} \right] \quad (3.10)$$

A la fin de la première phase où  $C_{ba}$  tend de sa valeur maximale à sa valeur minimale, celui-ci délivre la charge  $\Delta Q^{S,i}$  au réseau de condensateurs  $(C_{bc}, C_{res})$ . Par conséquent, la variation totale de la charge dans le système est donnée par :

$$-\Delta Q^{S,i} + 2\Delta Q^{S,i} = \Delta Q^{S,i} \quad (3.11)$$

Le mouvement oscillatoire de l'électrode mobile  $B$  induit par la suite la 2ème phase du cycle caractérisé par l'augmentation de  $C_{ba}$  vers  $C_{ba}^{Max}$  et la diminution de  $C_{bc}$  vers  $C_{bc}^{Min}$ . Pendant cette variation, tous les contacteurs s'ouvrent et le système conserve ses charges. En atteignant  $C_{ba}^{Max}$ , Les contacteurs  $S_1$  et  $S_2$  sont activés de nouveau, ce qui induit la position parallèle des condensateurs.

La charge totale juste avant l'établissement des contacts  $P^{-,i}$  est la même que celle établie juste après la fermeture de ces derniers  $P^{+,i}$  , qui est aussi identique à celle de la configuration série précédente  $S^i$  et qui est finalement la même que celle du régime permanent de cette configuration parallèle  $P^{i+1}$ .

$$Q_{tot}^{S,i} = Q_{tot}^{P^{-,i}} = Q_{tot}^{P^{+,i+1}} = Q_{tot}^{P^{i+1}} \quad (3.12)$$

Par conséquent, pour définir la charge totale au début d'un nouveau cycle mécanique  $i+1$  nous devons ajouter la charge  $\Delta Q^{S,i}$  aux condensateurs se trouvant en configuration parallèle.

$$V^{P,i+1} \cdot (C_{ba}^{Max} + C_{bc}^{min} + C_{res}) = V^{P,i} \cdot (C_{ba}^{Max} + C_{bc}^{min} + C_{res}) + \Delta Q^{S,i} \quad (3.13)$$

Donc, pour chaque cycle, l'augmentation de l'énergie récupérée est donnée par :

$$E(i+1) = \frac{1}{2} (C_{ba}^{Max} + C_{bc}^{min} + C_{res}) \cdot [V^{P,(i+1)^2} - V^{P,i^2}] \quad (3.14)$$

### 3.2.2 Effet des patches triboélectriques

En ajoutant des pastilles isolantes sur les surfaces actives de l'électrode mobile  $B$ , nous pouvons récupérer une quantité supplémentaire de charges par effet triboélectrique. On peut alors bénéficier de cette quantité supplémentaire de charges à chaque position extrême.

Ces charges, sont associées aux couples d'électrodes  $B-A$  et  $B-C$ . On les nomme respectivement  $Q_{ba}^t$  et  $Q_{bc}^t$  [98]. Leurs valeurs sont données approximativement par les Équations 3.15 :

$$\Delta Q_{ba}^t \approx \frac{2\sigma_{ba}S_{ba}}{1 + \frac{C_{bc}^{min}}{C_{ba}^{Max}}} \quad (3.15)$$

$$\Delta Q_{bc}^t \approx \frac{2\sigma_{bc}S_{bc}}{1 + \frac{C_{ba}^{min}}{C_{bc}^{Max}}}$$

Tel que  $S_{ba}$  et  $S_{bc}$  représentent les surfaces de contact des électrodes, associées aux capacités  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ .

$\sigma_{ba}$  et  $\sigma_{bc}$  représentent la densité surfacique des charges de chaque patch.

### 3.2.3 Évolution des grandeurs électriques

En se basant sur l'analyse précédente, nous pouvons simuler l'évolution des grandeurs électriques de notre récupérateur d'énergie vibratoire pour de multiples oscillations de l'électrode mobile  $B$ . Nous supposons que les capacités  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$  sont parfaitement symétriques et évoluent en opposition de phase entre  $C_{min}$  et  $C_{max}$ . Aussi, on considère que les contacteurs mécaniques  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  sont idéaux et ne présentent pas de pertes ohmiques dans cette étude.

Par conséquent, l'évolution des charges par cycle mécanique obtenue par l'Équation 3.10 devient :

$$\Delta Q^{S,i} = V^{P,i} \cdot \frac{(C_{Max}^2 - C_{Max} \cdot C_{min} - C_{min}^2) C_{res}}{C_{max}(C_{min} + 2C_{res})} = \alpha V^{P,i} \quad (3.16)$$

Afin d'effectuer un calcul numérique traduisant les conditions réelles, nous fixons pour notre simulation  $C_{res}=10$  nF et  $C_{min}=20$  pF.

Ainsi, nous pouvons voir sur la Figure 3.3 qui met en évidence la variation de  $\tilde{\alpha}$  ( $\alpha$  normalisée avec  $C_{min}$ ) en fonction du rapport de capacité  $\eta=C_{max}/C_{min}$ , que la conversion d'énergie du domaine mécanique au domaine électrique nécessite que  $\Delta Q$  et donc  $\tilde{\alpha}$  soit positif. Cela correspond dans notre simulation à un rapport de capacité  $\eta$  supérieur à 1,62. Par la suite, on remarque que l'augmentation de ce dernier rapport entraîne une amélioration de  $\tilde{\alpha}$  et donc de l'énergie récupérée.

La Figure 3.4 montre la variation de la tension  $V_{res}$  aux bornes du condensateur de stockage  $C_{res}$  et l'évolution de l'énergie totale récupérée dans ce dernier composant, en fonction du rapport de capacité  $\eta$  et ce, après 2000 cycles de fonctionnement.

On peut conclure à partir de ces Figures que la conversion d'énergie est fortement liée à la valeur du ratio de capacité  $\eta$ . Plus ce ratio est grand, plus la conversion d'énergie est importante.

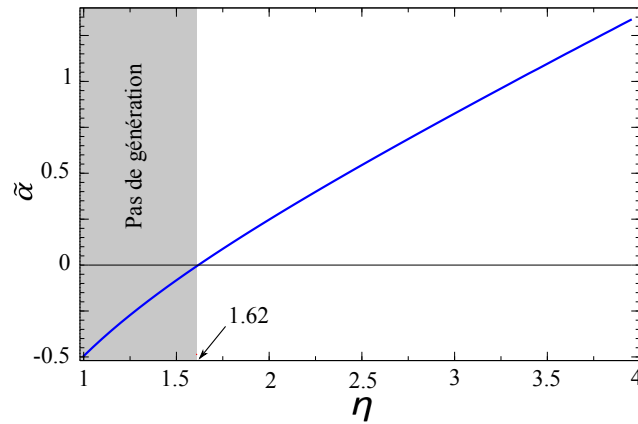


FIGURE 3.3 – Évolution de  $\tilde{\alpha}$  par rapport au ratio de capacités  $\eta$ .

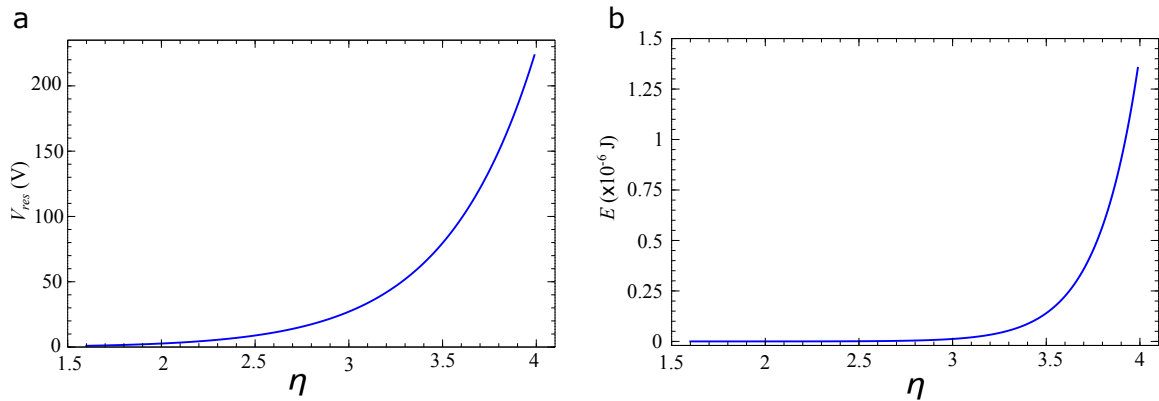


FIGURE 3.4 – Évolution de la tension  $V_{res}$  (a) et de l'énergie  $E$  (b) en fonction  $\eta$  après 2000 cycles.

Quant à la relation entre l'énergie totale récupérée et la tension  $V_{res}$ , celle-ci est mentionnée dans la Figure 3.5. Elle est réalisée pour  $\eta = 4$  et pour un nombre de cycles atteignant 2000. On observe sur cette Figure que l'accroissement de la tension induit une amélioration de l'énergie : après l'atteinte de 100 V de tension entre les bornes de la capacité de stockage, l'énergie récupérée est de  $0.23\mu$  J alors que pour  $V_{res}=200$  V l'énergie récupérée est de  $1.08 \mu$ J.

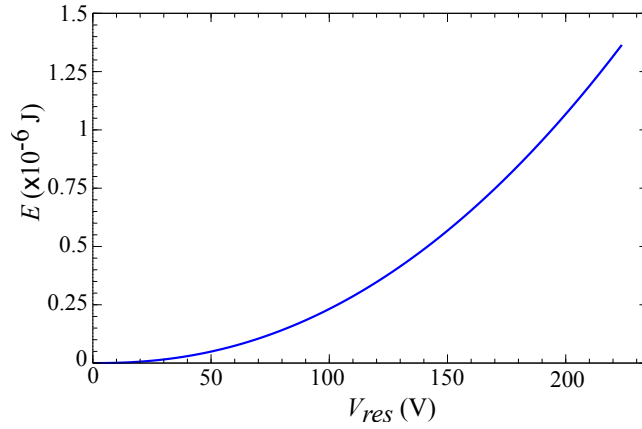


FIGURE 3.5 – Variation de l'énergie  $E$  en fonction de la tension  $V_{res}$  après 2000 cycles de fonctionnement pour  $\eta=4$ .

Comme mentionné ci-dessus, on ajoute aux surfaces latérales de l'électrode mobile de notre dispositif des patches triboélectriques destinés à améliorer ses performances. Nous simulons alors dans la Figure 3.6 l'effet de cet ajout sur la tension de sortie, ainsi que sur l'énergie récupérée par notre dispositif, en fonction du nombre de cycles. Pour cette simulation,  $\eta$  est fixé à 4, la tension initiale due au bruit électromagnétique ambiant est  $V_0 = 1$  V, la densité surfacique de charge de la couche triboélectrique est donnée par  $\sigma_{ba}=\sigma_{bc}=2.10^{-6}$  C/m<sup>2</sup> et la surface commune entre les électrodes est  $S_{ba}=S_{bc}=12$  cm<sup>2</sup>.

On remarque d'abord que la tension  $V_{res}$  augmente exponentiellement avec le nombre de cycles. De plus, on remarque que le patch triboélectrique ajouté exerce une influence positive sur notre récupérateur car il permet d'accélérer le processus de conversion d'énergie. En effet, après 100 cycles de fonctionnement, la tension obtenue aux bornes de la capacité de stockage est de 10 V pour le système classique alors que la tension atteint 89 V dans le cas d'ajout des patches triboélectriques. Cela est équivalent à une énergie récupérée de 0.5 nJ pour le système sans patch contre 0.88  $\mu$ J pour le système intégrant ce dernier. Cependant, on remarque que l'effet du patch triboélectrique s'atténue en atteignant les hautes tensions, après un très grand nombre de cycles.

L'avantage d'utiliser cette méthode d'optimisation n'est alors utile que dans les basses tensions. Ce qui correspond à la majorité des utilisations des composants électroniques. Ce phénomène observé est dû à la quantité constante de charges ajoutées par effet triboélectrique à chaque cycle. Dans les basses tensions, celle-ci est plus importante par rapport à celle produite suite au principe du doubleur de *Bennet*. Par contre, dans les hautes tensions, cet apport de charges triboélectriques devient négligeable.

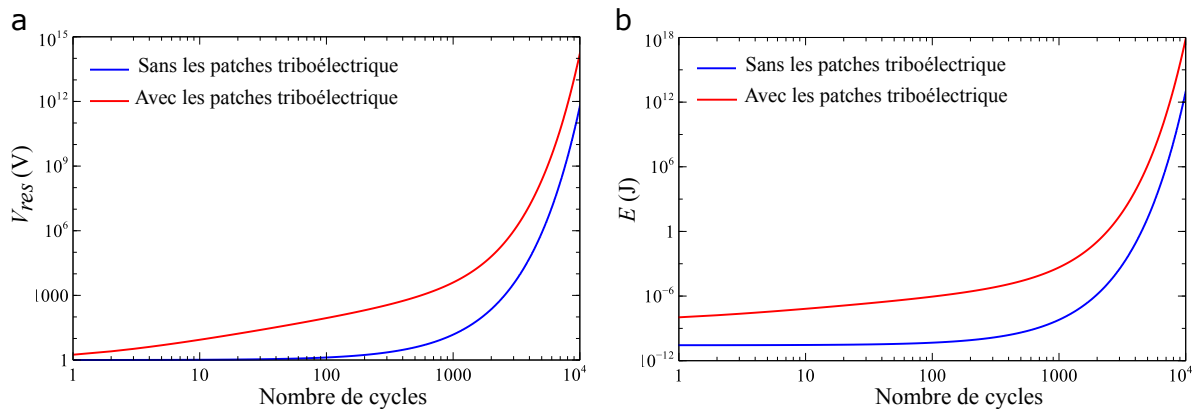


FIGURE 3.6 – Effet de l'addition du patch triboélectrique sur les performances du dispositif. (a) : Évolution de la tension par rapport au nombre de cycles. (b) : L'énergie récupérée résultante en fonction du nombre de cycles.

### 3.3 Modélisation électromécanique du système

#### 3.3.1 Modèle mécanique du système

L'électrode mobile  $B$  de masse  $m$  est libre de se déplacer sur une base rigide grâce à un palier linéaire, comme le montre la représentation de la Figure 3.7. Cette masse est excitée lorsqu'une accélération externe, que nous considérons comme harmonique, est appliquée sur la structure du dispositif. Son déplacement est limité dans les deux directions aux positions  $x_{01}$  et  $x_{03}$  par les commutateurs  $S_1$  et  $S_3$  respectivement, qui agissent aussi comme des butées de fin de course rigides.

Afin de garantir la reproductibilité du cycle de *Bennet*, on trouve aussi le contacteur  $S_2$  qui est positionné à  $x_{02}$ . Ce contacteur flexible possède une raideur  $k_2$  et un coefficient d'amortissement  $c_2$ .

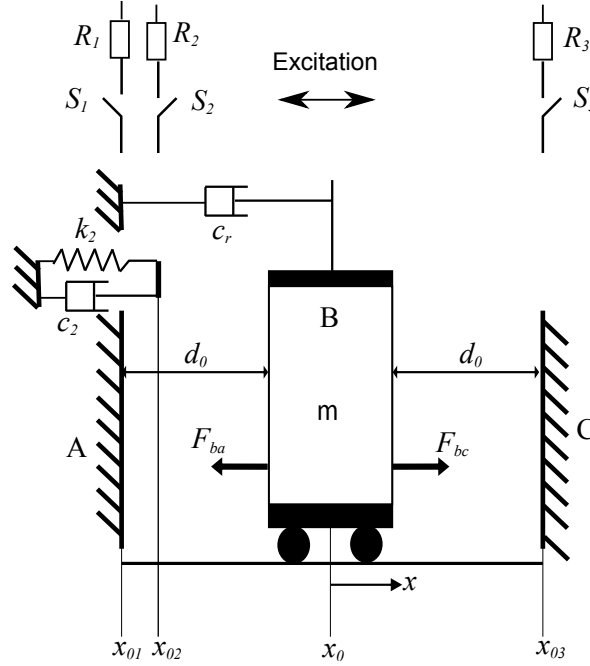


FIGURE 3.7 – Représentation mécanique du doubleur de charges à contacteurs mécaniques constitué d'une masse mobile dont le mouvement est limité par 2 butées de fin de course.

Le mouvement oscillatoire de la masse mobile  $B$  entre  $x_{01}$  et  $x_{03}$  entraîne une variation en opposition de phases des capacités  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ . En se référant à la section précédente, la tension aux bornes des capacités augmente avec le nombre de cycles. Cela entraîne l'apparition d'une force électrostatique  $Fe$  entre les armatures, dont la valeur augmente avec la tension. Celle-ci se décompose en  $F_{ba}$  et  $F_{bc}$  qui apparaissent respectivement entre les armatures  $B-A$  et  $B-C$ .

Leur évolution dans notre système est donnée par l'Équation 3.17 :

$$\begin{cases} F_{ba} = \frac{1}{2} \frac{dC_{ba}}{dx} \left( \frac{Q_{ba}}{C_{ba}} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{dC_{ba}}{dx} (V_{ba})^2 \\ F_{bc} = \frac{1}{2} \frac{dC_{bc}}{dx} \left( \frac{Q_{bc}}{C_{bc}} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{dC_{bc}}{dx} (V_{bc})^2 \end{cases} \quad (3.17)$$



$Q_{ba}$ ,  $V_{ba}$ ,  $Q_{bc}$  et  $V_{bc}$  correspondent respectivement aux charges et aux potentiels électriques associés aux capacités  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$  dont les équations sont données par :

$$\begin{cases} C_{ba} = \frac{\varepsilon S_{ba}}{d_0+x} \\ C_{bc} = \frac{\varepsilon S_{bc}}{d_0-x} \end{cases} \quad (3.18)$$

$S_{ba,bc}$  correspond à la surface commune formant la capacité variable et  $d_0$  indique la distance qui sépare les surfaces dans la position initiale.

Ainsi, on peut décrire le comportement mécanique du système à partir de la seconde loi de *Newton*, comme le montre l'Équation 3.19 ci-dessous :

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_r\dot{x} = m\gamma \cos(2\pi ft) + F_{ba} + F_{bc} & \text{Si } x_{02} < x \leq x_{03} \\ m\ddot{x} + (c_r + c_2)\dot{x} + k_2(x - x_{02}) = m\gamma \cos(2\pi ft) + F_{ba} + F_{bc} & \text{Si } x_{01} \leq x \leq x_{02} \end{cases} \quad (3.19)$$

Tels que  $x$  et  $\dot{x}$  représentent respectivement le déplacement et la vitesse de la masse mobile  $B$ ,  $c_r$  représente le coefficient d'amortissement mécanique dû aux frottements et  $\gamma$  est l'accélération externe subite par le dispositif.

Aux positions extrêmes, correspondant aux contacts de la masse mobile  $B$  avec les butées de fin de course, un inversement de direction se produit. Cela induit une perte d'énergie mécanique de cette électrode et une variation de vitesse selon la loi de *Singorini* [99] comme mentionné dans l'Équation 3.20 :

$$\begin{cases} \dot{x} \leftarrow -e_{ba}\dot{x} & \text{Si } x = x_{01} \\ \dot{x} \leftarrow -e_{bc}\dot{x} & \text{Si } x = x_{03} \end{cases} \quad (3.20)$$

$e_{ba}$  et  $e_{bc}$  correspondent aux coefficients de restitution associés au couple d'électrodes  $B-A$  et  $B-C$  respectivement. leur valeur dépend principalement de la géométrie du contact et des propriétés physiques des matériaux en interaction [100]. Pour notre étude, ces coefficients sont déterminés par ajustement avec les données expérimentales.

### 3.3.2 Modèle électrique du système

Dans la section précédente, les commutateurs ont été modélisés comme des composants parfaits. Dans la pratique, ils présentent une faible résistance de contact. Dans cette section, nous utilisons un modèle plus réaliste où ces contacteurs  $S_{1,2,3}$  présentent respectivement les résistances  $R_{1,2,3}$ .

Lorsque l'électrode  $B$  est en mouvement, les commutations se font de manière automatique sans nécessiter aucune intervention extérieure. Cela entraîne un circuit électrique dont la configuration alterne entre parallèle et série.

**Electrode  $B$  entre  $x_{01}$  et  $x_{02}$  :**

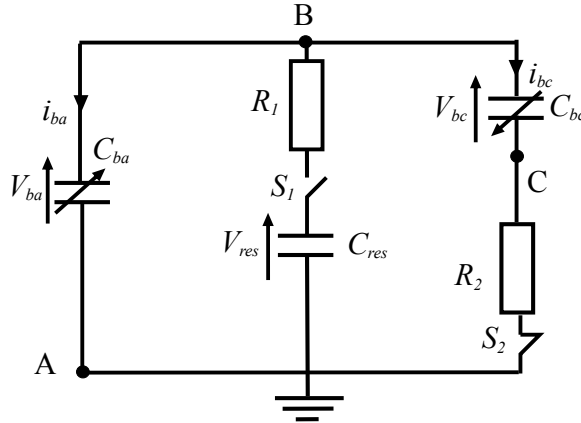


FIGURE 3.8 – Circuit électrique équivalent où  $S_2$  est activé et  $S_1$  ne l'est pas.

Dans cette configuration, l'électrode  $B$  a dépassé la position  $x_{02}$  mais n'a pas encore atteint  $x_{01}$ . Sur ce, le contacteur  $S_2$  se trouve en position fermée, alors que  $S_1$  et  $S_3$  sont ouverts (Figure 3.8). La fermeture de  $S_2$  entraîne l'apparition d'une résistance de contact  $R_2$ . Le système d'Équations décrivant ce circuit électrique est donné par :

$$\begin{cases} V_{ba} = V_{bc} + R_2 \frac{d(C_{bc}V_{bc})}{dt} \\ \frac{d(C_{ba}V_{ba})}{dt} + \frac{d(C_{bc}V_{bc})}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

En atteignant la position  $x_{01}$ , le contacteur mécanique  $S_1$  se ferme et  $S_2$  reste activé. Cela entraîne le passage à la configuration parallèle des condensateurs (Figure 3.9).

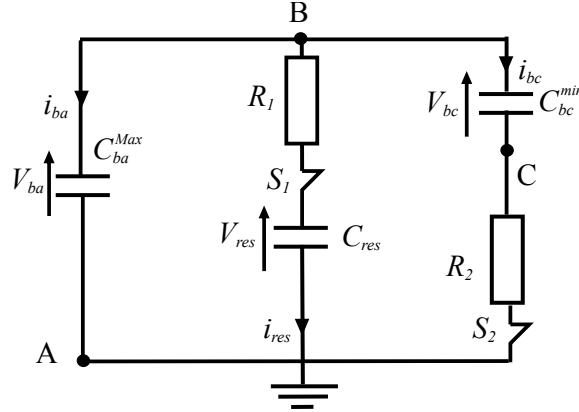


FIGURE 3.9 – Circuit électrique équivalent caractérisé par la fermeture des contacteurs  $S_1$  et  $S_2$  et induisant la configuration parallèle des résistances.

La fermeture de ces contacts entraîne l'apparition des résistances de contacts  $R_1$  et  $R_2$ . La capacité  $C_{ba}$  est à sa valeur maximale  $C_{ba}^{Max}$  et  $C_{bc}$  est à sa valeur minimale  $C_{bc}^{Min}$ . Les Équations décrivant le système électrique sont données par :

$$\begin{cases} V_{ba} = V_{res} + R_1 C_{res} \frac{dV_{res}}{dt} \\ V_{ba} = V_{bc} + R_2 \frac{d(C_{bc} V_{bc})}{dt} \\ \frac{d(C_{ba} V_{ba})}{dt} + \frac{d(C_{bc} V_{bc})}{dt} + C_{res} \frac{dV_{res}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

L'électrode  $B$  est entre  $x_{02}$  et  $x_{03}$  :

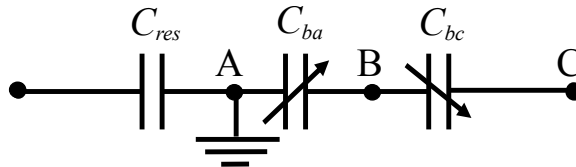


FIGURE 3.10 – Circuit électrique équivalent caractérisant l'état du système où tous les contacteurs sont ouverts.

Quand l'électrode mobile se déplace entre  $x_{02}$  et  $x_{03}$  (Figure 3.10), tous les contacteurs sont en position ouverte. Dans cette configuration,  $B$  est isolée et les charges se conservent. La tension aux bords des condensateurs est décrite selon l'Équation 3.23 :

$$\begin{cases} V_{res} = \frac{Q_{res}}{C_{res}} \\ V_{ba} = \frac{Q_{ba}}{C_{ba}} \\ V_{bc} = \frac{Q_{bc}}{C_{bc}} \end{cases} \quad (3.23)$$

Au moment où  $B$  atteint l'électrode  $C$ , le contacteur  $S_3$  s'active induisant la mise en place de la configuration série (Figure 3.11) et l'apparition de la résistance de contact  $R_3$  relative à ce commutateur.  $C_{ba}$  atteint sa valeur minimale  $C_{ba}^{Min}$  et  $C_{bc}$  sa valeur maximale  $C_{bc}^{Max}$ . Le système d'Équation décrit par cette configuration est donnée par l'Équation 3.24.

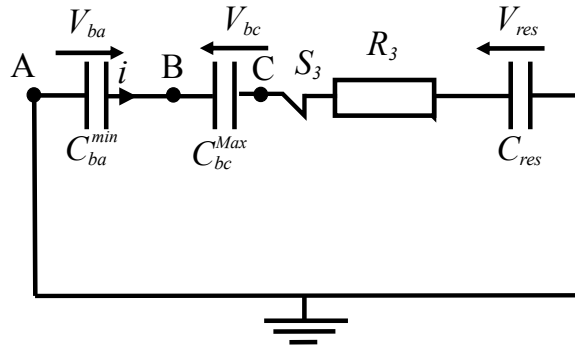


FIGURE 3.11 – Circuit électrique équivalent caractérisé par l'état du dispositif ou le contacteur  $S_3$  est fermé induisant la configuration série.

$$\begin{cases} V_{res} + R_3 i + V_{bc} - V_{ba} = 0 \\ i = -\frac{d(C_{ba}V_{ba})}{dt} = \frac{d(C_{bc}V_{bc})}{dt} = C_{res} \frac{dV_{res}}{dt} \end{cases} \quad (3.24)$$

### 3.3.3 Modèle électromécanique du système

Le modèle mécanique donné par l'Équation 3.19 dépend des forces électrostatiques  $F_{ba}$  et  $F_{bc}$ , elles-mêmes dépendantes des tensions définies dans le modèle électrique par les Équations 3.21, 3.22, 3.23 et 3.24.

Pour résoudre ce système électromécanique couplé, nous utilisons la méthode des différences finies basée sur un pas de temps de  $\Delta t$ . Nous détaillons dans la Figure 3.12 l'algorithme de résolution utilisé où  $x_j$  et  $\dot{x}_j$  représentent respectivement la position et la vitesse à l'instant  $j\Delta t$ .

On observe dans cet algorithme que la résolution de notre système électromécanique passe par des conditions. Chacune d'entre elles traduit un état de la masse mobile exprimé par la position et la direction de cette dernière.

## 3.4 Conclusion

Dans cette section, nous avons décrit les composants de notre doubleur de charges à contacteurs mécaniques ainsi que son fonctionnement. Nous avons ensuite approfondi la description en analysant le principe de dédoublement des charges dans les électrodes. Nous avons montré que le rapport minimal de variation de capacité est de 1.62.

Nous avons modélisé par la suite le comportement électromécanique en introduisant les efforts et les contraintes imposés au dispositif pendant l'excitation, ainsi que les schémas électriques résultant du déplacement de l'électrode B. L'algorithme de multiplication de charges employé a été aussi décrit.

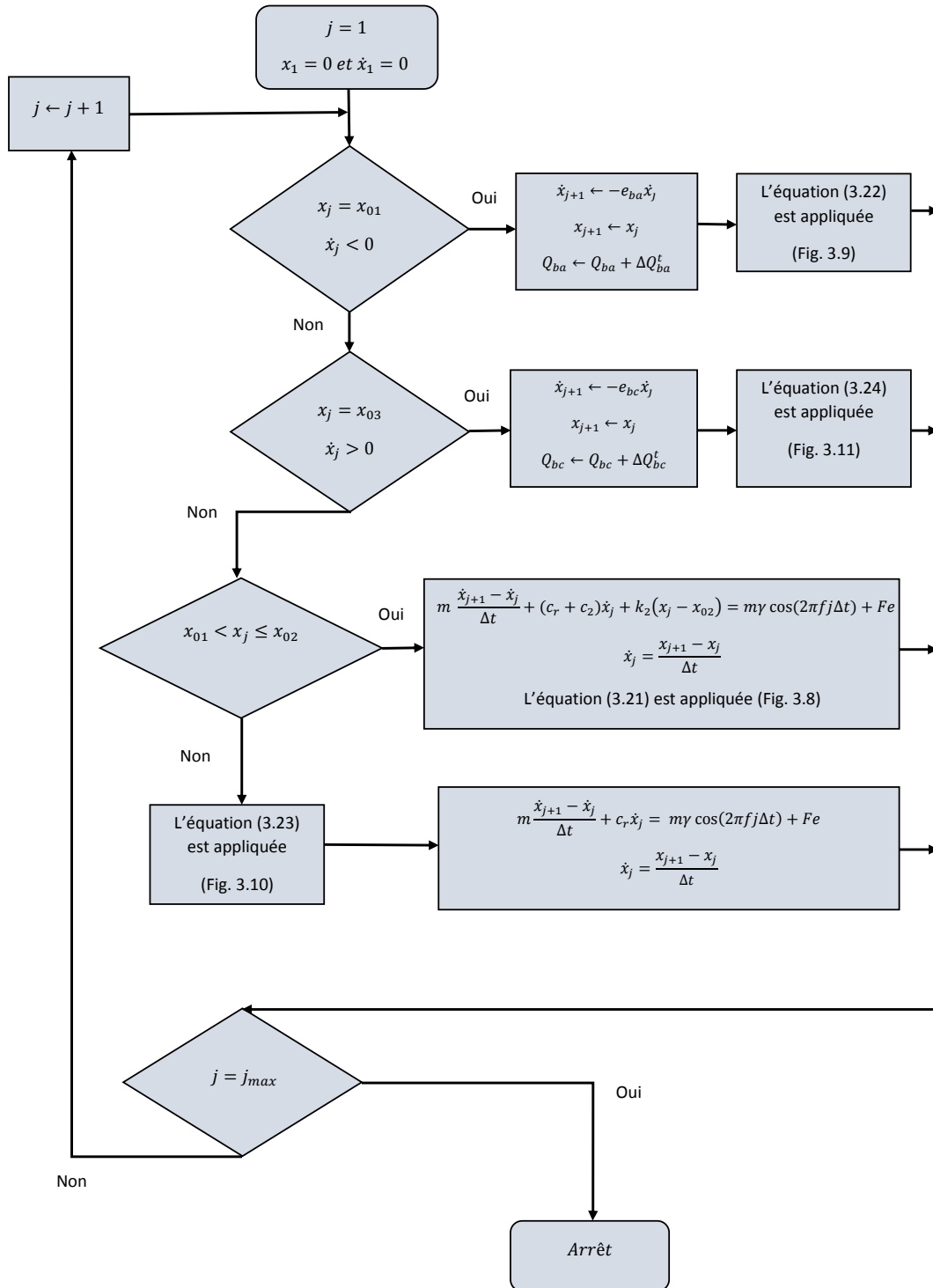


FIGURE 3.12 – Algorithme d'évolution de l'état électromécanique du doubleur de charges à contacteurs mécaniques.

# Chapitre 4

## Résultat des simulations du modèle et validation expérimentale

Après avoir décrit et détaillé le modèle numérique de notre récupérateur d'énergie vibratoire, nous allons consacrer ce chapitre à sa validation, grâce à une comparaison avec un prototype expérimental.

Pour ce faire, on décrira d'abord le système fabriqué ainsi que les méthodes d'essai employées. Puis on validera le comportement dynamique du récupérateur à travers une confrontation numérique/expérimental de la variation de capacité produite. Ensuite, nous analyserons le comportement électromécanique du système lors de l'atteinte des hautes tensions.

Après avoir prouvé l'efficacité de notre dispositif expérimental et validé notre analyse numérique, nous procéderons à une comparaison entre l'utilisation des diodes et des contacteurs mécaniques afin de valider l'apport de ces derniers. Enfin, nous visualiserons l'impact engendré par la variation des paramètres des pastilles triboélectriques.

## 4.1 Dispositif expérimental et méthode d'essai

### 4.1.1 Fabrication du dispositif

Afin de valider les résultats obtenus dans le chapitre précédent, nous avons conçu le prototype montré dans la Figure 4.1. La conception numérique de celui-ci est réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks alors que la fabrication des composants est assurée à l'aide d'une fraiseuse CNC. Les dessins techniques sont fournis en annexe 1.

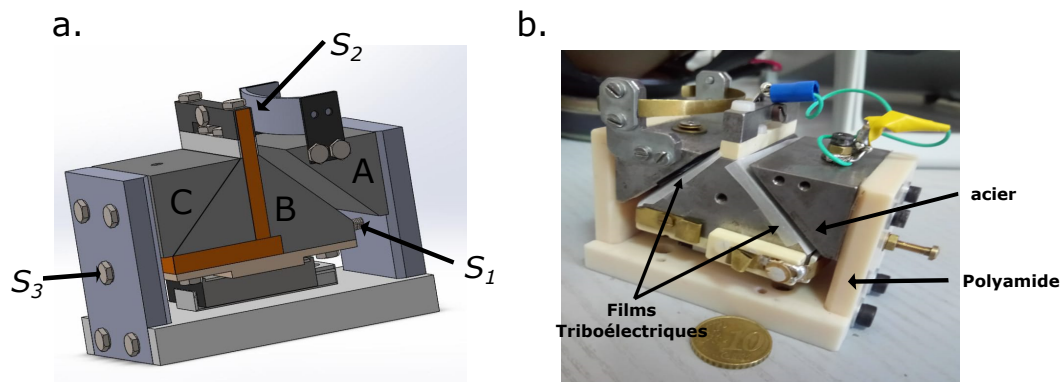


FIGURE 4.1 – Prototype expérimental. (a) : Dispositif numérique. (b) Dispositif réalisé.

Notre générateur a une masse totale de 600 g dont 315 g sont affectés pour l'électrode mobile. Le volume total du dispositif avoisine les 96 cm<sup>3</sup>. Les électrodes sont en acier non allié C40. Le choix de ce matériau a été approuvé pour des raisons économiques et de disponibilité. Les électrodes sont constituées de surfaces actives inclinées de 45° afin de maximiser la surface commune des capacités variables.

L'électrode centrale *B* est placée sur un guidage à roulement linéaire de marque *IKO*. Celui-ci présente un très faible coefficient de frottement permettant l'entraînement de cette électrode même suite à l'application d'un faible effort [101].

La structure du dispositif est créée à partir du *Polyamide*. Ce matériau supporte les électrodes ainsi que les autres composants du dispositif et assure une isolation électrique



entre ces derniers. Sa forme en 'U' nous a conduit à le diviser en trois pièces assemblées afin de garantir la planéité entre les surfaces opposées.

Les contacteurs mécaniques  $S_1$  et  $S_3$  sont placés respectivement à l'arrière des électrodes  $A$  et  $C$ , et permettent aussi de jouer le rôle de butée de fin de course. Le contacteur  $S_2$  est placé au dessus de l'électrode  $A$ . Pour garantir sa flexibilité conformément à la description faite dans le chapitre précédent, on choisit de le réaliser à l'aide d'une fine lame de laiton jouant le rôle d'un ressort à lames.

L'utilisation des contacteurs mécaniques doit permettre d'améliorer les performances de notre dispositif par rapport à l'utilisation des diodes pour automatiser la machine électrostatique, à des fins de récupération d'énergie vibratoire ambiante [94] [102] [92]. Pour ce faire, notre dispositif permet alors de tester les diodes à la place des contacteurs mécaniques.

Les surfaces actives de l'électrode centrale  $B$  sont recouvertes quant à eux par un film isolant triboélectrique [97]. Le choix de ce matériau isolant doit prendre en considération de sa classification dans la Table triboélectrique des matériaux (annexe 2) : plus l'écart entre les deux matériaux mis en contact est grand, plus le transfert de charge est important [98].

Dans ce sens, on choisit d'utiliser du *polypropylene* ( $PP$ ) de  $50 \mu\text{m}$  d'épaisseur comme isolant sur les surfaces actives de l'électrode mobile. A côté de sa disponibilité et de son prix relativement bas, ce matériau isolant permet d'avoir un transfert de charge important entre les électrodes, en raison de l'éloignement des matériaux mis en contact selon la Table triboélectrique.

Afin de garantir le stockage de l'énergie récupérée, on ajoute un condensateur de stockage  $C_{res}$  de capacité  $10 \text{ nF}$ .

### 4.1.2 Méthode d'essai

Afin de prouver l'efficacité du récupérateur d'énergie vibratoire, on décide de tester notre prototype conformément à la représentation fonctionnelle de la Figure 4.2. On place notre dispositif sur un pot vibrant (modèle : *LDS V40b* de la marque : *Bruel & Kjaer*). Celui-ci produit des vibrations dont la fréquence et l'accélération sont contrôlables. Afin de garantir une vibration conforme à la consigne, le pot vibrant est asservi par un contrôleur (modèle 7541 de *Bruel & Kjaer*) et un accéléromètre (modèle 4507B004 de *Bruel & Kjaer*) (Figure 4.2).

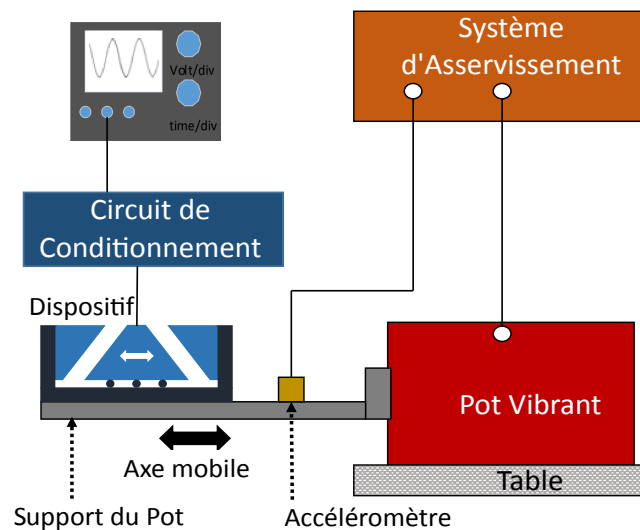


FIGURE 4.2 – Schéma représentatif de la manipulation et des composants utilisés nécessaires à la réalisation des expériences.

La tension de sortie est mesurée aux bornes du condensateur de stockage. Pour pouvoir visualiser les résultats, on utilise un oscilloscope associé à un circuit de conditionnement composé principalement d'un amplificateur opérationnel en mode suiveur afin de bénéficier de sa haute impédance.

## 4.2 Mesure de la capacité et analyse du comportement du générateur

Avant d'analyser les performances du système, nous consacrons cette sous-section à la validation de notre modèle et à l'étude du comportement du dispositif réalisé lorsque celui-ci est excité.

L'acquisition d'informations sur la position réelle de l'électrode mobile de manière directe nécessite l'utilisation de lasers de mesure de position. Cette technique est coûteuse et non disponible. On se tourne alors vers la mesure de la capacité variable produite entre les armatures des électrodes. Puisque sa valeur dépend de la position relative des électrodes, celle-ci nous permet de déterminer la position de la masse mobile. Par ailleurs, les valeurs de capacité obtenues à partir de cette analyse, nous permet d'avoir une idée claire sur les performances du dispositif.

### 4.2.1 Méthode

Pour visualiser la variation dynamique des capacités variables pendant le fonctionnement, on se base sur une méthode qui exploite le déphasage produit entre deux signaux dans un circuit  $RC$  représenté par la Figure 4.3 [92]. Pour chaque déphasage  $\theta$ , la valeur de la capacité est donnée par :

$$C_{ba,bc} = \frac{1}{\tan(\theta) R_{ba,bc} \omega} \quad (4.1)$$

Où  $\omega$  représente la fréquence angulaire de  $V_{ac}$  et  $\theta$  le déphasage existant entre  $V_{ac}$  et celle qui apparaît aux bornes de la résistance. La valeur de  $R$  doit être soigneusement choisie afin de maximiser la sensibilité à notre fréquence de test.

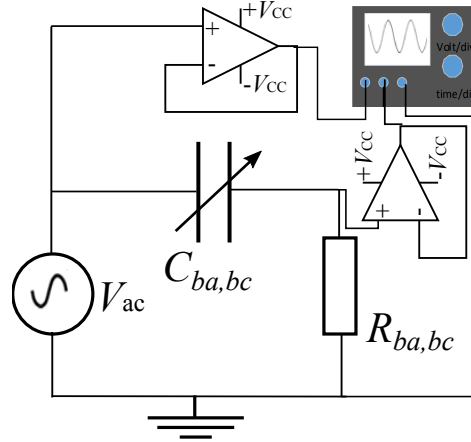


FIGURE 4.3 – circuit électrique de mesure de la variation dynamique des capacités variables  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ .

Dans le cas idéal, la meilleure précision est obtenue pour un déphasage de  $\frac{\pi}{4}$ . Donc pour  $R.C.\omega=1$ . La valeur de  $R$  doit donc être choisie tel que :

$$R_{ba,bc} = \frac{1}{C_{ba,bc}^{av}\omega} \quad (4.2)$$

Avec  $C_{ba}^{av}$  qui représente la valeur moyenne de la capacité variable. Sa valeur est donnée par :

$$C_{ba,bc}^{av} = \frac{C_{ba,bc}^{Max} + C_{ba,bc}^{min}}{2} \quad (4.3)$$

Pour notre étude, on excite le dispositif avec une fréquence de 5 HZ pour une accélération moyenne de 0.2  $g_{rms}$ . La tension  $V_{ac}$  est fixée à 1.5 V crête à crête, pour une fréquence de 100 KHz.

## 4.2.2 Mesures

On observe sur les Figures 4.4a et 4.4b la variation dynamique de la capacité de nos deux condensateurs en fonction du nombre de cycles.

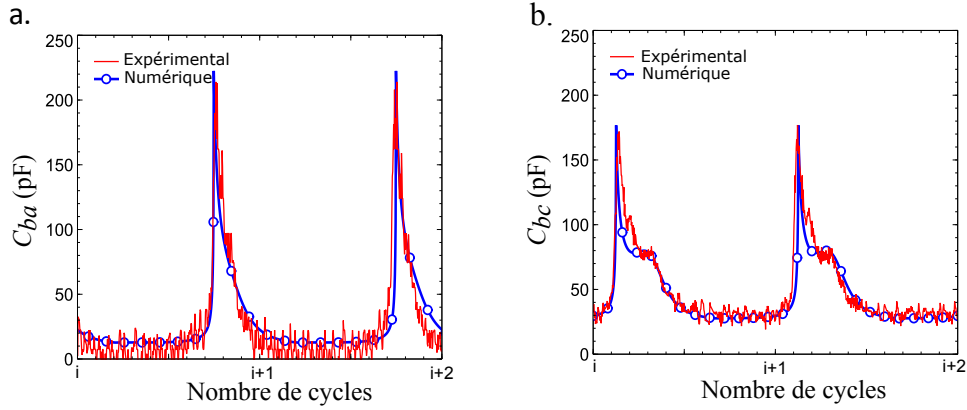


FIGURE 4.4 – Variation de capacité de  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$  mesurée expérimentalement et calculée numériquement.

Aussi, en utilisant le modèle électromécanique décrit dans le chapitre précédent et les différents paramètres géométriques et physiques du dispositif présentés dans le Tableau 4.1, on superpose sur ces mesures la variation des capacités obtenues de manière numérique. On remarque d’abord que les résultats de variation de capacités obtenus numériquement sont en concordance avec ceux mesurés expérimentalement en régime permanent. Cela nous permet de dire que notre modèle numérique est valide.

On observe aussi l’existence d’une asymétrie entre les deux capacités variables. En effet,  $C_{ba}$  varie entre 20 pF et 210 pF alors que  $C_{bc}$  varie entre 30 pF et 170 pF. Cette différence a comme origine la précision d’usinage lors de la fabrication des composants. Vu que l’on est dans la configuration de variation des capacités à ‘fermeture de gap’, leurs valeurs sont largement influencées par la position en fin de course. Une variation même minime de position dans les emplacements extrêmes peut entraîner une évolution très importante de la variation de capacité.

On observe aussi un profil d’évolution de capacité qui diffère entre  $C_{ba}$  et  $C_{bc}$ . Cela est dû au comportement de l’électrode centrale. Le contact de  $B$  avec le ressort à lame près de  $x_{02}$  influe sur la dynamique du système, comme le montre la Figure 4.5 qui représente l’évolution de la position de cette en fonction du nombre de cycles.

TABLE 4.1 – variables utilisées pour simuler le comportement du générateur électrostatique et leurs valeurs correspondantes.

désignation	signification	valeur
$C_{res}$	Capacité de stockage	9.68 nF
$R_{1,2,3}$	Estimation de la résistance de contact	0.1 $\Omega$
$d_0$	Distance entre les électrodes à la position initiale	2 mm
$x_0$	Position initiale	0 mm
$x_{01}$	Position du contacteur $S_1$	-1.95 mm
$x_{02}$	Position du contacteur $S_2$	-1.4 mm
$x_{03}$	Position du contacteur $S_3$	1.95 mm
$m$	Masse de l'électrode mobile	315 mg
$f$	Fréquence d'excitation	5 Hz
$\gamma$	Accélération appliquée	0.2 $g_{rms}$
$k_2$	Raideur du ressort $S_2$	200 N/m
$c_2$	Coefficient d'amortissement du ressort $S_2$	0.02 N.s/m
$c_r$	Coefficient d'amortissement dû aux frottements	0.2 N.s/m
$e_{bc}$	Coefficient de restitution à proximité de $C$	0.15
$e_{ba}$	Coefficient de restitution à proximité de $A$	0.09
$\Delta t$	Intervalle de temps minimal	0.4 ms
$\sigma_{ba}=\sigma_{bc}$	Densité surfacique des charges triboélectriques du $PP$	$2 \times 10^{-6}$ C/m <sup>2</sup>
$S_{ba}=S_{bc}$	Surface active des capacités variables $C_{ba}$ et $C_{bc}$	$1.2 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup>

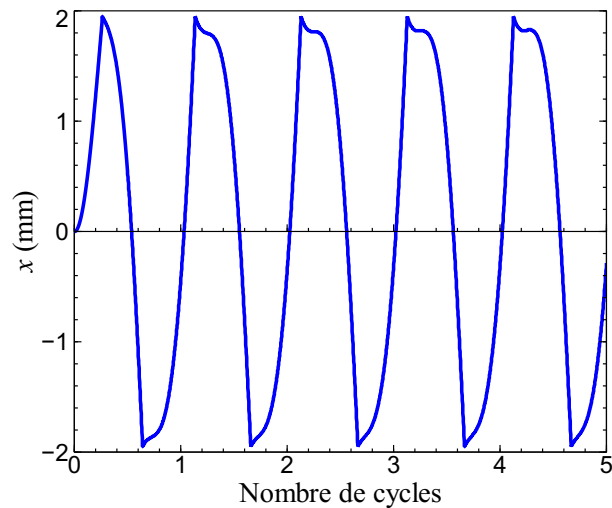


FIGURE 4.5 – Simulation de l'évolution de la position de la masse mobile par rapport au nombre de cycles.

## 4.3 Performances du récupérateur d'énergie vibratoire

### 4.3.1 Évolution des grandeurs électriques avec pré-charge initiale

Après avoir validé le comportement de notre dispositif et analysé sa variation de capacité, on consacre cette sous-section à étudier ses performances.

Pour ce faire, on place notre récupérateur d'énergie vibratoire sur le pot vibrant comme décrit dans la Figure 4.6a. La réalisation des essais a été effectuée par excitation du pot vibrant avec une fréquence de 5 Hz et pour une accélération de 0,2  $g_{rms}$ . Quant à l'amplificateur opérationnel, celui-ci est alimenté en  $\pm 30$  V.

La Figure 4.6b montre le circuit électrique équivalent à notre récupérateur d'énergie vibratoire mis en conditions de réalisation des essais.

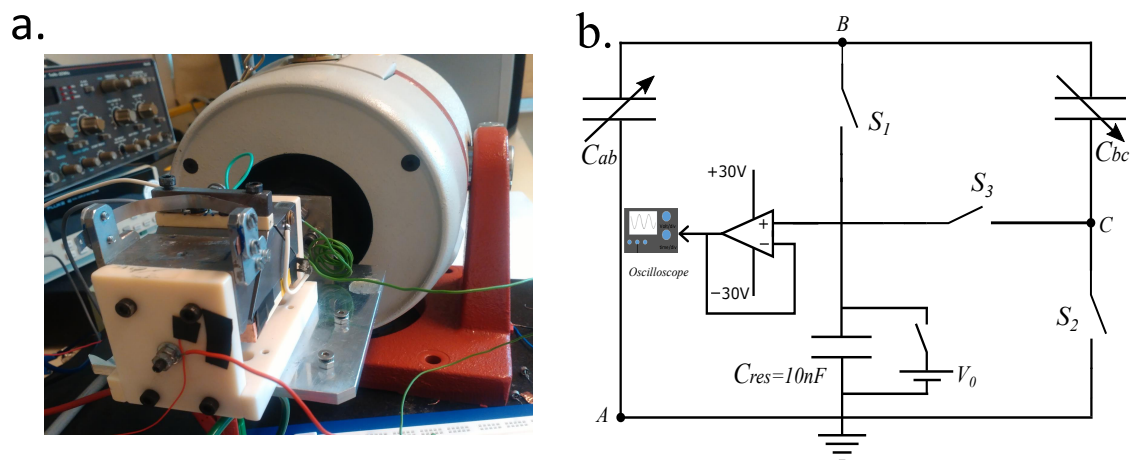


FIGURE 4.6 – (a) Dispositif réel placé sur le pot vibrant pendant la réalisation des essais. (b) Circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire ambiante.

On observe sur la Figure 4.7a l'évolution de la tension récupérée aux bornes du condensateur de stockage  $C_{res}$  pour différentes tensions de pré-charge.

On remarque d'abord que l'évolution de cette tension aux bornes de  $C_{res}$  pendant l'excitation s'accroît avec le nombre de cycles.

On remarque aussi que le dispositif a la capacité de commencer le cycle de multiplication de charges sans avoir recours à une charge initiale aux bornes de  $C_{res}$ . De plus, on peut noter que plus la pré-charge est importante, plus la tension s'accroît rapidement. Après 100 cycles de fonctionnement, on atteint une tension de 9.3 V dans le cas où aucune charge n'est ajoutée dans le système à l'état initial, contre 20.4 V pour une tension initiale appliquée de 5 V. Cela est équivalent à une énergie récupérée de 0.43  $\mu\text{J}$  sans pré-charge, contre 2.18  $\mu\text{J}$  pour une tension initiale appliquée de 5 V (Figure 4.7b).

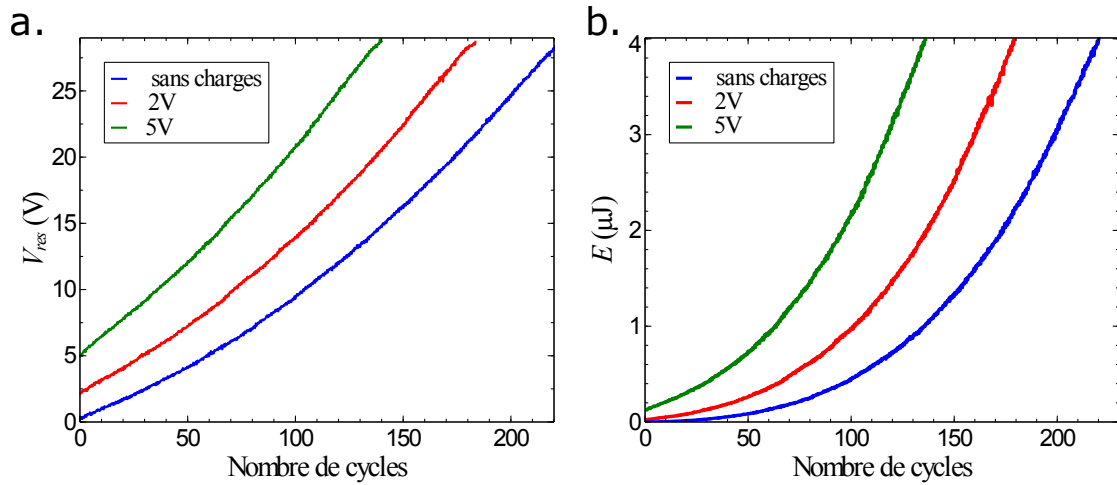


FIGURE 4.7 – Influence de la tension de pré-charge aux bornes de  $C_{res}$  sur les performances du dispositif à 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$ . (a) évolution de la tension et (b) évolution de l'énergie accumulée dans  $C_{res}$  en fonction du nombre de cycles.

### 4.3.2 Évolution des grandeurs électriques sans pré-charge initiale

Lors de la mesure précédente, la tension maximale de visualisation était limitée à 30 V puisque l'amplificateur utilisé ne peut pas supporter une tension supérieure à sa tension d'alimentation. On modifie alors le circuit électrique de notre système par l'utilisation d'un diviseur de tension capacitif comme mentionné dans la Figure 4.8 [103].



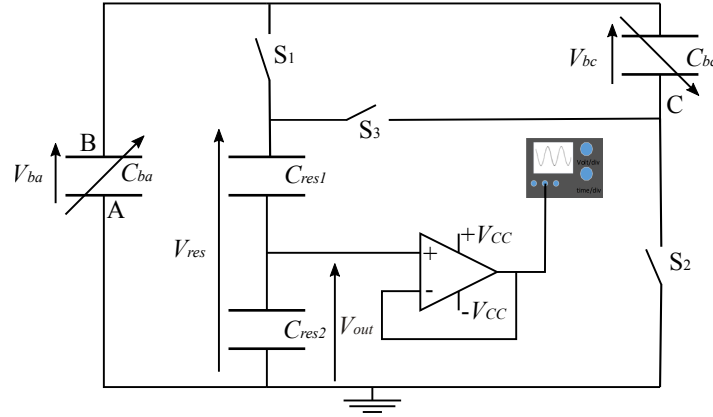


FIGURE 4.8 – Circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire intégrant le diviseur de tension capacitif.

Le rapport entre la tension d'entrée  $V_{res}$  et celle observée en sortie  $V_{out}$  est donnée par l'Équation 4.4 suivante :

$$V_{res} = V_{out} \left( \frac{C_{res1} + C_{res2}}{C_{res1}} \right) \quad (4.4)$$

Lors des expériences, on choisit  $C_{res1} = 10$  nF et  $C_{res2} = 300$  nF, ce qui permet d'afficher une tension de sortie allant jusqu'à 930 V.

Les résultats obtenus sont décrits dans la courbe de la Figure 4.9. On note que l'expérience est en accord avec le modèle numérique présenté dans le chapitre précédent. On considère alors que celui-ci est fiable.

On observe aussi que la tension  $V_{res}$  aux bornes de la capacité de stockage augmente de manière exponentielle jusqu'à l'atteinte d'un seuil de saturation qui apparaît après 700 cycles d'oscillations de l'électrode mobile. La tension maximale atteignable est de  $V_{res}=416$  V. Cela est équivalent à une énergie accumulée de 0.88 mJ, comme mentionné dans la Figure 4.10a. La puissance maximale atteignable est de  $13.65 \mu\text{W}$  et l'énergie par cycle est de  $2.73 \mu\text{J/Cycle}$  (Figure 4.10b).

Les courbes de la Figures 4.10 sont obtenues de manière numérique en analysant la courbe d'ajustement présentée dans la Figure 4.9.

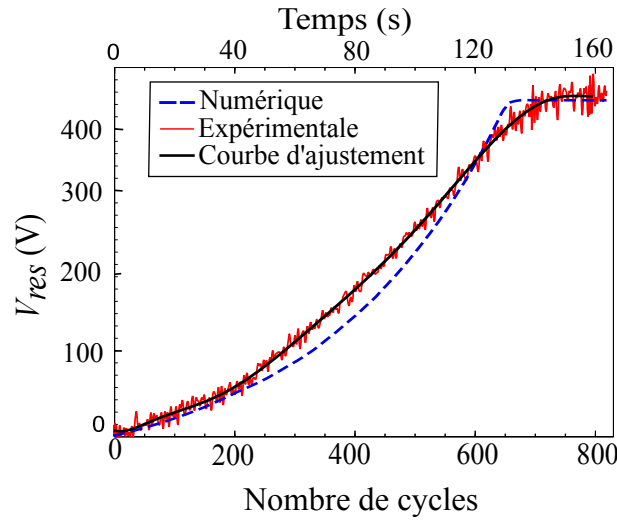


FIGURE 4.9 – Superposition numérique et expérimentale de l'évolution de la tension  $V_{res}$  aux bornes de  $C_{res}$  jusqu'à la saturation pour 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$ .

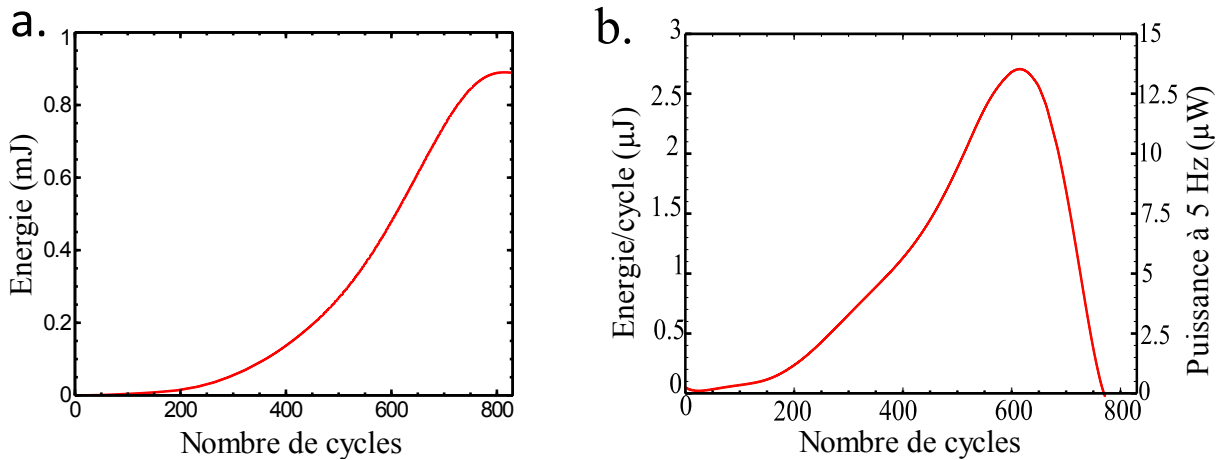


FIGURE 4.10 – (a) Évolution de l'énergie accumulée dans le condensateur  $C_{res}$  en fonction du nombre de cycles, tenant compte de la saturation. (b) Variation résultante de l'énergie par cycle et de la puissance

La saturation qu'on observe peut s'expliquer par la force électrostatique qui apparaît entre les surfaces actives des électrodes. Cette force s'accroît avec la tension à chaque cycle de fonctionnement jusqu'à ce qu'elle devienne supérieure à la force d'inertie.

Dans ce cas, la masse mobile n'aura pas assez d'énergie mécanique pour se déplacer de manière convenable et permettre ainsi le bon déroulement du cycle de multiplication de charges de la machine électrostatique et ce, comme mentionné dans la Figure 4.11 qui montre la simulation de l'évolution de la position de la masse centrale en fonction du nombre de cycles au moment de la saturation.

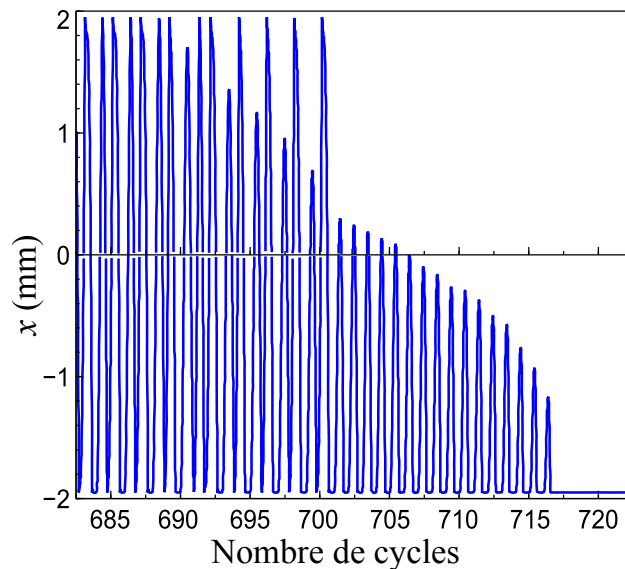


FIGURE 4.11 – Détail sur l'évolution de la position de la masse mobile en fonction du nombre de cycles au moment de la saturation.

On constate d'abord qu'après 700 cycles de fonctionnement, la valeur de la force électrostatique augmente au point d'empêcher la masse d'atteindre sa position extrême droite. Dans cette situation, la génération de charge suivant le principe de *Bennet* s'arrête puisque le contacteur  $S_3$  ne s'active plus.

Cependant, une génération de charges, par effet triboélectrique, persiste sur le côté opposé où l'électrode mobile atteint encore la position extrême. Cela engendre une augmentation des charges seulement à proximité de cette zone, et par conséquent, la force électrostatique correspondante augmente elle aussi.

Une résistance au déplacement qui s'incrémente est induite à chaque cycle. Elle est perçue par la diminution de la distance maximale atteignable.

Après 718 cycles, la force électrostatique devient tellement élevée qu'elle neutralise le mouvement de l'électrode mobile.

D'après la Figure 4.11, on note aussi que l'arrêt du déplacement s'effectue près de l'électrode  $A$ . En effet, la force électrostatique créée du côté  $B-A$  est toujours plus importante que celle produite du côté  $B-C$ , comme le montre la Figure 4.12. La raison de cela est que la variation de la capacité de  $C_{ba}$  est plus importante que  $C_{bc}$ . Cela induit alors une force électrostatique plus importante de ce côté.

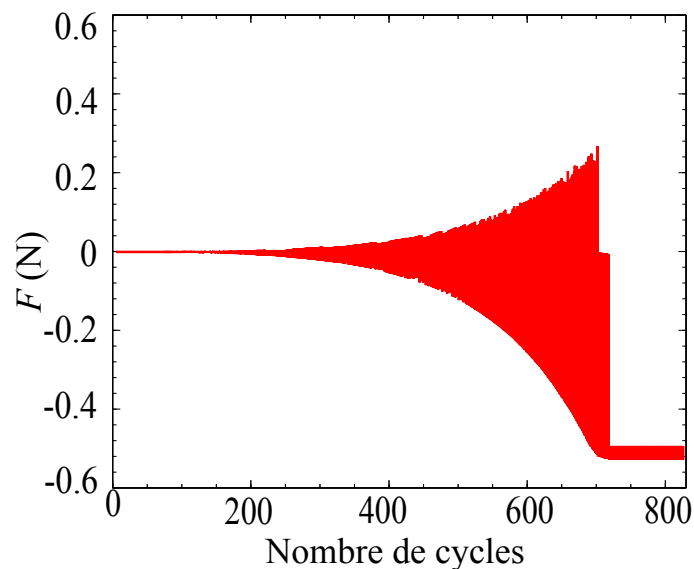


FIGURE 4.12 – Évolution de la force électrostatique agissant sur l'électrode mobile en fonction du nombre de cycles.

## 4.4 Avantage des contacteurs mécaniques

Après avoir validé le comportement du générateur électrostatique à contacteurs mécaniques, on le compare dans cette sous-section au système se basant sur l'utilisation des diodes. En effet, après que *Bennet* a inventé le principe du générateur électrostatique [26], *Queiroz* s'est basé sur celui-ci à des fins de récupération d'énergie vibratoire ambiante, en remplaçant les contacts classiques par des diodes [90].

Puisque l'utilisation des diodes peut influencer négativement sur le rendement du dispositif à travers leur tension seuil et leur courant de fuite induits [102] [92], nous proposons dans cette sous-section de comparer entre l'utilisation des diodes et des contacteurs mécaniques auto-synchronisés que l'on propose.

La Figure 4.13 montre le circuit électrique équivalent de notre dispositif pouvant supporter aussi bien les contacteurs mécaniques que les diodes. L'architecture du circuit et la position des contacteurs restent inchangées. Dans le cas où on se base sur l'utilisation des diodes, le rôle de  $S_1$  et  $S_3$  se limite à borner le déplacement de l'électrode mobile.

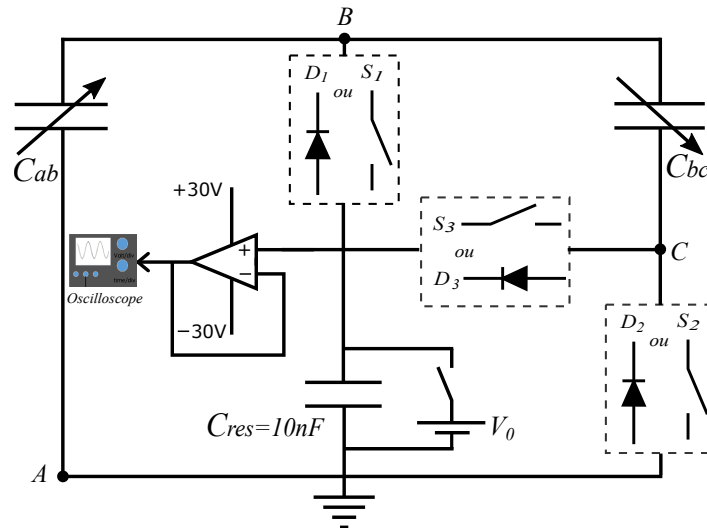


FIGURE 4.13 – circuit électrique du récupérateur d'énergie vibratoire ambiante permettant de supporter autant les diodes que les contacteurs mécaniques.

La réalisation des essais s'effectue dans des conditions similaires afin d'avoir des résultats de comparaison fiables. L'excitation du pot vibrant est fixée à 5 Hz pour une accélération de 0.2  $g_{rms}$ . On fournit aussi une tension de pré-charge de 1V au condensateur de stockage  $C_{res}$ .

la Figure 4.14a et 4.14b nous montre respectivement l'évolution de la tension aux bornes  $C_{res}$  et l'accroissement de l'énergie totale récupérée en fonction du nombre de cycles, dans la cas d'utilisation des diodes et des contacteurs mécaniques.

L'évolution de la tension est plus rapide dans le cas où on se base sur l'utilisation des contacteurs mécaniques. Après 200 cycles d'oscillation, on atteint une tension de 26.84 V avec les contacteurs contre 16.33 V dans le cas de l'emploi des diodes. Cela est équivalent à une énergie totale récupérée de 3.60  $\mu\text{J}$  avec les contacteurs mécaniques contre 1.33  $\mu\text{J}$  pour les diodes.

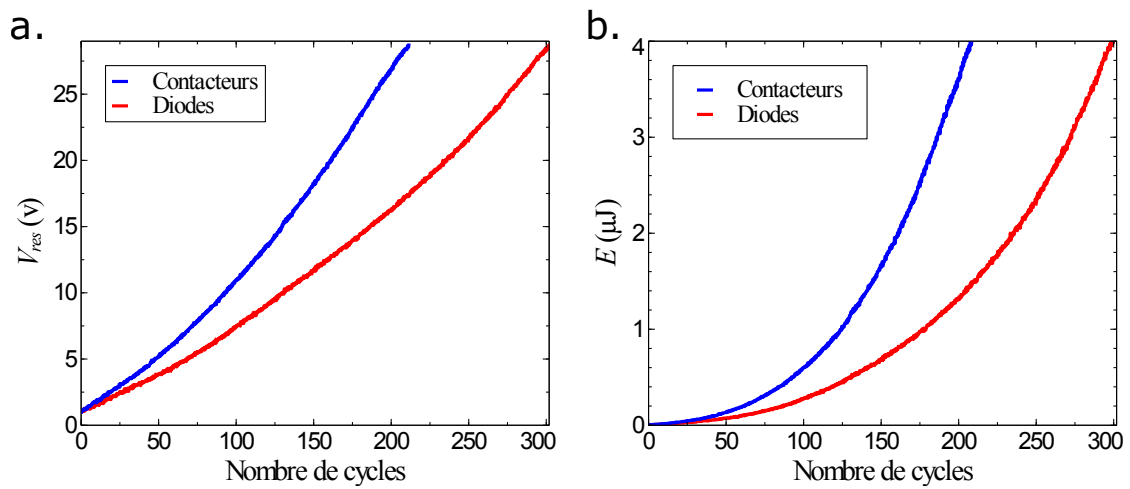


FIGURE 4.14 – Comparaison expérimentale entre le système se basant sur les contacteurs mécaniques et celui se basant sur les diodes, exprimée sous forme d'évolution de la tension  $V_{res}$  (a) et de l'énergie accumulée aux bornes du condensateur de stockage  $C_{res}$  (b), en fonction du nombre de cycles, pour 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$ .

## 4.5 Utilisation des pastilles triboélectriques

Pour évaluer l'impact du patch triboélectrique sur notre dispositif, nous analysons dans cette section l'effet engendré par le changement du matériau puis de son épaisseur.

### 4.5.1 Effet de la variation de matériau

On propose de comparer entre l'utilisation du Polypropylène *PP* et le *PTFE*. Ce dernier se positionne comme le matériau possédant le plus d'affinités électronégatives

( $-190$  nC/J pour le *PTFE* contre  $-90$  nC/J pour le *PP*) (annexe 2) [104]. Sa permittivité relative qui est de 2.1 est semblable à celle de *PP*. L'essai réalisé se base sur l'utilisation de pastilles de  $50$   $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

La réalisation de l'expérience s'effectue avec le circuit de la Figure 4.6b. La fréquence d'excitation est de  $5$  Hz associée à une accélération de  $0.2$   $g_{rms}$ .

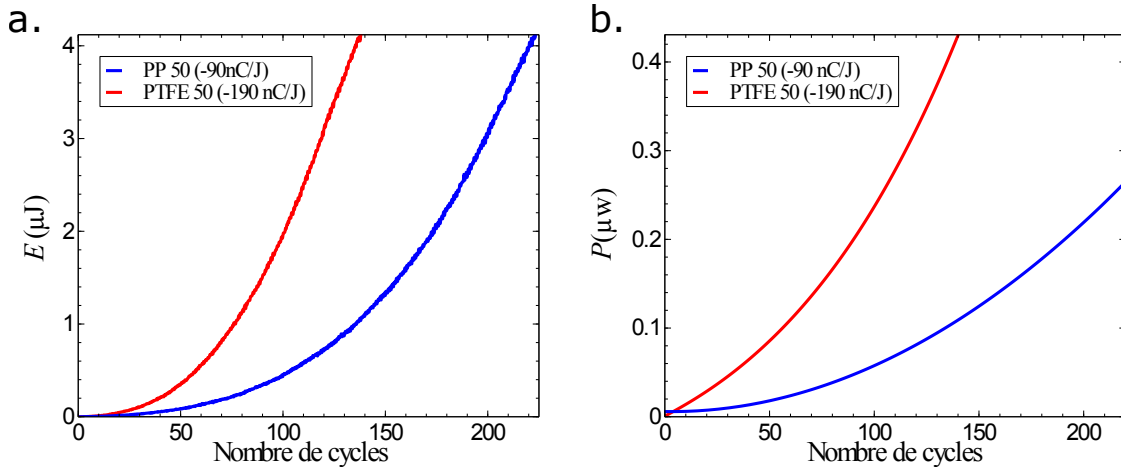


FIGURE 4.15 – Influence du matériau du patch triboélectrique sur les performances du dispositif. (a) Évolution de l'énergie au niveau du condensateur de stockage. (b) Puissance résultante en fonction du nombre de cycles pour  $5$  Hz et  $0.2$   $g_{rms}$

On observe dans la Figure 4.15a et 4.15b l'évolution de l'énergie au niveau du condensateur de stockage  $C_{res}$  et la puissance engendrée en fonction du nombre de cycles. Comme attendu, l'utilisation du *PTFE* est plus adaptée. En effet, après 100 cycles d'oscillations, on atteint  $1.95$   $\mu\text{J}$  d'énergie récupérée dans le cas de l'utilisation du *PTFE* contre  $0.43$   $\mu\text{J}$  avec le *PP*. Cela est équivalent à  $0.2$   $\mu\text{W}$  de puissance générée après 18 s pour le design avec le *PTFE* contre 38.1 s dans le cas où on se base sur l'utilisation du *PP*.

On trace sur la Figure 4.16 l'évolution de l'énergie produite par cycle en fonction de la tension. On observe, après l'atteinte de  $5$  V aux bornes du condensateur  $C_{res}$ , que l'énergie par cycle produite dans le système se basant sur le *PTFE* est de  $9.63$  nJ/cycle, contre  $4.54$  nJ/cycle dans le cas du *PP*.

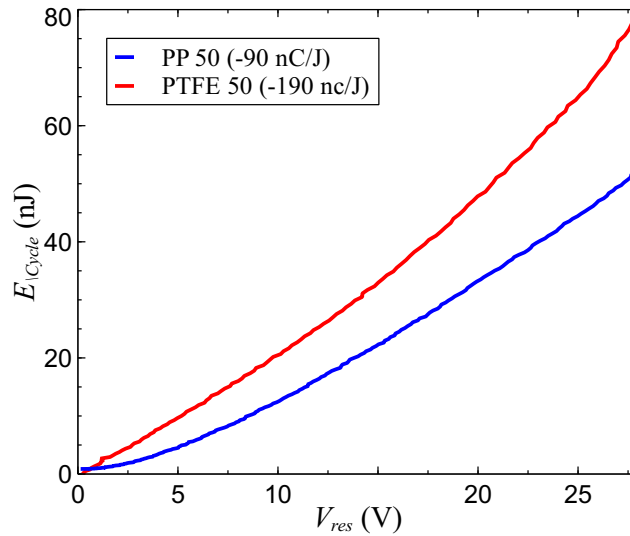


FIGURE 4.16 – Variation de l'énergie par cycle par rapport à l'évolution de la tension  $V_{res}$  dans le cas d'utilisation du *PP* et du *PTFE* pour 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$ .

#### 4.5.2 Effet de la variation de l'épaisseur de la pastille

On refait l'expérience dans les mêmes conditions en variant maintenant l'épaisseur du patch afin de voir l'impact de ce paramètre sur les performances du dispositif. On opte pour une comparaison entre deux patches en *PTFE* d'épaisseur respective de 25  $\mu\text{m}$  et 50  $\mu\text{m}$ . On trace alors sur la Figure 4.17a et 4.17b l'évolution de l'énergie récupérée aux bornes de  $C_{res}$  et la puissance résultante en fonction du nombre de cycles. On observe que l'utilisation de la pastille avec 25  $\mu\text{m}$  d'épaisseur induit une légère amélioration des performances. Après 100 cycles de fonctionnement, l'énergie récupérée atteint 2.2  $\mu\text{J}$  avec l'utilisation du patch de 25  $\mu\text{m}$ , contre 1.95  $\mu\text{J}$  avec le patch de 50  $\mu\text{m}$ . Cela est équivalent à 0.2  $\mu\text{W}$  de puissance générée après 16.54 s dans le premier cas, contre 17.95 s dans le deuxième.

On peut dire alors que la variation de l'épaisseur des pastilles isolantes n'affecte pas la quantité des charges transférées par effet triboélectrique. Par contre, cela induit une modification des positions extrêmes. Cela entraîne alors une variation de la capacité maximale atteignable.



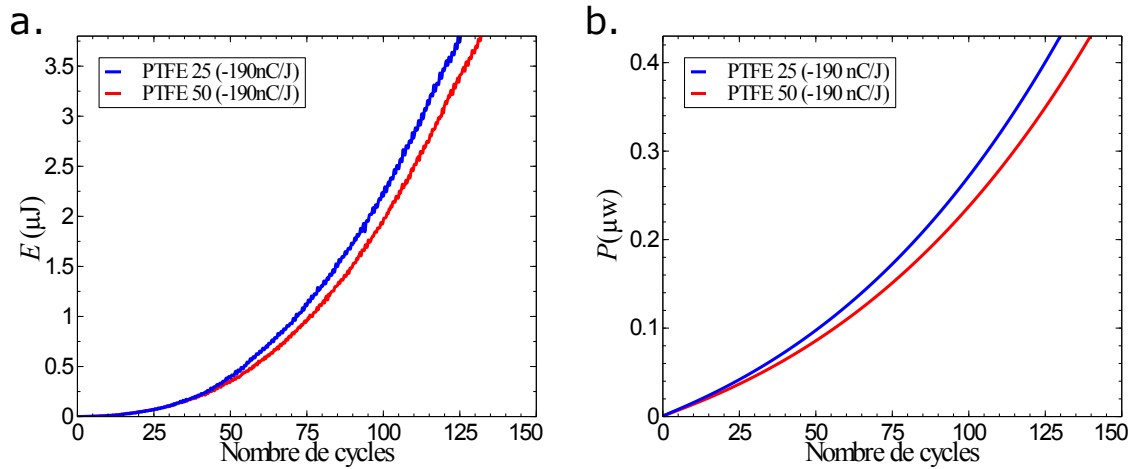


FIGURE 4.17 – Influence de l'épaisseur du patch triboélectrique en *PTFE* sur les performances du récupérateur d'énergie vibratoire décrite par l'évolution de l'énergie au niveau de  $C_{res}$  (a) et par la puissance engendrée (b) en fonction du nombre de cycles, pour 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$ .

## 4.6 Conclusion

Cette section a été successivement consacrée à la validation de notre modèle numérique, à la présentation de notre prototype expérimental et à la réalisation des ensembles des essais de validation des performances. Dans cette partie, on a aussi comparé notre récupérateur d'énergie vibratoire à contacteurs mécaniques avec la technologie se basant sur les diodes. On a aussi pu analyser l'effet des pastilles triboélectriques et on a confirmé leur impact sur les performances du dispositif.

La technologie qu'on vient d'exposer a l'avantage d'optimiser la récupération de l'énergie vibratoire par rapport aux systèmes déjà existants. Nous allons maintenant présenter une analyse dynamique de notre dispositif afin de voir son comportement dans différentes conditions d'utilisation.

# Chapitre 5

## Analyse du comportement dynamique du générateur électrostatique

Après avoir décrit les performances de notre récupérateur d'énergie vibratoire et réalisé les expériences nécessaires prouvant son efficacité, on consacre ce chapitre à l'analyse dynamique de notre système.

Étudier le comportement dynamique de notre dispositif revient à observer l'impact de chaque paramètre entraînant une modification de l'oscillation de la masse mobile [52]. Cette étude est essentielle pour assimiler les retombées de chaque variable sur le fonctionnement du récupérateur. Une connaissance approfondie de ces dernières nous permet alors d'optimiser le processus de récupération d'énergie.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons, grâce à l'algorithme développé et validé dans le chapitre précédent, aux conséquences induites suite à la variation de la fréquence d'excitation, de l'accélération appliquée et du décalage angulaire apparaissant entre la direction de déplacement et celle d'excitation. Par la suite, un modèle continu simulant le comportement de notre dispositif est présenté.

## 5.1 Réponse dynamique du dispositif sous différentes conditions d'excitation

Afin de visualiser le comportement dynamique de notre récupérateur dans les conditions d'essais ( $0.2 g_{rms}$ , 5 Hz), on trace sur la Figure 5.1 le portrait de phase du système pour la position et la vitesse de la masse mobile. Cette représentation est obtenue en utilisant l'algorithme développé et validé dans les chapitres précédents.

En se basant sur cette représentation, on peut déterminer le cycle-limite du mouvement de l'électrode mobile ainsi que les différentes caractéristiques liées à l'utilisation de butée de fin de course, entraînant un inversement rapide de la vitesse de déplacement et permettant t'atteindre un pic de 0.11 m/s. Aussi, cette représentation nous permet de mettre en évidence un rebond de l'électrode mobile qui apparaît lorsque celle-ci est positionnée près de l'électrode  $C$ . Ce phénomène est facilement détectable à partir de cette représentation par rapport à celle montré dans le chapitre précédent où on a tracé l'évolution de la position par rapport au temps.

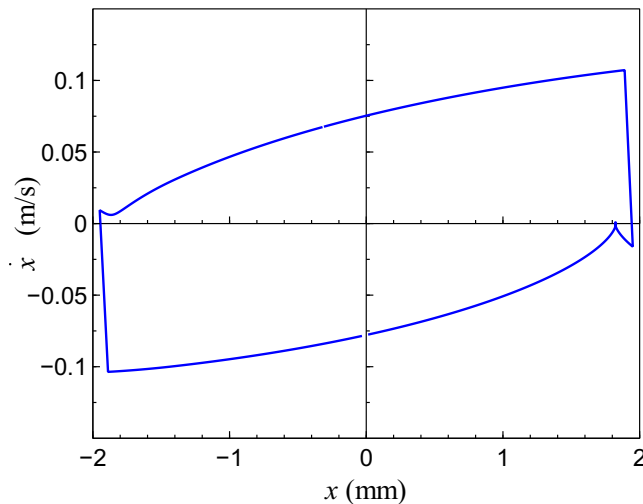


FIGURE 5.1 – Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile dans les conditions de test standard ( $0.2 g_{rms}$ , 5 Hz) en fonction de sa position pendant la récupération d'énergie vibratoire.

### 5.1.1 Effet de variation de la fréquence d'excitation

Afin d'assimiler l'effet de la fréquence d'excitation sur le fonctionnement du dispositif, on modélise d'abord dans la Figure 5.2 la réponse fréquentielle de notre récupérateur d'énergie vibratoire après 10 s de fonctionnement, commençant le cycle de multiplication de charges avec 2 V de tension aux bornes du condensateur de stockage  $C_{res}$  et en appliquant une accélération de 0.2  $g_{rms}$ . Pour y aboutir, on se base sur le modèle numérique précédemment développé et validé par sa confrontation avec le dispositif expérimental

On remarque d'abord à partir de cette figure que l'augmentation de l'excitation entraîne l'apparition d'une tension de plus en plus importante aux bornes de  $C_{res}$  après les 10 s de fonctionnement. Pour une fréquence de 4 Hz, la tension aux bornes du condensateur de stockage atteint 7.7 V contre 10.5 V pour une excitation de 6 Hz. Cela est évident, puisque l'augmentation de la fréquence d'excitation entraîne un accroissement du nombre de cycle de multiplication de charges pour un même intervalle de temps.

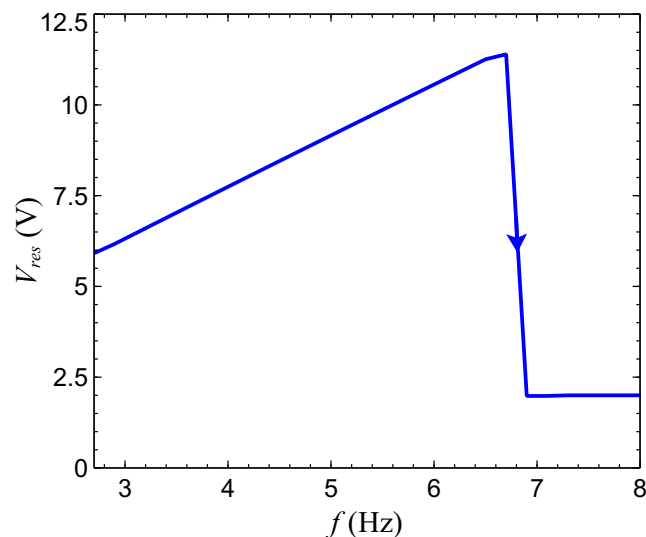


FIGURE 5.2 – Évolution de la tension au niveau de  $C_{res}$ , initialisée avec 2 V, après 10 s de fonctionnement en fonction de la fréquence appliquée et pour 0.2  $g_{rms}$ .

On observe aussi dans la Figure 5.2, qu'après une fréquence de 7 Hz, la multiplication de charges ne se produit plus. Dans ces conditions, la masse mobile n'a pas assez d'énergie pour assurer les étapes de la machine électrostatique. En effet, comme l'excitation se fait à une accélération constante ( $0.2 g_{rms}$ ), l'augmentation de la fréquence est automatiquement accompagnée par une réduction de l'amplitude.

Pour confirmer ce résultat, on trace sur la Figure 5.3 le cycle-limite de l'évolution de la vitesse de l'électrode centrale en fonction de sa position dans l'espace des phases, pour différentes fréquences d'excitation et pour une accélération de  $0.2 g_{rms}$ .

On remarque d'abord que la diminution de la fréquence d'excitation, par rapport à celle utilisée pour les essais, entraîne une légère augmentation de l'orbite du cycle limite et une apparition d'un rebond plus prononcé à proximité de  $x_{03}$ . Cela s'explique par l'énergie associée à la masse en mouvement qui augmente avec la diminution de la fréquence. Par contre, pour une fréquence de 8 Hz, l'amplitude résultante sera si faible qu'elle ne permet plus à la masse mobile d'atteindre les positions extrêmes et d'assurer ainsi la multiplication de charges selon le principe de la machine électrostatique. Ce phénomène a été observé dans la partie expérimentale de ce travail.

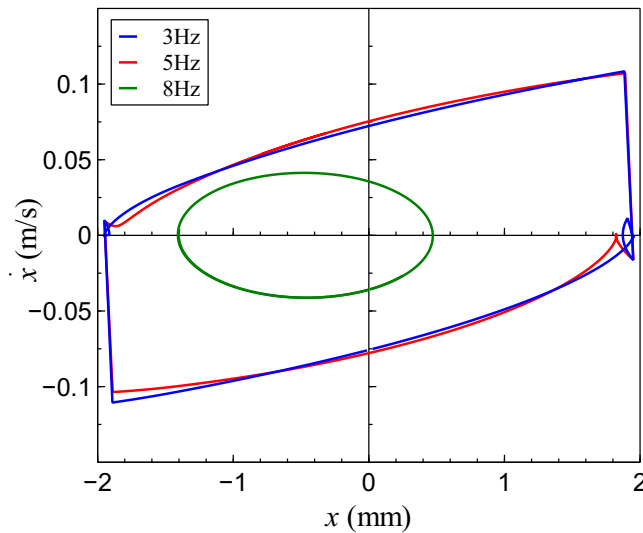


FIGURE 5.3 – Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour plusieurs fréquences appliquées, et pour  $0.2 g_{rms}$  d'accélération.

### 5.1.2 Effet de variation de l'accélération

On étudie dans cette sous-section l'effet de variation de l'accélération sur ses performances du dispositif. En utilisant notre algorithme, on trace d'abord sur la Figure 5.4 le cycle-limite de la variation de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour une fréquence de 5 Hz et pour différentes accélérations.

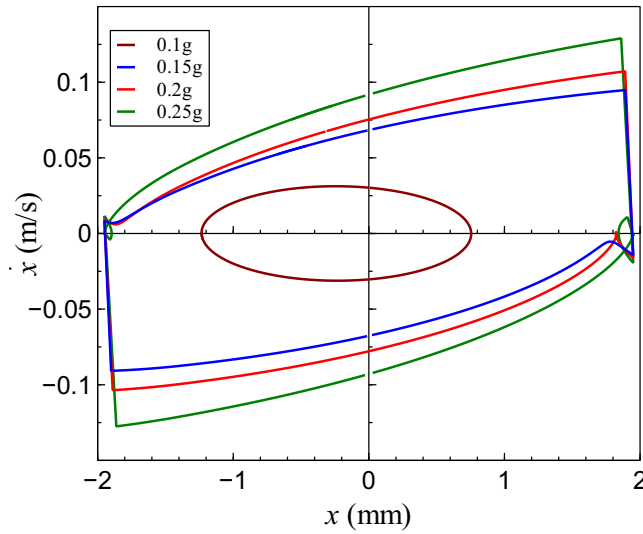


FIGURE 5.4 – Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour différentes accélérations appliquées et pour une fréquence de 5 Hz.

On observe que plus l'accélération appliquée sur notre système augmente, plus les orbites s'accroissent. Cela se traduit par l'obtention d'une vitesse de déplacement de plus en plus importante et d'un rebond plus visible près de  $x_{03}$ . L'énergie contenue dans le système est alors de plus en plus importante au niveau de la masse mobile. On remarque aussi qu'avec 0.1  $g_{rms}$  d'accélération appliquée, le système ne possède plus assez d'énergie pour atteindre les positions extrêmes. Dans ce cas, la masse mobile oscille sans pour autant toucher aux extrémités.

Quant à l'impact de ce paramètre sur le chargement de  $C_{res}$ , on trace sur la Figure 5.5 la réponse fréquentielle pour différentes accélérations. On observe que plus l'accélération augmente, plus on peut atteindre des niveaux de fréquence élevés.

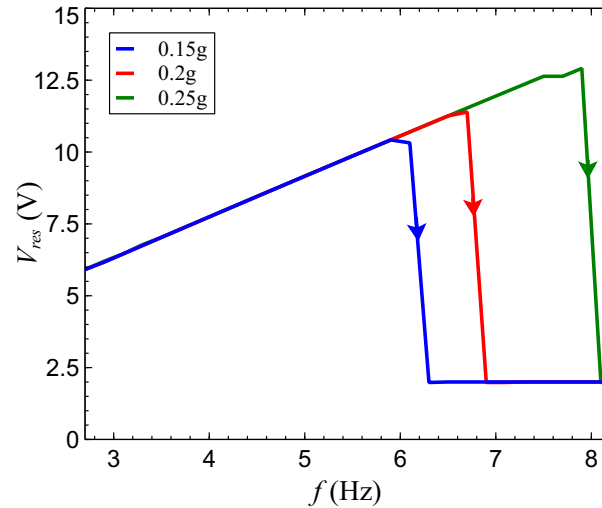


FIGURE 5.5 – Variation de la tension après 10 s de fonctionnement au niveau de  $C_{res}$  initialisé avec 2 V, en fonction de la fréquence appliquée, et pour différentes accélérations.

En effet, l'accroissement de ce dernier paramètre fournit au système plus d'énergie, permettant de fonctionner avec des niveaux plus élevés de fréquence. Cela permettra au système de récupérer de l'énergie sur une plus large bande. Par exemple, pour une accélération de 0.15  $g_{rms}$ , la fréquence maximale atteignable est de 6.1 Hz alors qu'elle arrive à 7.9 Hz pour une accélération appliquée de 0.25  $g_{rms}$ .

### 5.1.3 Impact de l'angle d'inclinaison sur le comportement dynamique

Dans les conditions réelles d'utilisation, le sens d'oscillation de la masse mobile n'est jamais parfaitement parallèle au sens de l'excitation. En effet, un angle  $\theta$  existe toujours entre le plan d'oscillation de l'électrode centrale et celui de l'excitation. Ce décalage angulaire existe toujours et ne peut être éliminé. On procède alors à étudier dans cette partie l'impact de ce décalage sur les performances de notre dispositif.

Du point de vue de modélisation, le décalage angulaire entre les deux plans se traduit en une force  $F_T$  agissant sur cette électrode mobile et dont la valeur dépend de l'angle d'inclinaison  $\theta$ . L'expression de cette force est donnée par l'Équation 5.1.

$$F_T = mg \sin \theta \quad (5.1)$$

Afin d'analyser l'impact de ce paramètre sur le dispositif, on trace le cycle-limite de la variation de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour une inclinaison négative puis positive, comme mentionné dans la Figure 5.6. On remarque que la vitesse de l'électrode mobile augmente si la direction de déplacement est la même que celle de l'inclinaison, et elle diminue si les deux directions sont opposées.

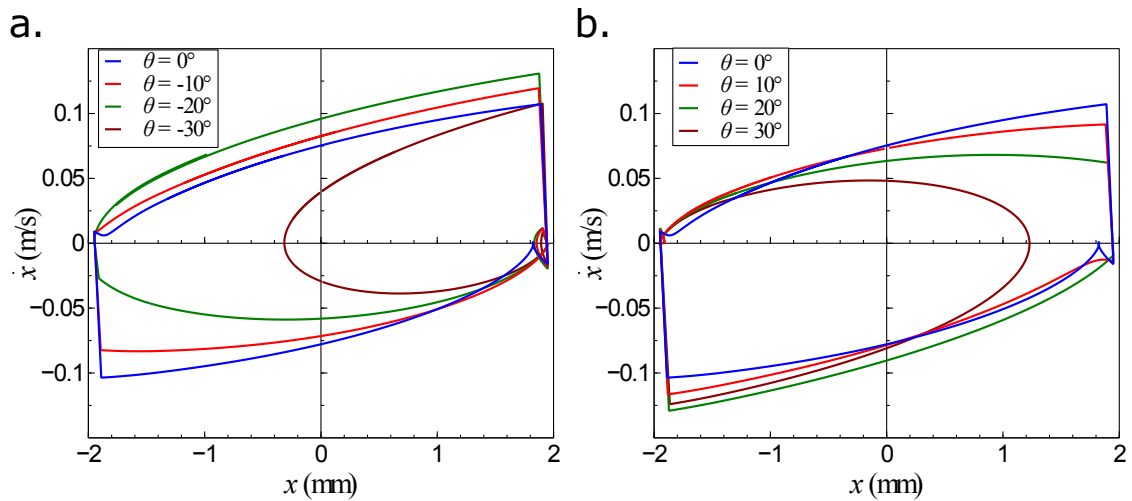


FIGURE 5.6 – Cycle-limite de l'évolution de la vitesse de la masse mobile en fonction de sa position pour des inclinaisons négatives (a) puis positives (b) avec 5 Hz d'excitation et 0.2  $g_{rms}$  d'accélération.

Aussi, a-t-on constaté que jusqu'à  $20^\circ$  d'inclinaison, la récupération de l'énergie continue de manière régulière puisque les positions extrêmes ( $x_{01}$  et  $x_{03}$ ) sont atteintes.



À partir de  $30^\circ$  d'inclinaison, la masse mobile n'aura plus assez d'énergie pour atteindre la course maximale. Ainsi la multiplication de charges s'arrête.

On peut conclure à partir de cette analyse que le décalage entre la direction de déplacement et celle de l'excitation entraîne une variation de l'énergie emmagasinée et peut même induire un arrêt de la récupération de l'énergie si l'angle d'inclinaison est important

#### 5.1.4 Effet de la variation de la capacité sur le comportement du dispositif.

À partir de ces analyses effectuées, on peut dire que la récupération de l'énergie vibratoire par notre dispositif est largement influencée par des paramètres extérieurs tels que la fréquence d'excitation, l'accélération ou même l'angle d'inclinaison du système. Il est donc primordial d'en tenir compte afin d'optimiser les performances de notre récupérateur. Cependant, dans une logique d'optimisation, on peut aussi agir sur la variation de capacité comme décrit dans les chapitres précédents.

Pour ce faire, on varie le rapport de variation de capacité  $\eta$  en agissant sur la distance minimale atteignable qui sépare les électrodes dans les positions extrêmes " $d_{min}$ ", sans pour autant toucher à la position des butées.

On trace alors sur la Figure 5.7 la réponse fréquentielle de notre dispositif pour différentes distances minimales atteignables entre les électrodes, pour une accélération de  $0.2 g_{rms}$  et après 10 s de fonctionnement.

On remarque à partir de cette Figure que la diminution de  $d_{min}$ , induisant l'accroissement du ratio de variation de capacité  $\eta$ , entraîne un chargement plus rapide du condensateur de stockage. Pour une fréquence de 5 Hz et après 10 s de fonctionnement, la tension aux bornes du condensateur de stockage  $C_{res}$  atteint 7.7 V pour un écart de  $70 \mu\text{m}$  contre 14.4 V pour un écart de  $30 \mu\text{m}$ .

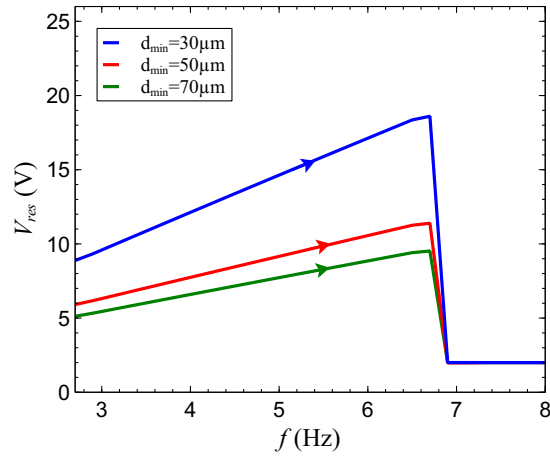


FIGURE 5.7 – Évolution de la tension après 10 s de fonctionnement au niveau de  $C_{res}$ , initialisé avec 2 V en fonction de la fréquence, pour différentes distances minimales  $d_{min}$  entre les électrodes.

Après 7 Hz d'excitation, un arrêt de la récupération de l'énergie est observé quel que soit le ratio de variation de capacité. Cela est d'autant plus vrai que la modification de ce paramètre entraîne effectivement une variation des performances, mais elle n'affecte en rien la dynamique de la masse mobile.

## 5.2 Analyse analytique du comportement du générateur électrostatique

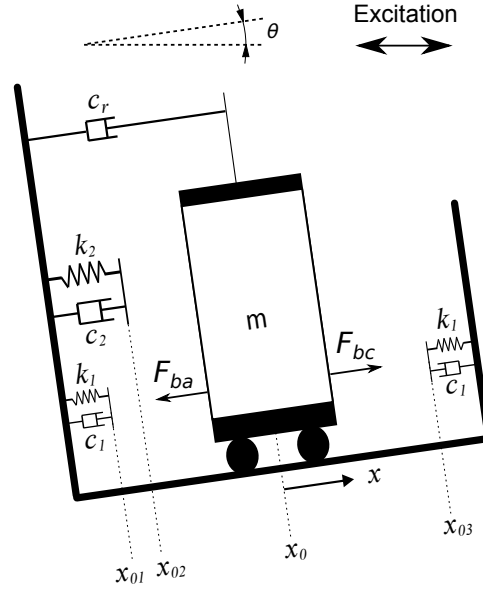


FIGURE 5.8 – Modèle dynamique pour l'analyse dynamique en utilisant une raideur continue en fonction de la position.

L'équation de mouvement de l'électrode mobile associée au modèle décrit dans la Figure 5.8 est donnée par :

$$m\ddot{x} + c(x)\dot{x} + F_k(x) = \frac{\epsilon S_{bc} V_{bc}^2}{2(d_0 - x)^2} - \frac{\epsilon S_{ba} V_{ba}^2}{2(d_0 + x)^2} + m\gamma \cos(2\pi ft) + mg \sin \theta \quad (5.2)$$

Tel que  $F_k$  représentée dans la Figure 5.9, est donnée par :

$$F_k(x) = \begin{cases} k_1(x - x_{03}) & \text{si } x \geq x_{03} \\ 0 & \text{si } x_{02} < x < x_{03} \\ k_2(x - x_{02}) & \text{si } x_{01} < x \leq x_{02} \\ (k_1 + k_2)x - k_1x_{01} - k_2x_{02} & \text{si } x \leq x_{01} \end{cases} \quad (5.3)$$

Quant au coefficient d'amortissement, celui-ci est donnée par :

$$c(x) = \begin{cases} c_1 + c_r & \text{si } x \geq x_{03} \\ c_r & \text{si } x_{02} < x < x_{03} \\ c_2 + c_r & \text{si } x_{01} < x \leq x_{02} \\ c_1 + c_2 + c_r & \text{si } x \leq x_{01} \end{cases} \quad (5.4)$$

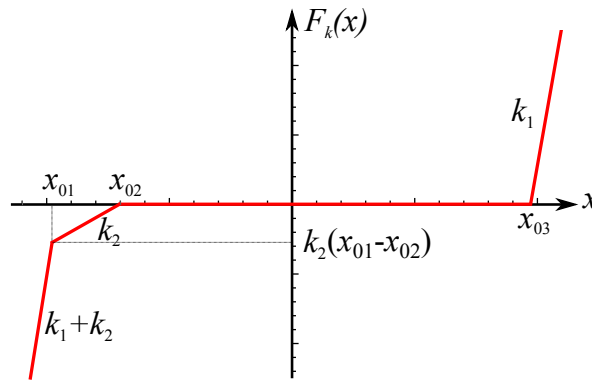


FIGURE 5.9 – Composante  $F_k$  de la force de rappel

Afin de faciliter les calculs, on opte pour l'utilisation des variables non dimensionnelles mentionnées comme suit :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_2}{m}}, \quad \kappa = \frac{k_1}{k_2}, \quad \beta = \frac{d_0}{x_{03}}, \quad \chi = \frac{\epsilon S}{2x_{03}^3 k_2}, \quad f_T = \frac{mg \sin \theta}{k_2 x_{03}}, \quad \Gamma = \frac{m\gamma}{k_2 x_{03}}, \quad \Omega = \frac{2\pi f}{\omega_n}$$

$$\alpha_1 = \frac{x_{01}}{x_{03}} = -1, \quad \alpha_2 = \frac{x_{02}}{x_{03}}, \quad \alpha_3 = \frac{x_{03}}{x_{03}} = 1$$

Ainsi l'équation de mouvement devient :

$$\ddot{x} + \zeta(x)\dot{x} + f_k(x) = \frac{\chi V_{bc}^2}{(\beta - x)^2} - \frac{\chi V_{ba}^2}{(\beta + x)^2} + f_T + \Gamma \cos \Omega t \quad (5.5)$$

Tel que  $\zeta(x) = \frac{\omega_n}{k_2}c(x)$  et :

$$f_k(x) = \begin{cases} \kappa(x - \alpha_3) & \text{si } x \geq \alpha_3 \\ 0 & \text{si } \alpha_2 < x < \alpha_3 \\ (x - \alpha_2) & \text{si } -1 < x \leq \alpha_2 \\ (\kappa + 1)x + \kappa - \alpha_2 & \text{si } x \leq -1 \end{cases} \quad (5.6)$$

### 5.2.1 Solution numérique du modèle continue

Afin de valider les nouveaux paramètres utilisés dans ce modèle, on utilise une approche numérique pour résoudre l'Équation 5.5. On pourra ainsi déterminer les paramètres de raideur et d'amortissement avec ceux du modèle discontinu calés sur les résultats de l'analyse expérimentale.

On utilise une discrétisation par la méthode de Runge-Kutta en utilisant les paramètres du Tableau 5.1.

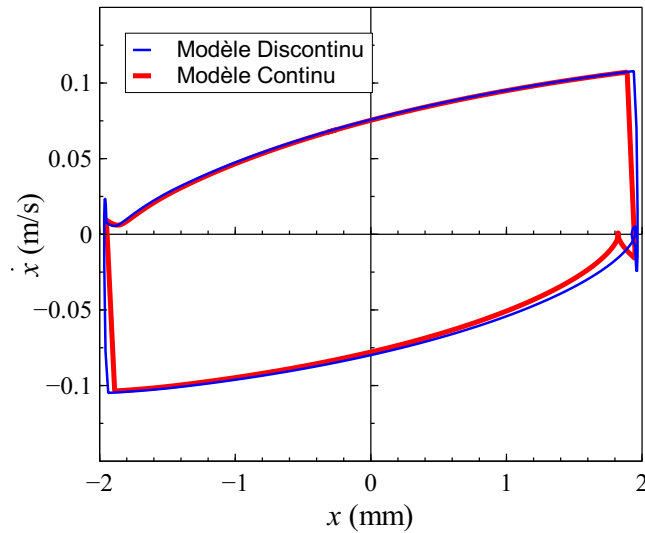
La validation du modèle continu et de ses paramètres se fait par la confrontation de ce dernier avec le modèle discontinu, validé quant à lui avec les expériences. On trace alors sur la figure 5.10 le portrait de phase de l'évolution de la vitesse de la masse mobile par rapport à sa position pour nos deux modèles. On observe sur cette Figure qu'une bonne concordance existe entre eux.

Pour confirmer le résultat obtenu, on trace sur la Figure 5.11 la simulation de la variation de  $\dot{x}_{rms}$  par rapport à la fréquence appliquée pour nos deux modèles.

A côté de la similitude observée entre eux, on constate que la moyenne quadratique de la vitesse de la masse mobile augmente avec la fréquence jusqu'à l'atteinte d'une valeur critique où les positions extrêmes ne sont plus atteintes. Ainsi, cette vitesse chute.

TABLE 5.1 – Paramètres utilisées pour simuler le comportement du dispositif en utilisant la méthode de Runge-Kutta ainsi que leurs valeurs correspondante.

désignation	signification	valeur
$x_{01}$	Position extrême gauche	-1.95 mm
$x_{02}$	Position du ressort au niveau de $S_2$	-1.4 mm
$x_{03}$	Position extrême droite	1.95 mm
$d_0$	Distance entre les électrodes à la position initiale	2 mm
$m$	Masse de l'électrode mobile	315 mg
$k_2$	Raideur du ressort $S_2$	200 N/m
$c_2$	Coefficient d'amortissement du ressort $S_2$	0.02 N.s/m
$k_1$	Raideur des butées de fin de course	$2.8 \cdot 10^6$ N/m
$c_1$	Coefficient d'amortissement des butées de fin de course	1200 N.s/m
$c_r$	Coefficient d'amortissement dû aux frottements	0.2 N.s/m
$S_{ba}=S_{bc}$	Surface active des capacités variables $C_{ba}$ et $C_{bc}$	$1.2 \times 10^{-3}$ m <sup>2</sup>


 FIGURE 5.10 – Comparaison portrait de phase pour une accélération de 0.2  $g_{rms}$  pour le modèle continu et discontinu.

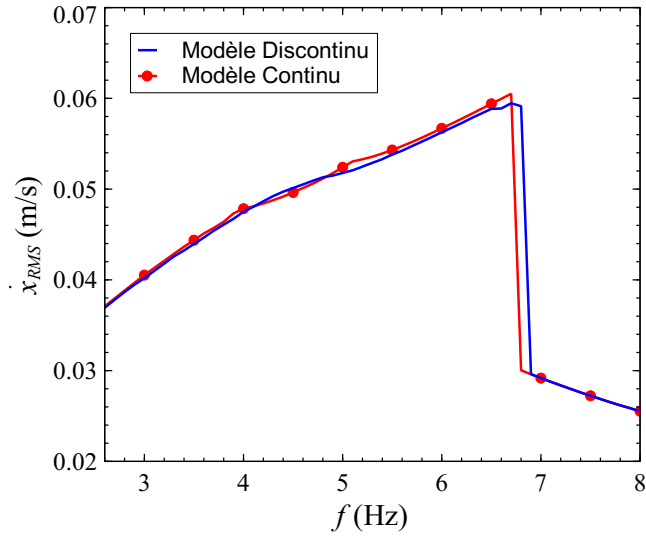


FIGURE 5.11 – Comparaison de la variation de  $\dot{x}_{rms}$  par rapport à la fréquence appliquée pour une accélération de  $0.2 g_{rms}$  pour le modèle continue et discontinu.

## 5.2.2 Solution analytique du modèle continue

Une solution de l'Equation 5.5 selon la méthode Averaging peut être calculée d'une manière analytique [52].

Les étapes suivies sont décrites ci-après [105]

On commence par supposer que l'équation de mouvement 5.5 peut être écrite sous la forme :

$$\ddot{x} = \varepsilon f(x, \dot{x}, t) \quad (5.7)$$

où  $\varepsilon$  est un paramètre de perturbation.

La solution de l'Equation 5.7 peut être décrite par la forme :

$$x(t) = a(t) \sin \phi(t) \quad (5.8)$$

où  $a(t)$  est l'amplitude de la solution,  $\phi(t) = \Omega t + \varphi(t)$  et  $\varphi$  représente le déphasage de la solution par rapport à l'excitation.

En utilisant la technique de Krylov-Bogoliubov [105], on impose à la solution de la vitesse la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = a\Omega \cos \phi \quad (5.9)$$

Par conséquent, la condition suivante doit être satisfaite :

$$\dot{a} \sin \phi + a\dot{\phi} \cos \phi = 0 \quad (5.10)$$

Le terme d'accélération est obtenu par dérivation de l'Equation 5.9

$$\ddot{x}(t) = -\Omega^2 a \sin \phi + \Omega \dot{a} \cos \phi - \Omega a \dot{\phi} \sin \phi \quad (5.11)$$

En combinant les équations 5.8, 5.9 et 5.11, dans l'Equation de mouvement 5.7, on obtient :

$$-\Omega^2 a \sin \phi + \Omega \dot{a} \cos \phi - \Omega a \dot{\phi} \sin \phi = \varepsilon f(a \sin \phi, a\Omega \cos \phi) = \varepsilon f(a, \phi) \quad (5.12)$$

On résout alors les Equations 5.10 et 5.12 pour  $\dot{a}$  et  $\dot{\phi}$  :

$$\begin{cases} \dot{a} = \frac{\cos \phi}{\Omega} (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) \\ \dot{\phi} = -\frac{\sin \phi}{a\Omega} (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) \end{cases} \quad (5.13)$$

Avec :

$$f(a, \phi) = \frac{\chi V_{bc}^2}{(\beta - a \sin \phi)^2} - \frac{\chi V_{ba}^2}{(\beta + a \sin \phi)^2} + f_T + \Gamma \cos(\varphi - \phi) - \zeta(a, \phi) a\Omega \cos \phi - f_k(a, \phi) \quad (5.14)$$



$$\zeta(a, \phi) = \frac{\omega_n}{k_2} \begin{cases} c_r & \text{si } 0 \leq \phi < \phi_3 \\ c_1 + c_r & \text{si } \phi_3 \leq \phi < \pi - \phi_3 \\ c_r & \text{si } \pi - \phi_3 \leq \phi \leq \pi - \phi_2 \\ c_2 + c_r & \text{si } \pi - \phi_2 \leq \phi \leq \pi - \phi_1 \\ c_1 + c_2 + c_r & \text{si } \pi - \phi_1 \leq \phi \leq 2\pi + \phi_1 \\ c_2 + c_r & \text{si } 2\pi + \phi_1 \leq \phi \leq 2\pi + \phi_2 \\ c_r & \text{si } 2\pi + \phi_2 \leq \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (5.15)$$

$$f_k(a, \phi) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 \leq \phi < \phi_3 \\ \kappa(a \sin \phi - \alpha_3) & \text{si } \phi_3 \leq \phi \leq \pi - \phi_3 \\ 0 & \text{si } \pi - \phi_3 < \phi \leq \pi - \phi_2 \\ (a \sin \phi - \alpha_2) & \text{si } \pi - \phi_2 \leq \phi \leq \pi - \phi_1 \\ (\kappa + 1)a \sin \phi + \kappa - \alpha_2 & \text{si } \pi - \phi_1 \leq \phi \leq 2\pi + \phi_1 \\ (a \sin \phi - \alpha_2) & \text{si } 2\pi + \phi_1 \leq \phi \leq 2\pi + \phi_2 \\ 0 & \text{si } 2\pi + \phi_2 \leq \phi \leq 2\pi \end{cases} \quad (5.16)$$

Où on considère que  $\phi_1 = \arcsin \frac{\alpha_1}{a}$ ,  $\phi_2 = \arcsin \frac{\alpha_2}{a}$  et  $\phi_3 = \arcsin \frac{\alpha_3}{a}$

L'équation différentielle d'ordre 2 décrite par 5.5 est remplacée par deux équations différentielles d'ordre 1 pour l'amplitude  $a$  et la phase  $\phi$ . L'application de la méthode Averaging suppose que ces variables varient lentement pour une période  $T = \frac{2\pi}{\Omega}$  du mouvement. Leurs variations dans le temps peut être considérées comme constantes,

de ce fait on écrit que

$$\begin{aligned}\dot{a} &= \frac{1}{T\Omega} \int_0^T \cos \phi (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) dt \\ &= \frac{1}{2\pi\Omega} \int_0^{2\pi} \cos \phi (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) d\phi\end{aligned}\quad (5.17)$$

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= -\frac{1}{aT\Omega} \int_0^T \sin \phi (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) dt \\ &= -\frac{1}{2a\pi\Omega} \int_0^{2\pi} \sin \phi (\Omega^2 a \sin \phi + \varepsilon f(a, \phi)) d\phi\end{aligned}\quad (5.18)$$

En calculant les termes intégrales, on obtient l'équation de modulation :

$$\begin{aligned}\dot{a} &= \frac{\varepsilon}{4k_2\pi\Omega} \left( 4c_1\omega\Omega \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}} - 2\alpha_2 c_2 \omega \Omega \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^2}{a^2}} - 2\pi a c_1 \omega \Omega \right. \\ &\quad \left. + 4a c_1 \omega \Omega \arcsin\left(\frac{1}{a}\right) - 2a c_2 \omega \Omega \arcsin\left(\frac{\alpha_2}{a}\right) - \pi a c_2 \omega \Omega \right. \\ &\quad \left. - 2\pi a c_1 \omega \Omega + 2\pi \Gamma k_2 \cos \varphi \right)\end{aligned}\quad (5.19)$$

$$\begin{aligned}\dot{\phi} &= \frac{1}{2a\pi\Omega} \left( \alpha_2 \varepsilon \sqrt{1 - \frac{\alpha_2^2}{a^2}} - 2\kappa \varepsilon \sqrt{1 - \frac{1}{a^2}} + a \varepsilon \arcsin\left(\frac{\alpha_2}{a}\right) - \pi a \Omega^2 \right. \\ &\quad \left. + \pi a \kappa \varepsilon - 2a \kappa \varepsilon \arcsin\left(\frac{1}{a}\right) + \frac{\pi a \varepsilon}{2} - \pi \Gamma \varepsilon \sin \varphi \right)\end{aligned}\quad (5.20)$$

La solution en régime permanent est décrite dans la Figure 5.12. Elle obtenue lorsque  $\dot{a} = 0$  et  $\dot{\phi} = 0$ . Les équations 5.19 et 5.20 sont résolues en utilisant un algorithme de Newton-Raphson pour différentes valeur de la fréquence d'excitation  $\Omega$ .

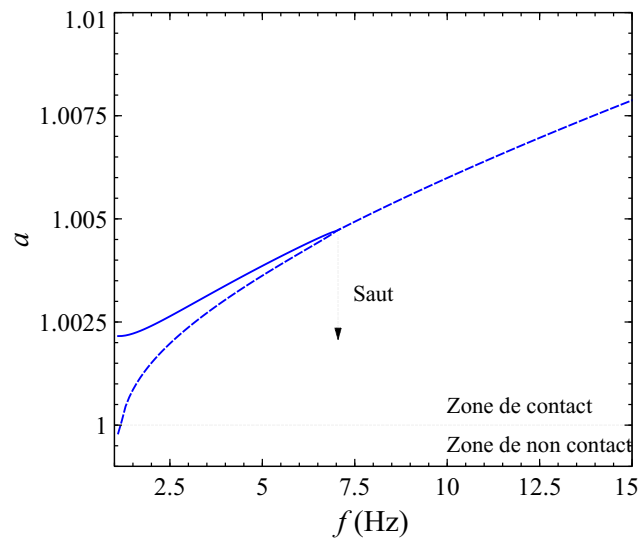


FIGURE 5.12 – Solution en régime permanent du modèle continue du récupérateur d’énergie vibratoire pour  $\epsilon = 0.05$ . Les solutions stables sont représentées par des traits continus et celles instable par des traits discontinus.

Sur la Figure 5.12 on démontre que la méthode analytique proposée peut reproduire le comportement du système d’une manière continue même lorsque le contact est assuré entre les électrodes mobile et fixes.

En effet, comme démontré dans cette figure l’amplitude du mouvement est d’abord croissante quand la fréquence d’excitation augmente pour des faibles valeurs de cette fréquence (de 1 à 6.8 Hz).

Ensuite, un point de bifurcation où on a coalescence de la solution instable de faible amplitude avec celle stable d’amplitude importante. On assiste alors à un saut de l’amplitude vers des valeurs beaucoup plus basse, comme celles observés dans la Figure 5.11.

### 5.3 Conclusion

L'analyse dynamique effectuée durant ce chapitre nous a permis d'assimiler l'impact de chaque paramètre sur le fonctionnement du dispositif. On a observé que l'augmentation de l'accélération permet d'atteindre des niveaux de fréquence plus élevés et que l'angle d'inclinaison du dispositif par rapport à celui de l'excitation entraîne une diminution de l'énergie emmagasinée dans le système au cours de son déplacement.

Un modèle continu traduisant le comportement dynamique de notre dispositif a aussi été réalisé. La résolution numérique de celui-ci a permis de le valider par sa confrontation avec le modèle discontinu développé dans les chapitres précédents. La résolution analytique de ce nouveau modèle a aussi été effectuée.

# Chapitre 6

## Optimisation du générateur électrostatique

Après avoir décrit les performances de notre récupérateur d'énergie vibratoire et réalisé les expériences nécessaires prouvant son efficacité, on consacre ce chapitre à son optimisation. L'approche qu'on propose se base sur l'intégration d'une nouvelle géométrie d'électrodes où les surfaces actives intègrent des dentures triangulaires.

L'amélioration des performances de notre générateur électrostatique est donc obtenue suite à une variation de capacité plus importante, engendrée par l'intégration de ses dentures triangulaires.

On commence notre analyse par le dimensionnement des dentures triangulaire afin d'optimiser le processus de récupération de l'énergie. Ensuite, on présente un nouveau générateur électrostatique où les électrodes intègrent cette nouvelle géométrie. Enfin, une analyse comparative de performances est réalisée entre ce dernier dispositif et celui déjà réalisé.

## 6.1 Conception proposée

L'augmentation du ratio de variation de capacité d'un condensateur variable a comme origine dans la plus part des cas l'amélioration de la valeur de capacité maximale atteignable [106] [107]. Cela pourra être réalisé, soit par la diminution de l'écart obtenu en fin de course entre les deux électrodes formant la capacité, soit par l'obtention d'une surface commune de plus en plus importante entre ces dernières [108].

Quant à la première technique de variation de capacité basée sur la modification d'écart entre les électrodes "Fermeture de gap", celle-ci repose sur un déplacement relatif d'une électrode par rapport à l'autre dans le sens normal des surfaces actives [109] comme le montre la Figure 6.1a et 6.1c. Cette technique permet d'avoir une différence de capacité entre  $C_{min}$  et  $C_{max}$  importante suite au faible écart qu'on peut atteindre dans la position extrême. La valeur minimale de cet écart qu'on peut atteindre n'est alors limitée que par les contraintes de planéité des surfaces, par la rugosité et par le claquage de l'air [110].

Dans cette configuration, la variation de capacité autour de la position d'équilibre est très faible. Cela s'explique par l'écart important qui existe entre les surfaces actives des électrodes autour de cette position.

La technique de variation de capacité par l'évolution de la surface commune entre les électrodes "Superposition de zone", permet de résoudre ce problème [25]. Se basant sur un déplacement tangentielle entre les surfaces actives des électrodes, cette configuration permet d'avoir une variation de capacité autour de la position d'équilibre importante (Figure 6.1b et 6.1d). Par contre la capacité maximale atteignable est relativement faible par rapport à la technique précédente. Cela est dû à l'écart qui sépare les deux électrodes, dont la valeur relativement élevée et limitée par les moyens et les processus de fabrication des composants, reste fixe tout le long du déplacement relatif des composants.

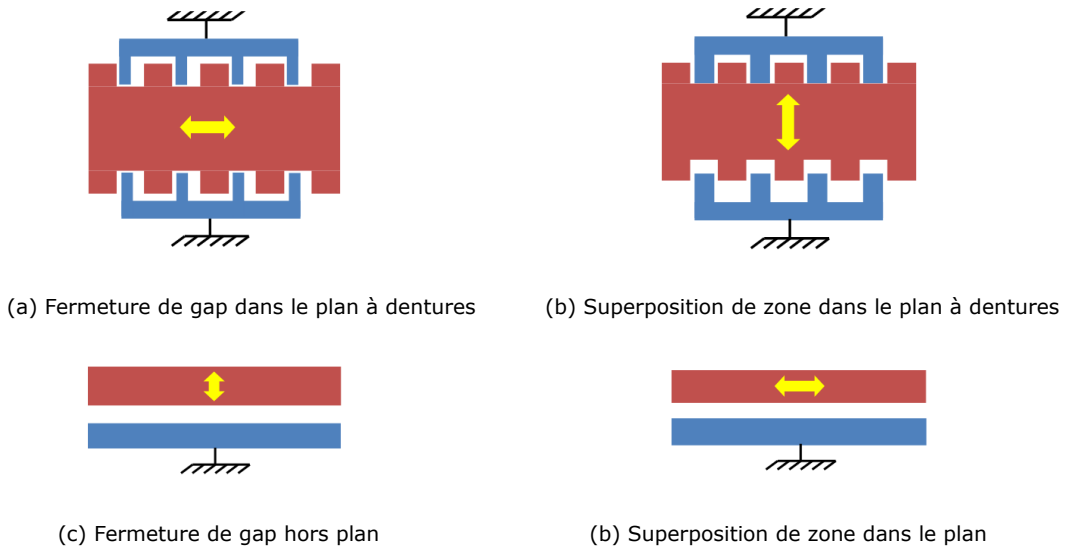


FIGURE 6.1 – Méthodes de variation de capacités employées dans la littérature. (a) et (c) font référence au système à fermeture de gap alors que (b) et (d) montrent le système de variation de capacité par superposition de zone.

Puisque la technique de fermeture de gap permet d'obtenir un ratio de variation de capacité plus important que l'autre configuration, nous nous sommes alors basés sur celle-ci jusque-là dans nos travaux.

Dans le cadre d'un processus d'amélioration, nous essayons d'optimiser le fonctionnement de notre système en agissant sur la variation de capacité et sur sa manière de procéder. On introduit alors une nouvelle conception d'électrodes dont les surfaces actives sont basées sur des dentures triangulaires [74].

La forme des dentures présente sur la surface active d'une armature est conçue pour être complémentaire avec les dentures de l'électrode opposée. Ce qui permet ainsi un emboîtement entre eux comme le montre la représentation de la Figure 6.2.

A côté de l'augmentation de la surface active des électrodes, l'utilisation de cette nouvelle conception nous permet d'obtenir lors du déplacement de la masse mobile, une variation à la fois de la surface commune et de l'écart entre ces deux électrodes.

Nous pouvons ainsi bénéficier des avantages liés à l'utilisation des autres géométries.

En utilisant cette conception, l'écart minimal entre les surfaces actives des électrodes dans les positions extrêmes pourra alors être très faible, sans pour autant être très limité par les contraintes liées à la fabrication et à l'assemblage. Cela engendre une valeur de capacité maximale  $C_{max}$  plus élevée.

De plus, dans l'emplacement d'équilibre caractérisé par le positionnement de l'électrode mobile juste au milieu des deux autres où  $x = x_0$ , la surface commune entre les électrodes reste considérable. Cela engendre une variation de capacité par unité de déplacement plus importante autour de cette position par rapport à la géométrie d'électrodes précédemment utilisée.

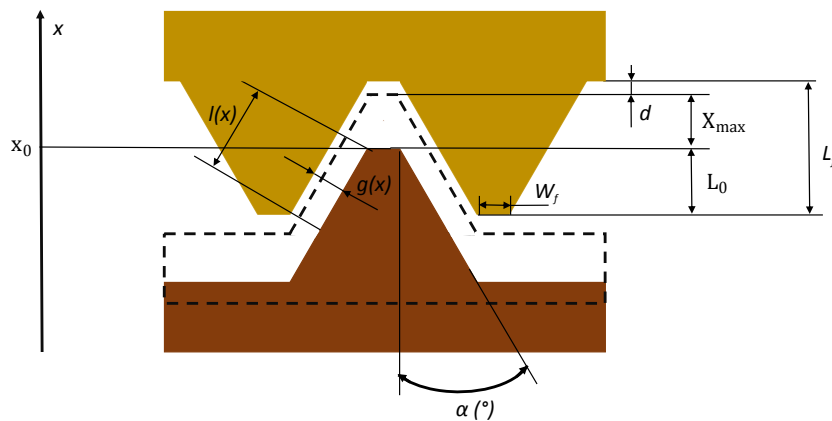


FIGURE 6.2 – Représentation des armatures à dentures triangulaires et paramètres géométriques associés.

## 6.2 Dimensionnement et optimisation des armatures à dentures triangulaires

Les principaux paramètres de l'électrode à dentures triangulaires sont la longueur et l'épaisseur de la denture (respectivement  $L_f$  et  $H_f$ ), l'angle d'inclinaison de celle-ci ( $\alpha$ ) et la taille de son extrémité ( $W_f$ ) et ce, comme noté sur la Figure 6.2.



Lors de l'atteinte de la position extrême d'une électrode par rapport à l'autre, l'emboîtement entre ces dernières laisse apparaître un jeu entre l'extrémité d'une denture et la base de celle opposée. Cet écart qui est nommé ( $d$ ) est primordial pour garantir un assemblage correct. On peut alors écrire l'expression de la position  $L_0$  où l'emboîtement est à l'état initial ( $x = x_0$ ) en fonction des paramètres du système :

$$L_0 = L_f - d - x_{\max} \quad (6.1)$$

Où  $x_{\max}$  est décrite comme la course obtenue suite à un déplacement engendrant un emboîtement maximal. Sa valeur est égale à  $L_0$ . On peut alors écrire :

$$L_0 = \frac{(L_f - d)}{2} \quad (6.2)$$

L'écart séparant les dentures des électrodes opposées ainsi que leurs surfaces communes varient en fonction du déplacement relatif d'une électrode par rapport à l'autre. On les notes respectivement  $g(x)$  et  $l(x)$ . La variation de ces paramètres est donnée par :

$$g(x) = g_{\min} + (x_{\max} - x) \cdot \sin(\alpha) \quad (6.3)$$

$$l(x) = \frac{x_{\max} + x}{\cos(\alpha)} + g(x) \cdot \tan(\alpha) \quad (6.4)$$

Tel que  $g_{\min}$  représente l'écart entre les deux électrodes dans la position où l'emboîtement est maximal. Sa valeur peut être très faible et ne dépend que des contraintes géométriques liées à la fabrication et au claquage de l'air.

En utilisant ces Équations de variation d'écart et de surface commune, on dégage l'Équation 6.5 de variation de capacité.

$$C(x) = \varepsilon \cdot N_F(\alpha) \cdot [2 \cdot H_F \cdot \left[ \frac{x_{\max} + x}{g_{\min} \cdot \cos(\alpha) + (x_{\max} - x) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha)} + \tan(\alpha) \right] + \frac{W_f \cdot H_f}{d + (x_{\max} - x)}] \quad (6.5)$$

Tel que  $N_f$  représente le nombre de dentures triangulaires dans une électrode. Leur nombre dépend de la longueur exploitable de l'armature  $L_A$  et des caractéristiques des dentures utilisées. La valeur de ce paramètre est déterminée après application de l'Équation 6.6 ci-dessous :

$$N_F(\alpha) = \frac{L_A}{2L_F \cdot \tan(\alpha) + 2.W_F} \quad (6.6)$$

Suite à cette mise en évidence de la variation de capacité, on remarque que la valeur de celle-ci est largement influencée par les paramètres géométriques, et précisément par l'angle  $\alpha$  décrivant l'inclinaison des dentures triangulaires. Il est donc nécessaire de chercher la valeur adéquate de ce dernier paramètre afin d'assurer un rendement optimal de récupération d'énergie vibratoire.

Pour ce faire, on exprime la capacité produite pour un emboîtement maximal, puis minimal en fonction de  $\alpha$ , comme décrit dans les Équations ci-dessous :

$$C_{\max}(\alpha) = \varepsilon \cdot N_F(\alpha) \cdot [2 \cdot H_F \cdot \left[ \frac{2x_{\max}}{g_{\min} \cdot \cos(\alpha)} + \tan(\alpha) \right] + \frac{W_f \cdot H_f}{d}] \quad (6.7)$$

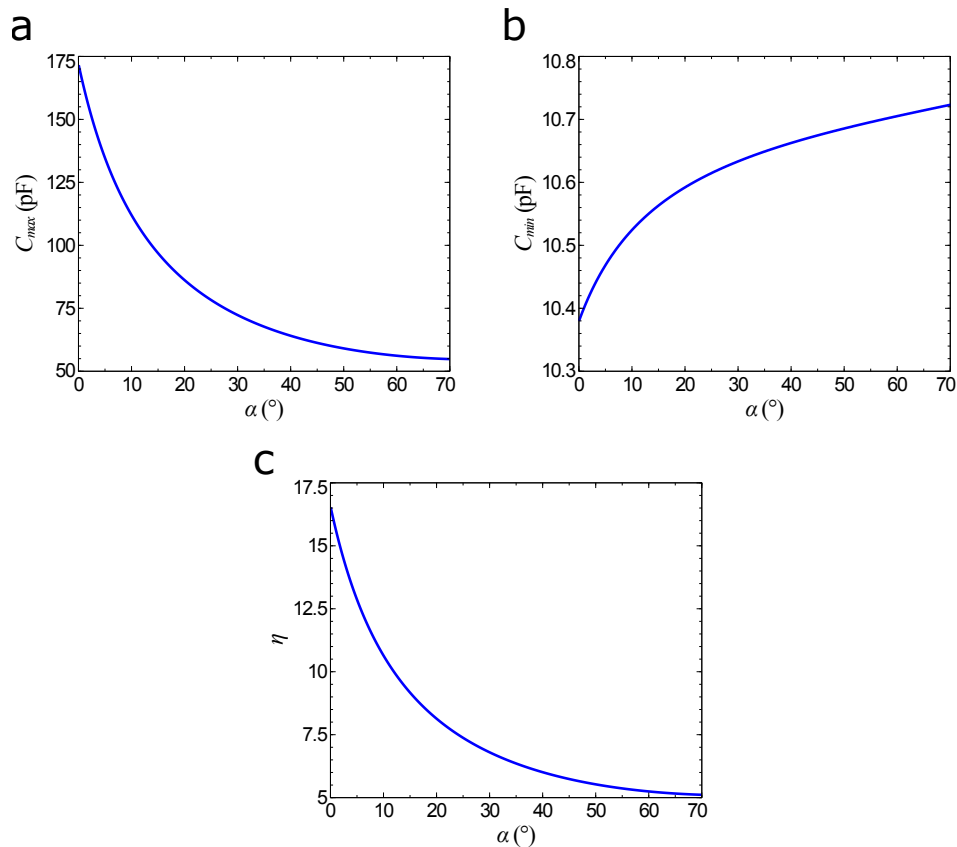
$$C_{\min}(\alpha) = \varepsilon \cdot N_F(\alpha) \cdot [2 \cdot H_F \cdot \tan(\alpha) + \frac{W_f \cdot H_f}{d + 2 \cdot x_{\max}}] \quad (6.8)$$

Les autres paramètres géométriques auxquels on a opté pour notre dispositif sont choisis en raison de contraintes de faisabilité et de coût. Le Tableau 6.1 résume les différentes variables adoptées pour notre système, ainsi que leurs valeurs numériques.

Ayant obtenu une variation de capacité ne dépendant que de  $\alpha$ , on trace sur la Figure 6.3 l'évolution de  $C_{\max}$ , de  $C_{\min}$ , et du ratio  $\eta$  en fonction de ce dernier angle, en considérant l'existence d'une capacité parasite de 10 pF.

TABLE 6.1 – Définition et valeurs des variables géométriques des armatures à dents triangulaires.

désignation	signification	valeur
$g_0$	Écart initial entre les dents	0.15 mm
$g_{min}$	Écart minimal entre les dents	0.05 mm
$L_0$	Position initiale où $x=x_0$	1.5 mm
$L_A$	Longueur de l'électrode	30 mm
$H_f$	Épaisseur de l'électrode	10 mm
$W_f$	Taille du sommet d'une denture	1 mm
$x_{max}$	Course maximale	1.5 mm
$d$	Écart d'électrodes pour un emboîtement maximal	0.5 mm
$L_f$	Longueur d'une denture	3.5 mm

FIGURE 6.3 – Évolution de  $C_{max}$  (a) et  $C_{min}$  (b) produite en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$  et variation engendré du ratio de capacité  $\eta$  (c).

On remarque à partir de cette figure que l'accroissement de  $\alpha$  entraîne une diminution de la capacité maximale atteignable et une augmentation de la capacité minimale. Le ratio de variation de capacité diminue alors avec l'accroissement de cet angle. La valeur de  $\alpha$  à choisir doit être donc la plus faible possible afin de garantir un rendement optimal.

Par contre, la valeur de cet angle ne peut pas être nulle, vu son interaction avec les autres paramètres géométriques.

Jusque-là, la valeur de l'angle  $\alpha$  à choisir est encore incertaine. Pour la définir avec précision, on exprime dans l'Équation 6.9 la variation de l'écart à l'état initial  $g_0$  où  $x=x_0$  en fonction de  $\alpha$ .

$$g_0 = g_{\min} + x_{\max} \cdot \sin(\alpha) \quad (6.9)$$

On sait que l'écart initial  $g_0$  ne peut pas être inférieur à une limite imposée par les contraintes de fabrication et d'assemblage. Pour notre cas où on utilise une fraiseuse CNC pour la fabrication et un assemblage manuel des composants par vissage,  $g_0$  ne peut pas être inférieur à 0.15 mm. En ayant plus de vision sur l'impact de  $\alpha$ , on trace alors dans la Figure 6.4 l'évolution de  $g_0$  en fonction de ce paramètre.

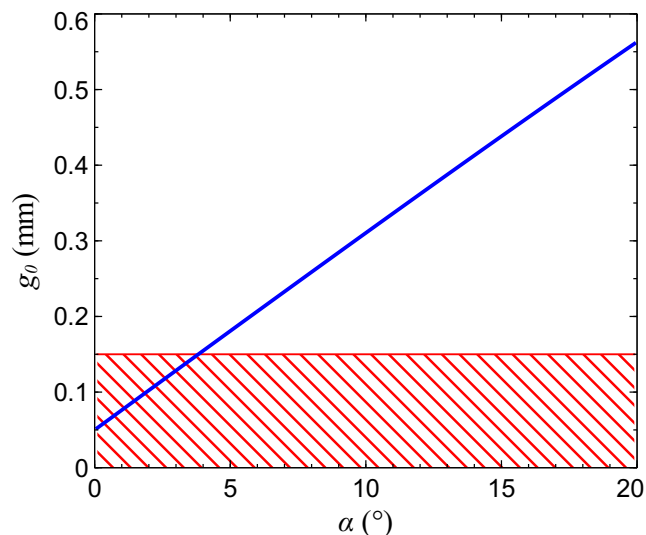


FIGURE 6.4 – Variation de l'écart  $g_0$  en fonction de l'angle d'inclinaison  $\alpha$ .

On remarque sur cette Figure que l'évolution de l'angle  $\alpha$  entraîne un accroissement linéaire de l'écart initial  $g_0$ . Aussi, puisque ce dernier ne peut pas être inférieur à 0.15 mm suite aux contraintes précédemment citées,  $\alpha$  ne peut pas être inférieur à  $4^\circ$ . En combinant les deux résultats, on conclut que  $\alpha$  doit être à la fois la plus faible possible et supérieur à  $4^\circ$ . Cette dernière valeur est alors choisie comme l'inclinaison optimale de l'angle  $\alpha$ .

Pour confirmer le résultat obtenu, on trace sur la Figure 6.5, la variation de la capacité produite entre deux électrodes en fonction de la position, et ce pour différents angles d'inclinaison  $\alpha$ .

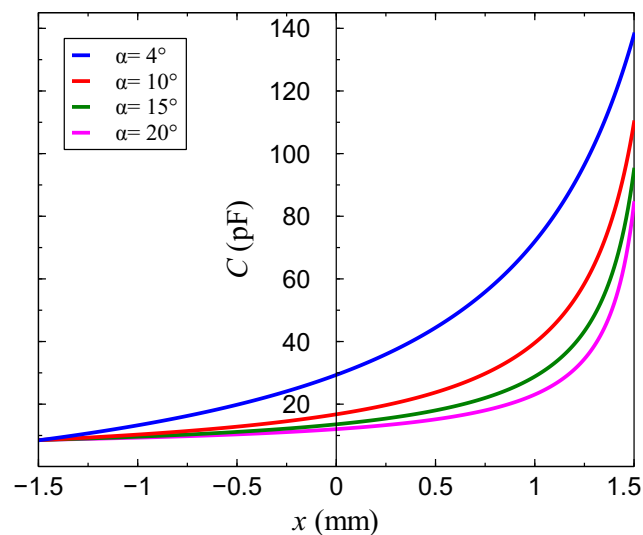


FIGURE 6.5 – Variation de la capacité entre deux armatures à dents triangulaires par rapport à la position pour différents angles d'inclinaisons  $\alpha$ .

A partir de cette Figure, on constate que l'angle  $\alpha$  de  $4^\circ$  choisi permet d'obtenir la valeur la plus élevée de capacité maximale ainsi que la meilleure variation de capacité autour de la position d'équilibre, où  $x = x_0$ . Aussi, on remarque que plus la valeur de cet angle augmente, plus les performances du dispositif diminuent, tout en se rapprochant de la configuration "Fermeture de gap".

Les valeurs de  $\alpha$  inférieur à celui choisi n'étant pas admis pour les raisons citées ci-haut, l'angle d'inclinaison des dentures triangulaires de  $4^\circ$  est donc l'optimum.

Afin de confirmer les avantages liés à l'utilisation d'armatures à dentures triangulaires par rapport aux techniques de variation de capacités décrites ci-haut, on trace sur la Figure 6.6a la variation de capacité  $C$  par rapport à la position produite pour un système à fermeture de gap et dont les électrodes conservent les mêmes proportions. La Figure 6.6b met en évidence un système de variation de capacité par superposition de zone. Dans ce dernier cas, les armatures possèdent aussi les mêmes paramètres géométriques, et la variation se fait conformément au système présenté dans la Figure 6.1b.

A partir de ces figures, on peut visualiser les caractéristiques et les performances liées à l'utilisation de chaque technique de variation de capacité. On peut aussi confirmer que l'utilisation d'armatures à dentures triangulaires permet une nette amélioration de la variation de capacité.

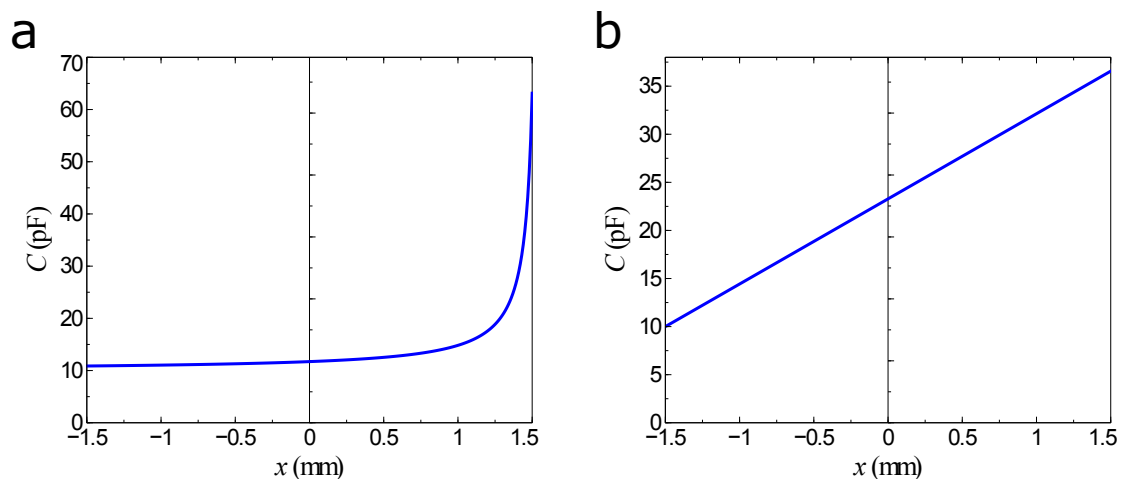


FIGURE 6.6 – Variation de capacité par rapport à la position entre deux armatures utilisant les techniques de fermeture de gap (a) et de superposition de zone (b), conservant les proportions d'armatures décrits.

L'étude réalisée s'est focalisée sur l'étude de la variation de capacité produite à partir des surfaces opposées des électrodes. En réalité, suite aux effets de bords, toutes les surfaces des électrodes interagissent entre elles et influent sur la variation totale de la capacité.

Pour avoir une idée plus claire sur l'importance de l'effet de bord apparaissant entre les électrodes, on modélise le champ électrique produit entre deux dentures opposées par le logiciel de simulation ANSYS, comme mentionné dans la Figure 6.7. On constate que les sommets des dentures interagissent aussi avec les surfaces latérales et influent sur la variation de capacité.

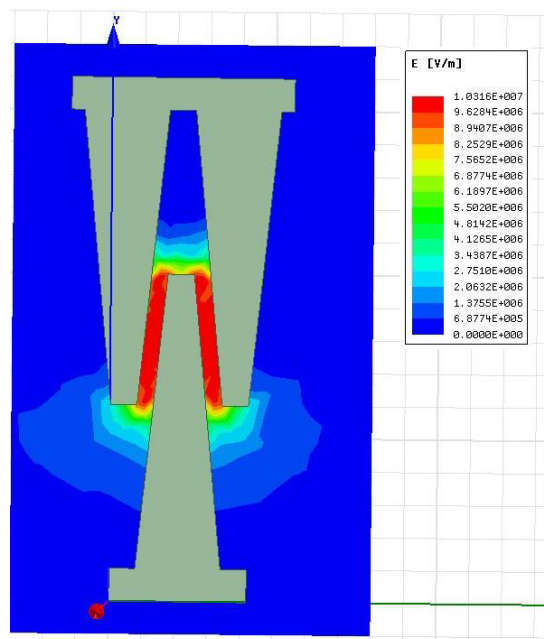


FIGURE 6.7 – Simulation du champ électrique apparaissant entre les dentures opposées.

Pour confirmer ce résultat, on compare sur la Figure 6.8 la variation de capacité par rapport à la position, obtenue de manière numérique avec celle calculée analytiquement. On remarque que la prise en considération de l'effet de bord met en évidence une capacité maximale atteignable plus importante. Cela est d'autant plus vrai que les surfaces des électrodes qui interagissent sont plus grandes.

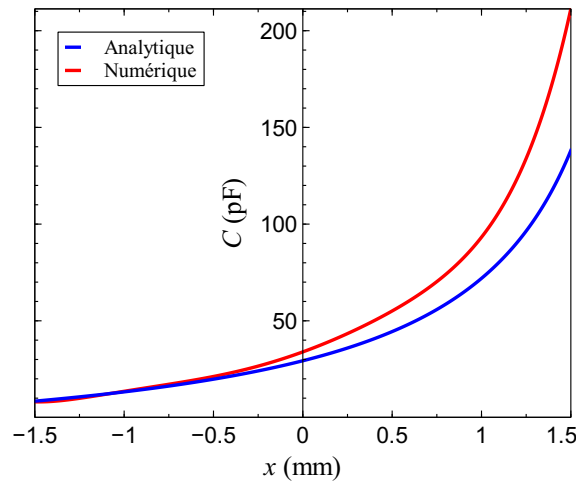


FIGURE 6.8 – Comparaison dans les mêmes conditions entre la variation de capacité produite de manière analytique et numérique par rapport à la position.

### 6.3 Conception et fabrication du générateur proposé

Après avoir choisi et validé tous les paramètres géométriques caractérisant les armatures de notre générateur, on passe à la conception de ce dernier. La Figure 6.9a expose le dispositif numérique réalisé à l'aide du logiciel de conception *SolidWorks*.

Pour assurer la récupération de l'énergie selon le principe de multiplication de charge de la machine électrostatique, on reprend le concept déjà réalisé dans le chapitre précédent tout en redessinant quelques composants dont principalement les armatures.

Ces dernières sont constituées désormais de dentures triangulaires au nombre de 12, comme affiché dans la Figure 6.9b. Lorsqu'une excitation externe est appliquée, l'électrode centrale  $B$  s'entraîne dans un mouvement oscillatoire entre les deux autres électrodes grâce au guidage linéaire sur lequel elle est basée.

Ainsi, l'emboîtement entre les dentures des différentes armatures s'effectue et le contact électrique entre les différents contacteurs se réalise.

Une fois le comportement cinématique du nouveau dispositif validé numériquement, on procède à la fabrication de celui-ci et à la réalisation des essais comme le montre la Figure 6.10 qui affiche le générateur, fabriqué et placé sur le pot vibrant.



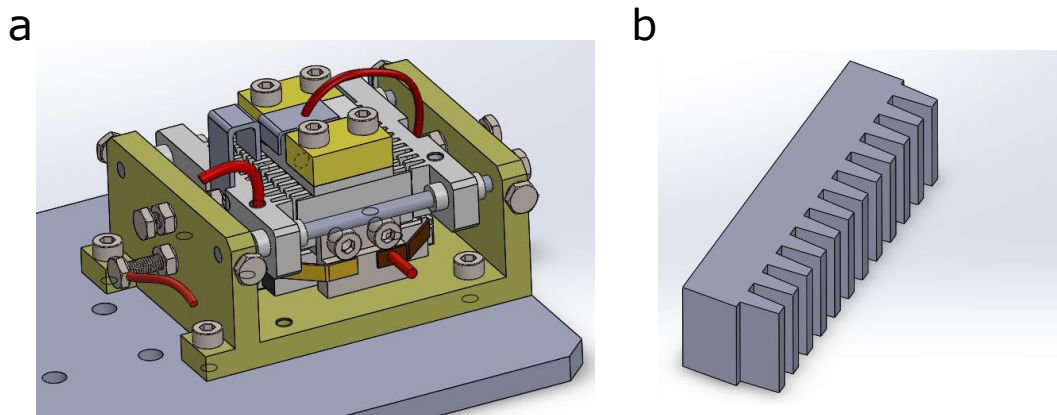


FIGURE 6.9 – Conception et Modélisation du générateur électrostatique intégrant les dents triangulaires (a) et zoom sur la nouvelle conception d'armatures (b).

Ayant un volume total avoisinant les  $30 \text{ cm}^3$ , la base de celui-ci est fabriquée à partir du polyamide alors que les électrodes sont usinées sur de l'aluminium. Le choix de ce dernier matériau comme élément des armatures a été validé afin de faciliter l'usinage, suite à sa haute malléabilité. Pour assurer une isolation électrique entre les électrodes dans les positions extrêmes, le cas échéant, on couvre les surfaces actives de l'électrode mobile  $B$  par un film fin en Parylène.

Les détails dimensionnels de chaque composant sont mentionnés dans les plans relatifs à ce dispositif présentés en annexe 3.

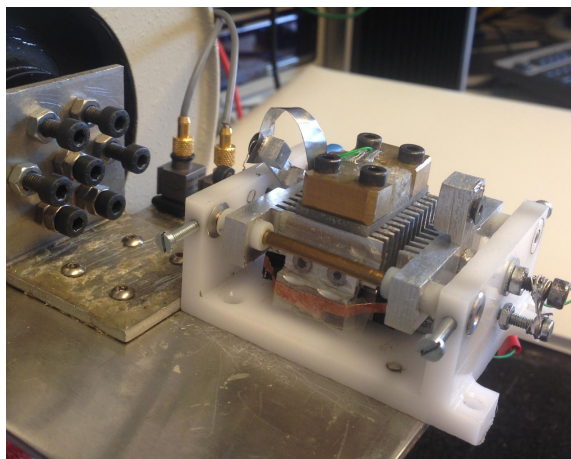


FIGURE 6.10 – Générateur électrostatique à dents triangulaires fabriqué et placé sur le pot vibrant.

## 6.4 Performances du générateur électrostatique à dents triangulaires

### 6.4.1 Mesure de la variation de capacité

Avant d'analyser les performances de notre générateur, on trace sur la Figure 6.11 la superposition de la variation de capacité obtenue de manière expérimentale et numérique. Cette dernière est réalisée à l'aide de l'algorithme précédemment utilisé où les variables ont été mises à jour. Quant à la mesure expérimentale de la variation de capacité, celle-ci a été acquise à travers l'utilisation de la méthode présentée et employée dans la version antérieure du générateur électrostatique.

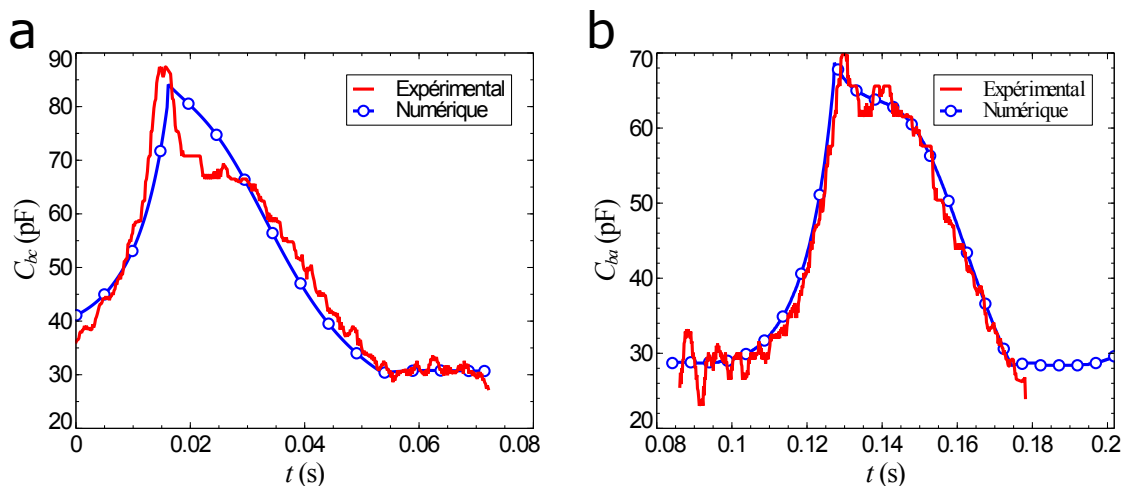


FIGURE 6.11 – Validation de la variation de capacité de  $C_{bc}$  (a) et  $C_{ba}$  (b) mesurée expérimentalement et calculée numériquement.

On observe qu'une bonne concordance existe entre la variation de capacité obtenue numériquement et celle mesurée expérimentalement.

De plus, on remarque que  $C_{ba}$  varie entre 28 pF et 69 pF alors que  $C_{bc}$  est entre 30 pF et 87 pF. L'origine de cette différence d'évolution entre les deux capacités vient de la géométrie du dispositif et des caractéristiques fonctionnelles.

### 6.4.2 Limites rencontrées

Lors de la réalisation des essais, on a constaté que le dispositif fabriqué ne possède pas une fiabilité suffisante pour qu'on puisse l'exploiter en tant que machine électrostatique. En effet, lors de l'atteinte de la position extrême gauche, un phénomène d'accrochage entre les armatures survient, induisant l'arrêt du mouvement oscillatoire. De plus, ce phénomène engendre un détachement de la couche de Parylène déposée, ce qui a pour conséquence d'altérer l'isolation électrique entre les deux électrodes.

La raison conduisant à l'observation de cette imperfection nous vient d'un faible parallélisme entre ces électrodes. L'emboîtement entre les dentures nécessite d'avoir des armatures parfaitement parallèles, ce qui n'est pas le cas dans la pratique. L'intervalle de tolérance adopté pour le positionnement et le maintien en position des électrodes a suffi à détériorer les performances du récupérateur.

Pour obtenir un résultat satisfaisant, l'utilisation de techniques d'horlogerie basées sur des micro fraiseuses de précision est nécessaire. Ces techniques nécessitent un investissement considérable pour être réalisée.

On se limite alors dans cette sous-section à analyser numériquement le comportement du notre dispositif configuré en tant que doubleur de charges à base de dentures triangulaires en utilisant notre l'algorithme validé.

### 6.4.3 Analyse numérique du dispositif configuré en tant que doubleur de charges

Afin d'assimiler les avantages liés à l'utilisation de cette nouvelle géométrie d'électrodes sur les performances de notre dispositif configuré en tant que doubleur de charges, on décide alors de la comparer à l'utilisation d'électrodes à plaques parallèles dont les dimensions globales restent inchangées. Cette dernière obéit à la loi de variation de capacité par fermeture de gap et produit donc une capacité maximale à  $x=x_{max}$  de 63 pF.

Les Figures 6.12a et 6.12b montrent la variation de l'énergie  $E$  et de la puissance  $P$  au niveau du condensateur de stockage  $C_{res}$  par rapport au nombre de cycles dans le cas où on se base sur l'utilisation d'électrodes à dentures triangulaires et celles à plaques parallèles.

A partir de ces courbes, il est clair que la nouvelle géométrie qu'on propose induit une nette amélioration des performances de récupération d'énergie vibratoire. En effet, après 200 cycles de fonctionnement, on récupère une énergie de  $2.89 \mu\text{J}$  pour le modèle proposé contre  $0.15 \mu\text{J}$  pour la conception standard. Cela est équivalent à une puissance respective de  $0.37 \mu\text{W}$  contre  $7.74 \text{ nW}$ .

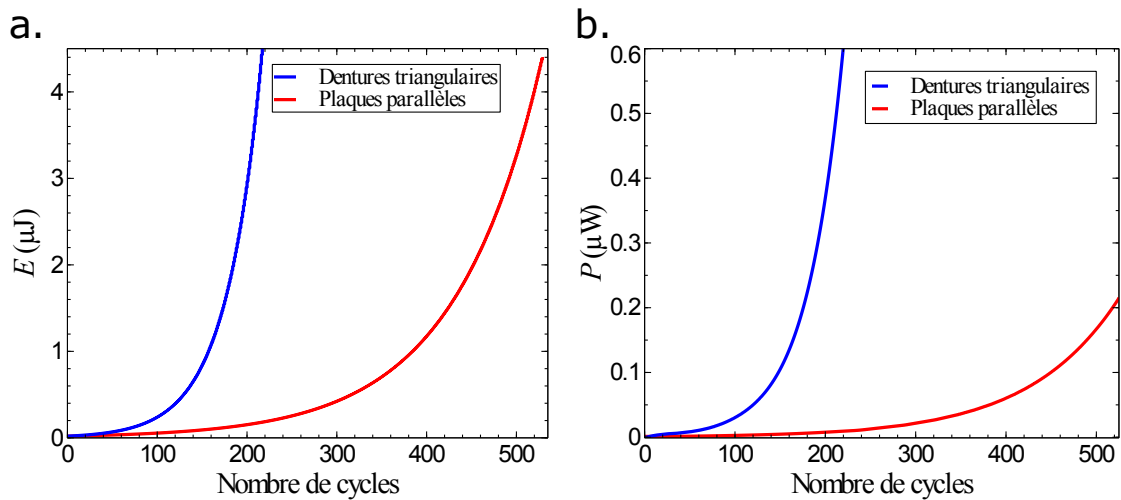


FIGURE 6.12 – Simulation de l'évolution de l'énergie accumulée  $E$  au niveau du condensateur de stockage  $C_{res}$  par rapport au nombre de cycles (a), et puissance résultante  $P$  (b) pour le dispositif intégrant les dentures triangulaires et celui à plaques parallèles ayant les mêmes dimensions pour 5 Hz et  $0.2 \text{ grms}$ .

Afin de valider le résultat obtenu, on trace aussi sur la Figure 6.13 l'évolution de l'énergie récupérée par cycle en fonction de la tension au niveau de  $C_{res}$ . La nouvelle géométrie proposée induit un meilleur résultat que celle utilisant les plaques parallèles.

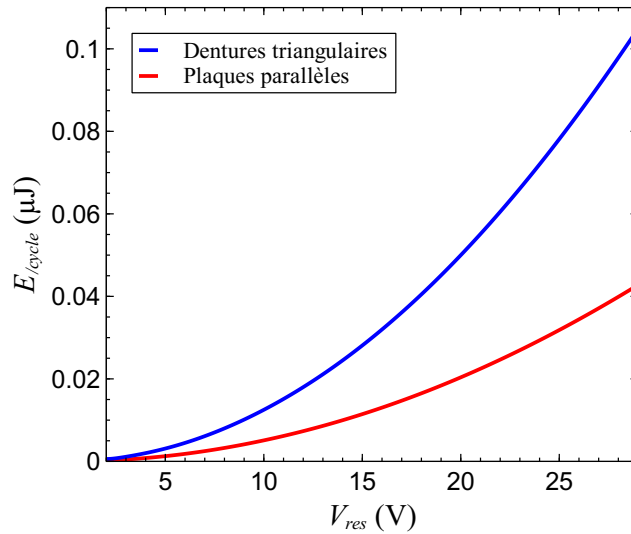


FIGURE 6.13 – Évolution de l'énergie par cycle en fonction de la tension  $V_{res}$  pour le nouveau dispositif proposé et celui à plaques parallèle ayant les mêmes dimensions pour 5 Hz et 0.2  $g_{rms}$  .

## 6.5 Performances du dispositif configuré en tant que pompe de charge

### 6.5.1 Principe de la pompe de charge

Concernant les performances de notre nouveau dispositif en termes de récupération d'énergie vibratoire ambiante, on se tourne vers l'implémentation du circuit de pompe de charges à contacteurs mécaniques. Ne nécessitant qu'une seule capacité variable, les problèmes rencontrés au niveau du récupérateur fabriqué pourront ainsi être surmontés.

Comme mentionné dans la Figure 6.14, ce système repose sur l'utilisation d'une seule capacité variable  $C_{Var}$ , 2 contacteurs mécaniques ( $S_1$  et  $S_3$ ), une alimentation ( $V_0$ ), et un condensateur de stockage ( $C_{res}$ ). Pour la visualisation des résultats, on utilise un oscilloscope associé à un amplificateur opérationnel en mode suiveur.

Lorsque la capacité variable  $C_{Var}$  se trouve à sa valeur maximale, le contacteur  $S_3$  se ferme. Ainsi, la tension aux bornes de  $C_{Var}^{max}$  sera égale à celle de  $V_0$ .

Par la suite, lorsque la valeur de la capacité commence à diminuer suite aux vibrations externes, le contacteur  $S_3$  s'ouvre et le système conserve ses charges. Dans cette configuration, la tension augmente aux bornes de ce dernier condensateur. Enfin, quand  $C_{Var}$  atteint sa valeur minimale  $C_{Var}^{min}$ , le contacteur  $S_1$  se ferme. L'énergie récupérée est alors transmise au condensateur de stockage  $C_{res}$ .

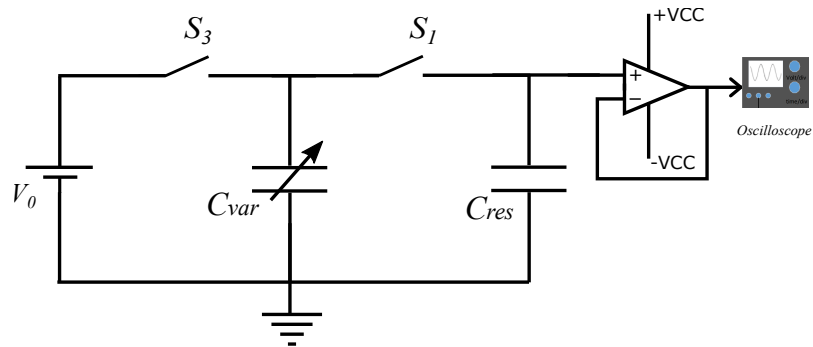


FIGURE 6.14 – Circuit électrique de la pompe de charges à contacteurs mécaniques.

Nommée aussi convertisseur *DC-DC*, la pompe de charge permet d'élever la tension présente initialement au niveau de l'alimentation  $V_0$  à un niveau plus important aux bornes de  $C_{res}$ . Le coefficient d'accroissement de la tension est proportionnel au ratio  $\eta$  de variation de capacité de  $C_{Var}$ .

### 6.5.2 Comparaison de la variation de capacité entre les deux dispositifs fabriqués

Il est vrai que le dispositif fabriqué ne nous a pas permis de l'exploiter en tant que machine électrostatique reposant sur le dédoublement de charge introduit par *Abraham Bennet*, mais ce dispositif peut toutefois être utilisé en tant que pompe de charge.

Afin d'avoir un aperçu expérimental sur les performances de celui-ci et de prouver les avantages liés à l'utilisation de cette nouvelle géométrie d'électrodes comparée à celle précédemment utilisée, on trace sur la Figure 6.15a et 6.15b la variation de capacité par unité de volume de nos deux dispositifs fabriqués.

On décide alors de diviser la capacité produite dans chaque récupérateur par le volume. Cette opération nous permet de visualiser objectivement et dans les mêmes conditions les performances de chaque système.

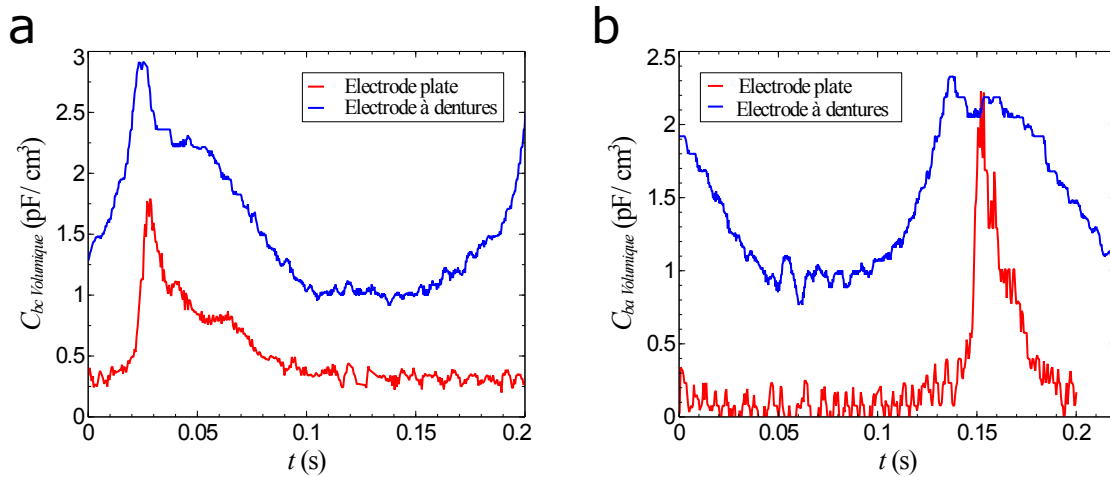


FIGURE 6.15 – Comparaison entre la variation de capacité volumique de  $C_{bc}$  (a) et de  $C_{ba}$  (b) par rapport au temps pour les deux dispositifs fabriqués

D'après ces Figures, on constate que malgré les insuffisances de planéité rencontrées, le nouveau dispositif modifié présente des caractéristiques similaires à celui présenté dans les chapitres précédents tout en étant 3 fois moins volumique.

### 6.5.3 Comparaison de performances électriques des deux dispositifs à plaque parallèle et à dentures triangulaires

Pour la réalisation des expériences sur les deux dispositifs, on se base sur l'utilisation de la capacité variable  $C_{bc}$ . On prend aussi  $C_{res}=10$  nF et  $V_0=7.5$  V. Concernant les contacteurs mécaniques employés, ceux-ci demeurent inchangés.

D'après la Figure 6.16 a, on constate qu'avec 7.5 V de tension initiale aux bornes de  $V_0$ , les performances des deux récupérateurs d'énergie vibratoire sont semblables.

Puisque le dispositif avec les dentures triangulaires est moins volumineux, celui-ci est donc le mieux adapté.

On trace sur les Figures 6.16b et 6.16c l'évolution de l'énergie volumique et de la puissance volumique en fonction du temps pour nos deux récupérateurs. A partir de ces derniers, on observe que le nouveau système permet d'accumuler plus d'énergie et de puissance par unité de volume que celui précédemment décrit.

On conclut alors que l'utilisation d'armatures à dentures triangulaires permet d'améliorer les performances du récupérateur d'énergie vibratoire configuré en tant que pompe de charge.

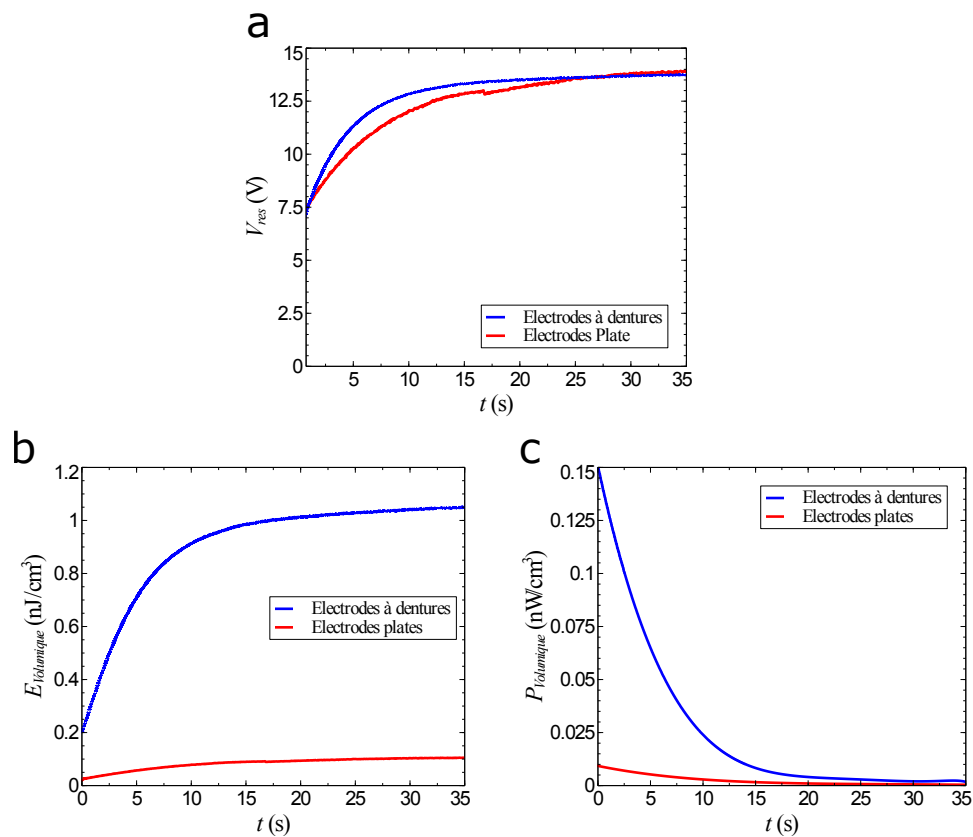


FIGURE 6.16 – Performances des récupérateurs fabriqués, configurés en tant que pompe de charge à contacteurs mécaniques, présentés à travers l'évolution de la tension au niveau du condensateur de stockage  $C_{res}$  (a), la variation de l'énergie volumique (b) et la puissance volumique engendrée (c).



## **6.6 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence un récupérateur d'énergie vibratoire basé sur une nouvelle géométrie d'électrodes utilisant des dentures triangulaires.

Pour un fonctionnement optimal, nous avons analysé les paramètres géométriques afin d'y choisir les valeurs donnant lieu à la meilleure variation de capacité. Nous avons procédé ensuite à la fabrication de celui-ci et à la réalisation des essais.

Malgré les aléas rencontrés suite à la fabrication, les données numériques et expérimentales récoltées nous confirment que la modification qu'on propose assure une nette amélioration des performances du dispositif qu'il soit configuré en doubleur ou en pompe de charges.

# Chapitre 7

## Conclusion générale

### 7.1 Synthèse des contributions

Dans le cadre de ce projet de recherche, nous avons procédé à la conception d'un nouveau récupérateur d'énergie vibratoire ambiante basé sur le principe de la machine électrostatique développée par *Abraham Bennet* en 1787, intégrant des contacteurs mécaniques auto synchronisés et des patches triboélectriques. Le dispositif est conçu pour récupérer cette énergie vibratoire en basse fréquence et en large bande, correspondant aux excitations qu'on trouve dans les milieux ambiants.

Pour ce faire, nous avons d'abord modélisé le principe de multiplication de charge adopté dans le cas idéal, puis dans les conditions réelles d'utilisation où une résistance de contact apparaît au niveau des contacteurs mécaniques.

En associant l'analyse du comportement électrique du système à la modélisation mécanique, permettant de traduire sa dynamique, nous avons développé un algorithme numérique simulant le fonctionnement de notre dispositif. Ce dernier a été validé par sa confrontation avec un dispositif expérimental fabriqué, dont les caractéristiques ont été détaillées.

En effet, la validation de cet algorithme a été effectuée non seulement à travers la comparaison de la variation des capacités obtenues numériquement et expérimentalement, mais aussi par la comparaison de l'évolution de la tension au niveau du condensateur de stockage pendant la récupération de l'énergie.

La confirmation de l'exactitude des données numériques nous a permis de combiner tous les résultats obtenus afin d'analyser la saturation de la tension qui se produit au niveau des hautes tensions. L'impact de la force électrostatique agissant sur notre système a ainsi été analysé. Le dispositif expérimental que nous avons développé nous a aussi permis de visualiser les avantages liés à l'utilisation des contacteurs mécaniques à la place des diodes, couramment utilisées dans les dispositifs de récupération de l'énergie vibratoire ambiante à transducteur électrostatique.

Notre proposition nous a permis d'atteindre des performances meilleurs par rapport aux autres dispositifs, par le biais de l'élimination des problèmes liés à l'utilisation de ce composant. L'effet du patch triboélectrique ajouté a aussi été analysé à travers la comparaison entre des pastilles de nature et d'épaisseur différentes.

Afin d'évaluer l'impact des paramètres dynamiques extérieurs sur le fonctionnement de notre générateur, on simule l'effet de ces derniers et l'impact de leur variation dans une logique d'optimisation. Les résultats de simulation ont montré que l'augmentation de l'accélération appliquée permet d'atteindre une plage de fréquence plus importante, conduisant à récupérer l'énergie sur une plus large bande.

Aussi, a-t-on démontré que l'inclinaison du dispositif par rapport au sens d'excitation entraîne une diminution de l'énergie emmagasinée dans le système et peut même induire un arrêt de la récupération de l'énergie si sa valeur est importante.

Après avoir analysé et validé le comportement de notre récupérateur d'énergie vibratoire, on a décidé d'optimiser ses performances en agissant sur la variation de capacité. Nous proposons ainsi une géométrie d'électrodes basée sur des dentures triangulaires.

En premier lieu, nous avons dimensionné ces armatures. Ensuite nous avons procédé à la réalisation d'un dispositif utilisant des électrodes à dentures triangulaires. La comparaison de ce système par rapport à celui déjà fabriqué a montré que la modification proposée permet un meilleur rendement énergétique.

## 7.2 Perspectives

Il est vrai que le générateur électrostatique développé favorise une amélioration des performances par rapport aux autres dispositifs de récupération d'énergie vibratoire. Cependant, des optimisations doivent lui être apportées afin de l'adapter à des applications commerciales.

D'abord, la taille imposante de notre dispositif ainsi que sa masse relativement importante le rend inapte à alimenter en énergie des systèmes électroniques à faible consommation dans les milieux ambiants. Une miniaturisation de celui-ci à l'échelle des MEMS s'avère alors primordiale pour pouvoir l'exploiter commercialement. Une inspiration pourra alors être faite sur un transducteur électrostatique qui se base sur l'utilisation de contacteurs mécaniques à l'échelle microscopique. Celui-ci a été proposé numériquement par *Le* [92]. Le dispositif modélisé, basé aussi sur 3 contacteurs mécaniques, est constitué d'électrodes à dentures droites et dont la capacité évolue par le système de superposition de zone.

Aussi, on a constaté dans notre système l'existence de perte d'énergie aussi bien par frottement au niveau du guidage en translation de la masse mobile, qu'au niveau des contacteurs mécaniques par résistance électrique. Une minimisation de ces facteurs pourra être obtenue en se tournant vers les techniques de fabrication des MEMS. En utilisant cette technologie, des ressorts de faibles raideurs pourront être utilisés en remplacement du guidage linéaire.



# Bibliographie

- [1] Florinda Martins, Carlos Felgueiras, Miroslava Smitkova, and Nidia Caetano. Analysis of fossil fuel energy consumption and environmental impacts in european countries. *Energies*, 12(6) :964, 2019.
- [2] Wenhui Chen and Yalin Lei. The impacts of renewable energy and technological innovation on environment-energy-growth nexus : New evidence from a panel quantile regression. *Renewable Energy*, 123 :1–14, 2018.
- [3] Loreto Mateu and Francesc Moll. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics. In *VLSI Circuits and Systems II*, volume 5837, pages 359–373. International Society for Optics and Photonics, 2005.
- [4] Godfrey Boyle. Renewable energy. *Renewable Energy, by Edited by Godfrey Boyle*, pp. 456. Oxford University Press, May 2004. ISBN-10 : 0199261784. ISBN-13 : 9780199261789, page 456, 2004.
- [5] Vinod R Challa, MG Prasad, and Frank T Fisher. Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications. *Smart Materials and Structures*, 20(2) :025004, 2011.
- [6] Shuhua Wang, Xue Wang, Zhong Lin Wang, and Ya Yang. Efficient scavenging of solar and wind energies in a smart city. *ACS nano*, 10(6) :5696–5700, 2016.

- [7] Junjun Ding, Vinod R Challa, MG Prasad, and Frank T Fisher. Vibration energy harvesting and its application for nano-and microrobotics. In *Selected Topics in Micro/Nano-robotics for Biomedical Applications*, pages 59–83. Springer, 2013.
- [8] Helios Vocca and Francesco Cottone. Kinetic energy harvesting. In *ICT-Energy-Concepts Towards Zero-Power Information and Communication Technology*. In-techOpen, 2014.
- [9] Paul D Mitcheson, Eric M Yeatman, G Kondala Rao, Andrew S Holmes, and Tim C Green. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE*, 96(9) :1457–1486, 2008.
- [10] Dimitri Galayko and Philippe Basset. A general analytical tool for the design of vibration energy harvesters (vehs) based on the mechanical impedance concept. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I : Regular Papers*, 58(2) :299–311, 2010.
- [11] Qingsong Wang, Wei Liu, Xueliang Yuan, Hongrui Tang, Yuzhou Tang, Mansen Wang, Jian Zuo, Zhanlong Song, and Jing Sun. Environmental impact analysis and process optimization of batteries based on life cycle assessment. *Journal of cleaner production*, 174 :1262–1273, 2018.
- [12] <http://www.arveni.fr/fr/>, 2011.
- [13] Jacek F Gieras, Adrian Kucharski, and Jozef Piechowski. Performance characteristics of a shake flashlight. In *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pages 1–7. IEEE, 2017.
- [14] <https://www.enocean.com/enocean-modules/details/eco-200/>, 2011.
- [15] <https://www.microstrain.com/applications/environmental>, 2011.
- [16] Dibin Zhu and Steve Beeby. Kinetic energy harvesting. In *Energy harvesting systems*, pages 1–77. Springer, 2011.

- [17] Lihua Tang, Yaowen Yang, and Chee Kiong Soh. Broadband vibration energy harvesting techniques. In *Advances in energy harvesting methods*, pages 17–61. Springer, 2013.
- [18] Mohamed Bendame, Eihab Abdel-Rahman, and Mostafa Soliman. Electromagnetic impact vibration energy harvesters. In *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, pages 29–58. Springer, 2015.
- [19] Samuel C Stanton, Clark C McGehee, and Brian P Mann. Nonlinear dynamics for broadband energy harvesting : Investigation of a bistable piezoelectric inertial generator. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 239(10) :640–653, 2010.
- [20] BP Mann and BA Owens. Investigations of a nonlinear energy harvester with a bistable potential well. *Journal of Sound and Vibration*, 329(9) :1215–1226, 2010.
- [21] IC Lien and YC Shu. Array of piezoelectric energy harvesting by the equivalent impedance approach. *Smart Materials and Structures*, 21(8) :082001, 2012.
- [22] Philippe Basset, Elena Blokhina, and Dimitri Galayko. Introduction to electrostatic kinetic energy harvesting, 2016.
- [23] Peter Glynn-Jones, Michael John Tudor, Stephen Paul Beeby, and Neil M White. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A : Physical*, 110(1-3) :344–349, 2004.
- [24] Salem Saadon and Othman Sidek. Shape optimization of cantilever-based mems piezoelectric energy harvester for low frequency applications. In *Computer Modelling and Simulation (UKSim), 2013 UKSim 15th International Conference on*, pages 202–208. IEEE, 2013.
- [25] Philippe Basset, Dimitri Galayko, A Mahmood Paracha, Frédéric Marty, Andrii Dudka, and Tarik Bourouina. A batch-fabricated and electret-free silicon elec-



- trostatic vibration energy harvester. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(11) :115025, 2009.
- [26] Abraham Bennet. Xxvii. an account of a doubler of electricity, or a machine by which the least conceivable quantity of positive or negative electricity may be continually doubled, till it becomes perceptible by common electrometers, or visible in sparks. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (77) :288–296, 1787.
- [27] CB Williams and Rob B Yates. Analysis of a micro-electric generator for micro-systems. *sensors and actuators A : Physical*, 52(1-3) :8–11, 1996.
- [28] Peter Glynn-Jones, Michael John Tudor, Stephen Paul Beeby, and Neil M White. An electromagnetic, vibration-powered generator for intelligent sensor systems. *Sensors and Actuators A : Physical*, 110(1-3) :344–349, 2004.
- [29] Shad Roundy and Paul K Wright. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and structures*, 13(5) :1131, 2004.
- [30] Francesco Cottone, Philippe Basset, Frédéric Marty, Dimitri Galayko, Luca Gammaitoni, and Tarik Bourouina. Electrostatic generator with free micro-ball and elastic stoppers for low-frequency vibration harvesting. In *2014 IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pages 385–388. IEEE, 2014.
- [31] Scott Meninger, Jose Oscar Mur-Miranda, Rajeevan Amirtharajah, Anantha Chandrakasan, and Jeffrey H Lang. Vibration-to-electric energy conversion. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 9(1) :64–76, 2001.
- [32] N Fondevilla, C Serre, A Perez-Rodriguez, MC Acero, E Cabruja, H Campa-nella, and J Esteve. Electromagnetic harvester device for scavenging ambient

- mechanical energy with slow, variable, and randomness nature. In *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [33] Daniel J Apo, Mohan Sanghadasa, and Shashank Priya. Low frequency arc-based mems structures for vibration energy harvesting. In *The 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pages 615–618. IEEE, 2013.
- [34] B Ando, S Baglio, C Trigona, N Dumas, Laurent Latorre, and P Nouet. Nonlinear mechanism in mems devices for energy harvesting applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20(12) :125020, 2010.
- [35] Tian Liu, Ryan St Pierre, and Carol Livermore. Passively-switched energy harvester for increased operational range. *Smart Materials and Structures*, 23(9) :095045, 2014.
- [36] Tian Liu and Carol Livermore. A compact architecture for passively-switched energy harvesters. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 660, page 012090. IOP Publishing, 2015.
- [37] Jens Twiefel and Henrik Westermann. Survey on broadband techniques for vibration energy harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(11) :1291–1302, 2013.
- [38] Ibrahim Sari, Tuna Balkan, and Haluk Kulah. An electromagnetic micro power generator for wideband environmental vibrations. *Sensors and Actuators A : Physical*, 145 :405–413, 2008.
- [39] M Amri, P Basset, F Cottone, D Galayko, F Najjar, and T Bourouina. Novel nonlinear spring design for wideband vibration energy harvesters. *Proceedings of the PowerMEMS*, pages 15–18, 2011.

- [40] Daigo Miki, Makoto Honzumi, Yuji Suzuki, and Nobuhide Kasagi. Large-amplitude mems electret generator with nonlinear spring. In *2010 IEEE 23rd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pages 176–179. IEEE, 2010.
- [41] Son Duy Nguyen. *Wideband MEMS energy harvesters utilizing nonlinear springs*. PhD thesis, Universitas osloensis.
- [42] Ryan L Harne and KW Wang. A review of the recent research on vibration energy harvesting via bistable systems. *Smart materials and structures*, 22(2) :023001, 2013.
- [43] Van-Du Nguyen, The-Hung Duong, Ngoc-Hung Chu, and Quoc-Huy Ngo. The effect of inertial mass and excitation frequency on a duffing vibro-impact drifting system. *International Journal of Mechanical Sciences*, 124 :9–21, 2017.
- [44] SG Burrow, LR Clare, A Carrella, and D Barton. Vibration energy harvesters with non-linear compliance. In *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2008*, volume 6928, page 692807. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [45] BP Mann and ND Sims. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *Journal of Sound and Vibration*, 319(1-2) :515–530, 2009.
- [46] B Edwards, M Xie, KC Aw, AP Hu, and W Gao. An impact based frequency up-conversion mechanism for low frequency vibration energy harvesting. In *2013 Transducers & Eurosensors XXVII : The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII)*, pages 1344–1347. IEEE, 2013.
- [47] Xiaopeng Zhao, CK Reddy, and AH Nayfeh. Nonlinear dynamics of an electrically driven impact microactuator. *Nonlinear Dynamics*, 40(3) :227–239, 2005.

- [48] Eric Jacquelin, Sondipon Adhikari, and Michael I Friswell. A piezoelectric device for impact energy harvesting. *Smart Materials and Structures*, 20(10) :105008, 2011.
- [49] Lokesh Dhakar, Huicong Liu, FEH Tay, and Chengkuo Lee. A new energy harvester design for high power output at low frequencies. *Sensors and Actuators A : Physical*, 199 :344–352, 2013.
- [50] Mostafa Soliman. Wideband micro-power generators for vibration energy harvesting. 2009.
- [51] Geraldo F de S Rebouças, Ilmar F Santos, and Jon J Thomsen. Validation of vibro-impact force models by numerical simulation, perturbation methods and experiments. *Journal of Sound and Vibration*, 413 :291–307, 2018.
- [52] Mohamed Bendame, Eihab Abdel-Rahman, and Mostafa Soliman. Electromagnetic impact vibration energy harvesters. In *Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis*, pages 29–58. Springer, 2015.
- [53] Shashank Priya and Daniel J Inman. *Energy harvesting technologies*, volume 21. Springer, 2009.
- [54] Slim Naifar, Sonia Bradai, Christian Viehweger, Olfa Kanoun, and Slim Choura. Investigation of the magnetostrictive effect in a terfenol-d plate under a non-uniform magnetic field by atomic force microscopy. *Materials & Design*, 97 :147–154, 2016.
- [55] Busra Mutlu, Erol Kurt, Nicu Bizon, and Jose Manuel Lopez Guede. Design and fabrication of a new micro-power scaled electromagnetic harvester. *Journal of Energy Systems*, 3(2) :51–66, 2019.

- [56] Mohamed Bendame and Eihab Abdel-Rahman. Nonlinear modeling and analysis of a vertical springless energy harvester. In *MATEC Web of Conferences*, volume 1, page 01004. EDP Sciences, 2012.
- [57] Steve P Beeby, RN Torah, MJ Tudor, P Glynn-Jones, T O'donnell, CR Saha, and S Roy. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *Journal of Micromechanics and microengineering*, 17(7) :1257, 2007.
- [58] Huidong Li, Chuan Tian, and Z Daniel Deng. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied physics reviews*, 1(4) :041301, 2014.
- [59] Daniel Guyomar and Mickaël Lallart. Recent progress in piezoelectric conversion and energy harvesting using nonlinear electronic interfaces and issues in small scale implementation. *Micromachines*, 2(2) :274–294, 2011.
- [60] Elie Lefeuvre, Adrien Badel, Claude Richard, and Daniel Guyomar. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16(10) :865–876, 2005.
- [61] Marcin Marzencki, Maxime Defosseux, and Skandar Basrour. Mems vibration energy harvesting devices with passive resonance frequency adaptation capability. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 18(6) :1444–1453, 2009.
- [62] F Lu, HP Lee, and SP Lim. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. *Smart Materials and Structures*, 13(1) :57, 2003.
- [63] P Miao, AS Holmes, EM Yeatman, TC Green, and PD Mitcheson. Micro-machined variable capacitors for power generation. *Imperial college*, 2003.
- [64] S Boisseau, G Despesse, and B Ahmed Seddik. Electrostatic conversion for vibration energy harvesting. *Small-Scale Energy Harvesting*, pages 1–39, 2012.

- [65] V Dragunov and V Dorzhiev. Electrostatic vibration energy harvester with increased charging current. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 476, page 012115. IOP Publishing, 2013.
- [66] Philippe Basset, Elena Blokhina, and Dimitri Galayko. *Electrostatic kinetic energy harvesting*. Wiley Online Library, 2016.
- [67] S Sathya, M Pavithra, and S Muruganand. Simulation of electrostatic actuation in interdigitated comb drive mems resonator for energy harvester applications. In *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, volume 149, page 012050. IOP Publishing, 2016.
- [68] Kazuya Murotani and Yuji Suzuki. Memes electret energy harvester with embedded bistable electrostatic spring for broadband response. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 28(10) :104001, 2018.
- [69] Kai Tao, Lihua Tang, Jin Wu, Sun Woh Lye, Honglong Chang, and Jianmin Miao. Investigation of multimodal electret-based mems energy harvester with impact-induced nonlinearity. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 27(2) :276–288, 2018.
- [70] Raphaël Guillemet, Philippe Basset, Dimitri Galayko, and Tarik Bourouina. Design optimization of an out-of-plane gap-closing electrostatic vibration energy harvester (veh) with a limitation on the output voltage. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 71(1) :39–47, 2012.
- [71] Yi Li, Zeynep Çelik-Butler, and Donald P Butler. A hybrid electrostatic microharvester incorporating in-plane overlap and gap closing mechanisms. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(3) :035027, 2015.
- [72] Philippe Basset, Dimitri Galayko, Francesco Cottone, Raphaël Guillemet, Elena Blokhina, Frédéric Marty, and Tarik Bourouina. Electrostatic vibration energy

- harvester with combined effect of electrical nonlinearities and mechanical impact. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(3) :035001, 2014.
- [73] Yingxian Lu, Frédéric Marty, Dimitri Galayko, Jean-Marc Laheurte, and Philippe Basset. A power supply module for autonomous portable electronics : ultralow-frequency mems electrostatic kinetic energy harvester with a comb structure reducing air damping. *Microsystems & nanoengineering*, 4, 2018.
- [74] Daniel Hoffmann, Bernd Folkmer, and Yiannos Manoli. Analysis and characterization of triangular electrode structures for electrostatic energy harvesting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(10), 2011.
- [75] Simiao Niu, Sihong Wang, Long Lin, Ying Liu, Yu Sheng Zhou, Youfan Hu, and Zhong Lin Wang. Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source. *Energy & Environmental Science*, 6(12) :3576–3583, 2013.
- [76] Ronan Hinchet, Ali Ghaffarinejad, Yingxian Lu, Javad Yavand Hasani, Sang-Woo Kim, and Philippe Basset. Understanding and modeling of triboelectric-electret nanogenerator. *Nano energy*, 47 :401–409, 2018.
- [77] Simiao Niu, Ying Liu, Xiangyu Chen, Sihong Wang, Yu Sheng Zhou, Long Lin, Yannan Xie, and Zhong Lin Wang. Theory of freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators. *Nano Energy*, 12 :760–774, 2015.
- [78] Feng-Ru Fan, Zhong-Qun Tian, and Zhong Lin Wang. Flexible triboelectric generator. *Nano energy*, 1(2) :328–334, 2012.
- [79] Zhong Lin Wang, Tao Jiang, and Liang Xu. Toward the blue energy dream by triboelectric nanogenerator networks. *Nano Energy*, 39 :9–23, 2017.
- [80] Jianjun Luo, Liang Xu, Wei Tang, Tao Jiang, Feng Ru Fan, Yaokun Pang, Libo Chen, Yan Zhang, and Zhong Lin Wang. Direct-current triboelectric nanogene-

- rator realized by air breakdown induced ionized air channel. *Advanced Energy Materials*, 8(27) :1800889, 2018.
- [81] Andrii Dudka, Dimitri Galayko, and Philippe Basset. Vhdl-ams modeling of adaptive electrostatic harvester of vibration energy with dual-output dc-dc converter. In *2009 IEEE Behavioral Modeling and Simulation Workshop*, pages 13–18. IEEE, 2009.
- [82] Ayyaz Mahmood Paracha. *Design and fabrication of Mems-based, vibration powered energy harvesting device using electrostatic transduction*. PhD thesis, Université Paris-Est.
- [83] Dimitri Galayko, Rodrigo Pizarro, Philippe Basset, Ayyaz Mahmood Paracha, and Gilles Amendola. Ams modeling of controlled switch for design optimization of capacitive vibration energy harvester. In *2007 IEEE International Behavioral Modeling and Simulation Workshop*, pages 115–120. IEEE, 2007.
- [84] Shad Roundy, Paul K Wright, and Kristofer SJ Pister. Micro-electrostatic vibration-to-electricity converters. In *ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, pages 487–496. American Society of Mechanical Engineers, 2002.
- [85] Bernard C Yen and Jeffrey H Lang. A variable-capacitance vibration-to-electric energy harvester. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 53(2) :288–295, 2006.
- [86] Yi Chiu and Victor FG Tseng. A capacitive vibration-to-electricity energy converter with integrated mechanical switches. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18(10) :104004, 2008.
- [87] H Samaali, B Ouni, and F Najjar. Design and modelling of mems dc-dc converter. *Electronics Letters*, 51(11) :860–861, 2015.



- [88] Ali Ghaffarinejad, Javad Yavand Hasani, Ronan Hinchet, Yingxian Lu, Hemin Zhang, Armine Karami, Dimitri Galayko, Sang-Woo Kim, and Philippe Basset. A conditioning circuit with exponential enhancement of output energy for triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 51 :173–184, 2018.
- [89] Andrey Dudka, Philippe Basset, Francesco Cottone, Elena Blokhina, and Dimitri Galayko. Wideband electrostatic vibration energy harvester (e-veh) having a low start-up voltage employing a high-voltage integrated interface. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 476, page 012127. IOP Publishing, 2013.
- [90] Antonio Carlos M de Queiroz. Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of benet’s doubler. In *2010 53rd IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems*, pages 404–407. IEEE, 2010.
- [91] Vitaly Dorzhiev, Armine Karami, Philippe Basset, Frédéric Marty, Valery Dragunov, and Dimitri Galayko. Electret-free micromachined silicon electrostatic vibration energy harvester with the benet’s doubler as conditioning circuit. *IEEE Electron Device Letters*, 36(2) :183–185, 2015.
- [92] Cuong Phu Le and Einar Halvorsen. Mems electrostatic influence machines. *Journal of physics*, 2016.
- [93] MA Ben Ouanes, H Samaali, D Galayko, P Basset, and F Najjar. A new type of triboelectric nanogenerator with self-actuated series-to-parallel electrical interface based on self-synchronized mechanical switches for exponential charge accumulation in a capacitor. *Nano Energy*, 62 :465–474, 2019.
- [94] MA Ben Ouanes, Yingxian Lu, H Samaali, Philippe Basset, and F Najjar. Design and test of a benet’s doubler device with mechanical switches for vibrational energy harvesting. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 773, page 012038. IOP Publishing, 2016.

- [95] Yipeng Wu, Adrien Badel, Fabien Formosa, Weiqun Liu, and Amen Agbossou. Nonlinear vibration energy harvesting device integrating mechanical stoppers used as synchronous mechanical switches. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(14) :1658–1663, 2014.
- [96] Hemin Zhang, Yingxian Lu, A Ghaffarinejad, and Philippe Basset. Progressive contact-separate triboelectric nanogenerator based on conductive polyurethane foam regulated with a benet doubler conditioning circuit. *Nano energy*, 51 :10–18, 2018.
- [97] A Ghaffarinejad, Y Lu, R Hinchet, D Galayko, JY Hasani, and P Basset. Bennet’s charge doubler boosting triboelectric kinetic energy harvesters. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1052, page 012027. IOP Publishing, 2018.
- [98] Y Lu, M Capo-Chichi, Y Leprince-Wang, and P Basset. A flexible electrostatic kinetic energy harvester based on electret films of electrospun nanofibers. *Smart Materials and Structures*, 27(1) :014001, 2017.
- [99] Alexis Peschot, Christophe Poulain, Nelly Bonifaci, and Olivier Lesaint. Contact bounce phenomena in a mem switch. In *2012 IEEE 58th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, pages 1–7. IEEE, 2012.
- [100] Vincent Acary and Bernard Brogliato. *Coefficients de restitution et efforts aux impacts : Revue et comparaison des estimations analytiques*. PhD thesis, INRIA.
- [101] Nobuyuki Osawa. Linear sliding guide bearing, July 17 1990. US Patent 4,941,758.
- [102] MA Ben Ouanes, H Samaali, P Basset, and F Najjar. Charge doubler vibration energy harvester using self-synchronized mechanical switches. In *Journal of Physics : Conference Series*, volume 1052, page 012121. IOP Publishing, 2018.

- [103] Nicolas AF Jaeger and Lawrence Young. High-voltage sensor employing an integrated optics mach-zehnder interferometer in conjunction with a capacitive divider. *Journal of Lightwave Technology*, 7(2) :229–235, 1989.
- [104] Anders Wåhlin. *Static electrification of teflon by metals*. PhD thesis, Umeå universitet, 1973.
- [105] Ali H Nayfeh. *Perturbation methods*. John Wiley & Sons, 2008.
- [106] Paul D Mitcheson, Tom Sterken, Cairan He, M Kiziroglou, EM Yeatman, and R Puers. Electrostatic microgenerators. *Measurement and Control*, 41(4) :114–119, 2008.
- [107] Y Naruse, N Matsubara, K Mabuchi, M Izumi, and S Suzuki. Electrostatic micro power generation from low-frequency vibration such as human motion. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(9) :094002, 2009.
- [108] Yongfeng Gao, Zheng You, and Jiahao Zhao. Electrostatic comb-drive actuator for mems relays/switches with double-tilt comb fingers and tilted parallelogram beams. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 25(4) :045003, 2015.
- [109] Raphaël Guillemet, Philippe Basset, Dimitri Galayko, and Tarik Bourouina. Combined optimization of electrical and mechanical parameters of an out-of-plane gap-closing electrostatic vibration energy harvester (veh). In *2010 Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, pages 73–78. IEEE, 2010.
- [110] Daniel Hoffmann, Bernd Folkmer, and Yiannos Manoli. Design considerations of electrostatic electrode elements for in-plane micro-generators. *Technical Digest PowerMEMS 2007 (Freiburg, Germany, November 2007)*, pages 133–6, 2007.

# Publications

## Articles de conférences :

**Design and test of a Bennet's doubler device with mechanical switches for vibrational energy harvesting**

Med Aymen Ben Ouanes, Yingxian Lu, Hatem Samaali, Philippe Basset, Fehmi Najjar  
Journal of Physics : Conference series (2016), vol 773, IOP Publishing, p. 012038.  
PowerMems2017, 14-17 Novembre 2017, Kanazwa, Japon,

**Charge Doubler Vibration Energy Harvester Using Self-Synchronized mechanical switches**

Med Aymen Ben Ouanes, Hatem Samaali, Philippe Basset, Fehmi Najjar  
Journal of Physics : Conference series (2018), vol 1052, IOP Publishing, p. 012121.  
PowerMems2016, 23-25 décembre 2016, Paris, France

**Optimized charge doubler device for electrostatic vibrational energy harvesting using triangular fingers electrodes**

Med Aymen Ben Ouanes, Hatem Samaali, Philippe Basset, Fehmi Najjar  
ICAV2018, 19-21 Mars 2018, Hamammet, Tunisie

**Dynamic analysis of the charge doubler electrostatic vibrational energy harvester**

Med Aymen Ben Ouanes, Hatem Samaali, Philippe Basset, Fehmi Najar  
CSNDD2018, 25-27 Juin 2018, Tanger, Maroc,

**Articles de journal :**

**A new type of triboelectric nanogenerator with self-actuated series-to-parallel electrical interface based on self-synchronized mechanical switches for exponential charge accumulation in a capacitor**

Med Aymen Ben Ouanes, Hatem Samaali, Dimitri Galayko, Philippe Basset, Fehmi Najar  
Nano Energy 62 (2019), 465-474.