



Filière : électrotechnique

Option : commande des systèmes électrique

Réf:

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER Thème

Récupération d'énergie mécanique à l'aide des matériaux intelligents par des méthodes non linéaires

Soutenu le : 27/06/2013

Présenté par :

Meharga Lamri

Cherigui Hachemi

Proposé et dirigé par :

Dr.Meddad Mounir

Devant un Jury composé de :

- B.Amara
- S.Benahdouga
- R.Khanfar

Président
Examineur
Examineur

Promotion : Juin 2013

إهداء

إلى روح أبي الطاهرة (رحمة الله عليه) الذي شاء القدر أن يفارقنا في عز شبابنا
ستبقى كلماتي أمامه صغيرة جدا. كان وسيبقى القروة والمعلم في كل حياتي، أسأل
الله أن أمثل بمباوئك وأكون كما تمنى أن يراني.

إلى والدتي التي علمتني معنى التضحية ومعنى أن تعاني ليسعد الآخرين. إلى
أطيب قلب. أرجو من الله أن أستطيع أن أرو لكما جزءا من فضلكما علي.

إلى أخوي وأختاي

وإلى جميع أفراد أسرتي من أعمام وأخوال، سنري في الدنيا ولا أحصي لهم
فضلا خاصة جري عبر المجير أطل الله في عمره له تحية إجلال وتقدير فاني مهما
فعلت لا أستطيع أن أرو بحيله

جزيل الشكر والامتنان إلى كافة أساتذة قسم الإلكترونيات وتكنولوجيا بجامعة محمد البشير
الإبراهيمي وأخص بالذكر الأستاذ المشرف و. مدرو منير الذي لم يبخل علينا
بتوجيهاته ونصائحه القيمة التي كانت عوننا لنا في إتمام هذه المذكرة.
إلى كل من ساهم معي من قريب أو بعيد سواء ماويا أو معنويا.

العمرى محارقة

إهداء

إلى اللذين ملكا عرش كياني وأول من نطق بهما لساني وبهمل ربي أوصاني
إلى من رؤيتهما تغزي روحي وتثير وربي
إلى من عطاؤهما بلا حدود، علي من هما رمز الوجود
إلى اللذين لو فرشت لهما الأرض وهبا لما وفيت
إلى أغلى ما أملك في ونيائي
إلى من لا تكفي الحروف والكلمات والصفحات للتعبير عما أعمل لهما
إلى من بذكرهما يطمئن قلبي ومن استأثرا علي كل حبي
إلى نسيم روحي وبلسم جروحي أُمِّي وأبِّي
وون أن أنسى بالذكر كل أفراد الأسرة الحبيبة من أخوة وأخوات
إلى صديقي ورفيق وربي بلال
إلى كل من كان ذكرى رائعة ومحطة باسمه في حيات أهدبهم شجرة جهري مع أسمى
معاني الحب والتقدير رمزا واعترافا بالجميل

عصام شريقي

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électromécanique de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arreridj.

Tout d'abord nous remercions le bon Dieu (الله) tout puissant de la bonne santé, de la volonté et de la patience qu'il nous a accordée tout au long de nos études.

*Nous tenons en premier lieu à remercier cordialement, notre cher encadreur **Dr. MEDDAD MOUNIR** pour sa précieuse collaboration et surtout sa gentillesse et son pertinent conseil, qu'il n'ait cessé de nous donner tout au long de l'élaboration de ce modeste travail.*

Nous remercions tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception.

Et enfin nous remercions l'ensemble de nos collègues de notre promotion l'électrotechnique et tous nos amis.

Lanri Hachemi

Résumé

Extraire de l'environnement ambiant la part d'énergie nécessaire pour assurer le fonctionnement d'un micro-dispositif électronique reste un formidable challenge. Une forte demande vis à vis de ce type de systèmes surgit actuellement de nombreux secteurs (domestique, transport, médical, militaire, industriel ...). En effet les niveaux de connaissance et de savoir-faire technologique permettent maintenant de fabriquer des matériaux intelligents avec les propriétés mécanique et électrique désirées. Rendant ainsi possible la conception de système à des coûts moindres, avec des dimensions et des masses plus faibles. De plus les polymères ont des propriétés intéressantes par rapport aux matériaux inorganiques. Ils sont légers, peu coûteux, pliables, Le but de cette mémoire est d'explorer la potentialité des polymères pour une application de récupération d'énergie mécanique ambiante

Mots-clés : *Récupération d'énergie mécanique, Polymère électroactifs, piézoélectricité, Caractérisation électrique et mécanique.*

المخلص:

لا يزال موضوع استخراج نسبة من الطاقة المتوفرة في البيئة المحيطة واللازمة لضمان تشغيل الأجهزة الإلكترونية الدقيقة يشكل تحدياً هائلاً. والذي دع العديد من القطاعات الهامة إلى الطلب الكبير على هذا النوع من الأنظمة من بينها: المنزلية، النقل، الطبية، العسكرية والصناعية... في الواقع يمكن لمستويات المعرفة والدراسة التكنولوجية الآن السماح بتصنيع مواد ذكية مع الخصائص الميكانيكية والكهربائية المطلوبة، مما يجعل من الممكن تصميم النظام بتكلفة أقل، بأحجام وكتل ضعيفة. إضافة إلى أن البوليمرات ذات خصائص مثيرة للاهتمام مقارنة مع المواد الغير عضوية، فهي خفيفة، غير مكلفة وقابلة للطي. الهدف من هذه المذكرة هو استكشاف مدى إمكانية البوليمرات الالكتروفعالة لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

الكلمات المفتاحية:

استرجاع الطاقة الميكانيكية، البوليمرات الكهروفعالة، الكهرو ضغطية، الخصائص الكهربائية والميكانيكية



SOMMAIRE

Tables des matières

<i>Dédicace</i>	ii
<i>Remerciements</i>	iii
<i>Résumé</i>	iv
<i>Tables des matières</i>	v
<i>Liste des tableaux</i>	ix
<i>Liste des figures</i>	x
<i>Abréviations et Nomenclature</i>	xiii

Introduction générale	1
------------------------------------	---

Chapitre I

I.1 Introduction	4
I.2. Généralité sur les microsystèmes	5
I.2.1 Les MEMS et leurs enjeux économiques	6
I.2.2 Le marché des MEMS – Contexte économique	6
I.3 Principales applications de la récupération d'énergie ambiante basse puissance	8
I.3.1 Le transport	8
I.3.2 L'industrie	9
I.3.3 L'habitat	10
I.3.4 Le médical	10
I.3.5 L'environnement	11
I.3.6 La défense et le spatial	11
I.3.7 Le grand public	12
I.4 Les sources énergétiques ambiantes	12
I.4.1 L'énergie des radiations	15
I.4.1.1 Le rayonnement solaire	15
I.4.1.2 Rayonnement nucléaire	16
I.4.2 Source Radiofréquence	17

I.4.2.1 L'énergie thermique	17
I.4.3 Energie mécaniques	18
I.4.3.1 Les énergies de corps humain	18
I.4.3.2 Les vibrations ambiantes	19
I.5 Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques ambiante	20
I.5.1 Conversion électromagnétique	21
1.5.2 Conversion électrostatique	24
I.5.3 Conversion piézoélectrique	26
I.5.3.1 Régime de fonctionnement d'un générateur piézoélectrique.....	29
I.5.3.2 Chaussure piézoélectrique de M.I.T. Media Lab.....	29
I.5.3.3 Les touches piézoélectriques	31
I.5.4 Comparaison des 3 méthodes de conversion	32
I.6 Conclusions	33

Chapitre II

II.1 Introduction.....	35
II.2 Généralité sur la piézoélectricité	36
II.2.1 Principe de fonctionnement polymère piézoélectrique	36
II.2.2 Equations de la piézoélectricité.....	37
II.2.3 Les différents modes de couplage électromécanique.....	39
II.2.3.1 Couplage intrinsèque.....	39
II.2.3.2 Couplage effectif	39
II.2.4. Mode de déformation.....	41
II.2.5 Principe du générateur récupérateur d'énergie mécanique.....	41
II.2.5.1 Régime de fonctionnement du générateur piézoélectrique.....	42
II.2.5.2 Matériau piézoélectrique	43
II.2.6 Modélisation du système Piézoélectrique.....	44
II.2.6.1 Description du système piézoélectrique	44
II.2.6.2 Evolution des circuits équivalent depuis le modèle de Mason	45
II.2.6.3 Analogie électromécanique.....	45

II.2.6.3 Evolution des circuits équivalents	46
II.2.6.5 Circuit équivalent en régime quasi-statique	47
II.2.6.6 Mise en équation en régime dynamique	53
II.2.7 Simulation par l'environnement MATLAB	56
II.2.8 Simulation d'un système piézoélectrique	56
II.2.8.1 Simulation selon le mode 33.....	57
II.2.8.2 Simulation selon le mode 31.....	59
II.2.8.3 Comparaison entre les modes de déformation 33 et 31.....	61
II.3 Les polymères électrostrictifs	62
II.3.1 Généralité	62
II.3.2 Les équations de l'électrostriction.....	63
II.3.3 Principe de récupération d'énergie par effet électrostrictif.....	64
II.3.4 Principe de générateur électrostrictif	66
II.3.4.1 Générateur à couplage direct	67
II.3.4.2 Générateur à couplage indirect.....	68
II.3.5 Modélisation et analyse des capacités des polymères électrostrictifs.....	69
II.3.5.1 Modélisation du courant de court-circuit.....	69
II.3.5.2 Modèle électromécanique	71
II.3.5.3 Modélisation en récupération d'énergie en conversion AC	72
II.3.5.4 Modèle à partir des équations phénoménologiques	73
II.3.5.5 Modèle à partir des équations en pseudo-piézoélectrique	75
II.3.6 La simulation d'un système électrostrictif.....	77
II.3.6.2 Interprétation des résultats	82
II.3.6.3 Etude comparative entre un système piézoélectrique et électrostrictif	82
II.4 Conclusion	84

Chapitre III

III.1 Introduction	86
III.2 Un prototype pour maximiser la récupération d'énergie en utilisant des polymères piézoélectrique.....	87
III.2.1 Modélisation	89
III.2.2 Simulation.....	90
III.2.3 Résultats de l'essai expérimental.....	92
III.2.4 Conclusion	95
III.3 Modélisation analytique de l'énergie électrique récupérée par polymère électrostrictifs	96
III.3.1 Modélisation.....	96
III.3.2 Le modèle analytique développée.....	98
III.3.3 Les résultats de simulation.....	100
III.4 Système de conversion AC-DC de l'énergie récupérée par polymères électrostrictifs	102
III.4.1 Principe de la conversion	102
III.4.2 Partie de simulation.....	105
III.5 Conclusion.....	107
Conclusion générale et perspectives	108
Références bibliographiques	110

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Densité de puissance de diverses technologies pour la récupération d'énergie	13
Tableau I. 2: quelques exemples de prototypes utilisant mode de conversion électromagnétique	23
Tableau I. 3 : comparaison entre les trois modes de conversion	32

Chapitre II

Tableau II. 1: Différentes formes d'écriture des équations de la piézoélectricité	37
Tableau II. 2: Définition des différentes constantes	38
Tableau II. 3: Les différents modes du couplage électromécanique	40
Tableau II. 4: Caractéristiques du matériau céramique PZT-5A	43
Tableau II. 5: Analogie électromécanique	46
Tableau II. 6 : les paramètres de film piézoélectrique PVDF	56
Tableau II. 7 : la densité de puissance récupérée par le film PVDF selon les modes 31 et 33	61
Tableau II. 8: Maximum d'énergie récupérable pour deux types de polymères électrostrictifs	66
Tableau II. 9 : Avantages et inconvénients des différents types de conversions	69
Tableau II. 10: Les valeurs des différents paramètres pour une déformation mécanique imposée de 0.2% et un champ statique $E_{dc}=5V/\mu m$	74
Tableau II. 11 : Les différentes grandeurs nécessaires à la simulation	77
Tableau II. 12: les résultats obtenus par la simulation de quatre échantillons de polymères électrostrictifs	80
Tableau II. 13 : la densité de puissance récupérée par les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs	83
Tableau II. 14 : étude comparative entre les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs	84

Chapitre III

Tableau III. 1 : les paramètres de polymère PVDF piézoélectrique	90
Tableau III. 2 : paramètres du polymère PU1%C	105

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1: Accéléromètre (Université de Princeton)	6
Figure I. 2: Evolution du marché des MEMS par applications	7
Figure I. 3: Placement des différents capteurs sur une voiture	9
Figure I. 4: Placement d'un pacemaker dans le corps humain.....	10
Figure I. 5: Les sources d'énergies ambiantes utilisables par les microsystèmes.....	13
Figure I. 6: Synthèse du potentiel de récupération d'énergie dans l'environnement humain .	14
Figure I. 7: Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque	15
Figure I. 8: Modèle d'une batterie nucléaire.....	16
Figure I. 9: Générateur thermoélectrique développée par la société Micro-pelt	18
Figure I. 10: quelques valeurs de puissances produites par le corps humain	19
Figure I. 11: Loi de Faraday.....	21
Figure I. 12: Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie	22
Figure I. 13: Lampe torche utilisant la conversion électromagnétique.....	23
Figure I. 14 : Schéma d'un générateur capacitif avec V_{in} – source de tension pour précharger la capacité variable, CV – capacité variable, C_{par} – capacité parasite et C_{stor} – capacité de stockage	24
Figure I. 15: Générateur électrostatique	25
Figure I. 16: Chaussure dotée d'un générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus)	26
Figure I. 17: Principe de la piézoélectricité	27
Figure I. 18: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format cymbale..	28
Figure I. 19: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre bimorphe.....	28
Figure I. 20: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre unimorphe.....	28
Figure I. 21: Modes 31 et 33 : ces modes de fonctionnement dépendent de la direction relative de la polarisation et de la compression/extension	28
Figure I. 22: Chaussures piézoélectriques développées au MIT, utilisant soit du PVDF stratifié placé sous la plante du pied, soit un bimorphe réalisé à partir de céramiques piézoélectriques (PZT) placé sous le talon.....	30
Figure I. 23: Schéma des touches du clavier Compaq	31
Figure I. 24: prototype de touches piézoélectriques	31

Chapitre II

Figure II. 1: Effet Piézoélectrique [28]	37
Figure II. 2 : Schéma de principe du générateur piézoélectrique	42
Figure II. 3 : Barreaux de céramique PZT fonctionnant en mode 33 ou 31	44
Figure II. 4 : Système mécanique {masse, ressort, amortisseur}	46
Figure II. 5: Evolution des modèles des matériaux piézoélectriques en régime dynamique..	47
Figure II. 6: Circuits équivalents au barreau piézoélectrique en mode 33 [34].....	50
Figure II. 7: Circuits équivalents au barreau piézoélectrique en mode 31 [34].....	52
Figure II. 8 : le circuit électromécanique équivalent d'un bar piézoélectrique [34].....	54
Figure II. 9 : la puissance récupérée par le film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	57
Figure II. 10: la tension générée par le film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	57
Figure II. 11: la courbe du courant de film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	58
Figure II. 12: la puissance récupérée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	59
Figure II. 13: la tension générée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	59
Figure II. 14: Le courant générée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation (S=0.1%, S=0.2%)	60
Figure II. 15: la puissance récupérée par le film PVDF selon les modes 31 et 33	61
Figure II. 17: Cycles d'hystérésis pour un polymère irradié et non irradié [37].	63
Figure II. 18: Cycles à réaliser avec un matériau électrostrictif pour la récupération d'énergie [38]	64
Figure II. 19: Cycle de récupération d'énergie sous champ électrique constant lors des phases d'étirements et de compressions [37].	65
Figure II. 20: Processus simplifié d'extraction d'énergie d'une structure vibrante par éléments électrostrictif [37].....	67
Figure II. 21 : types de générateur électrostrictif à couplage direct	68
Figure II. 22 : types de générateur électrostrictif à couplage indirect par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique	68
Figure II. 23: Définition du courant de court-circuit	71
Figure II. 24: Les différents comportements d'un élément électrostrictif.....	72
Figure II. 25: Principe de la caractérisation de la puissance récupérée	73
Figure II. 26: Schéma électrique équivalent en conversion AC	76
Figure II. 27: courbes théorique de puissance récupérée par PU et PU 1% C en fonction de la résistance avec un champ électrique de 10V/ μ m à 15 Hz et une déformation de 0.5%	78

Figure II. 28: courbes théorique de puissance récupérée par P(VDF-TrFE-CFE) et P(VDF-TrFE-CFE) 1%C en fonction de la résistance avec un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et une déformation de 0.5% 79

Figure II. 29: courbes théorique de tension récupérée par quatre échantillons de polymères électrostrictifs en fonction de la résistance avec un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et une déformation de 0.5% 79

Figure II. 30: La puissance récupérée par PU 1%C sous différentes valeurs de fréquence (3 Hz et 6 Hz).avec une déformation constante $s = 0.5\%$ 80

Figure II. 31: La puissance récupérée par PU 1%C avec différentes déformations 81

Chapitre III

Figure III. 1: Schéma du circuit prototype de la structure classique 87

Figure III. 2: Schéma du circuit prototype de la structure proposée 88

Figure III. 3 : la configuration du système mécanique proposé 88

Figure III. 4: la puissance récupérée par le film PVDF dans la structure classique et proposée. 90

Figure III. 5: l'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure classique ... 91

Figure III. 6 : l'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure proposée. 91

Figure III. 7: Banc expérimentale pour une structure classique 92

Figure III. 8: Banc expérimentale pour une structure proposé. 93

Figure III. 9 : Puissance récupérée théorique et expérimentale en fonction de la résistance .. 94

Figure III. 10: la variation de courant générée par PU 1% C en fonction de déformation S .. 97

Figure III. 11 : La variation de courant en fonction de déformation 100

Figure III. 12: Puissance théorique et expéromentale en fonction de la résistance, pour le modele proposée..... 101

Figure III. 13: Schéma électrique équivalent de la structure 102

Figure III. 14: Polymère en conversion DC 104

Figure III. 15 : Puissance récupéré en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 6.5% et un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ 106

Abréviations et Nomenclature

Abréviations

<i>Symbole</i>	<i>Sens</i>
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MIT	Massachussets Institute of Technology
HBS	Le projet Heart Beat Scavenger
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
EAP	ElectroActive Polymer ou les polymères électroactifs
PZT	Titanate Zirconate de Plomb
PVDF	Fluorure de Polyvinylidene
PU	Polyuréthane
P(VDF-TrFE-CFE)	Fluorure de Polyvinylidene de trifluoréthylène chlorofluoréthylène
1% C	Noir de Carbone
DMA	Dispositif mécanique d'application
SR	système de récupération
SP	système piézoélectrique
GP	Générateur piézoélectrique

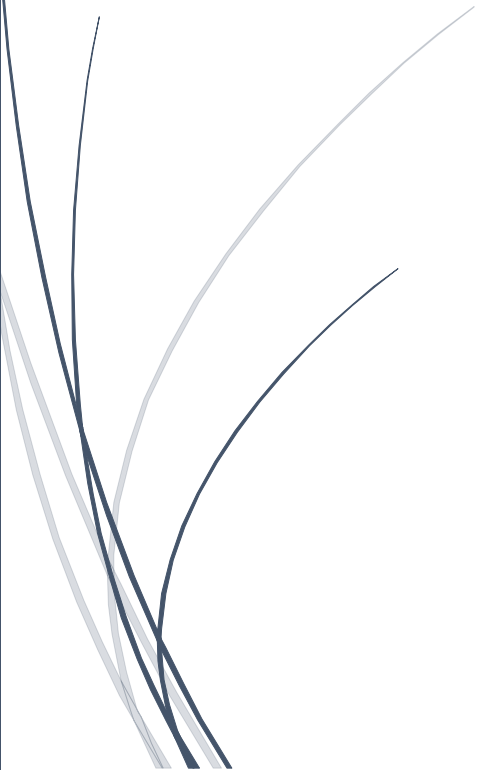
Nomenclature

<i>Symboles</i>	<i>Grandeurs</i>
S	La déformation mécanique
D	Le déplacement (Induction) électrique
T	La contrainte mécanique
E	Le champ électrique
P	la polarisation
s	la souplesse
d	La constante de charge
e	La constante piézoélectrique
g	La constante de tension
k_{33}, k_{31}, k_{15}	Le coefficient de couplage
A	Surface
L	Longueur
Q_m	Facteur de qualité mécanique
ε	Permittivité relative
ε_0	Permittivité du vide
C_0	la capacité de la céramique encastrée
C_m	la capacité mécanique
F	la force appliquée
ρ	La masse volumique du matériau
Z	L'impédance mécanique

M	Coefficient électrostriction
W	La densité d'énergie
Y	module d'Young
C_p	Capacité bloquée du polymère
ω_e	Pulsation électrique
ω_m	Pulsation mécanique
R	Charge résistive
C_b	Capacité de blocage
I_s	Courant de fuite dans la source haute tension
I_m	Courant dans la branche active



Introduction générale



Les besoins énergétiques mondiaux n'ont cessé de croître ces dernières années de sorte que nous prenons de plus en plus conscience de la valeur de l'énergie. Nous sommes aujourd'hui confrontés à deux problèmes majeurs : l'épuisement des énergies fossiles (Pétrole, Gaz) et nucléaire (Uranium), et le réchauffement climatique dont nous mesurons de plus en plus les effets sur notre environnement. Selon le Conseil Mondial de l'Énergie (CME), la consommation énergétique mondiale passera de 9 Milliards de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole) aujourd'hui, à 15 Milliards de TEP en 2020 et devrait probablement tripler d'ici 2050.

Depuis plusieurs années des pistes de recherches sont exploitées et des solutions sont présentées pour trouver d'autres sources de production d'énergie, moins coûteuses et moins polluantes pour l'environnement. Ainsi, juste après la première crise pétrolière en 1978, la France, comme plusieurs autres pays, s'est lancée dans la production d'énergie électrique nucléaire. Le recours à l'énergie nucléaire n'est pas la panacée. Cette source d'énergie est certes moins chère, mais produit des déchets radioactifs, qui bien que conservés dans des containers étanches, n'en présentent pas moins un risque pour la nature et les générations futures qui devront continuer à gérer notre consommation d'aujourd'hui. De plus, l'uranium reste une ressource épuisable comme les énergies fossiles. [1]

Aujourd'hui, des orientations politiques sont mises en œuvre pour encourager la maîtrise de notre consommation d'énergie et l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, hydraulique, éoliennes, géothermique...). L'exploitation de ces énergies possède un double caractère économique et écologique. Elles sont gratuites, non polluantes et, a priori, inépuisables. L'Union Européenne s'est engagée à inclure 20% d'énergie renouvelable dans sa consommation d'énergie, d'ici 2020.

Le développement des micro-technologies, et notamment de la microélectronique de puissance, a permis la réduction considérable de la consommation des dispositifs électroniques (du watt au micro Watt). Cette réduction des pertes suscite aujourd'hui l'intérêt de nouvelles recherches sur les micro-sources d'énergies environnantes (mécanique, thermique...), avec l'objectif d'augmenter l'autonomie d'alimentation des systèmes électroniques et de prolonger la durée de vie de leurs batteries de stockage.

Les avantages de cette solution sont évidents : la durée de fonctionnement du dispositif est limitée uniquement par l'existence d'une source externe et en plus, la taille du dispositif peut être réduite.

L'objectif de ce travail est de montrer l'utilité des polymères électrostrictifs et piézo-électriques appelés souvent matériaux intelligents. Le premier chapitre est consacré au contexte scientifique et technologique des systèmes intelligents une introduction générale sur la récupération d'énergie, en passant par un état de l'art sur la nouvelle problématique de recherche, qui concerne les polymères électroactifs. Le second s'intéresse à la modélisation des polymères électrostrictifs et piézoélectriques. Le modèle analytique est réalisé à partir des caractérisations mécaniques et électriques mise en place, Ce modèle permet de démontrer le fort potentiel des matériaux pour la récupération. Enfin, nous aborderons l'amélioration de la conversion électromécanique et nous présenterons des résultats de simulation obtenus. Les résultats seront confrontés aux tests des prototypes fabriqués. L'objectif de ce chapitre présente l'amélioration des performances du système, en exploitant les techniques développées et les adapter pour ce type de structures. Nous donnerons à la fin de cette mémoire quelques pistes de développement et d'optimisation et nous terminerons par une conclusion et les perspectives.



CHAPITRE I

Les différentes techniques de récupération de l'énergie



Le but de ce chapitre est de situer le travail présenté dans le contexte scientifique actuel. Une description de l'état de l'art en matière de récupération d'énergie est ainsi proposée.

De plus il sera également abordé la mise en commun de cette thématique, par la présentation de dispositifs autonomes déjà réalisés, voire déjà commercialisés.

De même, l'autre objectif de cette partie est de présenter les nouveaux matériaux intelligents, basés sur des technologies innovantes et alternatives aux solutions classiques connues, telle que la piézoélectricité, l'électromagnétisme et l'électrostatique.

I.1 Introduction

Depuis quelques années, le développement des applications mobiles sans fil connaît un essor remarquable. Un défi, apparu dans les années 90, est de pouvoir alimenter ces dispositifs portables en exploitant les ressources présentes dans l'environnement humain. En parallèle, le développement des capteurs communicants (déconnectés du réseau d'énergie électrique) génère également ses propres problèmes d'alimentation, en particulier liés aux opérations de changement de piles. L'auto alimentation de tous ces dispositifs devient envisageable grâce à la conjonction de la baisse des consommations des circuits électroniques, à la possibilité de réaliser des récupérateurs de ressources ambiantes suffisamment performants et aux progrès réalisés dans le stockage d'énergie électrique. [2]

Ainsi, après un bref bilan des ressources énergétiques exploitables dans l'environnement, nous nous intéressons dans ce premier chapitre aux différents principes de conversion d'énergie mécanique, thermique, photovoltaïque et électromagnétique haute fréquence, en énergie électrique exploitable.

Pour illustrer ces différents principes de conversion, nous nous appuyons sur des systèmes décrits dans la littérature. [2]

Ce chapitre a également pour objectif de présenter la problématique de cette mémoire, et par conséquent, de nous positionner scientifiquement par rapport aux travaux déjà menés dans cette communauté scientifique.

I.2. Généralité sur les microsystèmes

Le terme américain MEMS (Micro Electro Mechanical System) qui s'est imposé aujourd'hui pour remplacer les « Microsystèmes » européens et les « Micromachines » japonaises, englobe un ensemble de composants réalisés sur silicium à l'aide de micro technologies. Les microsystèmes ont été développés au début des années 1970 en tant que dérivé de la micro- électronique, leur première commercialisation remonte aux années 1990. Les MEMS sont encore en plein essor. C'est un domaine de recherche relativement récent qui combine l'utilisation des techniques électroniques, informatiques, chimiques, mécaniques, optiques.

On peut définir les micro-systèmes ou les micro-électromécaniques comme des systèmes de petite dimension (plus petites qu'un centimètre cube) et qui accomplissent des fonctions de précision. Ce concept a très rapidement suscité un vif intérêt dans le monde.

Les micro-systèmes se composent de capteurs pour acquérir les informations du monde extérieur et d'actionneurs qui réagissent avec le monde extérieur. Très souvent l'électronique associée est intégrée sur le même substrat pour le traitement de données. Le terme micro- système est aussi utilisé pour décrire des systèmes hybrides dont les différents composants sont fabriqués indépendamment (avec différente technologie et différents substrats), ainsi pour décrire des systèmes monolithiques dont les composants sont fabriqués sur le même substrat. Les capteurs et les actionneurs sont fabriqués sur des microstructures de silicium, tandis que les parties de traitement de signal sont fabriquées avec les processus microélectroniques ordinaires.

Dans le domaine en forte croissance des MEMS, les matériaux fonctionnels sont appelés à plus ou moins long terme à jouer un rôle important en vue de l'amélioration des performances et de la compétitivité des dispositifs. Parmi eux, les piézo-électriques présentent un intérêt particulier en raison de la forte densité d'énergie élastique qu'ils peuvent générer dans un volume réduit et de leur faible impédance électrique : cela permet de faire des actionneurs basse tension fortement miniaturisés et des capteurs de micro déformations très sensibles. [3]

I.2.1 Les MEMS et leurs enjeux économiques

Les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems) sont des microsystèmes issus de l'industrie de la micro-électronique et composés d'éléments mécaniques et électroniques permettant par exemple de réaliser des fonctions de capteurs (pression, accélération, masse,...) ou d'actionneurs (moteurs,...).

Ces structures sont obtenues par des processus émanant des techniques employées dans la microélectronique telles que la lithographie, la gravure, le dépôt... et sont caractérisées par la présence d'un élément « libéré » capable de se mouvoir sous l'action d'une force extérieure (accélération, pression, tension,...).

Les premiers MEMS datent des années 1960, mais ce n'est qu'avec leur utilisation dans les imprimantes (buses d'impression) ou dans les airbags (accéléromètres (figure I.1)). Ce n'est que dans les années 1980 que les MEMS furent introduits en masse sur le marché. A l'heure actuelle, les MEMS sont utilisés dans de nombreux domaines tels que les télécommunications, la médecine, l'automobile, l'aéronautique ou encore la biologie. [4]

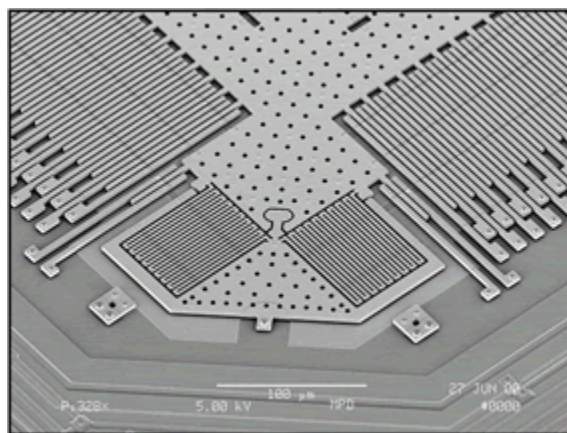


Figure I. 1: Accéléromètre (Université de Princeton) [4]

I.2.2 Le marché des MEMS – Contexte économique

A l'heure actuelle, les MEMS représentent un marché de 8 milliards de dollars ; la majorité du chiffre d'affaire est réalisée grâce aux têtes d'impression, aux capteurs de pressions, aux accéléromètres, aux capteurs inertiels et aux gyroscopes (figure I.2).

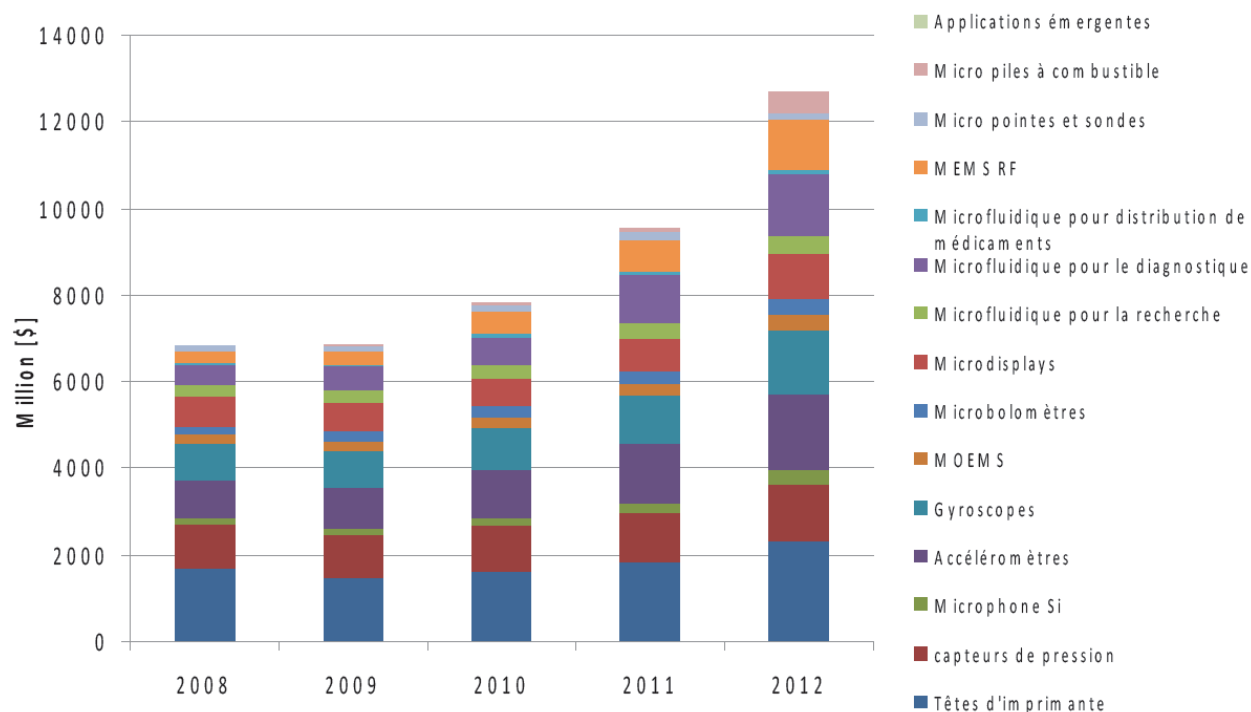


Figure I. 2: Evolution du marché des MEMS par applications [3] [5]

Cependant, cette répartition est en évolution, notamment avec l'apparition de nouveaux marchés liés à l'intégration des MEMS dans l'électronique grand public (Smart phones, consoles de jeux). Ainsi, une seconde étude de marché réalisée par I Suppli montre qu'en 2013, 30% du chiffre d'affaire des MEMS sera réalisé par ce secteur, alors qu'il n'en représentait que 19% en 2008 [3].

La crise économique de 2009 a touché de plein fouet l'industrie du semi-conducteur avec une chute du chiffre d'affaire de 23%. Sur cette même période, le marché des MEMS lié aux applications grand public, s'en est plutôt bien sorti, puisqu'il aura permis de générer 1,2 milliards de dollars, avec une tendance à la hausse. L'étude réalisée par I Suppli prévoit ainsi que d'ici 2013, ce marché représentera 2,5 milliards de dollars, poussé par le développement des Smartphones (microphones, accéléromètres, gyroscopes...) et des télécommunications (filtres BAW, Switch RF,...).

L'année 2012 sera également une date clé pour l'industrie du MEMS. Cette date correspond en effet à la mise en application de lois européennes sur la mesure obligatoire de pression des pneus en temps réel (TPMS), mesure qui sera vraisemblablement réalisée à l'aide de MEMS (en vigueur aux Etats-Unis depuis 2007).

A l'heure actuelle, les plus gros fabricants de MEMS sont Hewlett Packard et Texas Instruments. Les MEMS ont permis la création de nombreuses start-up et il est possible de dénombrer aujourd'hui 300 entreprises qui travaillent dans ce secteur. Cependant, seules 10% d'entre elles sont à l'origine de 90% du chiffre d'affaire mondial

La notion de récupération d'énergie définit le processus qui permet de transformer une énergie ambiante, dans ses formes multiples, en une énergie électrique exploitable pour alimenter un dispositif électronique. Dans ces travaux de mémoire nous nous sommes intéressés aux applications basses puissances, comme par exemple, les capteurs de force, de température, de présence, dont la consommation ne dépasse pas la centaine de μ W. Ci-dessous sont détaillées quelques applications potentielles dans cette gamme de puissance.

I.3 Principales applications de la récupération d'énergie ambiante basse puissance

De nouvelles idées ont émergé pour des applications originales dans des domaines très variés et à court terme, trois grands domaines applicatifs paraissent d'intérêt pour les réseaux de capteurs autonomes : [6]

I.3.1 Le transport

L'utilisation de systèmes de récupération d'énergie ambiante dans le véhicule permet d'alimenter des capteurs sans nécessité de câblage. Les informations mesurées peuvent alors être remontées via une communication sans fil vers un centre de traitement des données, en l'occurrence l'ordinateur de bord. [7]

- Suivre la pression des pneus
- Anticiper la défaillance de pièces mécaniques par la surveillance de la température ou des vibrations (maintenance prédictive)



Figure I. 3: Placement des différents capteurs sur une voiture [7]

I.3.2 L'industrie

- maintenance prédictive de machines

Le contrôle du fonctionnement des machines industrielles et la prévention des pannes est l'un des facteurs contribuant à la continuité du service et donc à la productivité d'une usine.

Il est donc impératif d'en tenir compte avant l'installation de tout équipement, notamment lorsqu'il s'agit d'équipement se trouvant dans des endroits hostiles et inaccessibles.



L'implantation des systèmes assurant un monitoring permanent est confrontée à la contrainte de câblage, de la durée de vie limitée des batteries, et dans certaines circonstances à l'impossibilité d'accéder aux capteurs pour remplacer la batterie, c'est le cas des capteurs de vitesse, de flux magnétique, implantés dans les machines tournantes, d'où l'avantage d'utiliser des systèmes de récupération de l'énergie ambiante et l'énergie vibratoire en particulier.

I.3.3 L'habitat

- interrupteurs sans fil
- capteurs de contraintes, de fissures, de présences...sans fil

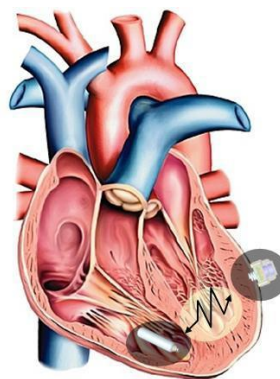
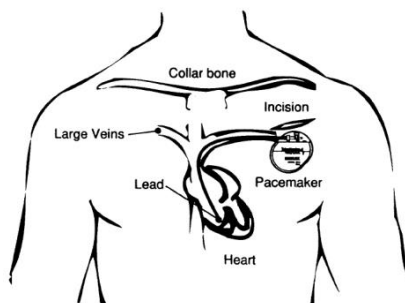
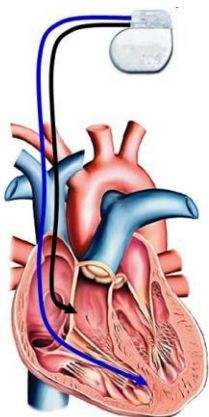
Les systèmes auto alimentés sont de plus en plus présents dans les nouveaux bâtiments, ils permettent essentiellement de contrôler la lumière, les stores et l'HVAC 'Heating Ventilation and Air Conditioning'. Ils permettent ainsi d'éviter le câblage (tranchée dans les murs) ou les contraintes liées à l'utilisation de batteries.



Les systèmes de récupération de l'énergie ont une place considérable dans le domaine de l'habitat afin d'assurer une auto- alimentation efficace de ces différents capteurs.

I.3.4 Le médical

- pacemakers autonomes
- implants auditifs autonomes
- capteurs de pression sanguine autonomes



Stimulateur actuel Futur stimulateur HBS

8 cm ³	Taille du stimulateur	< 1 cm ³
Pile 2.5 cm ³	Source d'énergie	μ-générateur < 0.5 cm ³
1.5 cm ³	Circuit électronique	< 0.3 cm ³
50 μW	Consommation	35 μW

Figure I. 4: Placement d'un pacemaker dans le corps humain [3]

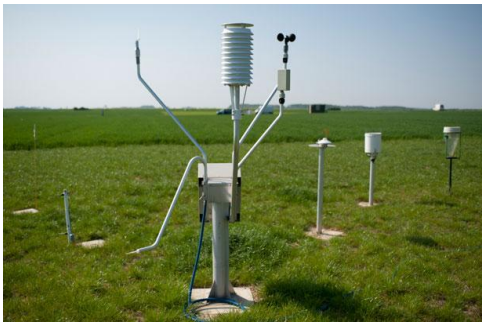
Le projet HBS :

Le but de ce projet est le développement d'une structure de récupération d'énergie utilisant les mouvements du cœur et permettant de fabriquer des pacemakers autonomes (figure I.4).

La structure visée est capacitive à électrets, mesure 18mm X 9mm X 3mm, a une fréquence de résonance de 20Hz et récupère 40 μ W après l'électronique de conversion [3].

I.3.5 L'environnement

- suivi de différents paramètres pour aider l'agriculture
- anticiper un tsunami (bouées marines)



I.3.6 La défense et le spatial

- suivi des appareils (hélicoptères, avions,...)
- surveillance des frontières



I.3.7 Le grand public

- diminuer la fréquence des rechargements (lecteur MP3, télécommandes,...)



L'application commune entre les différents domaines que nous venons d'aborder consiste à alimenter les capteurs sans fils destinés à assurer le contrôle et la surveillance d'un paramètre physique donné. Ces capteurs sont aujourd'hui dans la majorité des cas alimentés à l'aide de batteries ou de fils. L'utilisation des systèmes de récupération de l'énergie ambiante permet d'éviter plusieurs contraintes associées à l'utilisation des batteries et du câblage. Nous allons présenter dans ce qui suit les différentes sources d'énergie potentielles permettant d'assurer plus d'autonomie énergétique aux systèmes vus précédemment.

I.4 Les sources énergétiques ambiantes

De nombreuses sources d'énergie sont susceptibles de fournir des niveaux de puissance suffisants pour alimenter des systèmes autonomes communicants : l'énergie mécanique résultant de vibrations, charges ou contraintes, l'énergie solaire photovoltaïque issue du soleil ou de lumières artificielles, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique ou encore l'énergie chimique issue de processus biologiques sont autant d'exemples d'énergies naturelles ou inhérentes à un processus industriel, qui sont actuellement envisagées pour être conditionnées en production utile.



L'énergie des radiations

- Rayonnements solaires
- Radiofréquences

L'énergie thermique

- Gradients de température
- Variations de température

L'énergie chimique et biochimique

- Glucose
- Produits chimiques

L'énergie mécanique

- Vibrations
- Déformations
- Chocs

Figure I. 5: Les sources d'énergies ambiantes utilisables par les microsystèmes [3]

La comparaison de ces différentes sources est délicate car dépendante de nombreux facteurs, et de l'application considérée. Néanmoins des études comparatives classiques, ont pu comparer les densités de puissance de plusieurs sources classiques. Des résultats sont répertoriés tableau I.1 :

Technologie	Densité de puissance
Photovoltaïque extérieur (cellule de rendement 15 %, irradiante incidente de 100 mW/cm ²)	15000 μW/cm ²
Photovoltaïque intérieur (cellule de rendement 6 %, irradiante incidente de 0.5 mW/cm ²)	30 μW/cm ²
Piézoélectrique (inserts dans chaussure)	330 μW/cm ³
Vibrations (Petit four à micro-ondes)	116 μW/cm ³
Thermoélectrique (pour un gradient de 10 °C)	40 μW/cm ³
Bruit acoustique (100 dB)	0.96 μW/cm ³

Tableau I. 1: Densité de puissance de diverses technologies pour la récupération d'énergie [10]

Il apparaît que l'exploitation de l'énergie des vibrations ambiantes permet d'obtenir potentiellement une forte densité d'énergie après l'énergie solaire. Cette source présente également l'avantage d'être plus simple à mettre en œuvre (moins de contraintes qu'un système photovoltaïque), et d'être disponible dans de nombreux domaines d'application, notamment dans les milieux industriels, ou de transport, où l'utilisation de réseaux de capteurs autonomes peut être envisagée. Du fait de cette disponibilité, les vibrations sont également très diversifiées, présentant pour des applications typiques dans des bâtiments de travail, des usines ou à domicile, des valeurs d'accélérations s'échelonnant de 0.1 ms^{-2} à 10 ms^{-2} (la majorité des applications étant plutôt proches de la première valeur), et des fréquences de 50 Hz à 400 Hz.

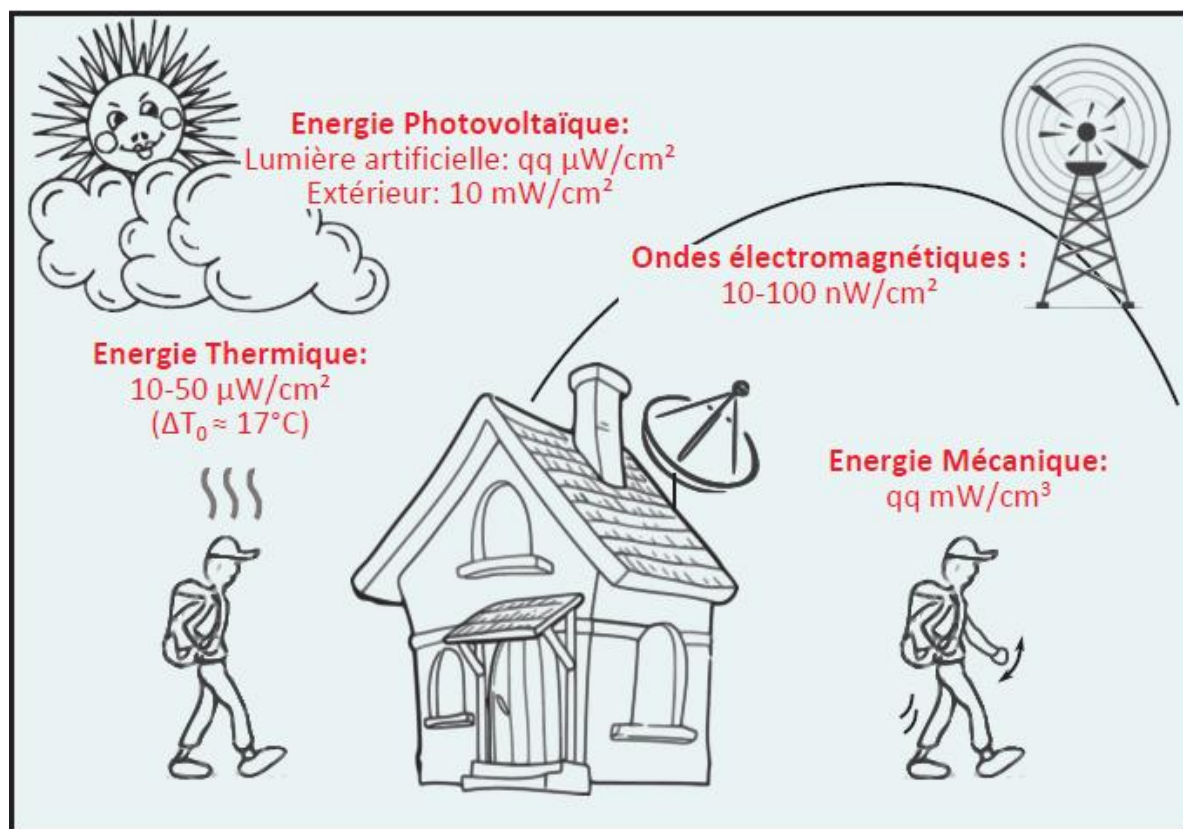


Figure I. 6: Synthèse du potentiel de récupération d'énergie dans l'environnement humain [2]

I.4.1 L'énergie des radiations

Dans cette première section, nous nous intéressons aux systèmes qu'il est possible de concevoir dans le but de récupérer l'énergie des rayonnements (rayonnement solaire, nucléaire infrarouge, RF,...).

I.4.1.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement naturel en provenance du soleil demeure la source d'énergie la plus abondante dans la nature.

La production d'électricité à partir du rayonnement solaire est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques. L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Ce matériau comporte une jonction P-N, comme illustré sur la Figure I.7. Il se crée au voisinage de la jonction une zone de charges d'espace (zone dépourvue de charges électriques), la d'autre de cette zone crée un champ électrique interne. Lorsqu'un photon en provenance du soleil, ou toute autre source de lumière, arrive sur la surface de la zone dopée négatif (N), il arrache des électrons aux atomes de silicium. Ces électrons sont alors balayés par le champ électrique présent dans la zone de charge d'espace et sont capables de fournir un courant à une charge électrique connectée à la jonction.

Sur le marché actuel, plusieurs technologies de panneaux photovoltaïques sont proposées, la plupart sont à base de matériau silicium multi/mono cristallin. L'efficacité des cellules photovoltaïques varie en fonction de la technologie et de la pureté des matériaux, on note un rendement entre 10 et 16 % pour les cellules du commerce, alors que des procédés avancés de fabrication en laboratoires de recherche permettent d'atteindre des rendements de l'ordre de 40%, leur principal inconvénient est le coût qui reste relativement élevé. [7]

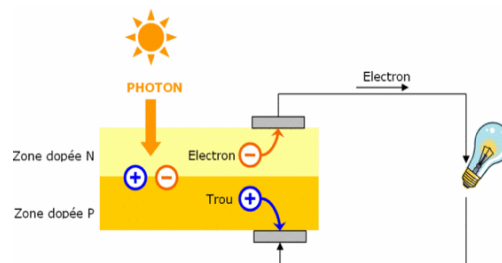


Figure I. 7: Jonction P-N d'une cellule photovoltaïque [7]

I.4.1.2 Rayonnement nucléaire

Le rayonnement nucléaire naturel n'est pas suffisant dans une optique de récupération d'énergie. Pour pouvoir utiliser le rayonnement nucléaire, il est nécessaire de se servir de sources radioactives artificielles, ce qui limite les applications du fait du danger pour les êtres vivants. Néanmoins, certains essais ont été réalisés et ont montré la faisabilité de ce principe.

Par exemple, le système de récupération d'énergie présenté figure I.8 utilise une source de radioactivité couplée à une poutre sur laquelle est placé un piézoélectrique : la source radioactive émet des électrons sur la poutre. Les forces électrostatiques qui en découlent provoquent le rapprochement de la poutre vers la source radioactive ; dès qu'il y a contact, les charges sont évacuées et la poutre est relâchée rapidement provoquant sa mise en vibration. L'énergie est récupérée en utilisant le film piézoélectrique placé au niveau de l'encastrement, transformant les vibrations de la poutre en électricité. [3]

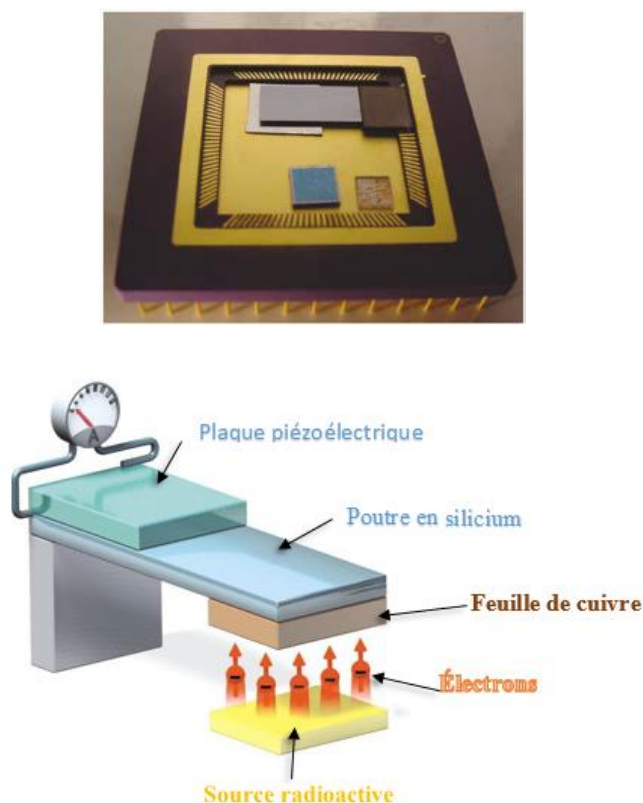


Figure I. 8: Modèle d'une batterie nucléaire [3]

I.4.2 Source Radiofréquence

La prolifération d'émetteurs radio dans le paysage urbain actuel permet d'envisager des solutions où les signaux radiofréquences ambiants servent de réservoir d'énergie pour des applications mobiles. Les systèmes de récupération de l'énergie RF ambiante sont toutefois très limités en puissance et nécessitent soit une grande surface réceptrice, soit d'être très près de la source émettrice. La densité de puissance p reçue par cm^2 est reliée au champ électrique E et à la résistance de radiation de l'espace libre $Z_0=377 \Omega$ par (I.1) [8]

$$P_s = \frac{E^2}{Z_0} \quad (I.1)$$

Rappelle ainsi qu'un champ électrique de 1V/m , ne permet pas de récupérer plus de $0.26\mu\text{W/m}^2$ alors que le champ maximum près d'une source ne dépasse généralement pas quelques Volts par mètre. [9]

I.4.2.1 L'énergie thermique

De nombreux systèmes peuvent être considérés comme des sources potentielles d'énergie dès lors qu'ils subissent des pertes se traduisant par des émissions de chaleur. Les machines thermodynamiques, comme les réfrigérateurs, rejettent de la chaleur pendant leur cycle de fonctionnement, tout comme le pot d'échappement des voitures qui évacuent des gaz pouvant atteindre une température de 700°C .

Le principal inconvénient des générateurs thermoélectrique est leur faible rendement ($<5\%$) si le gradient de température est faible. Par ailleurs, le coût de fabrication est élevé et leur volume est important pour des systèmes à l'échelle micro. Cependant, les avancées en nanotechnologies ont permis la fabrication de générateurs thermoélectriques MEMS. En 2006, un film mince d'une surface 0.5 cm^2 été commercialisé par Applied Digital solution et produit une puissance de $1.5 \mu\text{W}$ pour une variation de température de seulement 5°C .

La société allemande Micro-pelt, spécialisée dans la conception de générateurs thermoélectriques à couche mince, a développé un générateur à effet Seebeck capable de produire une tension électrique de plus de 2 V et une puissance de 4 mW pour une variation de température de 20 °C [6] (figure I.9)

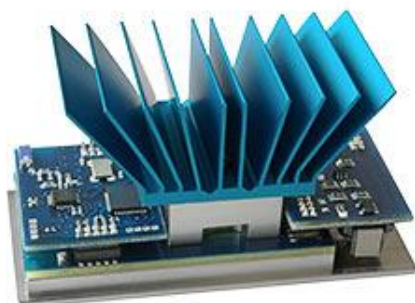


Figure I. 9: Générateur thermoélectrique développée par la société Micro-pelt [10]

I.4.3 Energie mécaniques

De nombreux phénomènes mécaniques (vibrations, contraintes, chocs, déformations) présents dans notre environnement peuvent être récupérés et transformés en énergie électrique. Les sources mécaniques peuvent provenir des mouvements du corps humain, naturels ou volontaires, mais également de vibrations ambiantes dues aux machines environnantes ou aux bruits acoustiques. Nous allons différencier ces deux types de sources.

I.4.3.1 Les énergies de corps humain

Les puissances dissipées par le corps humain sont liées aux puissances consommées par le corps pour réaliser une action mécanique donnée que multiplie le rendement de conversion métabolique. En effet, au repos ou durant des activités quelconques, le corps humain convertit de l'énergie, parfois exprimée en calories par heure. A répertorié la puissance calorifique consommée pour différentes activités comme dormir, être debout, jouer du piano, nager. . .

A titre d'exemple, la puissance calorifique consommée est d'environ 160 W lorsque l'on conduit une voiture, et de 580 W lorsque l'on nage. Pour la production de travail mécanique, le rendement énergétique humain n'est pas unitaire, c'est-à-dire qu'il s'accompagne de pertes se traduisant par un dégagement de chaleur. Le rendement de conversion correspondant, évalué à 25 %, nous permet donc d'estimer la puissance récupérable. En reprenant les exemples précédents, pendant la conduite d'une voiture elle est de 40 W, et de 150 W pour la nage. [2]

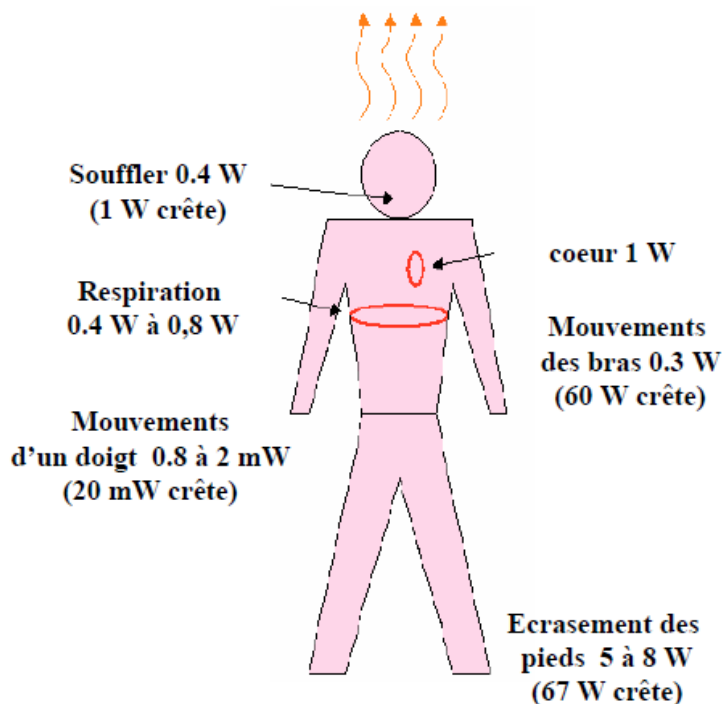


Figure I. 10: quelques valeurs de puissances produites par le corps humain [28]

I.4.3.2 Les vibrations ambiantes

Les vibrations mécaniques ambiantes sont de natures diverses : elles sont généralement dues aux machines tournantes, mais peuvent également être induites dans le sol et les murs par les véhicules ou la météo (vent, pluie...). Ces ressources dépendent de la fréquence de vibration et de l'accélération (elle-même proportionnelle au carré de la fréquence). Il est donc possible de les quantifier lorsque l'on connaît toutes les caractéristiques des vibrations.

Par ailleurs, une autre ressource est celle des vibrations acoustiques. La densité de puissance d'un bruit I (en W.m^{-2}), appelée intensité acoustique, est liée à la pression acoustique P du bruit (en Pa) et à l'impédance acoustique Z du milieu (en Pa.s.m^{-1}) par la relation suivante :

$$I = \frac{P^2}{Z} \quad (I.2)$$

Dans l'air, l'impédance acoustique étant de 415 Pa.s.m^{-1} , la densité de puissance d'un bruit de 0 dB (correspondant au seuil d'audition) est d'environ 1 pW.m^{-2} , et celle d'un bruit de 100 dB (correspondant au bruit d'un marteau piqueur à un mètre) de 1 mW.m^{-2} .

I.5 Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques ambiante

Depuis environ une dizaine d'années, la récupération de l'énergie vibratoire fait l'objet d'une thématique de recherche très active (plus d'une cinquantaine de laboratoires dans le monde ont une action dans le domaine). L'énergie vibratoire est omniprésente dans notre environnement, comme sur la plupart des appareils à usage quotidien, dans les bâtiments, dans les systèmes de transport...etc.

L'exploitation de l'énergie vibratoire ambiante apparaît donc comme un excellent moyen de remplacer l'usage des batteries qui limite la durée de vie de ces réseaux. Dans ce but, plusieurs types de macro-générateurs ont été développés qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique.

Nous nous intéressons dans un premier temps à la récupération des vibrations. A l'heure actuelle, trois principes de base (électromagnétisme, électrostatique, piézoélectricité) permettent de transformer les vibrations mécaniques en électricité.

I.5.1 Conversion électromagnétique

Les générateurs électromagnétiques considérés pour la récupération d'énergie ambiante sont ceux à aimants permanents. Les dispositifs consistent en un aimant et une bobine, mobiles l'un par rapport à l'autre. Ce mouvement est induit par les vibrations. [6] D'après la loi de Faraday, la variation du flux magnétique va provoquer l'apparition d'une force électromagnétique, et donc d'un courant si le circuit est fermé (Figure I.11). La loi de Faraday s'écrit de la façon suivante, avec e la force électromotrice, N le nombre de tours de l'inducteur, Φ le flux magnétique et t le temps [11]

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (I.3)$$

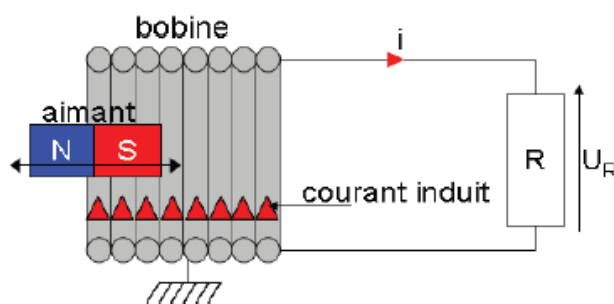


Figure I. 11: Loi de Faraday [3]

D'après une étude menée par Roundy [11], un maximum de 100mV ne peut être obtenu à partir d'un générateur de moins d'un cm³. Ceci est un problème majeur des générateurs électromagnétiques, puisqu'une tension de 100mV ne permet pas de faire de redressement avec des circuits standard. Un autre désavantage des générateurs électromagnétiques est la difficulté des dépôts ou de la fabrication des matériaux magnétiques avec des techniques de micro fabrication. Les bobines peuvent être fabriquées, mais les aimants ou micro aimants sont habituellement usinés et reportés à la main sur les structures.

Un autre problème dans l'optique de les intégrer sur une même puce qu'un circuit électronique est la présence de forts champs magnétiques, qui peuvent perturber le fonctionnement de l'électronique et créer des dysfonctionnements.

Nous allons par la suite présenter quelques exemples de structures de générateurs électromagnétiques.



Figure I. 12: Générateur électromagnétique pour récupérer l'énergie [11]

Avec des dimensions macroscopiques, les générateurs électromagnétiques fonctionnent bien. Nous allons le montrer par quelques exemples. Un premier exemple est un générateur développé pour récupérer l'énergie générée par l'homme [11]. Nous pouvons observer sur la Figure I.12 la taille du générateur, légèrement plus gros qu'une pile AA. Un schéma de principe est aussi représenté sur cette figure. Ce générateur a délivré de 0.3 à 2.46 mW placé sur un sac à dos d'une personne marchant ou courant lentement. Ce résultat est remarquable, d'autant plus qu'il est précisé que la structure n'a pas été optimisée.

Un autre exemple plus simple de ce principe est la lampe torche représentée sur la Figure I.13. Lorsque l'on secoue la lampe, un aimant se déplace à l'intérieur de la bobine. Le courant électrique ainsi créé vient recharger un condensateur qui permet l'éclairage d'une diode, la puissance générée par la bobine est de 300mW environ. Ce dispositif n'est cependant pas à proprement parler un système récupérateur d'énergie mais plutôt un système générateur d'énergie, puisqu'il nécessite un mouvement volontaire n'ayant pas d'autre but que de recharger le condensateur. [8]

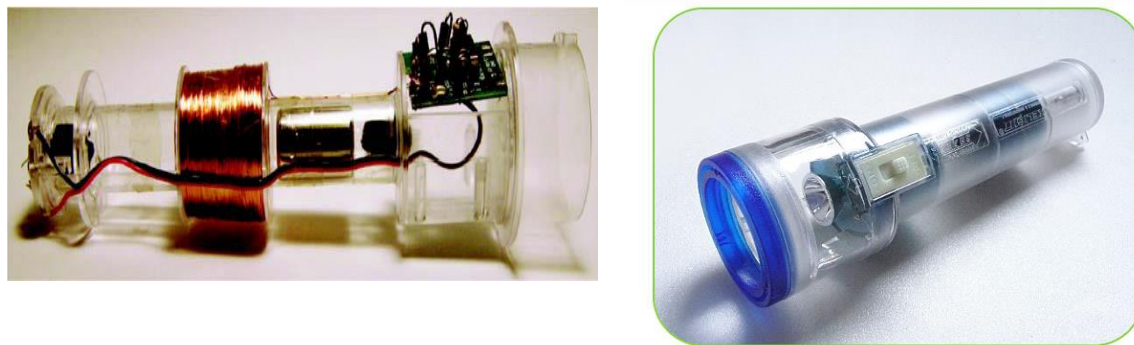


Figure I. 13: Lampe torche utilisant la conversion électromagnétique [8] [12]

Le tableau I.2 donne quelques exemples de prototypes utilisant ce mode de conversion :

Auteur	Puissance	Surface	Volume	Tension	Fréquence	Masse
Li [13]	100 μ W	/	1000 mm ³	/	60 Hz	/
El-hami [14]	1000 μ W	240 mm ²	240 mm ³	0,012 V	320 Hz	/
Ching [15]	830 μ W	100 mm ²	1000 mm ³	4,4 V	110 Hz	/
Glynne-Jones [16]	157 μ W	2500 mm ²	125000 mm ³	0,005 V	100 Hz	/
Kulah [17]	2,5 μ W	0,12 mm ²	0,06 mm ³	0,15 V	10 Hz	/
Beeby [18]	0,02 μ W	/	100 mm ³	/	9500 Hz	0,03 g
Sari [19]	0,5 μ W	168 mm ²	1344 mm ³	0,02 V	3600 Hz	/
Torah [20]	58 μ W	100 mm ²	1000 mm ³	1,12 V	52 Hz	/
Yuen [21]	830 μ W	500 mm ²	50000 mm ³	1,29 V	100 Hz	/
Kulkarni [22]	0,148 μ W	34,2 mm ²	34,2 mm ³	/	8080 Hz	0,03 g

Tableau I. 2: quelques exemples de prototypes utilisant mode de conversion électromagnétique [3]

Ici encore, on peut remarquer que les systèmes capables de travailler à basses fréquences ont un volume assez important. De plus, il est important de noter que les tensions générées sont basses. Ceci peut poser de nombreux problèmes pour redresser la tension (pont de diodes).

1.5.2 Conversion électrostatique

La méthode dite électrostatique (ou capacitive) tire profit du fait de la multiplication de l'énergie sur une capacité dont la valeur peut être modifiée mécaniquement. Le schéma simplifié de ce type de générateur est présenté sur la figure I.14. Si deux conducteurs séparés par un diélectrique peuvent se déplacer relativement l'un par rapport à l'autre, la capacité créée par ces deux conducteurs va varier proportionnellement. Dans le cas où une charge est présente sur la capacité ainsi créée, la modification de sa valeur va impliquer la variation de l'énergie électrique accumulée. Une conversion de l'énergie mécanique (déplacement des électrodes) en énergie électrique (multiplication de l'énergie électrique accumulée) est donc possible en suivant ce principe. **Ce type de convertisseur n'est pas un générateur au sens propre du terme mais plutôt un multiplicateur d'énergie.** Il nécessite donc une source de tension initiale pour pré charger la capacité variable. L'énergie récupérable est décrite par l'équation I.4 [23] :

$$E = \frac{1}{2} V_{in}^2 (C_{max} - C_{min}) \left(\frac{C_{max} + C_{par}}{C_{min} + C_{par}} \right) \quad (I.4)$$

Il est donc souhaitable d'augmenter la tension d'opération du dispositif ainsi que la plage de variation de la capacité.

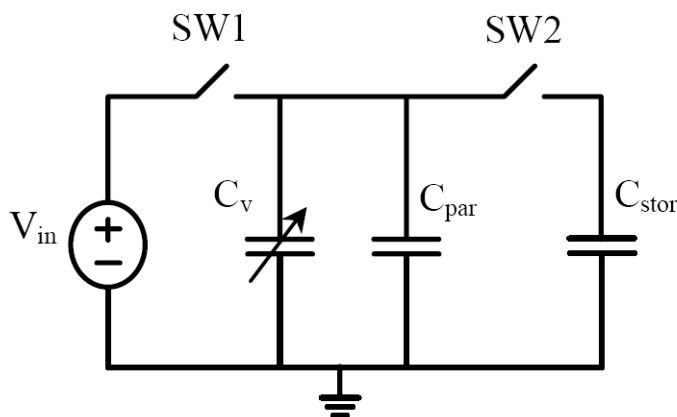


Figure I. 14 : Schéma d'un générateur capacitif avec V_{in} – source de tension pour précharger la capacité variable, C_v – capacité variable, C_{par} – capacité parasite et C_{stor} – capacité de stockage [23].

Les générateurs électrostatiques présentent l'avantage d'être facilement fabriqués avec des technologies MEMS silicium, ce qui pourrait permettre de les intégrer sur une même puce avec l'électronique associée. Un autre avantage des générateurs électrostatiques est leur tension de sortie qui est élevée, de l'ordre de plusieurs volts. Une tension de sortie élevée permet de charger facilement des batteries par exemple. Cependant, les générateurs électrostatiques présentent plusieurs inconvénients : une source d'énergie doit être placée en entrée pour que le générateur puisse fonctionner. D'autre part, si les deux conducteurs se touchent, il n'y a plus de puissance générée et les deux plaques risquent de rester collées. De ce fait, des stoppeurs mécaniques doivent être placés pour que cet événement ne se produise pas. L'ajout de stoppeurs complexifie le procédé de fabrication.

Nous allons maintenant présenter quelques exemples de générateurs électrostatiques de différents types.

Ghislain Despesse dans sa thèse [24] propose un générateur fabriqué à partir d'une pièce en tungstène, de dimensions 30mm*45mm*10mm (Figure I.15).

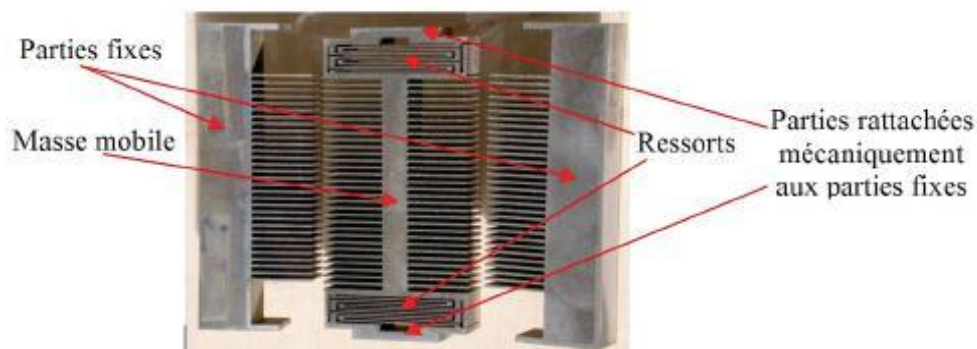


Figure I. 15: Générateur électrostatique [24].

Théoriquement, ce générateur aurait dû permettre de produire 1mW. Cependant, un problème de symétrie ne permet de récupérer que 500 μ W à 50Hz. Il fut testé en situation réelle sur le moteur d'une voiture et permit de récupérer 232 μ W. Un autre avantage de ce générateur est qu'il est large bande, il fonctionne sur une bande de fréquence de plusieurs dizaines de Hz.

En prend comme un autre exemple la chaussure électrostatique représentée sur la Figure I.16. Cette chaussure a été développée par le SRI (un institut de recherche international indépendant). Elle est capable de produire une puissance de 800mW pour un rythme de

marche de deux pas par seconde. La capacité de ce générateur est réalisée à partir d'un élastomère diélectrique compressible. La marche de l'utilisateur actionne un soufflet qui exerce une pression sur l'élastomère entraînant sa compression et donc la variation de capacité du générateur nécessaire à la conversion mécano-électrique. [8]

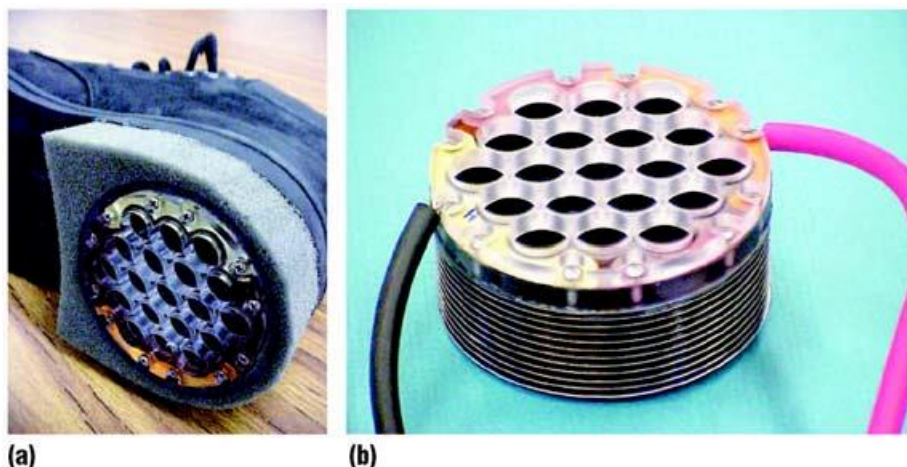


Figure I. 16: Chaussure dotée d'un générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus) [8]

I.5.3 Conversion piézoélectrique

L'effet piézoélectrique a été observé pour la première fois par un minéralogiste français, l'Abbe R.Hauy en 1817. Ensuite ce sont les frères Pierre et Jacques Curie qui ont exploré le lien entre la structure cristalline des matériaux et leurs propriétés pyro et piézoélectriques. C'est à eux qu'on attribue la découverte expérimentale de l'effet piézoélectrique. Cet effet se caractérise par une capacité de certains corps à se charger électriquement lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique [23]

Le principe de l'effet piézoélectrique direct est la génération de charges électriques sous l'effet d'une contrainte mécanique. Inversement, la structure se déforme sous l'effet d'un champ électrique. Ce phénomène est dû à la formation d'un dipôle lors de la séparation des charges dans les structures cristallines [25] (voir Figure I.17).

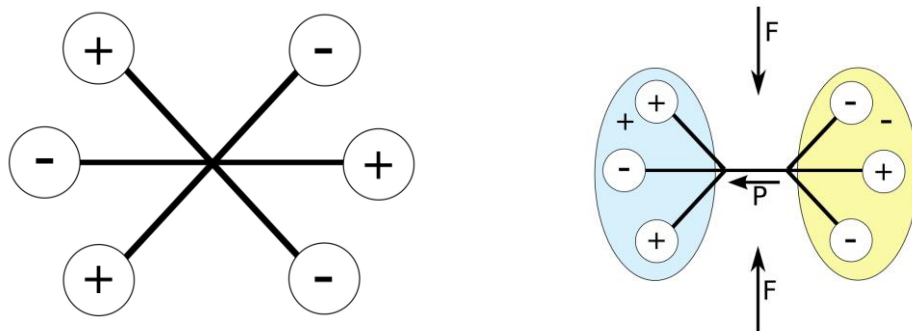


Figure I. 17: Principe de la piézoélectricité [25]

La transduction de l'énergie vibratoire en énergie électrique requiert la compression et l'extension alternée du matériau piézoélectrique, et différentes topologies ont été explorées pour cela, par exemple en cymbale (Figure I.18), membrane ou ressort en S. Cependant le format le plus répandu reste la poutre bimorphe (une couche de matériau inerte – silicium par exemple ou métal – pris en sandwich entre 2 couches de matériau piézoélectrique Figure I.19) ou monomorphe (une seule couche de matériau piézoélectrique sur une couche de matériau inerte Figure I.20). Ces topologies de type poutre vibrante permet d'utiliser l'effet de levier et donc d'appliquer de fortes déformations sur le matériau piézoélectrique, tout en restant de fabrication relativement simple.

Cependant cette topologie n'utilise que le mode 31 (Figure I.21) de l'élément piézoélectrique, dont le coefficient de couplage électromécanique d_{31} est plus faible que celui associé au mode 33 (coefficient d_{33}), ce qui limite les performances de tels dispositifs. Une disposition alternative des électrodes (Figure I.21). Permet d'utiliser le mode 33 dans une configuration poutre mais l'optimisation des électrodes et de la poutre est alors plus difficile [26].

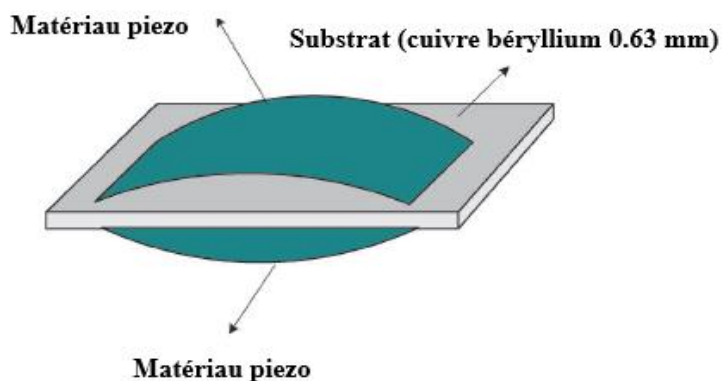


Figure I. 18: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format cymbale [26]

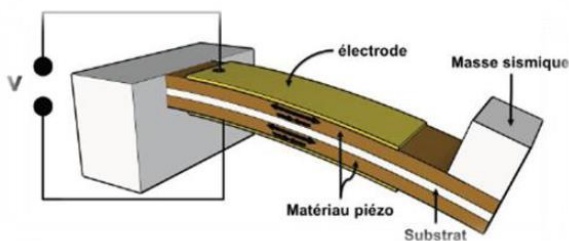


Figure I. 19: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre bimorphe [27]

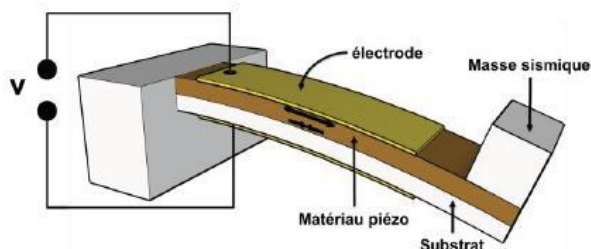
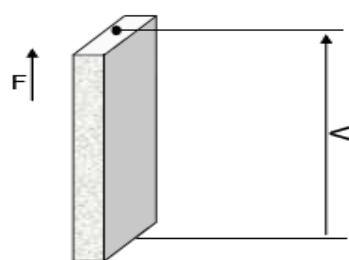
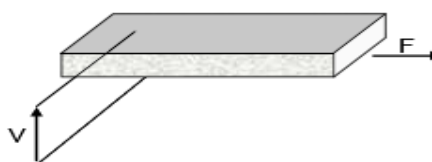


Figure I. 20: Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre unimorphe. [27]



Excitation suivant le mode 33



Excitation suivant le mode 31

Figure I. 21: Modes 31 et 33 : ces modes de fonctionnement dépendent de la direction relative de la polarisation et de la compression/extension [25]

I.5.3.1 Régime de fonctionnement d'un générateur piézoélectrique

La première étape dans la conception d'un GP est le choix du régime de fonctionnement, qui peut être dynamique ou quasi-statique.

I.5.3.1.1 Régime dynamique

Système piézoélectrique fonctionnant en compression. Dans le cas des touches piézoélectriques mis au point par le MIT, les barreaux piézoélectriques sont directement percutés par les touches. (L'élément est soumis à un choc de courte durée et relâché, lui permettant d'osciller librement à sa fréquence de résonance).

Le moyen utilisé pour relâcher le barreau est probablement un ressort. Mais même avec celui-ci, il est peu probable que la durée de la compression soit suffisamment faible pour constituer une impulsion. Une véritable impulsion peut être obtenue grâce la chute d'une bille sur le barreau. L'application typique d'un système piézoélectrique comprimé par choc est l'alimentation de l'électronique embarquée sur les missiles

I.5.3.1.2 Régime quasi-statique

En régime quasi-statique, le système piézoélectrique est soumis à une contrainte graduelle, de fréquence très inférieure à la résonance. Le moyen le plus simple de générer une telle contrainte consiste à utiliser un dispositif à compression graduelle, semblable à ceux utilisés dans les systèmes d'allumage.

Dans ce cadre, deux types de dispositifs piézoélectriques ont été mis au point : un prototype de touche et une chaussure piézoélectriques.

I.5.3.2 Chaussure piézoélectrique de M.I.T. Media Lab

Au sein du M.I.T (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge), des chercheurs travaillent sur les interfaces hommes machines et sur la génération nomade de l'énergie électrique. Dans ce contexte, un groupe de recherche a réalisé deux dispositifs de génération d'énergie électrique lors de la marche, puis une comparaison de ces deux dispositifs.

Le premier dispositif repose sur l'implantation d'une feuille de PVDF flexible dans la semelle et récupère l'énergie de mouvement de flexion de chaque pas (Fig. I.22). Une charge résistive de $250\text{ k}\Omega$ a été utilisée. Ceci a permis la récupération d'une puissance de $1,3\text{ mW}$.

Le deuxième dispositif formé de deux rubans précontraints et incurvés de céramique PZT « bimorphe » est placé dans le talon de la chaussure. Le choix d'utilisation de deux rubans est destiné à maximiser la contrainte et donc la puissance moyenne récupérée ($14,4\text{ mW}$ sur une charge résistive de $500\text{ k}\Omega$)).

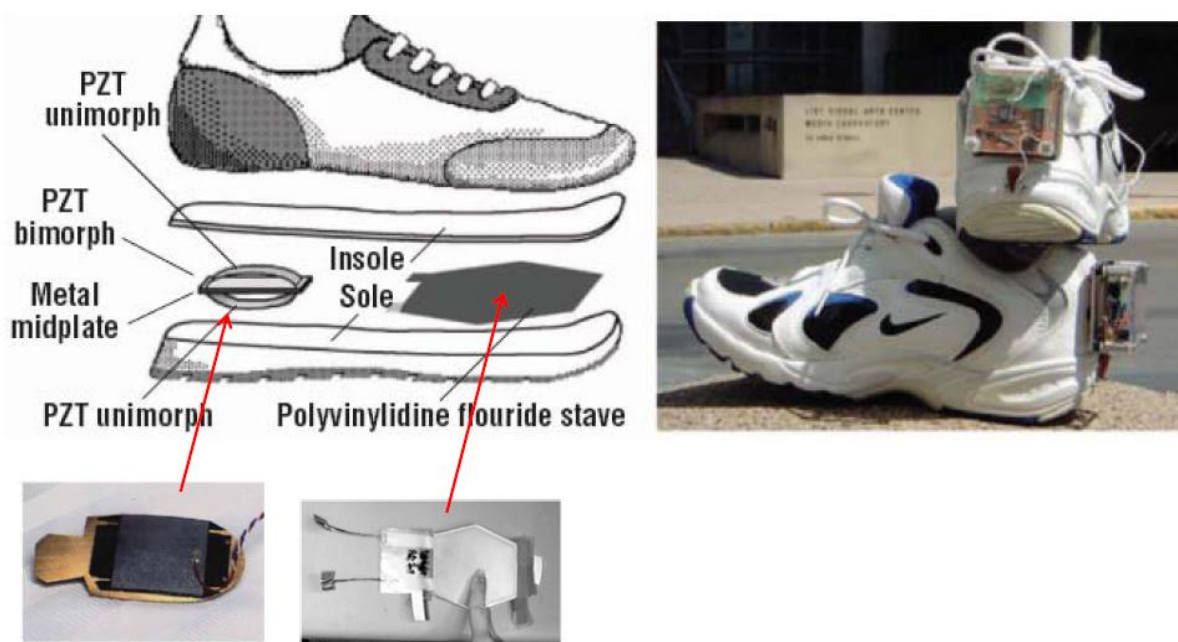


Figure I. 22: Chaussures piézoélectriques développées au MIT, utilisant soit du PVDF stratifié placé sous la plante du pied, soit un bimorphe réalisé à partir de céramiques piézoélectriques (PZT) placé sous le talon [8]

Cette chaussure est équipée également d'un système électrique de. La commande des interrupteurs est réalisée de telle sorte que les charges apparues pour chaque cycle sont recueillies à chaque maximum ou minimum de déformation du dispositif mécanique. Ceci garantit un fonctionnement optimal. Pour une fréquence de marche égale à $0,8\text{ Hz}$, le rendement maximal obtenu est de 18% , équivalent à une puissance de $1,3\text{ mW}$.

I.5.3.3 Les touches piézoélectriques

Un prototype de touches piézoélectriques a été réalisé suite au brevet déposé en 1999 par la société Compaq Computer Corporation à Houston . Ce brevet concerne la récupération de l'énergie. Mécanisme dissipée lors de la frappe des touches du clavier de l'ordinateur. Chaque touche est munie à sa base d'un aimant qui, lorsqu'on appuie sur la touche, s'enfonce dans une bobine (Figure I.22) et joue le rôle de mini-générateur de courant permettant la charge d'un condensateur.

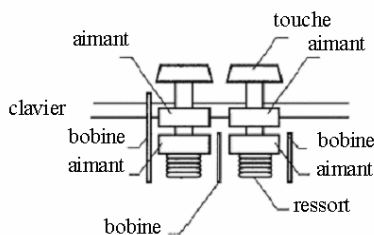


Figure I. 23: Schéma des touches du clavier Compaq [28]

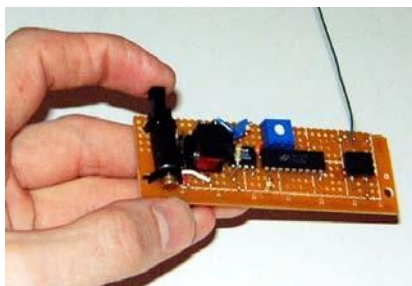


Figure I. 24: prototype de touches piézoélectriques



Ces générateurs présentent l'avantage d'avoir une densité d'énergie élevée, et qui reste constante avec la réduction d'échelle. De plus aujourd'hui les matériaux piézoélectriques peuvent être déposés en couche mince, et certains procédés de dépôts de matériaux piézoélectriques sont compatibles CMOS, comme pour déposer du nitrure d'alumine par exemple. Cependant pour les matériaux piézoélectriques qui ne sont pas compatibles CMOS,

Il peut donc être parfois difficile d'intégrer des matériaux piézoélectriques dans des structures micro fabriquées. Un autre désavantage des matériaux piézoélectriques en couche mince est qu'ils sont souvent moins performants en couche mince qu'en massif. Malgré ces deux inconvénients, nous verrons que cette méthode de conversion est très intéressante, puisqu'elle présente une densité d'énergie importante, avec une intégration qui est possible pour certains matériaux.

I.5.4 Comparaison des 3 méthodes de conversion

Il est important de comparer les trois méthodes de conversion, avec leurs avantages et inconvénients :

La méthode électrostatique présente l'avantage d'être facilement intégrable et d'avoir une densité de puissance qui augmente avec la miniaturisation, mais présente l'inconvénient de nécessiter une source d'énergie initiale et un contrôle mécanique des déplacements.

La méthode électromagnétique présente l'avantage d'avoir une densité d'énergie maximale récupérable importante, mais qui diminue avec la miniaturisation. De plus les matériaux magnétiques peuvent parfois être assez difficiles à intégrer, et les tensions de sortie sont très faibles.

La méthode piézoélectrique présente l'avantage d'une densité d'énergie importante, qui reste constante avec la miniaturisation si les propriétés des matériaux ne se détériorent pas en couche mince, ce qui peut être le cas. L'intégration des matériaux piézoélectriques est possible, même si certains matériaux ne sont pas compatibles avec les procédés CMOS.

Les trois méthodes ont des avantages et des inconvénients, résumés dans le Tableau I.3 [3]

<i>Transduction</i>	<i>Electrostatique</i>	<i>Electromagnétique</i>	<i>Piézoélectrique</i>
<i>Miniaturisation</i>	Matériaux faciles à intégrer (compatible CMOS),	Intégration délicate.	Certains matériaux ne sont pas compatibles CMOS.
<i>Densité d'énergie</i>	Faible	Elevée.	Elevée
<i>Niveau de développement</i>	Très avancé.	Moyen.	Avancé.
<i>Problèmes spécifiques</i>	Nécessité d'une source initiale d'énergie, tensions élevées, déplacement doit être contrôlé mécaniquement. Procédé de fabrication complexe.	Faible tension de sortie, Intégration.	Propriétés des couches minces parfois inférieures aux matériaux massifs, compatibilité CMOS de certains matériaux.

Tableau I. 3 : comparaison entre les trois modes de conversion

I.6 Conclusions

Dans ce chapitre **I**, nous avons donné un aperçu du contexte global de la récupération d'énergie à basse puissance à l'aide de matériaux intelligents, dans le but d'alimenter des appareils électroniques portables. Nous avons présenté un certain nombre d'applications des mouvements dans l'environnement ainsi que les différentes formes d'énergie potentiellement exploitables qui peut être convertie en énergie électrique, celle-ci permettrait d'alimenter certains appareils portables, Chaque application, chaque forme d'énergie et chaque mécanisme de conversion (électrostatiques, électromagnétiques et piézoélectriques), fait l'objet d'une thématique à part entière dans la recherche scientifique.

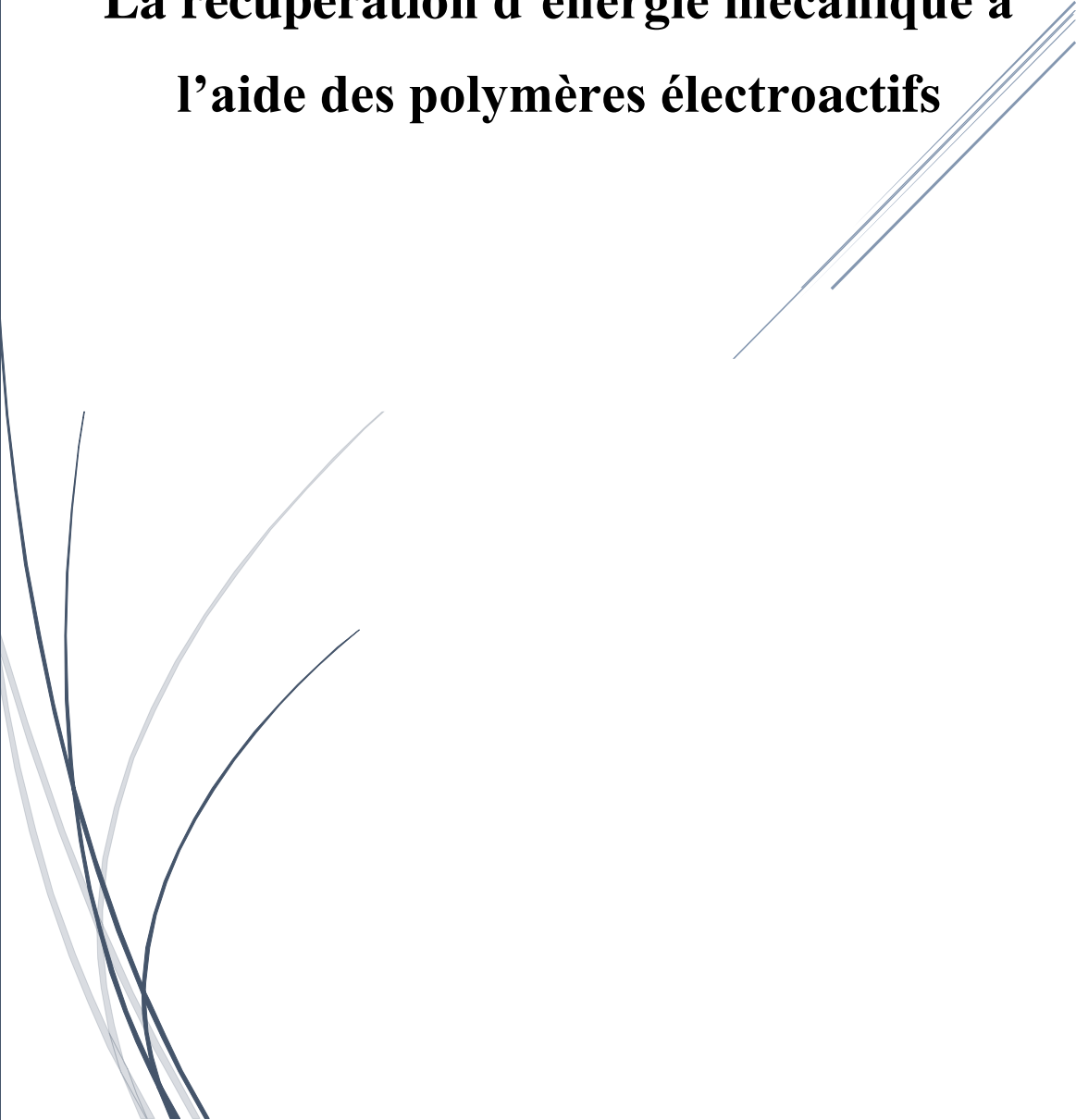
La plupart des générateurs existant ont des structures rigides fabriquées à base de métaux comme les structures électrostatiques ou encore celles à base de céramiques piézoélectriques très fragile. De plus, les bobines et les aimants restent des éléments rigides même s'il est possible de les réaliser sur des supports de plus en plus flexibles.

Les polymères électroactifs, matériaux souples possédant des propriétés physiques particulières, sont les meilleurs candidats pour développer des générateurs flexibles. L'utilisation de ces polymères est en pleine expansion mais peu de structures récupératrices d'énergie exploitent leurs potentiels. De nombreuses avancées technologiques sont encore à réaliser de l'amélioration de ces matériaux.



Chapitre II

La récupération d'énergie mécanique à l'aide des polymères électroactifs



Ce chapitre présente une étude détaillée de la conversion mécano-électrique par transduction piézoélectrique. Objectif de cette partie est de présenter un rappel de la théorie de la piézoélectricité en présentant les équations constitutives, les différents modes de couplages ainsi que les critères de choix des matériaux piézoélectriques.

A partir de ces derniers, une comparaison des performances de ces polymères en termes de densité d'énergie récupérable, de domaine de fonctionnement est opérée. Le meilleur candidat sera alors sélectionné et utilisé pour développer un nouveau générateur flexible.

II.1 Introduction

Les polymères électroactifs, ou « muscles artificiels », sont des composés organiques légers, flexibles et capables de répondre à une stimulation électrique par un changement en dimensions et formes.

La conversion mécano-électrique par l'utilisation des matériaux électroactifs nous entendons tout matériau possédant un couplage électromécanique. Ces matériaux, de par leur nature, se déforment sous l'action d'un champ électrique/magnétique, et réciproquement, ils génèrent un champ électrique/magnétique lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Cela concerne les matériaux possédant l'une des propriétés suivantes :

- la piézoélectricité
- l'électrostriction

L'origine de ce couplage réside dans la géométrie de la structure de la matière à l'échelle microscopique, qui change de dimensions sous l'action d'un champ électrique ou magnétique, et inversement, génère un champ magnétique/électrique en opposition sous l'action d'une contrainte mécanique. Nous décrivons ci-dessous quelques exemples illustratifs pour chacune de ces propriétés.

Le but de cette étude est de comparer deux électromécaniques différents systèmes, afin de les utiliser dans autonomes générateurs portables, qui récupérée de l'énergie mécanique livrés par des gens à travers volontaire ou involontaire mouvements. Le premier est un système piézo-électrique, composé d'un polymère PVDF piézoélectrique. le second est un système électrostrictif, composé par les dérivés du PVDF tel le copolymère P(VDF-TrFE) ou le ter polymère P(VDF-TrFE-CTFE), ou Polyuréthane PU.

Après avoir décrit les modèles analytiques établis pour les deux systèmes, nous allons expliquer leur principe de fonctionnement, avec un point de vue comparatif. Ensuite, une étude quantitative à l'aide des valeurs réalistes des paramètres géométriques et physiques va illustrer la dualité des deux systèmes, dont optimale de travail exigent des niveaux très différents de force, déplacement, la fréquence et de la charge électrique, afin de maximiser la généré puissance électrique

II.2 Généralité sur la piézoélectricité

Le mot « piézoélectricité » vient de la contraction des mots grecs ; *piezein* (pression) et *elektron*. La découverte de la piézoélectricité est attribuée à Pierre (1858-1906) et Jacques Curie (1855-1941) qui démontrèrent théoriquement et expérimentalement l'existence de l'effet piézoélectrique direct. Gabriel Lippmann suggère l'existence de l'effet inverse en 1881 par le biais de considérations théoriques, cet effet étant expérimentalement confirmé la même année par les frères Curie. Bien que les premières preuves tangibles de l'existence de ce phénomène ne remontent qu'à la fin du 19^{ème} siècle, les premières observations de l'effet direct remontent à l'abbé Hauy (1743-1822), minéralogiste français, en 1817 [28].

Les matériaux piézoélectriques peuvent être présentés sous différentes formes tels que : [29]

- Les monocristaux, c'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz ou la tourmaline.
- Les céramiques,(PZT) c'est la forme la plus répandue, principalement en raison de leur facilité de fabrication et des nombreuses propriétés qu'on peut obtenir en faisant varier la composition chimique, les paramètres de fabrication, etc.
- Les piézocomposites ils ont l'avantage d'avoir un meilleur couplage électromécanique que les céramiques conventionnelles.
- Les polymères, type PVDF ou copolymère P (VDF-TrFE) ils ont l'avantage d'être très souples, ainsi leur processus de fabrication est facile et leur production est plus variée. Toutefois, leurs coefficients de couplage sont assez faibles.

II.2.1 Principe de fonctionnement polymère piézoélectrique

La piézoélectricité est définie comme un changement dans la polarisation du matériau lorsque celui-ci est soumis à une contrainte mécanique : il s'agit de l'effet piézoélectrique direct.

L'effet inverse correspond à l'apparition d'une déformation lors de l'application d'un champ électrique (figure II.1). [28]

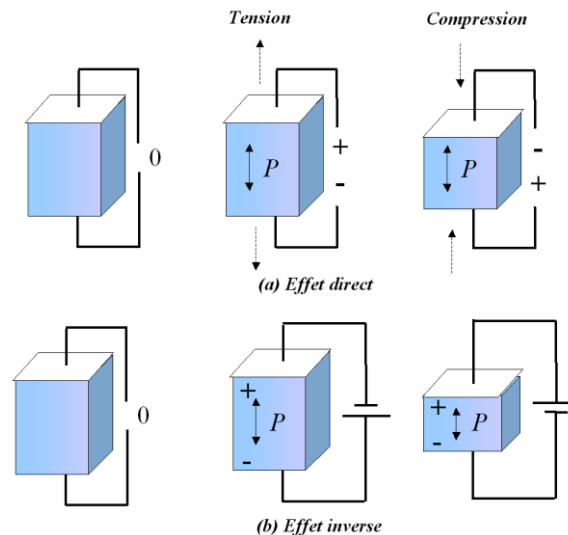


Figure II. 1: Effet Piézoélectrique [28]

II.2.2 Equations de la piézoélectricité

Les équations statiques de la piézoélectricité relient les trois composantes du champ électrique \mathbf{E} et de l'induction \mathbf{D} aux six composantes des tenseurs mécaniques de déformation \mathbf{S} et de contrainte \mathbf{T} (Tableau. II.1).

Trois types de coefficients interviennent : électriques, mécaniques ou piézoélectriques, ces derniers traduisant le couplage électromécanique. Les définitions, les unités et les dimensions des termes sont résumées dans le tableau II.2.

Le choix d'utiliser l'une ou l'autre de ces formes dépend du mode de fonctionnement du matériau piézoélectrique (actionneur ou générateur).

Equations d'état	Variables indépendantes	unité	dimension
$\begin{cases} \mathbf{S} = s^E \mathbf{T} + d^t \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \varepsilon^T \mathbf{E} + d \mathbf{T} \end{cases} \quad (II.2.1)$	T : La contrainte mécanique	N/m ²	6 x 1
	E : Le champ électrique	V/m	3 x 1
$\begin{cases} \mathbf{T} = c^D \mathbf{S} - h^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = \beta^s \mathbf{D} - h \mathbf{S} \end{cases} \quad (II.2.2)$	S : La déformation mécanique	sans dimension	6 x 1
	D : Le déplacement électrique	C/m ²	3 x 1
$\begin{cases} \mathbf{S} = s^D \mathbf{T} + g^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = \beta^T \mathbf{D} - g \mathbf{T} \end{cases} \quad (II.2.3)$	T, D		
$\begin{cases} \mathbf{T} = c^E \mathbf{S} - e^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \varepsilon^s \mathbf{E} + e \mathbf{S} \end{cases} \quad (II.2.4)$	S, E		

Tableau II. 1: Différentes formes d'écriture des équations de la piézoélectricité [7]

()^t indique une transposée de la matrice considérée.

()^x Indique que cette grandeur est déterminée pour **x** nul ou constant (ex : **s^E** étant la souplesse **s** à champ électrique **E** nul ou constant).

Rappelons la définition de l'induction électrique **D** en fonction du champ **E** et de la polarisation **P** :

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (II.2.5)$$

Avec $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$, permittivité de vide.

Les constantes sont donc des tenseurs qu'il est d'usage d'écrire sous forme matricielle. Le Tableau ci-dessous donne la définition, la nature ainsi que la dimension du tenseur de chaque constante.

	Paramètre	Définition	Unité	Dimension
Electrique	ϵ^T	Permittivité diélectrique	$F.m^{-1}$	3x3
	β	Perméabilité électrique	$m.F^{-1}$	3x3
Mécanique	s^E	Souplesse (compliance)	$m^2.N^{-1}$	6x6
	c	Raideur, rigidité élastique	$N.m^{-2}$	6x6
Piézoélectrique	d	Constante de charge	$C.V^{-1}$ ou $m.V$	3x6
	e	Constante piézoélectrique	$C.m^{-2}$	3x6
	g	Constante de tension	$m^2.C^{-1}$	3x6
	h	Constante piézoélectrique	$V.m^{-1}$ ou $N.C^{-1}$	3x6

Tableau II. 2: Définition des différentes constantes [7]

- La constante de charge **d** traduit la proportionnalité entre la contrainte **T** et l'induction **D** à champ électrique **E** nul ou constant.
- La constante piézoélectrique **e** traduit la proportionnalité entre la déformation **S** et le déplacement électrique **D** à champ électrique **E** nul ou constant.
- La constante de tension **g** traduit la proportionnalité entre la contrainte mécanique **T** et le champ électrique **E** à déplacement électrique **D** nul ou constant.
- La constante piézoélectrique **h** traduit la proportionnalité entre la déformation **S** et le champ électrique **E** à déplacement électrique **D** nul ou constant

Puisque les quatre couples d'équations sont équivalents, il est possible d'écrire des relations matricielles entre les différentes constantes piézoélectriques comme indiqué dans le système ci-dessous:

$$\begin{cases} d = \varepsilon^T \cdot g = e \cdot s^E \\ e = \varepsilon^s \cdot h = d \cdot c^E \\ g = \beta^T \cdot d = h \cdot s^D \\ h = \beta^s \cdot e = g \cdot c^D \end{cases} \quad (II.2.6)$$

II.2.3 Les différents modes de couplage électromécanique

II.2.3.1 Couplage intrinsèque

Le couplage électromécanique intrinsèque d'un matériau piézoélectrique représente son efficacité à convertir une énergie mécanique en une énergie électrique et vice versa. Le couplage intrinsèque dépend de la qualité du matériau, qui est fortement liée à l'orientation du réseau cristallin. Il dépend aussi du mode de couplage électromécanique. Nous verrons ci-dessous les différents modes de couplages qui existent. Le coefficient de couplage est souvent mesuré en pourcentage, il est souvent plus intéressant d'utiliser sa valeur au carré, liée au rapport des énergies transférée et fournie. Nous distinguons deux expressions du coefficient de couplage électromécanique selon le mode de fonctionnement (actionneur ou générateur), ci-dessous les expressions respectives du coefficient de couplage électromécanique pour chaque mode de fonctionnement. [30]

En mode actionneur :

$$k^2 = \frac{\text{Energie mécanique stockée}}{\text{Energie électrique reçue}} \quad (II.2.7)$$

En mode générateur :

$$k^2 = \frac{\text{Energie électrique fournie}}{\text{Energie mécanique stockée}} \quad (II.2.8)$$

II.2.3.2 Couplage effectif

Les expressions (II.2.7) (II.2.8) représentent le coefficient de couplage électromécanique intrinsèque. Cependant, dans le cas réel, le matériau piézoélectrique est souvent connecté mécaniquement à d'autres matériaux (électrodes, support) qui sont passifs. De ce fait, nous parlons plutôt de **coefficient de couplage effectif** de l'actionneur (ou du générateur) qui est le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie reçue par le système en entier. Ce coefficient de couplage effectif est bien entendu inférieur au couplage intrinsèque car il y a toujours une partie de l'énergie qui est emmagasinée ou dissipée dans la zone passive [7].

Le mode de couplage électromécanique traduit la façon dont les deux domaines (mécanique et électrique) interagissent. Il existe trois principaux modes pour le couplage électromécanique (mode longitudinal, transversal et de cisaillement). Ce qui fait la différence entre les différents modes c'est la direction de l'axe de polarisation du matériau piézoélectrique par rapport à l'axe d'application de la contrainte mécanique dans le matériau piézoélectrique. Le Tableau II-3 illustre ces trois principaux modes de couplage électromécanique avec les coefficients respectifs k_{ij} où i correspond à la direction de la contrainte mécanique principale appliquée (F) dans le matériau piézoélectrique, et l'indice j correspond à la direction de l'axe de polarisation (P). [31]

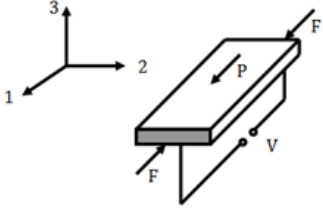
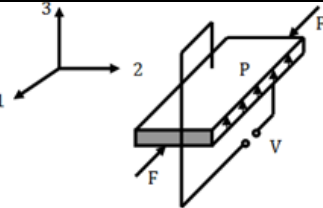
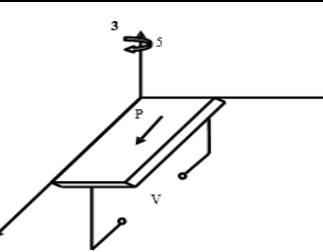
<p>Mode longitudinal (mode 33)</p>		$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T s_{33}^E}}$
<p>Mode transversal (mode 31)</p>		$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T s_{11}^E}}$
<p>Mode de cisaillement (mode 15)</p>		$k_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{\epsilon_{11}^T s_{55}^E}}$

Tableau II. 3: Les différents modes du couplage électromécanique [31]

Chacun de ces modes est adapté à un fonctionnement donné. En récupération de l'énergie vibratoire on privilégie souvent le mode longitudinal et le mode transversal pour plusieurs raisons : facilité de mise en œuvre, adaptabilité avec les vibrations unidirectionnelles, couplage intrinsèque relativement important...etc.

II.2.4. Mode de déformation

Le choix du mode de déformation est déterminant lorsque l'on cherche à maximiser l'énergie générée. En effet, pour une même énergie mécanique apportée, l'énergie électrique générée est d'autant plus grande que le coefficient de couplage intrinsèque est élevé. Pour un même matériau, les coefficients de couplage se classent de la manière suivante :

$$k_{33} \succ k_{15} \succ k_{31}$$

A priori, il est préférable de choisir le mode 33. Cependant, le mode 31 est souvent préféré au mode 33, pour plusieurs raisons.

D'une part, ce choix peut être lié à des contraintes de mise en œuvre. Lorsque le SP doit être inséré dans un espace limité en hauteur, par exemple le talon d'une chaussure [34], le mode 31 est mieux adapté à ce cahier des charges.

D'autre part, à cause de la rigidité très élevée des céramiques (parfois supérieure à 10^{11} N/m²), une contrainte très élevée est nécessaire pour obtenir un déplacement suffisant. Un coefficient de couplage élevé ne conduit pas forcément à une énergie générée élevée, si l'énergie mécanique apportée reste faible. De ce point de vue, les systèmes fonctionnant en mode 31 et en flexion sont intéressants car ils conduisent naturellement à un déplacement plus élevé, ce qui facilite l'apport d'énergie mécanique au SP.

II.2.5 Principe du générateur récupérateur d'énergie mécanique

Au terme de cette étude bibliographique, il nous est apparu que tous les générateurs récupérateurs d'énergie mécanique, quel que soit le mode de conversion électromécanique choisi, ont tous la même structure. Nous allons la présenter à travers l'exemple du générateur piézoélectrique.

Le générateur piézoélectrique (GP) est généralement constitué de trois étages de conversion (Figure. II.2) :

- Le système piézoélectrique (SP) : c'est l'étage central de conversion mécano-électrique, formé d'un ensemble de céramiques ou de films piézoélectriques ;
- Le dispositif mécanique d'application (DMA) : ce premier étage de conversion purement mécanique a pour rôle de transformer la force F_{mot} délivrée par la source mécanique en une force F de forme et d'amplitude adaptées au SP ;

- Le système de récupération (SR) : ce dernier étage de conversion purement électrique est un convertisseur statique. Il est indispensable pour convertir l'énergie 'brute' délivrée par le SP en énergie utilisable par l'appareil portable ciblé, ou éventuellement en énergie stockée dans un élément de type condensateur ou accumulateur électrochimique.

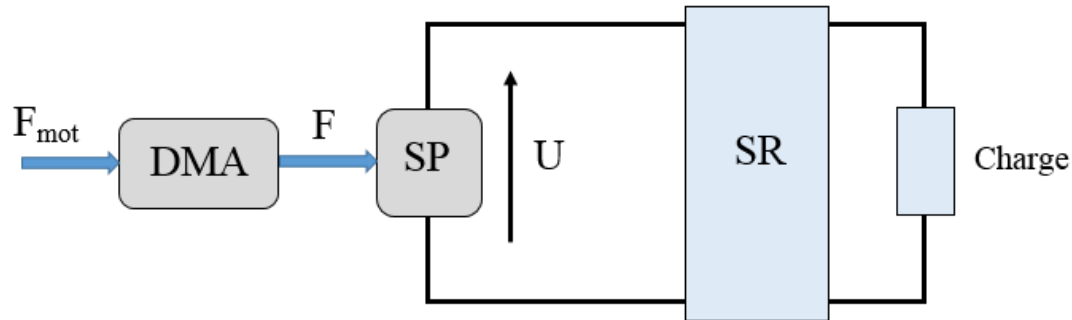


Figure II. 2 : Schéma de principe du générateur piézoélectrique

II.2.5.1 Régime de fonctionnement du générateur piézoélectrique

La première étape dans la conception d'un GP est le choix du régime de fonctionnement, qui peut être dynamique ou quasi-statique comme nous avons vu dans chapitre 1. La distinction entre ces deux régimes n'est pas nouvelle. Le premier type fonctionne à partir d'une compression extrêmement brève (choc), le second, à partir d'une compression lente, appelée 'squeeze'. Suite à un choc, le SP se met à vibrer à sa fréquence de résonance. Sous l'effet d'une compression lente, le SP ne vibre pas. Bien sûr, comme nous le verrons au ce chapitre, le modèle équivalent du SP est différent dans les deux cas : en régime dynamique, une source associée à un circuit RLC ; en régime statique, une source associée à une capacité C.

Que l'on parle de mode de déformation en régime quasi-statique, ou de mode de vibration en régime dynamique,

Il est possible de conclure sur les conditions permettant d'augmenter, voire de maximiser la puissance délivrée :

- En régime dynamique, elle est maximale à la fréquence de résonance du SP.
- En régime statique, elle augmente d'autant plus que la contrainte varie rapidement.

II.2.5.2 Matériau piézoélectrique

Le choix du matériau est bien sûr essentiel. Considérons la céramique de type PZT-5A et le polymère PVDF, qui ont été comparés par les chercheurs du MIT pour l'application des chaussures piézoélectriques. Le dimorphe en PZT a généré une puissance de 8,4mW, contre 1,3 mW pour le film de PVDF. Le choix du PZT est donc clair. Cependant, les caractéristiques des deux matériaux suggèrent une réflexion plus approfondie (Tableau II.4).

Les valeurs des coefficients k_{31} confirment le choix du PZT. Or k_{31}^2 est proportionnel à la compliance mécanique, donc au module d'Young, qui est très différent pour les deux matériaux. Ceci explique que, malgré la supériorité du PZT en terme de couplage, le PVDF est supérieur en ce qui concerne le produit $g_{31}d_{31}$. A priori, pour une même contrainte appliquée, l'énergie volumique générée par le film de PVDF est donc supérieure à celle générée par la céramique PZT. En réalité, ça n'est pas si simple, car d'autres paramètres entrent en jeu :

- le volume de matériau utilisé, dont dépend l'énergie totale générée
 - la contrainte maximale acceptée : celle du PZT-5A est 20 fois supérieure à celle du PVDF
- Ces paramètres vont déterminer les valeurs effectives de couplage et d'énergie électrique générée.

L'expérience montre que le PZT est alors plus performant.

Propriété	Unité	PZT-5A	PVDF
Densité	10^3 kg/m^3	7.5	1.78
Permittivité relative	ϵ_r	1200	12
Module d'Young	<i>GPa</i>	62	3
Contrainte maximale	<i>MPa</i>	19	≈ 1
Déformation maximale	10^{-6}	300	200
d_{31}	10^{-12} C/N	-171	23
g_{31}	10^{-3} Vm/N	-11.4	216
$g_{31}d_{31}$	10^{-12} CVm/N^2	1.95	4.97
k_{31}	10^{-2}	34.4	12
k_{31}^2	10^{-2}	11.8	1.4

Tableau II. 4: Caractéristiques du matériau céramique PZT-5A

et du film en polymère PVDF [34]

II.2.6 Modélisation du système Piézoélectrique

Cette partie est consacrée à l'étude théorique du système piézoélectrique (SP), qui constitue la partie centrale du générateur piézoélectrique (GP). Après les deux types de barreaux de PZT choisis, nous aborderons un point important de la modélisation : il concerne le choix des équations de la piézoélectricité, en fonction du mode de déformation. Ensuite, nous présenterons l'évolution des circuits équivalents. Nous présenterons alors le modèle du SP en régime dynamique et en régime quasi-statique, et terminerons par une étude prédictive du fonctionnement du SP sous l'effet d'une contrainte mécanique appliqué par DMA. [34]

II.2.6.1 Description du système piézoélectrique

Les SP utilisés pour les deux maquettes de test sont des barreaux parallélépipédiques en céramique PZT (Figure II.3). Les barreaux de dimensions $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 1\text{cm}$ sont déformés selon le mode 33. Ceux de dimensions $2\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2\text{cm}$ sont déformés selon le mode 31. Les dimensions des barreaux selon les 3 axes sont notées L_i . Les aires des surfaces orthogonales à l'axe i sont notées A_i .

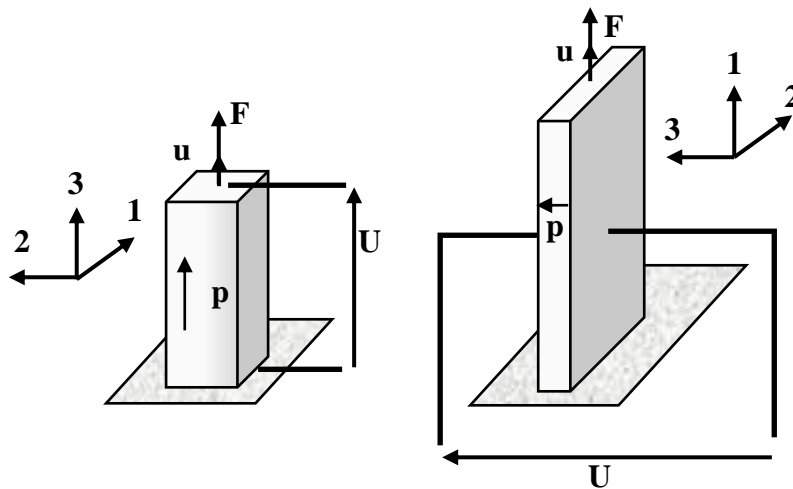


Figure II. 3 : Barreaux de céramique PZT fonctionnant en mode 33 ou 31

Chaque barreau est encasté d'un côté. Sur la face opposée, il est soumis à une force F de compression, que l'on suppose uniforme sur toute la surface. Comme nous ne connaissons pas la répartition spatiale réelle de la contrainte, nous ne supposons que F est la valeur moyenne de la contrainte réelle, sur la surface du barreau.

Si en prenons l'exemple d'un barreau long fonctionnant en mode 33 (Figure II.3 gauche), la contrainte T_3 n'entraîne pas l'apparition d'une polarisation selon les axes 1 et 2. Pourtant, sous l'effet d'une compression lente selon l'axe 3, le barreau long se déforme latéralement, et prend l'allure d'un tonnelet. Cette déformation est négligeable si la céramique a la forme d'un disque mince.

En conclusion, si $L_3 \gg L_{i \neq 3}$, les grandeurs $S_{i \neq 3}$ ne sont pas nulles, mais $T_{i \neq 3} = 0$, donc il convient de choisir la variable T_3 .

La variable électrique choisie est D_3 puisque $\frac{\partial D_3}{\partial x_3} = 0$. En effet, $D_3(x_3) = \frac{Q}{A_3(x_3)}$ est supposée

uniforme selon l'axe 3. On retrouve cette condition sur D dans les modes où la déformation a lieu selon le même axe que la polarisation (mode longitudinal (mode 33) et épaisseur). La

condition $\frac{\partial E_3}{\partial x_{i \neq 3}} = 0$ est vérifiée lorsque la déformation est perpendiculaire à l'axe de

polarisation (mode transversal (mode 31)). Dans ce cas, c'est la variable E_3 qui est choisie.

[34]

II.2.6.2 Evolution des circuits équivalent depuis le modèle de Mason

Les matériaux piézoélectriques ont le plus souvent été utilisées pour leurs propriétés de circuit résonant (émetteurs acoustique, microphones, filtres, transformateurs). De même, dans les applications dédiées à la génération électrique (générateur d'arc, ou plus récemment générateur de puissance partir de vibration), le fonctionnement en régime dynamique est le plus souvent rencontré. C'est pourquoi la plupart des modèles mis au point de puis le modèle de Mason, en 1950, présentent des circuits résonants.

II.2.6.3 Analogie électromécanique

Ainsi, un système {masse, ressort, amortisseur} peut être modélisé par une impédance électrique RLC, généralement appelée « branche émotionnelle » (Figure II.4).

Grandeurs mécaniques	Grandeurs électriques
Déplacement : u (m)	Charge électrique : Q (C)
Vitesse : V (m/s)	Courant : I (A)
Force : F (N)	Tension : U (V)
Masse : M (kg)	Inductance : L (H)
Raideur : k (N/m)	Capacité : C (F)
Amortissement : ρ_m (kg/s)	Résistance : R (Ω)
Extrémité encastrée : $V = 0$	$I = 0$
Extrémité libre : $F = 0$	$U = 0$

Tableau II. 5: Analogie électromécanique

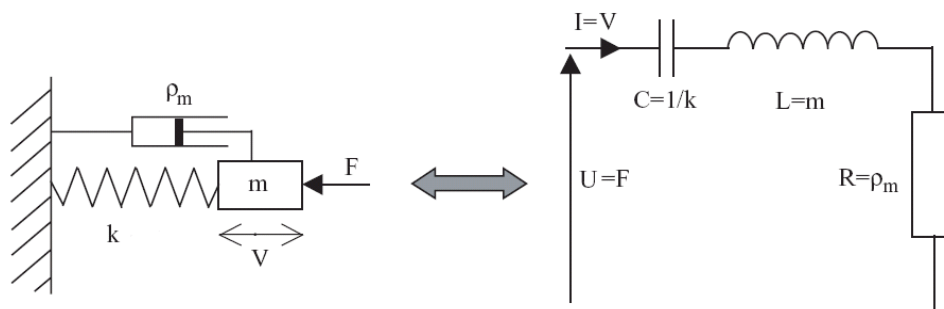


Figure II. 4 : Système mécanique {masse, ressort, amortisseur}

et circuit électrique équivalent

II.2.6.3 Evolution des circuits équivalents

Le modèle de Mason reste le plus connu. Le circuit, présenté figure II.5 (a), fait apparaître des impédances $Z1$ et $Z2$ fonctions de la fréquence et un transformateur représentant le couplage électromécanique. En mode 33, une capacité négative est située en sortie du transformateur, elle s'explique également par le couplage électromécanique. Ce modèle peut être linéarisé au voisinage de la fréquence de résonance (Figure II.5 b).

Ce modèle inspire par la suite plusieurs circuits : en 1961, Redwood remplace le réseau d'impédances mécaniques par une ligne de transmission ; en 1994, Leach modifie le modèle

de Redwood en remplaçant le transformateur par des sources commandées, ce qui supprime la capacité négative [34].

Nous avons perfectionné ce modèle en y ajoutant les pertes diélectriques, mécaniques et piézoélectriques (Figure II.5 d). Ce modèle est intéressant car, tout en étant une représentation mathématique, il est proche des phénomènes physiques :

- il prend en compte le temps de parcours de l'onde d'une extrémité à l'autre du barreau ;
- les pertes apparaissent au niveau intrinsèque (parties imaginaires des constantes mécaniques, électriques et piézoélectriques), et non par l'intermédiaire de résistances équivalentes.

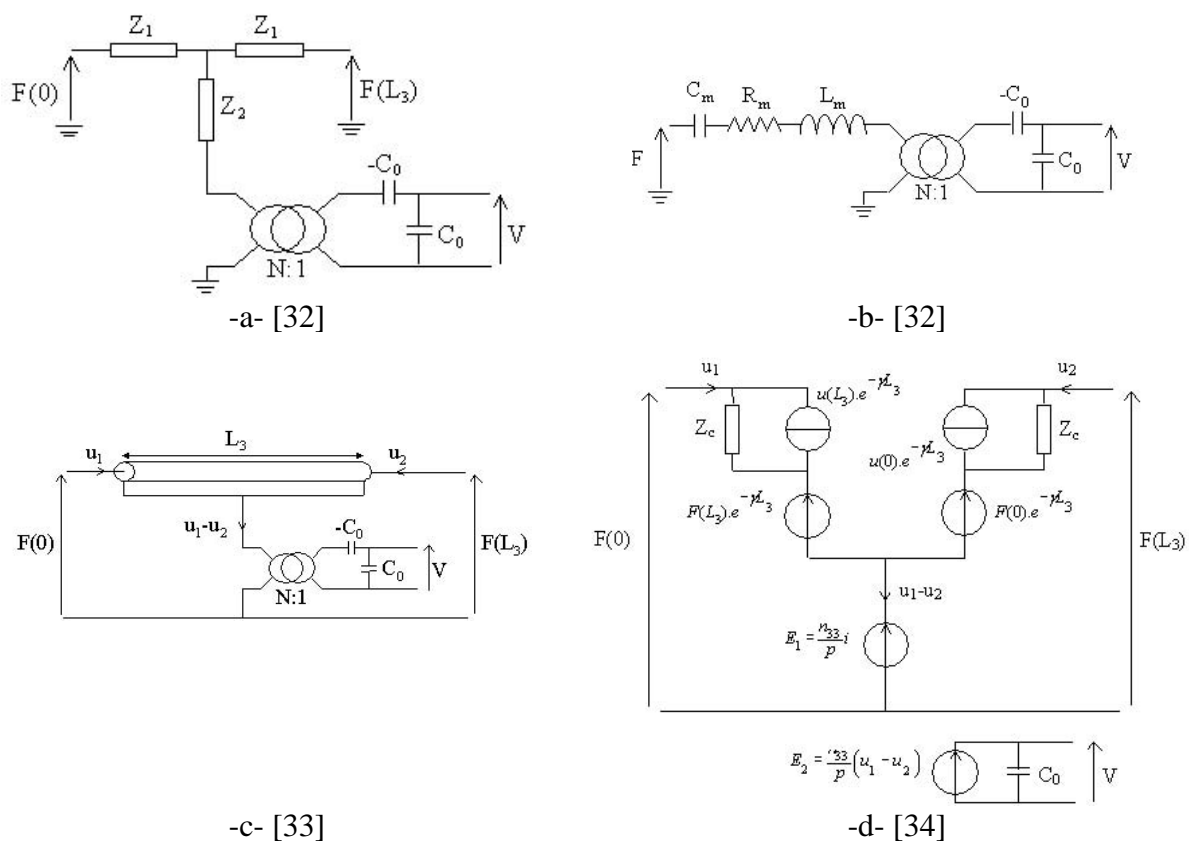


Figure II. 5: Evolution des modèles des matériaux piézoélectriques en régime dynamique

II.2.6.5 Circuit équivalent en régime quasi-statique

Notre générateur étant destiné à récupérer l'énergie des mouvements humains, la fréquence de la contrainte mécanique appliquée au dispositif piézoélectrique est très faible par rapport à ses modes de résonance. Le modèle utilisé est donc uniquement déterminé à partir des équations

statiques de la piézoélectricité. Il est possible d'obtenir ce modèle à partir des modèles établis en régime dynamique, en faisant tendre simplement la fréquence vers 0.

Dans ce cas, les éléments inductifs n'interviennent plus, de même que les résistances de pertes mécaniques, car celles-ci sont très faibles à basse fréquence [35].

II.2.6.5.1 Barreau piézoélectrique long déformé selon le mode 33

En régime quasi-statique, rappelons les équations de départ :

$$S_3 = s_{33}^D T_3 + g_{33} D_3 \quad (II.2.10)$$

$$E_3 = -g_{33} T_3 + \beta_{33}^T D_3 \quad (II.2.11)$$

$$T_3 = \frac{F}{A_3} \quad ; \quad S_3 = \frac{u}{L_3} \quad ; \quad E_3 = -\frac{U}{L_3} \quad ; \quad I = A_3 \frac{dD_3}{dt} \quad (II.2.12)$$

De (II.2.10) et (II.2.11) se déduit :

$$E_3 = -h_{33e} S_3 + \beta_{33}^S D_3 \quad (II.2.13)$$

Faisant apparaître de nouveaux coefficients :

$$\beta_{33e}^S = \beta_{33}^T + \frac{g_{33}^2}{s_{33}^D}$$

$$h_{33e} = \frac{g_{33}}{s_{33}^D}$$

(2.10) et (2.13) conduisent à :

$$\left(1 - \frac{g_{33} h_{33e}}{\beta_{33e}^S}\right) S_3 = s_{33}^D T_3 + \frac{g_{33}}{\beta_{33e}^S} E_3$$

A l'aide de (II.2.12), on obtient :

$$\left(\frac{\beta_{33e}^S}{g_{33}} - h_{33e}\right) u = \frac{s_{33}^D}{g_{33}} \cdot \frac{\beta_{33e}^S L_3}{A_3} F - U \quad (II.2.14)$$

Appelons C_0 la capacité de la céramique encastrée :

$$C_0 = \frac{A_3}{\beta_{33e}^s \cdot L_3} \quad (II.2.15)$$

Appelons $N = \frac{g_{33}^D}{s_{33}^D} C_0 = h_{33e} \cdot C_0$ (II.2.16). Alors (II.2.14) devient :

$$\left(\frac{\beta_{33e}^s}{h_{33e} \cdot C_0 \cdot g_{33}^D} - \frac{1}{C_0} \right) \cdot Nu = \frac{F}{N} - U \quad (II.2.17)$$

Notons C_m la capacité mécanique en basse fréquence : $C_m = \frac{s_{33}^D \cdot L_3}{A_3}$ (II.2.18)

En dérivant (II.2.17), apparaît la première équation du circuit équivalent :

$$\left(\frac{1}{N^2 \cdot C_m} - \frac{1}{C_0} \right) \cdot NV = \frac{d}{dt} \left(\frac{F}{N} - U \right) \quad (II.2.19)$$

D'autre part, avec (II.2.12) et en dérivant (II.2.13) :

$$-\frac{1}{L_3} \cdot \frac{dU}{dt} = -\frac{h_{33e}}{L_3} \cdot \frac{du}{dt} + \frac{\beta_{33e}^s}{A_3} \cdot I \quad (II.2.20)$$

Ceci fournit la seconde équation : $C_0 \cdot \frac{dU}{dt} = NV - I$

Le système d'équations obtenu :

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{N^2 \cdot C_m} - \frac{1}{C_0} \right) \cdot NV = \frac{d}{dt} \left(\frac{F}{N} - U \right) \\ C_0 \cdot \frac{dU}{dt} = NV - I \end{cases} \quad (II.2.21)$$

Ces équations, en accord avec l'analogie électromécanique tension - force et courant - vitesse, se traduisent par le circuit présenté figure II.6 (a). Le coefficient N , tel qu'il pondère force F et vitesse V , suggère d'introduire un transformateur de rapport $N : 1$, reliant ainsi les 2 branches mécanique et électrique (Figure II.6 b). Ce transformateur, associé à la capacité négative $-C_0$, modélise la conversion électromécanique due à la piézoélectricité. [35]

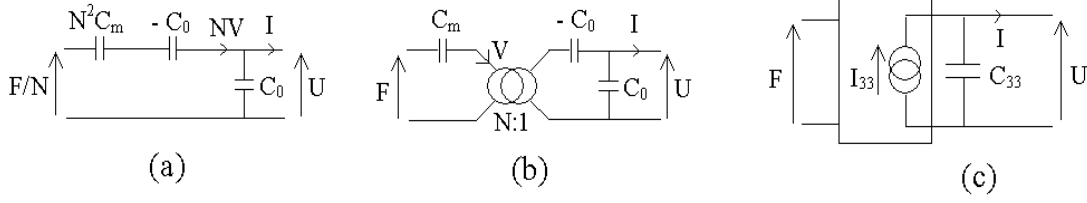


Figure II. 6: Circuits équivalents au barreau piézoélectrique en mode 33 [34]

Ce circuit peut être mis sous la forme d'un générateur de Norton équivalent, comprenant une source de courant I_{33} et une impédance Z_{33} en parallèle :

$$I_{33} = \frac{F}{N} \cdot \frac{1}{\frac{1}{j\omega N^2 C_m} - \frac{1}{j\omega C_0}} \quad (II.2.22)$$

$$Z_{33} = \frac{N^2 C_m}{C_0} \left(\frac{1}{j\omega N^2 C_m} - \frac{1}{j\omega C_0} \right) \quad (II.2.23)$$

Dans le domaine temporel, le barreau piézoélectrique est équivalent à une source de courant I_{33} proportionnelle à la dérivée de la force appliquée, en parallèle avec une capacité C_{33} (Figure II.6 c) :

$$I_{33}(t) = \Lambda_{33} \cdot \frac{dF}{dt} \quad (II.2.24)$$

$$\Lambda_{33} = \frac{NC_m C_0}{C_0 - N^2 C_m}$$

$$C_{33} = \frac{C_0^2}{C_0 - N^2 C_m}$$

Ces expressions se simplifient lorsque l'on remplace C_0 , C_m et N par (II.2.15), (II.2.16) et (II.2.18) :

$$\Lambda_{33} = \frac{g_{33}}{\beta_{33}^T}$$

$$C_{33} = \frac{A_3}{L_3 \beta_{33}^T}$$

II.2.6.5.2 Barreau piézoélectrique long déformé selon le mode 31

Considérons maintenant un barreau long fonctionnant en mode 31 (Figure II.3 droite). Les équations régissant le comportement du barreau en régime quasi-statique sont [34]:

$$S_1 = s_{11}^E T_1 + g_{31} E_3 \quad (II.2.25)$$

$$D_3 = d_{31} T_1 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (II.2.26)$$

$$T_1 = \frac{F}{A_1} \quad ; \quad S_1 = \frac{u}{L_1} \quad ; \quad E_3 = -\frac{U}{L_3} \quad ; \quad I = A_3 \frac{dD_3}{dt} \quad (II.2.27)$$

(II.2.25) et (II.2.26) conduisent à :

$$S_1 = \frac{s_{11}^E}{d_{31}} \cdot D_3 + \left(d_{31} - \frac{s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T}{d_{31}} \right) \quad (II.2.28)$$

A l'aide de (II.2.27) et en dérivant (II.2.28) on en déduit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{u}{L_1} \right) = \frac{s_{11}^E}{d_{31}} \cdot \frac{I}{A_3} - \left(d_{31} - \frac{s_{11}^E \cdot \varepsilon_{33}^T}{d_{31}} \right) \cdot \frac{1}{L_3} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (II.2.29)$$

Multiplions (II.2.29) par $\frac{d_{31} \cdot A_3}{s_{11}^E}$:

$$\frac{d_{31} \cdot A_3}{s_{11}^E L_1} \cdot V - I = \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \cdot \frac{A_3}{L_3} \cdot \frac{dU}{dt} \quad (II.2.30)$$

Posons :

$$\varepsilon_{33e}^S = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E}$$

$$N = \frac{d_{31} \cdot L_2}{s_{11}^E} \quad (II.2.31)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{33e}^S \cdot A_3}{L_3} \quad (II.2.32)$$

L'équation (II.2.30) se simplifie :

$$NV - I = C_0 \cdot \frac{dU}{dt} \quad (II.2.33)$$

D'autre part, (II.2.25) et (II.2.27) conduisent à :

$$\frac{u}{L_1} = s_{11}^E \cdot \frac{F}{A_1} - d_{31} \frac{U}{L_3} \quad (II.2.34)$$

En dérivant (II.2.34) et en la multipliant par $\frac{L_3}{d_{31}}$:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{F}{N} - U \right) = \frac{L_3}{L_1 \cdot d_{31}} \cdot V \quad (II.2.35)$$

En posant $C_m = \frac{s_{33}^E \cdot L_1}{A_1}$ (II.2.36) fournit la seconde équation :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{F}{N} - U \right) = \frac{1}{N^2 \cdot C_m} \cdot NV \quad (II.2.37)$$

Le système d'équations obtenu :

$$\begin{cases} \frac{1}{N^2 \cdot C_m} \cdot NV = \frac{d}{dt} \left(\frac{F}{N} - U \right) \\ NV - I = C_0 \cdot \frac{dU}{dt} \end{cases} \quad (II.2.38)$$

Le circuit équivalent correspondant diffère de celui du mode 33, car il ne présente pas de capacité négative dans la branche électrique (Figure II.7 b). Ceci est logique dans la mesure où la déformation est perpendiculaire à l'axe de polarisation. La capacité diélectrique effective, qui dépend de la distance entre les électrodes, ne varie donc pas lorsque le barreau est déformé.

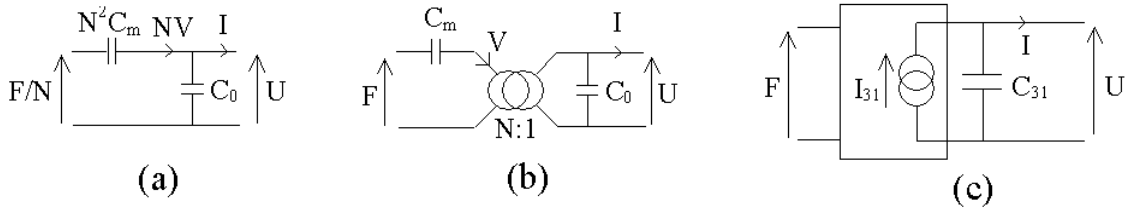


Figure II. 7: Circuits équivalents au barreau piézoélectrique en mode 31 [34]

Le générateur de Norton, comme celui établi en mode 33, est une source de courant I_{31} proportionnelle à la dérivée de la force appliquée, en parallèle avec une capacité C_{31} (Figure II.7 c) :

$$\begin{aligned} I_{33}(t) &= \Lambda_{31} \cdot \frac{dF}{dt} \\ \Lambda_{31} &= N \cdot C_m \\ C_{31} &= N^2 \cdot C_m + C_0 \end{aligned}$$

En remplaçant C_m , C_0 et N par leurs expressions (II.2.36), (II.2.32) et (II.2.31) on obtient :

$$\Lambda_{31} = d_{31} \cdot \frac{L_1}{L_3} \quad (II.2.39)$$

$$C_{31} = \varepsilon_{33}^T \frac{A_3}{L_3} \quad (II.2.40)$$

II.2.6.6 Mise en équation en régime dynamique

Ces modèles résonants sont établis à partir des équations statiques de la piézoélectricité [34], auxquelles s'ajoute la loi de Newton. Par exemple, pour un barreau long fonctionnant en mode 33 :

$$S_3 = s_{33}^D T_3 + g_{33} D_3 \quad (II.2.41)$$

$$E_3 = -g_{33} T_3 + \beta_{33}^T D_3 \quad (II.2.42)$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial x_3} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

En outre, quatre relations lient respectivement T_3 , S_3 , E_3 et D_3 à F , u , U et I :

$$T_3 = \frac{F}{A_3} \quad ; \quad S_3 = \frac{\partial u}{\partial x_3} \quad ; \quad E_3 = -\frac{\partial U}{\partial x_3} \quad ; \quad \frac{I}{A_3} = \frac{\partial D_3}{\partial t} \quad (II.2.43)$$

Avec :

F : Force appliquée à l'extrémité du barreau

V : Vitesse de l'extrémité du barreau

U : Déplacement de l'extrémité du barreau

U : Tension entre les électrodes du barreau

Q : Charge électrique sur les faces du barreau

I : Courant à travers le barreau

ρ : Masse volumique du matériau

T_i , S_i , E_i , D_i : contrainte, déformation relative, champ électrique et induction électrique, selon l'axe i

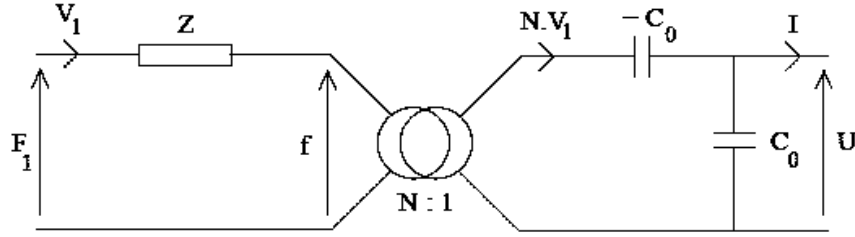


Figure II. 8 : le circuit électromécanique équivalent d'un bar piézoélectrique [34]

D'après le circuit équivalent montré dans la figure II.8 on obtenus le système d'équations suivante :

$$\begin{cases} Z(j\omega).V_1 = N \cdot \frac{1}{j.C_0\omega} + F & (II.2.44) \\ I = N.V_1 - jC_0\omega.U = \frac{U}{R_1} & (II.2.45) \end{cases}$$

Avec Z représente l'impédance mécanique

$$Z(j\omega) = \frac{Z_c}{j \cdot \tan\left(\frac{\omega}{u_p} \cdot L_3\right)} \quad (II.2.46)$$

La relation (II.2.46) représente le modèle exacte de l'impédance mécanique celle-ci peuvent être linéarisé au voisinage de la fréquence de résonance par :

$$Z(j\omega) = jL_m\omega + \frac{1}{jC_m\omega} + R_m \quad (II.2.47)$$

L_3 Longueur de bar piézo et $Z_c = \frac{k.A_3}{\omega.s_{33}^D}$,

$u_p = \frac{1}{\sqrt{\rho s_{33}^D}}$ Le déplacement, $k = \frac{\omega}{u_p}$ le nombre de propagation et A_3 la surface de la barre.

La résolution de ces équations aboutit au système suivant, exprimé dans le domaine fréquentiel (p : variable de Laplace) :

$$\frac{du}{dx_3} = -p \frac{s_{33}^D}{A_3} \left(F - \frac{g_{33}}{s_{33}^D} \cdot \frac{I}{p} \right) \quad (II.2.48)$$

$$\frac{d}{dx_3} \left(F - \frac{g_{33}}{s_{33}^D} \cdot \frac{I}{p} \right) = -\rho A_3 p u \quad (II.2.49)$$

$$U = \frac{g_{33}}{s_{33}^D \cdot p} (u_1 - u_2) + \frac{I}{C_0 p} \quad (II.2.50)$$

C_0 est généralement appelée « capacité bloquée ». C'est la capacité d'un condensateur dont le diélectrique, non piézoélectrique, aurait la même permittivité que la céramique piézoélectrique.

$$C_0 = \frac{A_3}{L_3 \beta_{33e}^S} \quad (II.2.51)$$

Ou
$$\beta_{33e}^S = \beta_{33}^T \left(1 + \frac{g_{33}^2}{s_{33}^D \cdot \beta_{33}^T} \right)$$

Le développement de du système d'équations (II.2.44) et (II.2.45) permet de déduire le modèle analytique d'un système piézoélectrique en mode dynamique :

U : la tension, I : le courant, V_1 : la vitesse.

$$\begin{cases} U = \frac{R_L \cdot N \cdot Z_e \cdot F}{(R_L + Z_e)Z_m + (R_{conv})^2} \\ I = \frac{N \cdot Z_e \cdot F}{(R_L + Z_e)Z_m + (R_{conv})^2} \\ V_1 = \frac{R_L + Z_e}{(R_L + Z_e)Z_m + (R_{conv})^2} \end{cases} \quad (II.2.52)$$

Avec $Z_m = jL_m \omega + \frac{1}{jC_m \omega} + R_m$ représente l'impédance mécanique.

$R_{conv} = \frac{h_{33}}{\omega}$ Correspondre à la conversion électromécanique

$$Z_e = \frac{1}{jC_0 \omega}, \quad C_m = \frac{8 \cdot L_3 \cdot s_{33}^D}{\pi^2 \cdot A_3}, \quad L_m = \frac{\rho \cdot L_3 \cdot s A_3}{2}, \quad R_m = \frac{2\pi}{Q_m} \cdot \sqrt{\frac{L_m}{C_m}}$$

Puissance électrique et mécanique

$$\begin{cases} P_e = \frac{R_L \cdot R_{conv}^2 \cdot F^2}{2 \left| (Z_e + R_L)Z_m + (R_{conv})^2 \right|^2} \\ P_m = \frac{\left| (Z_e + R_L) \right|^2 \cdot \text{Re}(Z_m) + (R_L + \text{Re}(Z_e^*)) R_{conv}^2}{2 \left| (Z_e + R_L)Z_m + (R_{conv})^2 \right|^2} \end{cases} \quad (II.2.53)$$

II.2.7 Simulation par l'environnement MATLAB

La modélisation et la simulation constituent une méthode de "*prototypage virtuel*", qui permet au concepteur de tester les spécifications d'un concept. Le prototypage virtuel permet aussi de réduire considérablement le flot de conception, et d'éviter le prototypage physique répété. De plus, le prototypage virtuel permet au concepteur d'avoir un retour immédiat, lui permettant ainsi de prendre les décisions relatives à la conception d'un système. Une telle approche permet l'exploration d'alternatives lors de la conception et donc l'exécution efficace du concept final. Enfin le but essentiel du prototype virtuel est la validation d'un système avant de réaliser le prototype réel et la réduction du temps et du coût de conception. [25]

II.2.8 Simulation d'un système piézoélectrique

Avec les caractéristiques d'un film piézoélectrique de type PVDF illustré dans le tableau suivante :

Symbole	Paramètre	
e	L'épaisseur	50 (μm)
A	La surface	500 (mm^2)
d ₃₁	Constante de charge	$23 \times 10^{-12} \text{ C / N}$
d ₃₃		-33
g ₃₁	Constante de tension	$216. \cdot 10^{-3} \text{Vm / N}$
g ₃₃		$-330. \cdot 10^{-3} \text{Vm / N}$
ρ	Densité	$1.78 \cdot 10^3 \text{ kg / m}^3$
ϵ_r	Permittivité relative	10_12
Y	Module de young	$2 _ 3 \cdot 10^9 \text{ GPa}$
Q _m	Facteur de qualité	10

Tableau II. 6 : les paramètres de film piézoélectrique PVDF [36]

II.2.8.1 Simulation selon le mode 33

Les figures 9, 10 et 11 illustrent respectivement l'effet de la contrainte mécanique sur la puissance récupérée, la tension et le courant généré pour une fréquence de 6Hz et les différentes déformations $S=0.1\%$, $S=0.2\%$.

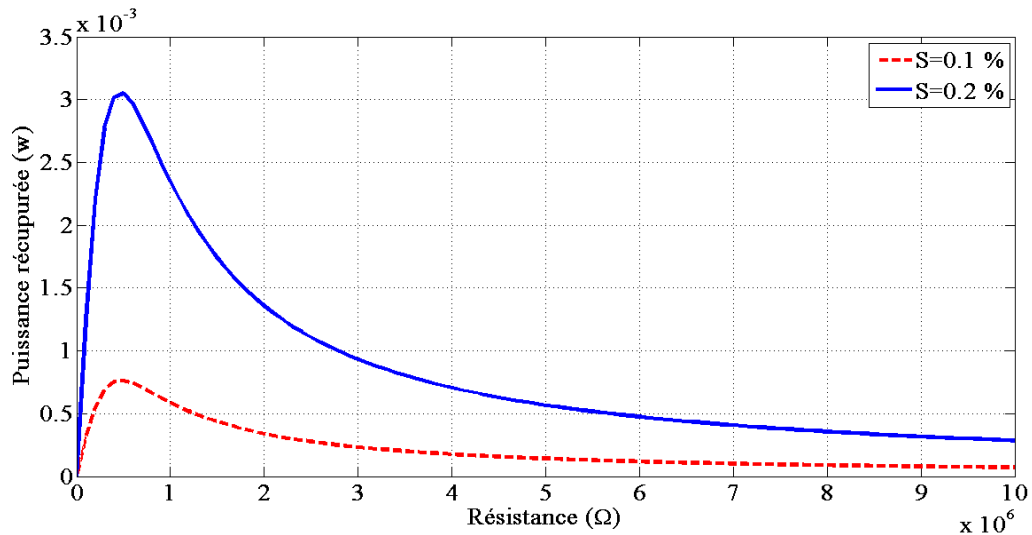


Figure II. 9 : la puissance récupérée par le film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs maximums de la puissance récupérée (0.762 mW, 3.05 mW) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%,) et résistance optimale (0.5 M Ω , 0.5 M Ω).

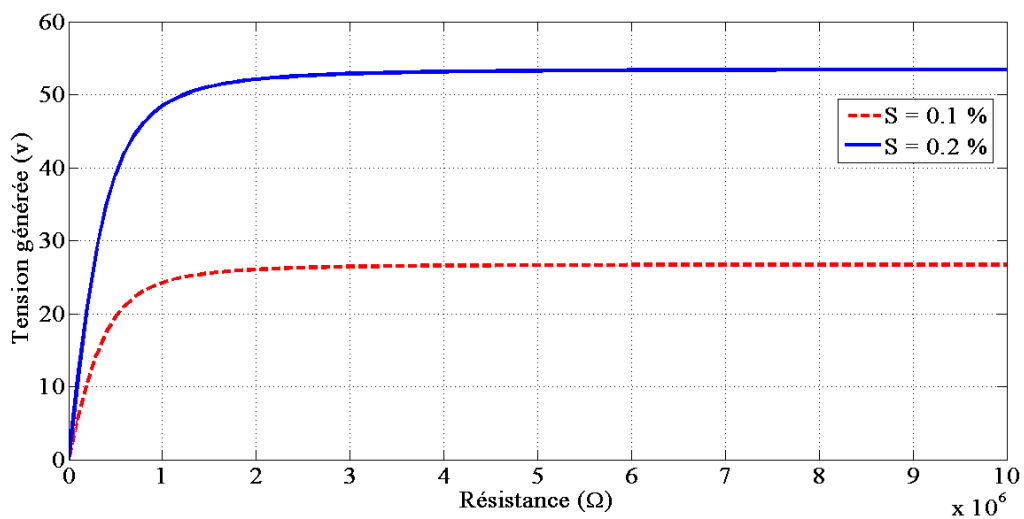


Figure II. 10: la tension générée par le film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs maximums de la tension générée (26.67 V, 53.34 V) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%).

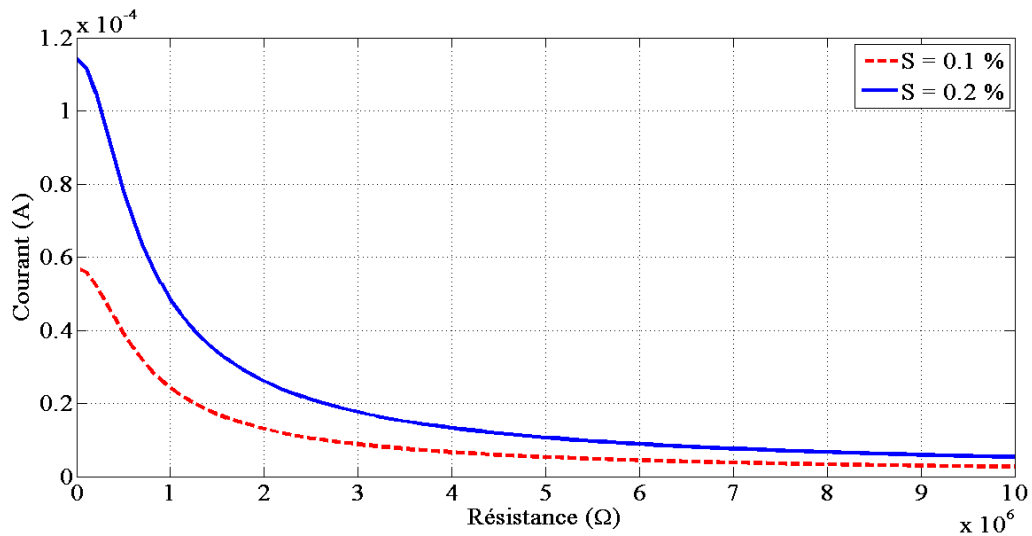


Figure II. 11: la courbe du courant de film PVDF selon le mode 33 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs du courant généré (39 μA , 78.09 μA) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%) et résistance optimale (0.5 M Ω , 0.5 M Ω).

Les figures 9,10 et 11 montrent clairement l'influence de la déformation sur les grandeurs (P, U et I). L'amplitude de la déformation est un paramètre important pour augmenter et maximiser l'énergie récupérée.

II.2.8.2 Simulation selon le mode 31

Les figures 12, 13 et 14 illustrent respectivement l'effet de la contrainte mécanique sur la puissance récupérée, la tension et le courant généré pour une fréquence de 6Hz et les différentes déformations $S=0.1\%$, $S=0.2\%$.

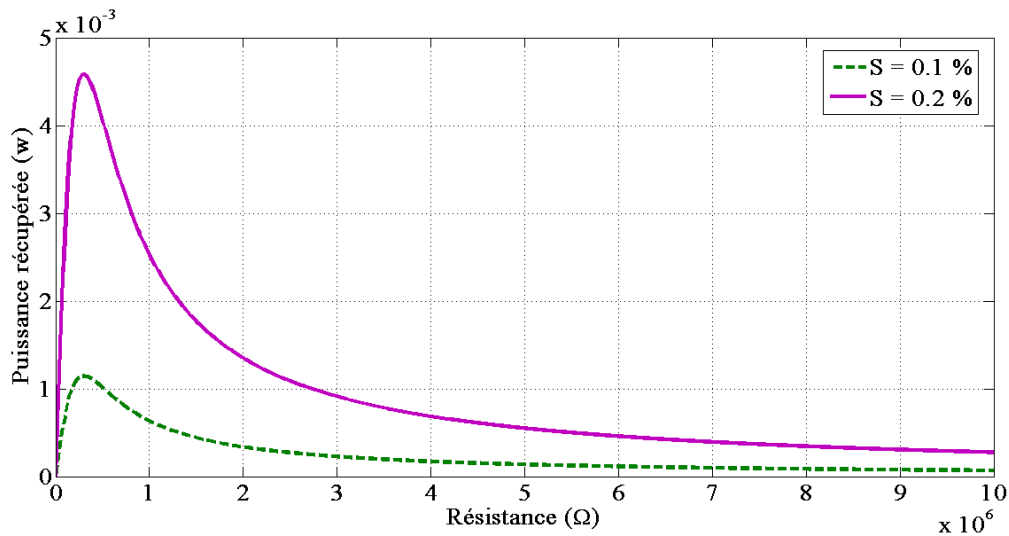


Figure II. 12: la puissance récupérée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs maximums de la puissance récupérée (1.145 mW, 4.581 mW) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%,) et résistance optimale (0.29 M Ω , 0.29 M Ω).

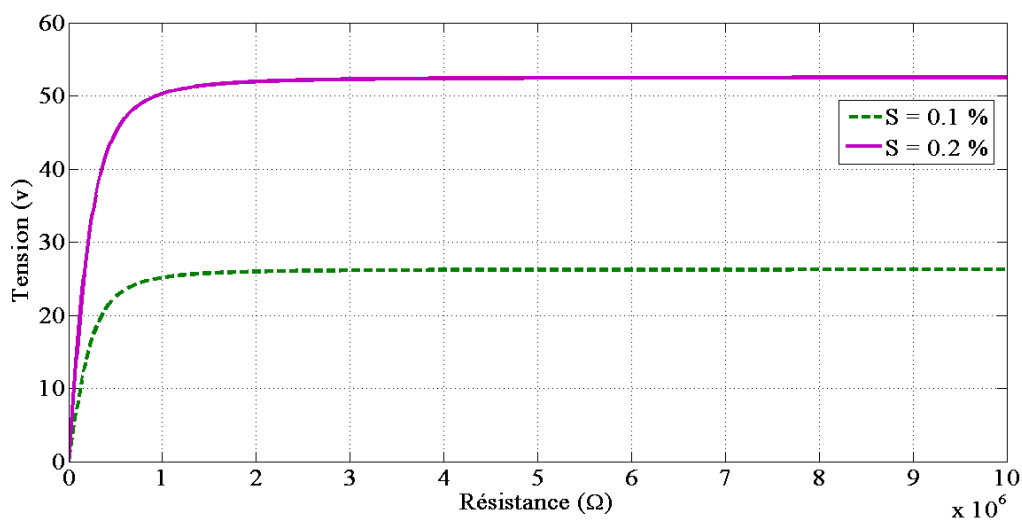


Figure II. 13: la tension générée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs de la tension générée (26.24 V, 52.48 V) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%).

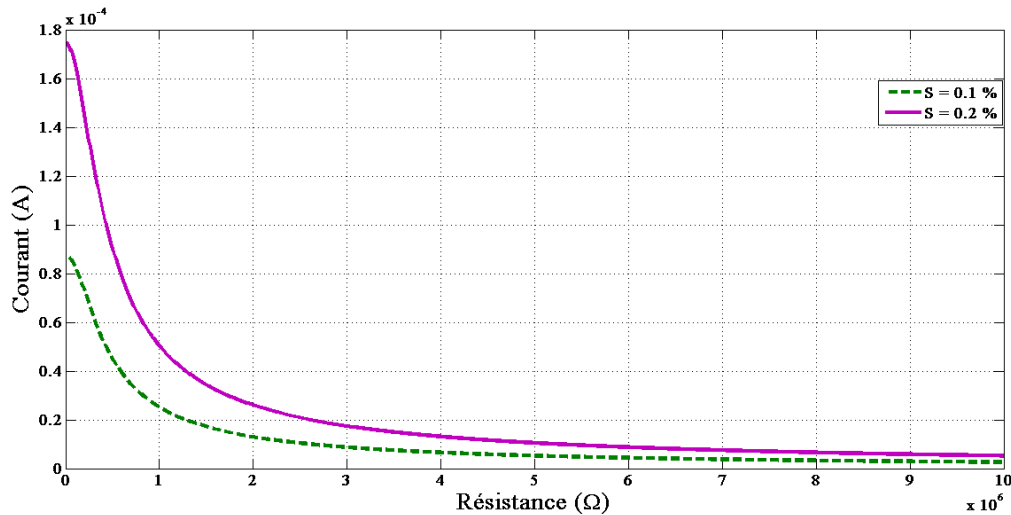


Figure II. 14: Le courant générée par le film PVDF selon le mode 31 avec deux valeurs de déformation ($S=0.1\%$, $S=0.2\%$)

Cette figure illustre les valeurs du courant généré (62.84 μ A, 125.7 μ A) respectivement pour chaque déformation (0.1%, 0.2%) %, et résistance optimale (0.29 M Ω , 0.29 M Ω).

L'effet de la déformation c'est le même pour le mode 31, la puissance récupérée, la tension et le courant généré sont proportionnelle avec la déformation. Donc ce mode de déformation joue un rôle important pour amplifier la puissance récupérée.

II.2.8.3 Comparaison entre les modes de déformation 33 et 31

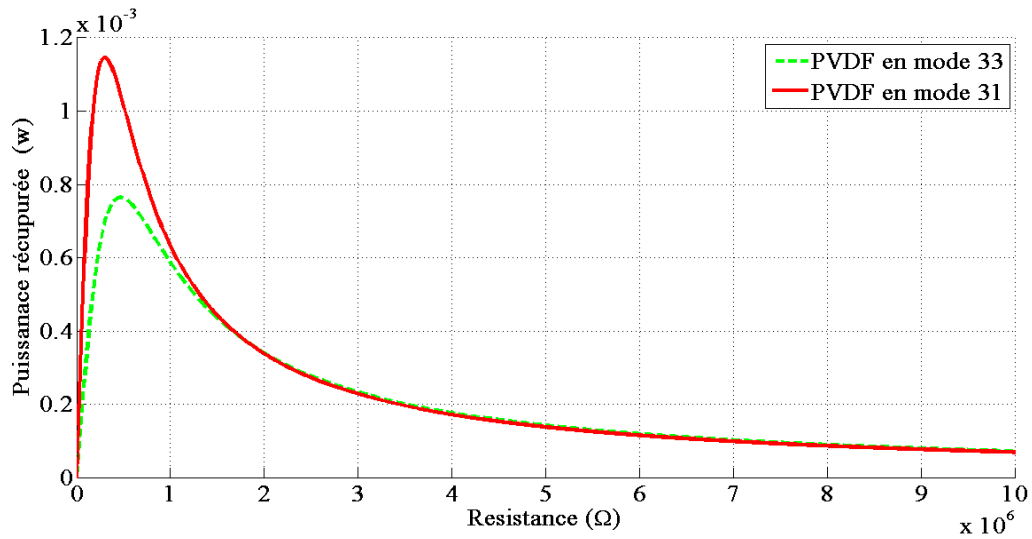


Figure II. 15: la puissance récupérée par le film PVDF selon les modes 31 et 33

Avec une fréquence $F=6$ Hz et une déformation $S=0.1$ % on a obtenu les résultats suivantes :

Mode 33 : puissance 0.764 mW résistance optimale 0.47 MΩ

Mode 31 : puissance 1.145 mW résistance optimale 0.31 MΩ

Type de matériaux Piézoélectriques	Module de Young (GPa)	Permittivité relative ϵ_r	Déformation (%)	Densité de puissance récupérée (w/cm^3)
PVDF 33	2	10	0.1	0.03056
PVDF 31	3	12	0.1	0.04580

Tableau II. 7 : la densité de puissance récupérée par le film PVDF selon les modes 31 et 33

II.3 Les polymères électrostrictifs

II.3.1 Généralité

Les premiers à étudier les polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie étaient Liu et al. L'utilisation de ces polymères pour la récupération d'énergie est un domaine en pleine expansion, qui a un grand potentiel du point de vue densité d'énergie. De manière générale, un micro générateur à base d'un polymère électrostrictif est constitué d'un dispositif mécanique capable de transmettre une sollicitation mécanique à un film électrostrictif.

L'électrostriction est une propriété de certains matériaux ferroélectriques qui développent une dépendance quadratique entre la déformée S et la polarisation P sous une contrainte T constante.

Le comportement électrostrictif existe dans les diélectriques (polymères ou céramiques) non symétriques (appelé 1^{er} forme) ou se retrouve au sein de polymères électrostrictifs à changement de phase (appelé 2nd forme). La seconde forme apparaît pour les dérivés du PVDF tel le co-polymère P(VDF-TrFE) ou le terpolymère P(VDF-TrFE-CTFE), polymères semi-cristallin dont les performances sont fonction des changements de phases (ferroélectrique - para électrique). [30]

Comme pour les matériaux piézoélectriques, les matériaux électrostrictifs peuvent se présenter sous différentes formes,. Ici seuls les polymères seront étudiés, car les céramiques sont trop rigides. Les principaux polymères électrostrictifs utilisés actuellement sont des dérivés du PVDF.

Le premier type de polymère largement utilisé est le P(VDF-TrFE) qui est un copolymère dérivé du PVDF. Pour obtenir de bon couplage électromécanique, il faut l'utiliser près de la transition ferroélectrique-paraélectrique [37]. Or, cette transition s'opère à une température supérieure à la température ambiante, et une hystérésis électrique large y est observée (Figure II.17). Pour remédier à ce problème d'hystérésis large, donc de pertes électriques, le P(VDFTrFE) est soumis à un rayonnement d'électrons d'une énergie de quelque MeV. La dose d'irradiation est généralement autour de 100 Mrad Ce dernier détruit les domaines polarisés macroscopiques pour donner des régions paraélectriques, ce qui permet de réduire l'hystérésis (Figure II.17).

Le second polymère électrostrictif est un ter-polymère (P(VDF_x-TrFE_{1-x}-CTFE_y)). Il n'a pas besoin d'être irradié. En effet, l'introduction d'un troisième composant CTFE ou CTE permet de faire du polymère un « relaxor-ferroelectric » soit un polymère électrostrictif aux

performances améliorées (grandes déformations, faible perte). Toutefois, le procédé de fabrication est délicat, mais ces caractéristiques sont bien meilleures que pour les copolymères. C'est pour cela que le calcul de la densité d'énergie est réalisé pour un matériau de type ter-polymère ou la densité obtenue est de 0.3J/cm³, pour un champ électrique maximal de 150 MV/m. Cette valeur est importante, en effet il est possible de récupérer dix fois plus d'énergie que pour un matériau électrostrictif.

Par contre, ils nécessitent la réalisation de cycle avec une tension de polarisation plus complexe à mettre en place.

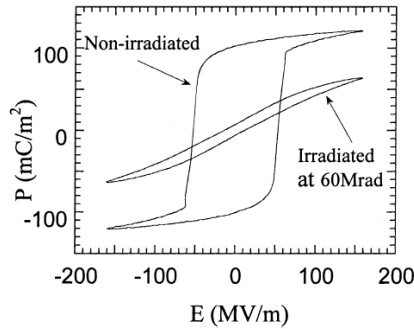


Figure II. 17: Cycles d'hystérésis pour un polymère irradié et non irradié [37].

II.3.2 Les équations de l'électrostriction

Comme pour la piézoélectricité, les équations intrinsèques de l'électrostriction s'obtiennent par dérivation d'un potentiel énergétique préalablement choisi. Ainsi à température constante et sans phénomène d'hystérésis, les équations constitutives de l'électrostriction sont données par le système d'équation (II.3.1) [38].

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^E \cdot T_{ij} + M_{mnij} \cdot E_n \cdot E_m \\ D_m &= \epsilon_{mn} \cdot E_n + 2 \cdot M_{mnij} \cdot E_n \cdot ij \end{aligned} \tag{II.3.1}$$

Avec

s_{ijkl}^E : Souplesse élastique a champ électrique constant.

M_{mnij} : Coefficient électrostriction.

D_i : Déplacement électrique.

Toutefois sous fort champ électrique, la polarisation P peut être saturée en fonction du champ électrique. Il est alors plus correct d'utiliser le système (II.3.2).

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^P \cdot T_{kl} + Q_{ijmn} \cdot P_m \cdot P_n \\ E_m &= \varepsilon_{mn}^T \cdot P_n + 2 \cdot Q_{klmn} \cdot T_{kl} \cdot P_n \end{aligned} \quad (II.3.2)$$

Toutefois, sous un champ électrique fort ($E > E_0$, valeur seuil), la polarisation P est saturée à une valeur P_s (Figure II.17).

II.3.3 Principe de récupération d'énergie par effet électrostrictif

Pour convertir de l'énergie mécanique en électricité, le polymère doit subir des cycles énergétiques. En d'autres termes, le polymère « ne doit pas suivre le même chemin » lors de son étirement (chemin A) et lors de sa contraction (chemin B), chemins représentés sur la figure II.18.

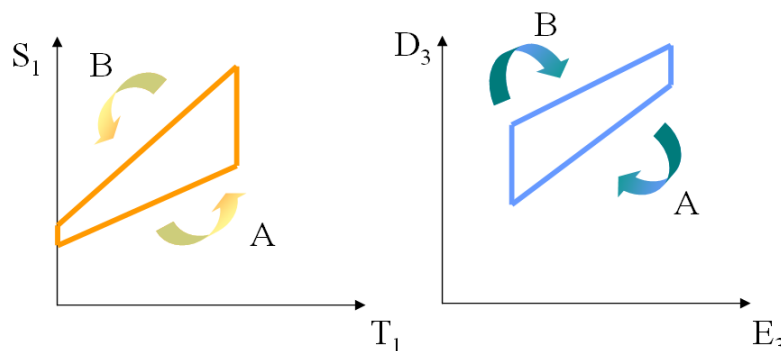


Figure II. 18: Cycles à réaliser avec un matériau électrostrictif pour la récupération d'énergie [38]

Actuellement aucune autre méthode n'a été proposée pour récupérer de l'énergie à l'aide de polymère électroactif. Mais des variantes existent comme cela va être démontré dans les prochains paragraphes.

L'énergie électrique récupérée est maximale pour une combinaison particulière de conditions aux limites lors de la réalisation de ce cycle (Figure II.18). Ainsi, à partir des équations intrinsèques de l'électrostriction (II.3.1) (II.3.2), le calcul des variations mécaniques et électriques sur les chemins A et B est possible, ce qui permet pour des conditions aux limites adéquates de calculer l'énergie électrique récupérée.

Pour déterminer les conditions aux limites, il faut utiliser le coefficient de couplage k dont la définition est calée sur celle des matériaux piézoélectrique, elle est rappelée en (II.3.3).

$$k = \frac{W_1}{W_1 + W_2} \quad (\text{II.3.3})$$

Avec W_1 l'énergie récupérée, W_2 l'énergie non convertie alors la somme de W_1 et W_2 est l'énergie totale apportée au système (équation II.3.3).

Outre une comparaison possible entre les différents matériaux, ce coefficient permet surtout de comparer les différentes conditions aux limites. Plus celui-ci est élevé, plus l'énergie récupérée est importante. A partir des travaux de Liu et al, il est possible de déterminer le facteur de couplage optimal. La figure II.19 illustre le cycle ayant le coefficient de couplage le plus important. Les auteurs l'ont nommé cycle à charge constante.

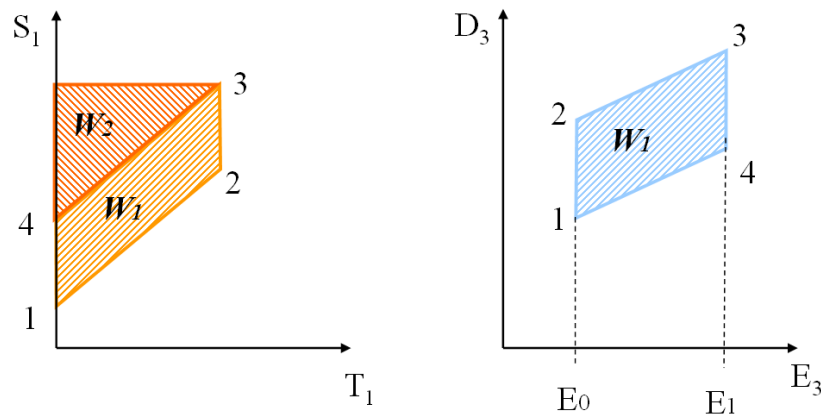


Figure II. 19: Cycle de récupération d'énergie sous champ électrique constant lors des phases d'étirements et de compressions [37].

Concrètement, le polymère est au repos en 1 (contrainte T nulle, déformation S constante). Sous un champ électrique constant E_0 , le polymère est étiré mécaniquement : phase 1 à 2. Puis sous cette contrainte maximale, le champ électrique passe d'une valeur E_0 à une valeur E_1 plus importante : phase 2 à 3. Sous ce champ électrique E_1 constant, on supprime la contrainte imposée, le polymère se relaxe et retourne progressivement à un état sans contrainte ($T=0$) : phase 3 à 4. Enfin, le champ électrique revient à la valeur E_0 et le polymère peut retrouver ces dimensions initiales : phase 4 à 1.

Avec le cycle décrit sur la figure II.19, l'expression du coefficient de couplage k , à partir de l'équation II.3.3, est donné par l'équation 3.4.

$$k = \sqrt{\frac{M_{31}(E_1^2 - E_0^2)}{\frac{1}{2}s_1T_{1_max} + M(E_1^2 - E_0^2)}} \quad (II.3.4)$$

Avec

M : Coefficient d'électrostriction

T : Contrainte

S : Déformée

E_1 et E_0 : Champs électriques à imposer

Pour optimiser ce coefficient k , et donc l'énergie récupérée, on choisit le champ électrique maximal pour le champ électrique E_1 c'est-à-dire le champ de claquage, et le champ électrique nul pour E_0 . Une portion du cycle générateur s'effectuera donc sous haut champ électrique, le phénomène de polarisation de saturation est donc à prendre en compte, Pour cela, on utilise le second couple d'équation (équation II.3.2). [37]

Le Tableau II.8 donne les valeurs obtenues du coefficient k pour deux types de matériaux couramment utilisés.

Type	ϵ_{33}	M_{31} (m^2/V^2)	s_{11} (Pa) ⁻¹	E_{max} ($V/\mu m$)	T_{max} (MPa)	W_{1_max} (J/cm^3)	k
P(VDF-TrFE-CFE)	$50.\epsilon_0$	2.10^{-18}	$2.5.10^{-9}$	150	20	0.9	0.483
Polyuréthane	$7.5.\epsilon_0$	$3.6.10^{-18}$	6.10^{-8}	175	2	0.221	0.807

Tableau II. 8: Maximum d'énergie récupérable pour deux types de polymères électrostrictifs

II.3.4 Principe de générateur électrostrictif

Le processus d'extraction simplifié de l'énergie mécanique d'une structure vibrante est schématisé Figure II.20. Une perturbation extérieure (choc, appui, vibration...) impose un certain état de contrainte et de déplacement sur la structure, générant des vibrations. Cet état dépend directement des caractéristiques intrinsèques de la source perturbatrice et de la structure. Une quantité d'énergie E_i est alors injectée. Une part de cette énergie (E_d) est

dissipée par pertes mécaniques intrinsèques. Une autre part de cette énergie (E_e) va être convertie par les éléments actifs par effet électrostrictif et de ce fait, extraite de la structure. Cette énergie électrique (E_e) permet ainsi d'alimenter un consommateur électrique quelconque en lui fournissant la tension et le courant requis. La plupart des circuits intégrés fonctionnant grâce à une alimentation électrique continue, il est nécessaire d'insérer un étage de conversion de la tension variable de l'élément électrostrictif en tension continue et éventuellement un élément de stockage (condensateur, accumulateur).

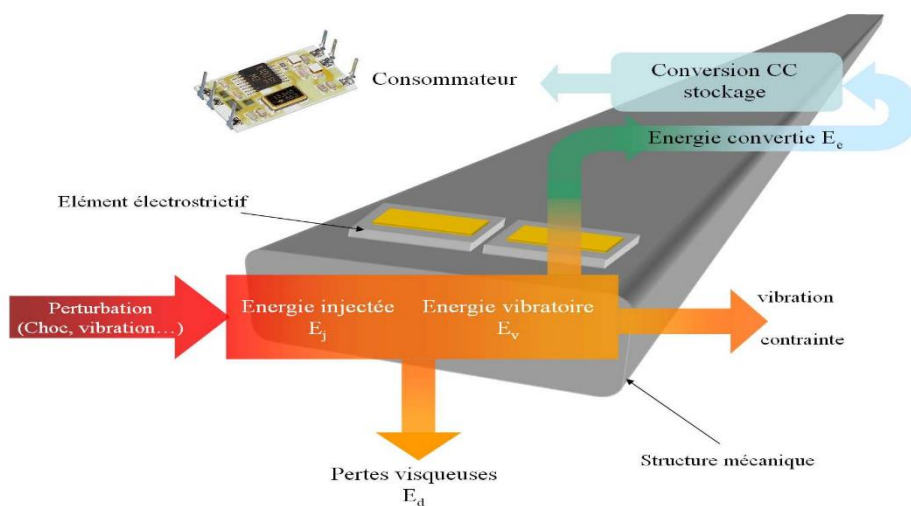


Figure II. 20: Processus simplifié d'extraction d'énergie d'une structure vibrante par éléments électrostrictif [37]

L'électrostriction est généralement définie comme un couplage quadratique entre la déformation et la polarisation, Ici, un polymère électrostrictif a été soumis à un champ électrique de polarisation continue. Cela était nécessaire, afin d'obtenir un comportement pseudo-piézo-électrique du polymère qui n'était pas piézoélectrique. Les Figures II.21 et II.22 illustrent ces deux types de générateurs. Il s'agit dans les deux cas de convertir l'énergie vibratoire de la structure vibrante représentée en gris.

II.3.4.1 Générateur à couplage direct

Les éléments actifs sont couplés à la structure vibrante. Ils convertissent alors directement les perturbations mécaniques présentes dans la structure en énergie électrique. Ce type de générateur (Figure II.21) est particulièrement adapté aux structures se déformant en flexion. L'énergie récupérée dépend dans ce cas directement du champ de contrainte et de déformation imposés par la structure sur l'élément actif.

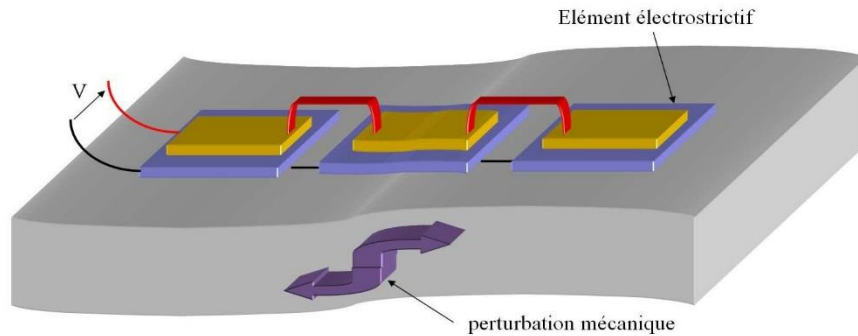


Figure II. 21 : types de générateur électrostrictif à couplage direct

II.3.4.2 Générateur à couplage indirect

Les éléments actifs sont couplés à un oscillateur mécanique. Ils convertissent alors sous forme d'énergie électrique les vibrations de cet oscillateur. Ces oscillations sont induites par couplage mécanique à la structure.

Ce type de générateur (Figure II.22) convient aux structures vibrantes sans déformations locales. L'énergie récupérée dépend alors dans ce cas de l'accélération induite par le déplacement de corps rigide de la structure.

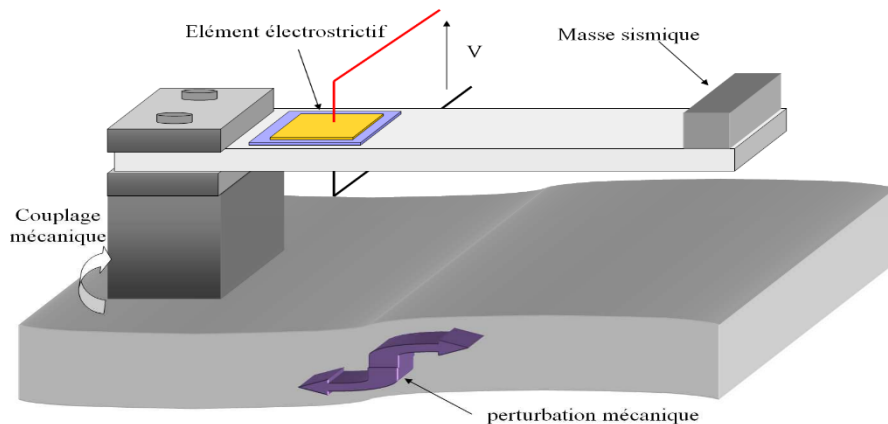


Figure II. 22 : types de générateur électrostrictif à couplage indirect par l'intermédiaire d'un oscillateur mécanique

Pour résumer, dans le cas (b) l'énergie de la structure est transmise au système oscillant constitué par une poutre sur laquelle sont collés des inserts électrostrictifs assurant la conversion mécano-électrique et éventuellement une masse sismique permettant d'ajuster la fréquence de résonance. Pour le cas (a), les inserts électrostrictifs sont directement collés sur la structure. La différence théorique entre ces deux systèmes n'est pas franche, puisque le cas (a) peut être vu comme un agrandissement du cas (b) si la structure sur laquelle sont collés les inserts présente des résonances mécaniques.

D'un point de vue pratique cependant, le cas (a) montre que l'on peut réaliser simplement un micro-générateur susceptible d'alimenter un capteur en collant des éléments piézoélectriques sur une structure vibrante. Ceci constitue un avantage incontestable par rapport aux générateurs électromagnétiques ou électrostatiques qui sont nécessairement constitués de pièces mécaniques ayant des mouvements relatifs (déplacement d'un aimant par rapport à une bobine pour les générateurs électromagnétiques ou modification de la distance entre les électrodes pour les générateurs électrostatiques). Le tableau II.9 synthétise les avantages et inconvénients de chaque structure.

	<i>Couplage direct</i>	<i>Couplage indirect</i>
Avantages	+ Masse et encombrement réduit + Large bande	+ Coefficient de couplage important + Maintenance aisée (démontable)
Inconvénients	- Maintenance difficile (intégré dans la structure) - Sensible aux évolutions des conditions aux limites	- Bande passante réduite - Sensible à la direction de l'accélération - Masse ramenée non négligeable

Tableau II. 9 : Avantages et inconvénients des différents types de conversions

Le choix entre ces 2 types de générateurs est donc dicté avant tout par le type de structure hôte, par les déformations qu'elle subit et par les spécifications du cahier des charges, notamment en terme d'installation et de maintenance.

II.3.5 Modélisation et analyse des capacités des polymères électrostrictifs

Cette section vise à exposer un calcul théorique de la puissance de sortie maximale qui peut être obtenue à partir de matériaux électrostrictifs, elle est consacrée à la mise en place d'un modèle analytique pour le fonctionnement en « piezoactif » de nos polymères.

II.3.5.1 Modélisation du courant de court-circuit

L'approche à la modélisation du courant peut être décrite par l'équation constitutive d'un matériau électrostrictif ont été rappelés en équation (II.3.5) [38] :

$$\begin{cases} S_1 = M_{31} \cdot E_3^2 + s_{11}^E \cdot T_1 \\ D_3 = \varepsilon_{33} \cdot E_3 + 2 \cdot M_{31} \cdot E_3 \cdot T_1 \end{cases} \quad (II.3.5)$$

Il est possible d'exprimer la contrainte T_1 en fonction de la déformation S_1 :

$$T_1 = \frac{1}{s_{11}^E} (S_1 - M_{31} \cdot E_3^2) \quad (II.3.6)$$

D'où l'expression du déplacement électrique D_3 :

$$D_3 = E_3 \left(\epsilon_{33} + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} (S_1 - M_{31} \cdot E_3^2) \right) \quad (II.3.7)$$

Le courant s'exprime alors sous la forme :

$$I = A \frac{\partial D_3}{\partial t}$$

Où A représenté la surface active de polymère.

$$I = A \left[\frac{\partial E_3}{\partial t} \left(\epsilon_{33} + \frac{2M_{31} \cdot S_1}{s_{11}^E} - \frac{6M_{31}^2 \cdot E_3^2}{s_{11}^E} \right) + \frac{2M_{31} \cdot E_3}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad (II.3.8)$$

Pour fonctionner en pseudo-piézoélectrique un champ électrique statique E_{dc} est nécessaire, la dérivée du champ électrique par rapport au temps $\frac{\partial E}{\partial t}$ est donc nulle comme, E_{dc} est égale à une constante. L'expression (II.3.8) peut donc se simplifier à l'expression (II.3.9) :

$$I_{ac} = A \frac{\partial D_3}{\partial t} = A \frac{2M_{31} \cdot E_{dc}}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \quad (II.3.9)$$

L'expression simplifiée du courant généré est donné par :

$$I_{ac} = A \cdot 2M_{31} \cdot Y \cdot E_{dc} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \quad \text{Avec } Y \text{ représente le module d'Young } Y = \frac{1}{s_{11}^E}$$

La relation (II.3.9) exprime une dépendance linéaire du courant de court-circuit, avec le champ électrique statique et la dérivée temporelle de déformation. Cette formule est analogue à celle obtenue dans le cas de la piézoélectricité :

$$I_{cc} = A \frac{\partial D_3}{\partial t} = A \frac{d_{31}}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t}$$

Le champ statique permet donc de créer un état dit polarisé. Plus le champ statique sera important, plus le pseudo coefficient piézoélectrique sera grand. La figure II.23 illustre les deux configurations de courant de court-circuit dans le cas de la piézoélectricité (figure II.23.a) et dans le cas de l'électrostriction en mode piezoactif (figure II.23.B).

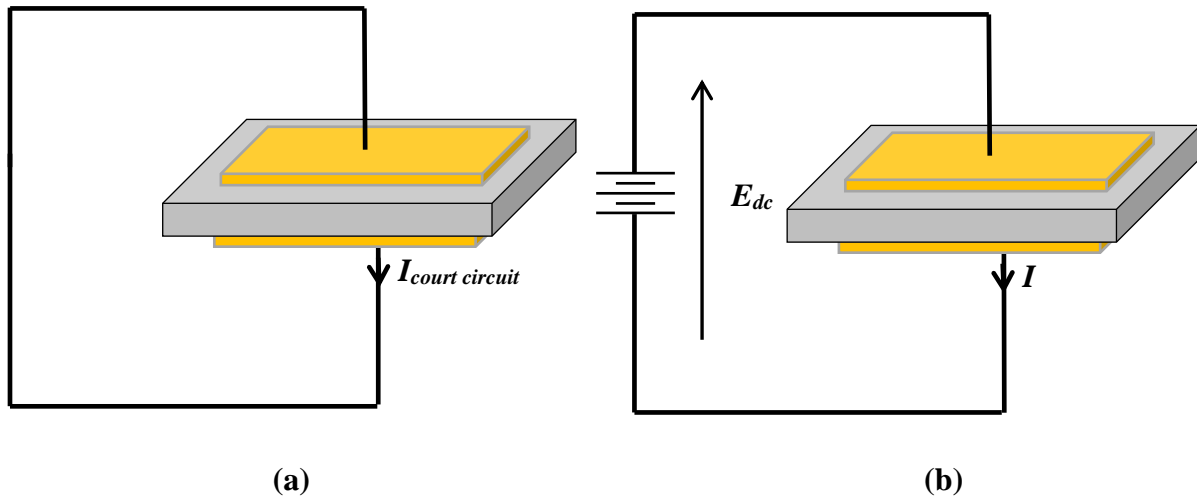


Figure II. 23: Définition du courant de court-circuit

(a) Cas de la piézoélectricité

(b) Cas en pseudo-piézo pour un matériau électrostrictif

II.3.5.2 Modèle électromécanique

Les équations de l'électrostriction couplent généralement la déformation et le déplacement électrique avec la contrainte et le champ électrique (équation II.3.5). Il est en général plus facile d'exprimer ces expressions sous forme du courant I et de la force F liée à l'élongation du matériau u et à la tension V (équation II.3.10).

$$\begin{cases} F = K.u - \beta.V^2 \\ I = \alpha.E_{dc} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - C_p \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \end{cases} \quad (II.3.10)$$

Ce système d'équation traduit les trois comportements d'un élément électrostrictif :

- Un comportement purement élastique, traduit par la relation (II.3.11) et graphiquement par la figure II.24.a.

$$F_{élastique} = K.u \quad (II.3.11)$$

- Un comportement purement diélectrique, traduit par (II.3.12). Idiélectrique est le courant associé au déplacement de charge dans le matériau (figure II.24.b)

$$I_{diélectrique} = C_p \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad (II.3.12)$$

- Et enfin un comportement lié à la conversion électromécanique, traduit par les relations du système (II.3.13) (figure II.24.c).

$$\begin{cases} F_{\text{électrique}} = \beta.V^2 \\ I_{\text{mécanique}} = \alpha.E_{dc} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (\text{II.3.13})$$

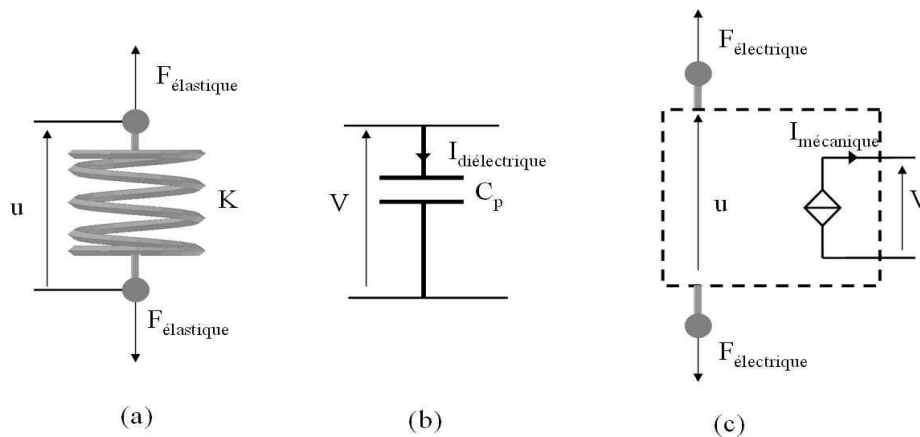


Figure II. 24: Les différents comportements d'un élément électrostrictif
 (a) Comportement purement élastique
 (b) Comportement purement diélectrique
 (c) Comportement lié à la conversion électromécanique

Dans le cas présent, seul l'équation faisant intervenir le courant nous intéresse. Le coefficient α qui traduit la conversion électromécanique est proportionnel au champ électrique statique appliqué. Sans ce champ statique aucune conversion mécano-électrique n'est possible comme il a été démontré lors de la modélisation du courant de court-circuit.

II.3.5.3 Modélisation en récupération d'énergie en conversion AC

Le principe de base de la conversion en mode pseudo piézoélectrique ayant été énoncé et modélisé au court des deux derniers paragraphes. Le but de celui-ci consiste à modéliser la puissance récupérée au borne d'un charge purement résistive comme l'illustre la figure II.25.

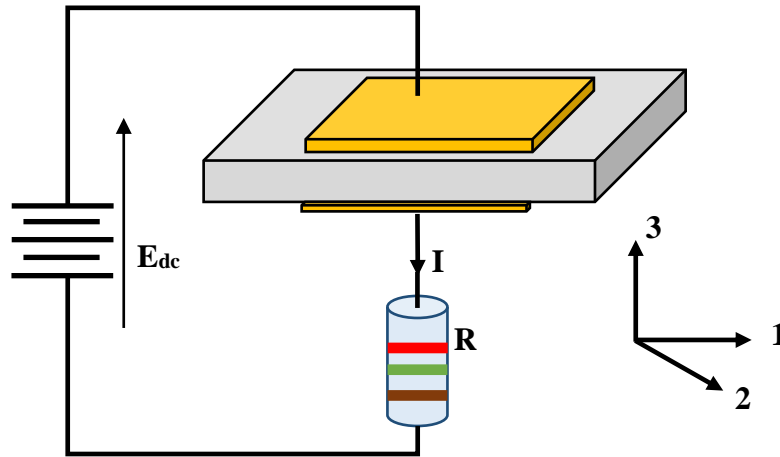


Figure II. 25: Principe de la caractérisation de la puissance récupérée

Afin de démontrer la validité du système d'équation (II.3.10) deux méthodes différentes seront utilisées pour modéliser la puissance dissipée dans la charge résistive. La première se basant sur le système d'équation (II.3.5) et la seconde sur le système (II.3.10).

II.3.5.4 Modèle à partir des équations phénoménologiques

En prenant les axes de références de la figure II.25 et la modélisations du courant effectué à l'équation (II.3.8) le courant délivré dans le polymère dans le cas de sollicitation mécanique transversale s'exprime sous la forme :

$$I = A \frac{\partial D_3}{\partial t} = A \left[\frac{\partial E_3}{\partial t} \left(\varepsilon_{33}^T + \frac{2M_{31} \cdot S_1}{s_{11}^E} - \frac{6M_{31}^2 \cdot E_3^2}{s_{11}^E} \right) + \frac{2M_{31} \cdot E_3}{s_{11}^E} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad (II.3.14)$$

Le champ électrique total est alors égal à la somme d'un champ statique E_{dc} et un champ électrique alternatif E_{ac} aux bornes de la résistance R ; $E_3 = E_{dc} + E_{ac}$.

L'expression du courant devient alors :

$$I = A \frac{\partial D_3}{\partial t} = A \left[\left(\varepsilon_{33}^T - \frac{6M_{31}^2}{s_{11}^E} (E_{dc} + E_{ac})^2 + \frac{2M_{31} \cdot S_1}{s_{11}^E} \right) \cdot \frac{\partial E_{ac}}{\partial t} + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} (E_{dc} + E_{ac}) \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad (II.3.15)$$

Le champ électrique alternatif E_{ac} produit par la résistance, peut s'écrire sous la forme :

$$E_{ac} = -\frac{R \cdot I}{e} \quad (II.3.16)$$

Avec e l'épaisseur du film de polymère dans lequel le champ électrique est appliqué.

D'où la nouvelle expression du courant :

$$I = A \left[\frac{R}{e} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{6M_{31}^2}{s_{11}^E} \left(E_{dc} - \frac{R.I}{e} \right)^2 + \frac{2M_{31} \cdot S_1}{s_{11}^E} \right) \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} \left(E_{dc} - \frac{R.I}{e} \right) \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad (II.3.17)$$

Une charge purement résistive directement reliée à l'élément électrostrictif. Pour des fréquences supérieures à 20Hz des études antérieures ont démontré que, lorsque le mode de fonctionnement d'un polymère est pseudo-piézo-électrique, la composante de champ alternatif induit par la charge de la résistance peut être négligée par rapport au champ électrique de polarisation à courant continu ainsi que les rapports $\frac{M_{31}}{s_{11}^E}$, $\frac{M_{31}^2}{s_{11}^E}$ sont négligeables devant la permittivité ε_{33}^T .

En effet les valeurs des coefficients d'électrostriction sont de l'ordre de 10^{-18} d'où un facteur 200 entre la permittivité et les termes de l'expression (II.3.17) comme l'illustre le tableau II.10 où les différentes valeurs des coefficients sont disponibles.

Type	Q_{31} (m^4 / C^4)	M_{31} (m^4 / V^4)	Y (MPa)	ε_{33}^T (F/m)	$\frac{2M_{31}}{s_{11}^E} S_1$	$\frac{6M_{31}^2}{s_{11}^E} E_{dc}^2$
PU à 20 Hz	4000	2.10^{-18}	20	$3.5.10^{-11}$	$1.6.10^{-13}$	$1.2.10^{-14}$

Tableau II. 10: Les valeurs des différents paramètres pour une déformation mécanique imposée de 0.2% et un champ statique $E_{dc}=5V/\mu m$

L'expression simplifiée du courant devient donc :

$$I \approx A \left[\frac{R \cdot \varepsilon_{33}^T}{e} \cdot \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} (E_{dc}) \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad (II.3.18)$$

Dans le domaine fréquentiel le courant prend la forme :

$$I \approx \frac{\frac{2 \cdot M_{31}}{s_{11}^E} (E_{dc}) \cdot j \cdot \omega \cdot S_1 \cdot A}{1 + \frac{R \cdot \varepsilon_{33}^T}{e} \cdot j \cdot \omega \cdot A} \quad (II.3.19)$$

Avec ω la pulsation $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (II.3.20) et f la fréquence.

La puissance dissipée dans la résistance R s'exprime sous l'équation (II.3.21) :

$$P_{ac} = \frac{R}{2} . I . I^* = \frac{R}{2} \cdot \frac{\left(\frac{2M_{31}}{s_{11}^E} (E_{dc}) . 2 . \pi . f . S_M . A \right)^2}{1 + \left(\frac{R . \varepsilon_{33}^T}{e} . 2 . \pi . f . A \right)^2} \quad (II.3.21)$$

Avec S_M l'amplitude de la déformation.

La puissance est maximale pour une charge donnée, il est possible de déterminer cette valeur en dérivant par rapport à R l'équation (II.3.21).

$$\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = \frac{\left(1 + \left(\frac{R . \varepsilon_{33}^T}{e} . 2 . \pi . f . A \right)^2 \right) - 4 . R^2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{33}^T}{e} . 2 . \pi . f . A \right)^2}{2 \cdot \left(1 + \left(\frac{R . \varepsilon_{33}^T}{e} . 2 . \pi . f . A \right)^2 \right)^2} \quad (II.3.22)$$

$$\text{L'optimum est obtenu lorsque l'équation (II.3.22) est nulle } \frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = 0 \quad (II.3.23)$$

$$\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = 0 \Rightarrow R_{optimal_ac} = \frac{1}{A \cdot \frac{\varepsilon_{33}^T}{e} . 2 . \pi . f . A} \quad (II.3.24)$$

La puissance maximale pour la charge déterminée précédemment est égale à :

$$P_{max_ac} = \frac{2 . \pi . e}{\varepsilon_{33}^T} \left(\frac{M_{31}}{s_{11}^E} \right)^2 E_{dc}^2 . f . S_M^2 . A \quad (II.3.25)$$

II.3.5.5 Modèle à partir des équations en pseudo-piézoélectrique

Le courant en mode piezoactif peut s'exprimer sous la forme :

Dans le prochain paragraphe une étude à partir du système d'équation (II.3.10) sera entreprise afin de juger de sa validité.

$$I = \alpha . E_{dc} . \frac{\partial S_1}{\partial t} - C_p \frac{\partial V}{\partial t} \quad (II.3.26)$$

Avec ou $\alpha = \frac{2 . M_{31} . A}{s_{11}^E}$ A représenté la surface active de polymère.

Par rapport au système (II.3.10) la différence réside dans le changement de variable entre l'élongation u et déformation S_1 , afin de garder une certaine homogénéité de l'ensemble. Le

premier terme peut être identifié au courant de court-circuit exprimé par l'expression (II.3.9) [38].

Le schéma équivalent du système est donné en figure II.26. Ce modèle ne prend pas en compte les pertes électriques.

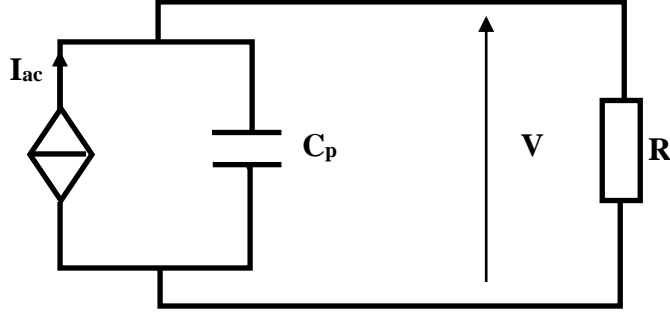


Figure II. 26: Schéma électrique équivalent en conversion AC

Afin de faciliter le développement théorique, le passage au domaine fréquentiel est utilisé. L'expression de la tension à la borne de la résistance R s'exprime sous la forme :

$$\tilde{V} = \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot R}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C_p} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tilde{S}_1 \quad (II.3.27)$$

D'où l'expression de la puissance dissipée dans la charge R :

$$P_{harvested_AC} = \frac{\tilde{V} \cdot \tilde{V}^*}{2 \cdot R} = \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 \cdot R}{1 + (R \cdot C_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2} \frac{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (II.3.28)$$

Comme pour le cas précédent, la puissance est optimale pour une charge donnée, et se démontre en dérivant l'expression de la puissance par rapport à R :

$$\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = \frac{1 - (R \cdot C_p \cdot \omega)^2}{(1 + (R \cdot C_p \cdot \omega)^2)^2} \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (II.3.29)$$

La charge adaptée est alors égale à :

$$R_{optimal_ac} = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \quad (II.3.30)$$

Soit une expression de la puissance maximale :

$$P_{max_ac} = \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2}{C_p} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot f) S_M^2}{4} \quad (II.3.31)$$

En remplaçant α par $\frac{2.M_{31}.A.E_{dc}}{s_{11}^E}$ et $C_p = \frac{\epsilon_{33}.A}{e}$, l'équation (II.3.31) vaut :

$$P_{\max_ac} = \frac{2.\pi.e}{\epsilon_{33}^T} \left(\frac{M_{31}}{s_{11}^E} \right)^2 . E_{dc}^2 . f . A . S_M^2 \quad (II.3.32)$$

Cette dernière expression est égale à celle démontrée à l'équation (II.3.32) et permet ainsi de valider les deux approches proposées. Des modèles développés, les paramètres intrinsèques du matériau à optimiser pour une amélioration de la conversion mécano-électrique ressortent par exemple le coefficient d'électrostriction.

II.3.6 La simulation d'un système électrostrictif

Le but de cette simulation consisterait à étudier la puissance récupérée pour différentes configurations et différents régimes de fonctionnement.

Afin de obtenu les résultats de simulation, il est nécessaire de connaître un certain nombre de constantes tel que le coefficient d'électrostriction M_{31}

$$P = \frac{\alpha^2 . E_{dc}^2 . R}{1 + (R.C_p . 2.\pi.f)^2} \frac{(2.\pi.f)^2 . S_M^2}{2}$$

Avec R la résistance de charge, A la surface, e l'épaisseur, ω la pulsation, Y le module de Young, ϵ_r la permittivité relative et la ϵ_0 permittivité du vide. S_M désigne l'amplitude des déformations longitudinales.

On utilise un échantillon de polymère avec une surface et une épaisseur respectivement de 5 cm^2 et $50\mu\text{m}$.

Le tableau II.11 résume les principales valeurs, pour les différents matériaux électrostrictifs utilisées.

Type	Y (MPa)	ϵ_r	$M_{31} (m^2/V^2)$
PU	21	4.8	$1.44.10^{-18}$
PU 1%C	24	8.1	$2.40.10^{-18}$
P(VDF-TrFE-CFE)	242	41	$1.45.10^{-18}$
P(VDF-TrFE-CFE) 1%C	261	72	$2.66.10^{-18}$

Tableau II. 11 : Les différentes grandeurs nécessaires à la simulation

Nous montrons dans *la Figure II. 27* et *Figure II. 28* La puissance récupérée utilisant différents types de polymères électrostrictifs (la variation de permittivité relative du polymère), pour une fréquence de $f = 15$ Hz avec un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ et une déformation de 0.5%

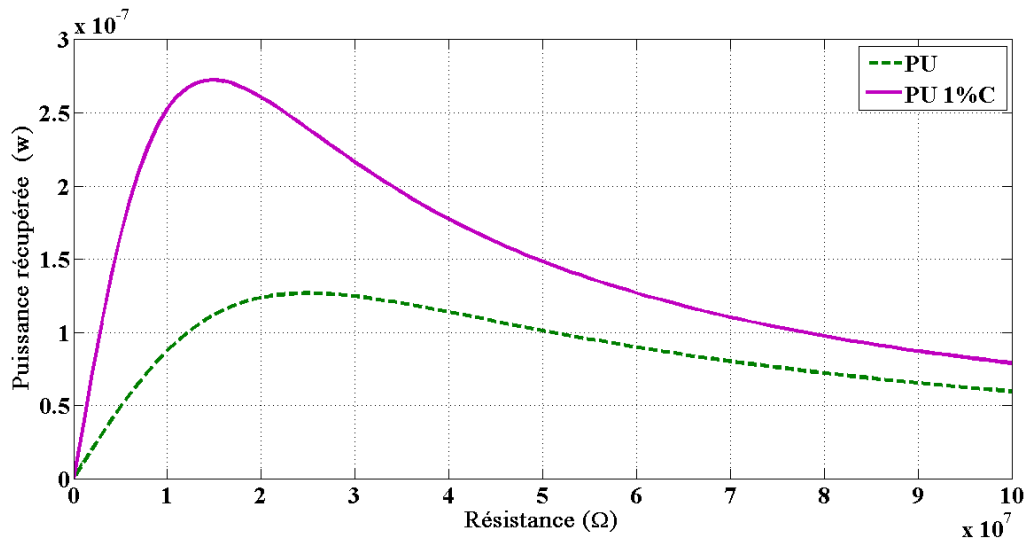


Figure II. 27: courbes théorique de puissance récupérée par PU et PU 1%C en fonction de la résistance avec un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et une déformation de 0.5%

La figure II.27 montre les résultats de simulation validant le modèle théorique concernant l'évaluation de la puissance récupérée par le polyuréthane **PU** et **PU 1%C**, en plus de la figure II.28 concernant la puissance récupérée obtenu avec **P(VDF-TrFE-CFE)** et **P(VDF-TrFE-CFE) 1%C**.

Ces résultat résumé dans le tableau II.12 montrent bien l'existence d'une résistance optimale de charge et la puissance maximum récupérée pour chaque matériaux, ainsi que la tension générée.

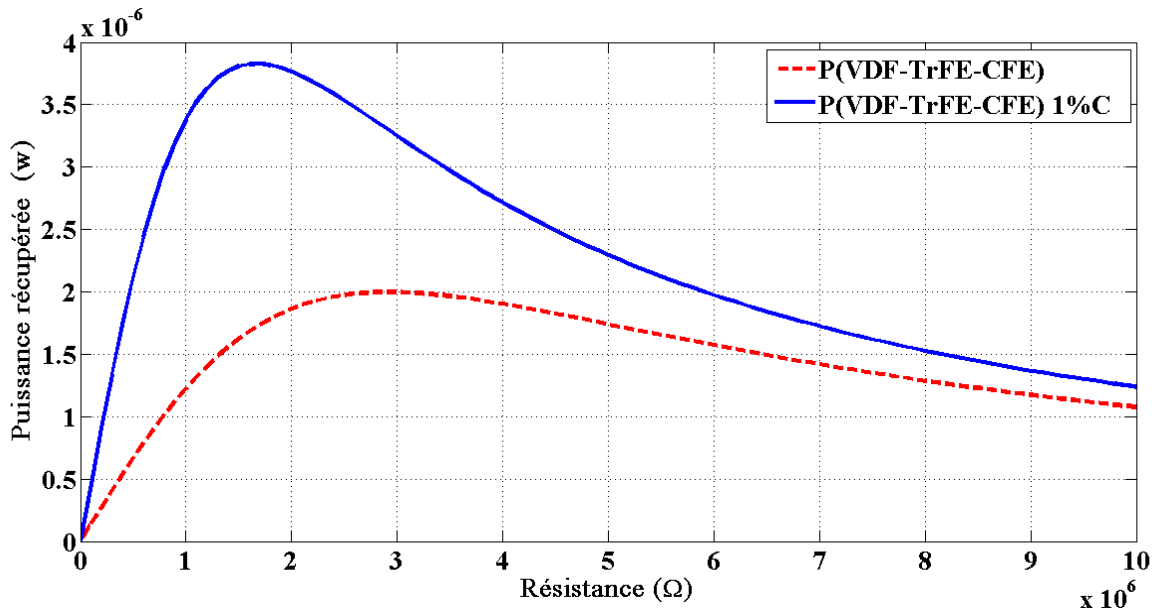


Figure II. 28: courbes théorique de puissance récupérée par P(VDF-TrFE-CFE) et P(VDF-TrFE-CFE) 1%C en fonction de la résistance avec un champ électrique de $10V/\mu m$ à 15 Hz et une déformation de 0.5%

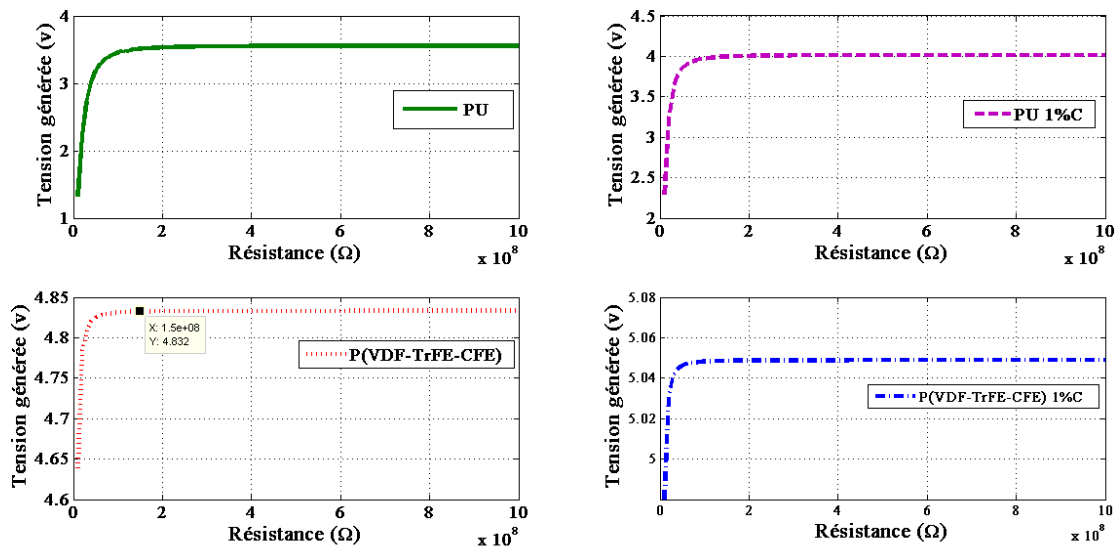


Figure II. 29: courbes théorique de tension récupérée par quatre échantillons de polymères électrostrictifs en fonction de la résistance avec un champ électrique de $10V/\mu m$ à 15 Hz et une déformation de 0.5%

Le tableau II.12 donne les puissances récupérées dans les différents matériaux, dans le cas où la résistance de charge est adaptée, et pour même valeur de déformation.

Type	Résistance optimal (MΩ)	Puissance récupérée maximale (μw)	La tension générée (v)
PU	26	0.126	3.53
PU 1%C	15	0.272	4.00
P(VDF-TrFE-CFE)	3	1.990	4.83
P(VDF-TrFE-CFE) 1%C	2	3.765	5.05

Tableau II. 12: les résultats obtenus par la simulation de quatre échantillons de polymères électrostrictifs

Les composites à base de noir de carbone et de la matrice de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C donne une meilleure puissance pour nos matériaux.

L'influence de l'incorporation de charge conductrice est clairement mise en évidence sur l'énergie pour un PU 1%C et pour P(VDF-TrFE-CFE) 1%C .

L'augmentation de la permittivité relative entraîne un accroissement de l'énergie récupérée, comme cela était ressorti des données sur les mesures effectuées au tableau.

L'étape suivante consisterait à étudier la puissance récupérée pour des amplitudes des déformations constantes, et deux fréquences (3 hertz et 6 hertz).

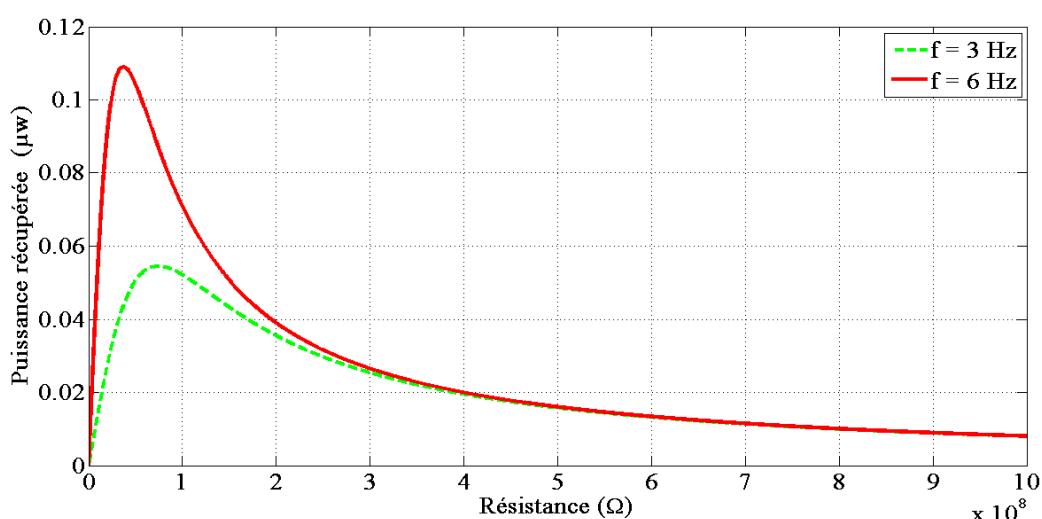


Figure II. 30: La puissance récupérée par PU 1%C sous différentes valeurs de fréquence (3 Hz et 6 Hz), avec une déformation constante $s = 0.5\%$

La figure II.30 montre bien que la puissance récupérée est de l'ordre de $0.054 \mu\text{W}$ pour un système fonctionnant avec une fréquence de $f = 3 \text{ Hz}$. Cependant, une valeur de $0.110 \mu\text{W}$ a été mesurée pour $f = 6 \text{ Hz}$.

La puissance récupérée, à une fréquence d'excitation mécanique 3 Hz était inférieure à celle utilisant une fréquence de 6 Hz .

Les résultats montrent bien que cette puissance était proportionnelle aux fréquences d'excitation mécanique. Cette différence entre les puissances électriques est due aux caractéristiques intrinsèques du matériau.

La figure II.31 est prise pour illustrer l'effet de la contrainte sur la puissance récupérée pour un champ électrique de $10 \text{ v}/\mu\text{m}$ et les différentes déformations $S=2\%$, $S=4\%$ et $S=6\%$ à fréquence de 6 Hz .

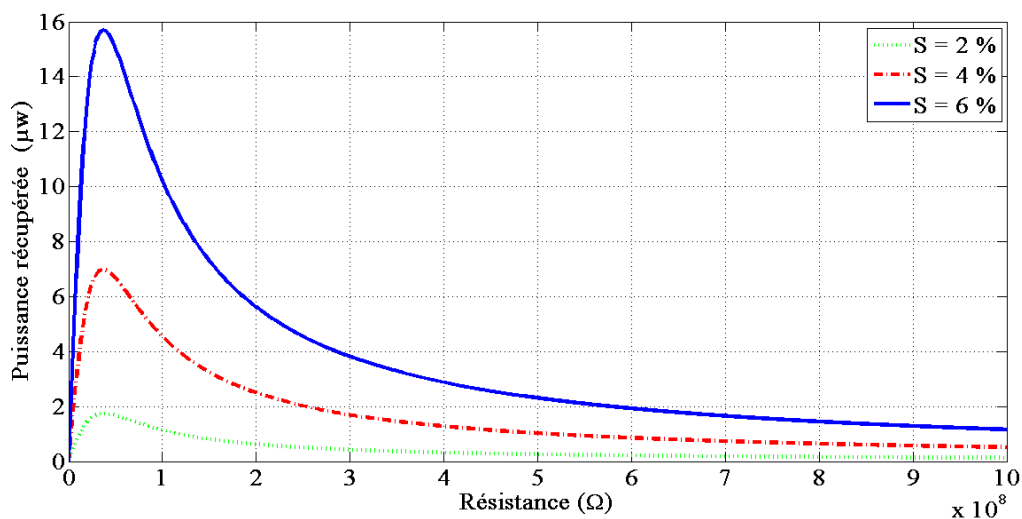


Figure II. 31: La puissance récupérée par PU 1%C avec différentes déformations 2%, 4%, 6% à $f=6 \text{ Hz}$

Cette figure montre qu'il existe un rapport linéaire entre la puissance récupérée et l'amplitude de déformation. Cette amplitude est un paramètre important pour augmenter l'énergie récupérée.

Elle montre aussi que la valeur maximum de la puissance récupérée est de l'ordre de ($1.74 \mu\text{W}$, $6.97 \mu\text{W}$, $15.7 \mu\text{W}$) respectivement pour une déformation (2%, 4%, 6%).

II.3.6.2 Interprétation des résultats

- Les propriétés électromécaniques des polymères électrostrictifs sont intrinsèquement régies par la permittivité du matériau, Ce paramètre contrôle la déformation électromécanique en mode actionneur mais aussi la densité de puissance récupérable en mode générateur. Une augmentation de la permittivité engendre une augmentation substantielle des performances. Parmi les méthodes pour augmenter les propriétés diélectriques des polymères est la dispersion de nano-objets (nano-charges) diélectriques dans une matrice polymère. L'inconvénient est la nécessité d'ajouter de nombreuses charges afin d'augmenter la permittivité diélectrique (ϵ_r). Ceci va malheureusement entraîner une forte augmentation du module d'Young qui se traduit par une perte de flexibilité.
- L'étude nous avons permis de connaître la variation de la puissance récupérée en fonction de la charge avec variation de la déformation et le maintien de la fréquence de fonctionnement constante et vice versa, dans le but de valider le modèle présenté.

Dans chaque essai, selon les résultats de la simulation, ce modèle a rendu possible de préciser l'influence des paramètres mécaniques (fréquence mécanique, amplitude de déformation) sur la performance globale de la conversion électromécanique pour les polymères d'électrostriction.

II.3.6.3 Etude comparative entre un système piézoélectrique et électrostrictif

Le but des travaux de recherche ayant pour objectif de récupérer de l'énergie mécanique, il est nécessaire que les matériaux utilisés possèdent une densité d'énergie importante. Afin d'étudier la faisabilité d'un portable autonome en terme d'énergie une étude comparative a été présentée par la suite entre ces deux systèmes électromécaniques, {piézoélectriques et électrostrictifs}, de point de vue de la densité de la puissance récupérée par les polymères électroactifs.

	Type de matériaux	Module de Young (MPa)	Permittivité relative ϵ_r	Déformation (%)	Densité de puissance récupérée (w/cm^3)
piézoélectricité	PVDF	2.10^3	10	0.1	0.06036
électrostriction	PU %1 C	21	8.1	45	0.15892
	P(VDF-TrFE-CFE) 1%C	261	72	10	0.12824

Tableau II. 13 : la densité de puissance récupérée par les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs

Pour synthétiser l'ensemble des informations, une comparaison entre les propriétés des polymères électrostrictifs et leur principaux concurrents les films de P(VDF) piézoélectrique est illustrer dans le tableau II.13. La nécessité d'une tension de polarisation pour pouvoir fonctionner les polymères électrostrictifs est paramètre important.

Par contre pour les polymères piézoélectriques les déformations maximales avant la transition plastique sont très faibles, de l'ordre de quelques pourcents <10%. Les polymères électrostrictifs généralement capables de supporter des déformations beaucoup plus grandes que celle des céramiques ou PVDF piézoélectriques la possibilité de les étirer de plus de 400%, Ils ont des facteurs de forme flexible et peuvent répondre à une plus large gamme de fréquences. Ce qui est un paramètre important pour récupérer de l'énergie sur les mouvements du corps humain ...

	<i>PVDF</i>		<i>Polymère électrostrictif</i>	
Mode	Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
<i>Actionneur</i>	+ faible champ électrique d'activation (1V/ μm)	- faible déformation (<1%) - processus de fabrication complexe (étape de polarisation)	+ grande déformation (<10%) + facile à fabriquer	- Champ électrique important (10V/ μm)
<i>Générateur</i>	+ matériau actif	déformation maximale faible (<10%) - densité d'énergie récupérée faible	+ Possibilité d'appliquer de très grande déformation (400%)	- matériau passif nécessite une tension de polarisation

Tableau II. 14 : étude comparative entre les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs

II.4 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la problématique de la génération d'énergie à l'aide de matériaux intelligents de type polymères électroactifs, dans le but d'alimenter des appareils électroniques portables. En première partie nous avons présenté les différents types de polymères, leurs principales caractéristiques électriques et leur domaine d'application. En deuxième partie nous avons présenté une analyse

Avec simulation cette analyse consiste à étudier les courbes de puissance récupérée la tension générée pour les deux modes d'excitation, afin d'analyser l'influence des particules sur la réponse électromécanique de ces polymères. Les effets de la déformation, de la fréquence, et pour deux différents types de polymères P (VDF-TrFE-CFE) et PU ont été étudiés



Chapitre III

Systeme d'amélioration de la puissance récupérée par polymère électroactif



Ce chapitre se veut un coup de projecteur sur les polymères électroactifs (EAP) en termes de matériaux, de leurs capacités et de leurs potentiels à former des structures intelligentes avec différente technique permet de améliorer la capacité de la récupération d'énergie vibratoire par des polymères piézoélectrique et électrostrictifs afin d'être une énergie utile et exploitable. Les techniques utilisées sont réalisées par des procédés à base de polymère et un système mécanique. On montre qu'il est théoriquement possible de remonter la valeur de la puissance générée. Nous démontrons les points forts des polymères électrostrictifs dans le domaine de la récupération d'énergie. Les modèles développés sont confrontés aux mesures expérimentales. On termine le chapitre par une étude d'un system de conversion AC-DC de l'énergie récupérée.

III.1 Introduction

Le marché des appareils électroniques portables a été en pleine expansion notamment pour les 10 dernières années, et leur la consommation d'énergie a diminué en parallèle [35].

Alors l'idée de la récupération d'une partie de l'énergie mécanique dissipée dans notre environnement suscite un regain d'intérêt : par exemple alimentations sont libres, non polluantes et durables, contrairement aux batteries actuellement utilisées.

La source d'énergie mécanique peut être le corps humain en mouvement, ou une structure vibrante. La fréquence de l'excitation mécanique dépend de la source : certains Hz pour des mouvements humains, à quelques centaines de kHz pour vibrations des machines. L'énergie mécanique est convertie en énergie électrique par un transducteur piézo-électrique qui peut être, électromagnétiques, ou électrostatique.

De nombreuses enquêtes ont été réalisées sur polymères électrostrictifs et piézoélectriques de prévoir leurs capacités de récupération d'énergie en augmentant la permittivité ou incorporant conducteurs nanoparticules.

D'autres études, telles que celles réalisée par M. Meddad et al [39], montrent l'effet de la fréquence de la déformation dans le courant produit par les polymères électrostrictifs afin d'augmenter la puissance récupérée.

L'objectif de la présente étude était de démontrer la faisabilité des changements dans la réponse du système piézoélectrique par une conception de prototype pour une augmentation de courant et de la récupération d'énergie par une fréquence doublé.

Ce dernier paramètre était un facteur important dans la conversion. Comme on a déjà montré, que le courant varie en fonction de plusieurs paramètres, et l'influence de la fréquence dans les deux structures.

III.2 Un prototype pour maximiser la récupération d'énergie en utilisant des polymères piézoélectrique

Deux structures du système mécanique, sont illustrées à la Figure III.1 et III.2. La structure dans la figure III.1 représente la configuration classique dans lequel l'excitation mécanique et l'étirement du polymère vibrent à la même fréquence f_m , le courant récupéré est liée à f_m . En supposant une déformation uniforme sur l'échantillon, La puissance récupérée sur la charge a été calculée en utilisant $P = RI^2$ où R est la charge électrique. [40]

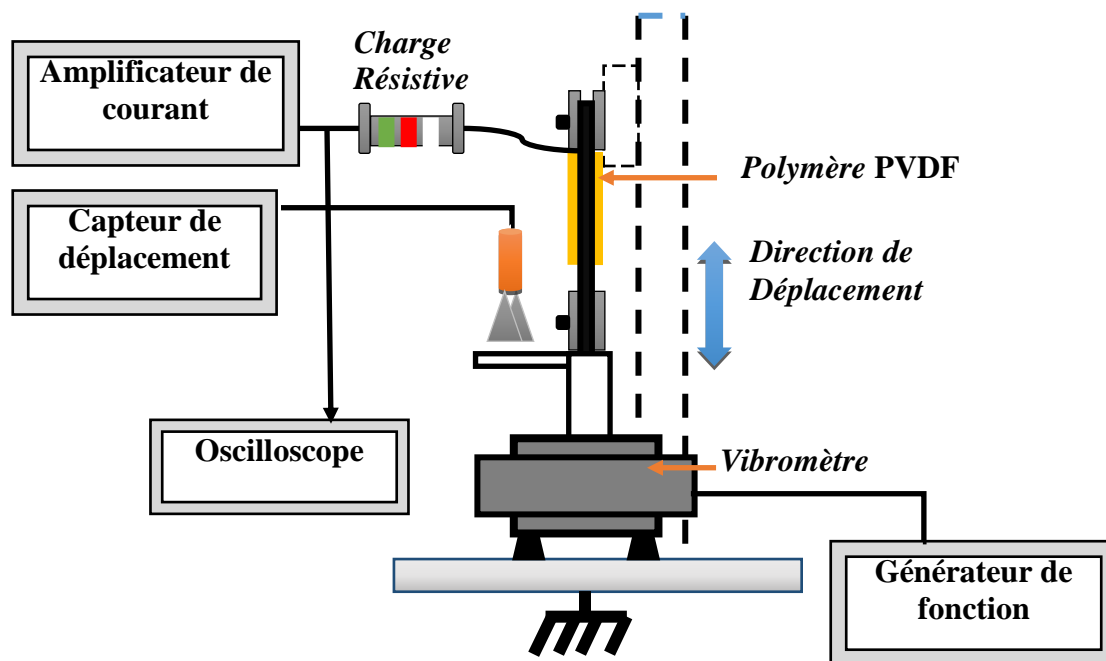


Figure III. 1: Schéma du circuit prototype de la structure classique

Pour la deuxième structure figure III.2, dans lequel l'excitation mécanique suite à un cycle donne lieu à deux cycles de déformation du polymère avec une fréquence de $2.f_m$. L'avantage principal de cette configuration est de doubler la fréquence et par conséquent amplifier la valeur de courant qui est proportionnelle avec la puissance récupéré.

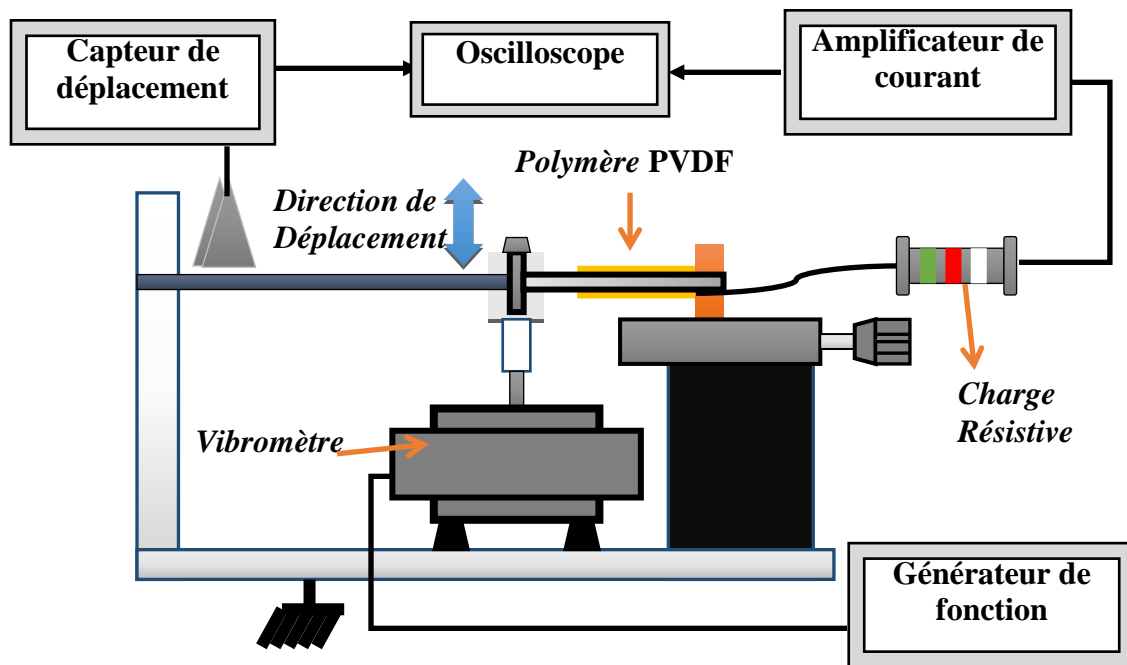


Figure III. 2: Schéma du circuit prototype de la structure proposée

Le système mécanique est représenté à la Figure III.3, Le film de polymère PVDF a été fixé à une extrémité au métal et l'autre extrémité est attachée à la partie fixe du support de base. Avec l'application d'un mécanisme d'excitation par un vibromètre, l'échantillon de polymère a été étiré dans les deux directions.

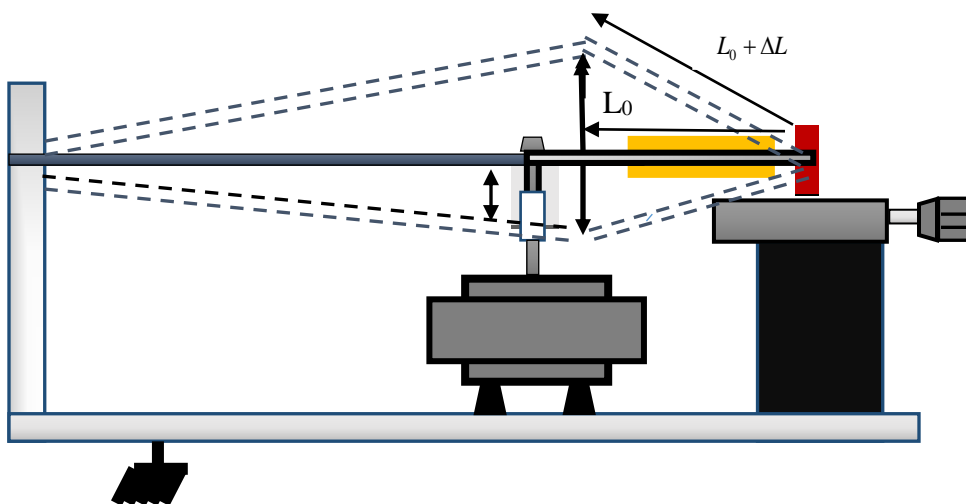


Figure III. 3 : la configuration du système mécanique proposé [39]

III.2.1 Modélisation

$$I = \frac{N.Z_e.F}{(R_L + Z_e)Z_m + (h_{33}/w)^2} \quad (\text{III.1})$$

A partir de l'équation (III.1) on voit bien que le courant généré dans la première configuration dépend de la fréquence fm, alors que dans le cas de la seconde configuration, où la poutre est excitée par un seul cycle d'excitation mécanique, le courant généré est proportionnel à 2*fm suite aux deux étirements.

Par conséquent, la puissance récupérée par la première configuration peut être calculée comme suit :

$$P = \frac{R_L.R_{conv}^2.F^2}{2|(Z_e + R_L)Z_m + (R_{conv})^2|^2}, \quad R_{conv} = \frac{h_{33}}{\omega} \cdot \omega = 2\pi.f$$

$$P = \frac{R_L.R_{conv}^2.F^2}{2|(Z_e + R_L)Z_m + \frac{(h_{33})^2}{\omega^2}|^2} \quad (\text{III.2})$$

Pour la deuxième structure proposée, la puissance récupérée est déterminée par L'équation :

$$P = \frac{R_L.R_{conv}^2.F^2}{2|(Z_e + R_L)Z_m + \frac{(h_{33})^2}{\omega^2}|^2} \text{ Avec } R_{conv} = \frac{h_{33}}{\omega} \cdot \omega = 4\pi.f$$

$$P = \frac{R_L.R_{conv}^2.F^2}{2|(Z_e + R_L)Z_m + \frac{(h_{33})^2}{(4.\pi.f)^2}|^2} \quad (\text{III.3})$$

À partir des équations (III.2) et (II.3) la puissance récupérée dans la seconde structure est deux fois plus grande que celle de la première structure.

III.2.2 Simulation

Les paramètres du polymère PVDF utilisé dans cette simulation sont donnés dans le tableau suivant :

	<i>Surface</i> <i>A (mm²)</i>	<i>Epaisseur</i> <i>e (μm)</i>	<i>Module de</i> <i>Young (GPa)</i>	<i>Permittivité</i> <i>ε_r</i>
<i>Polymère PVDF</i>	500	50	2	10

Tableau III. 1 : les paramètres de polymère PVDF piézoélectrique

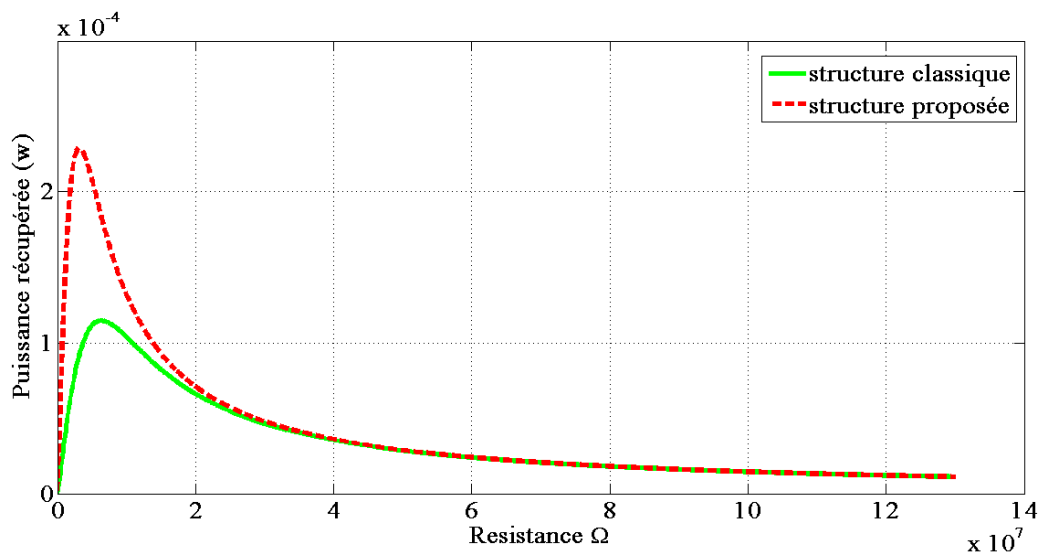


Figure III. 4 : la puissance récupérée par le film PVDF dans la structure classique et proposée.

Cette figure présente la puissance récupérée en fonction de la charge électrique pour une déformation de 0,1%. Ces données montrent l'existence d'une résistance de charge optimale de 6.3 MΩ qui correspond une puissance récupérée maximale de 0,114 mW dans la structure classique. D'autre part, pour la structure proposée, la puissance maximale atteint une valeur de 0,229 mW avec une résistance de charge optimale de 3.2 MΩ.

On montre dans les figures III.5 et III.6 la variation du courant générée et le déplacement en fonction de temps pour les deux structures. L'analyse de ce courant, montre bien que le courant de la structure proposé possède une fréquence doublé par rapport au déplacement. Ainsi on remarque une augmentation d'amplitude du courant. Par contre à la première structure le courant et le déplacement ont les mêmes phases.

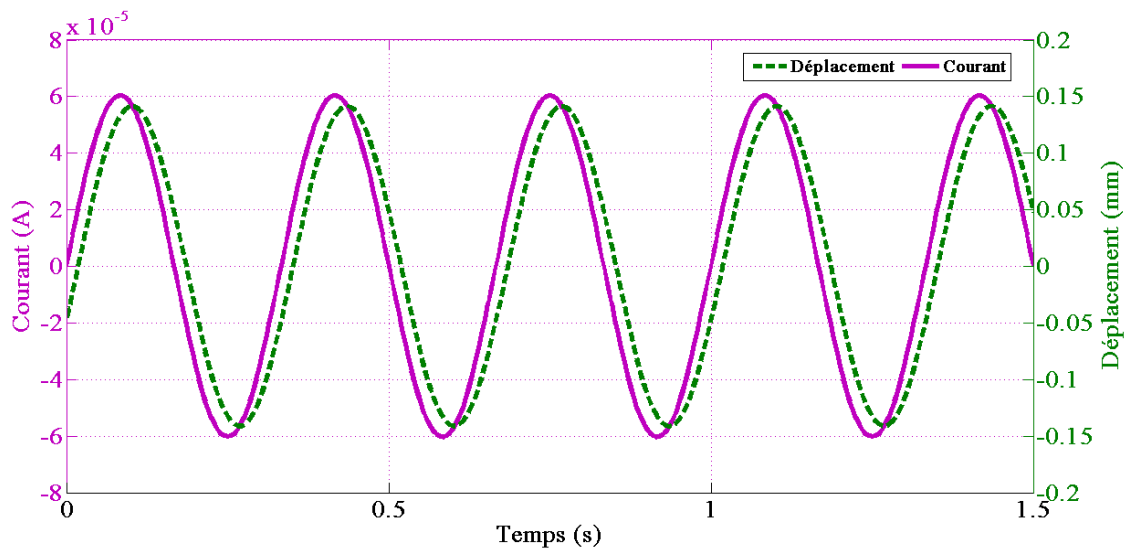


Figure III. 5: l'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure classique

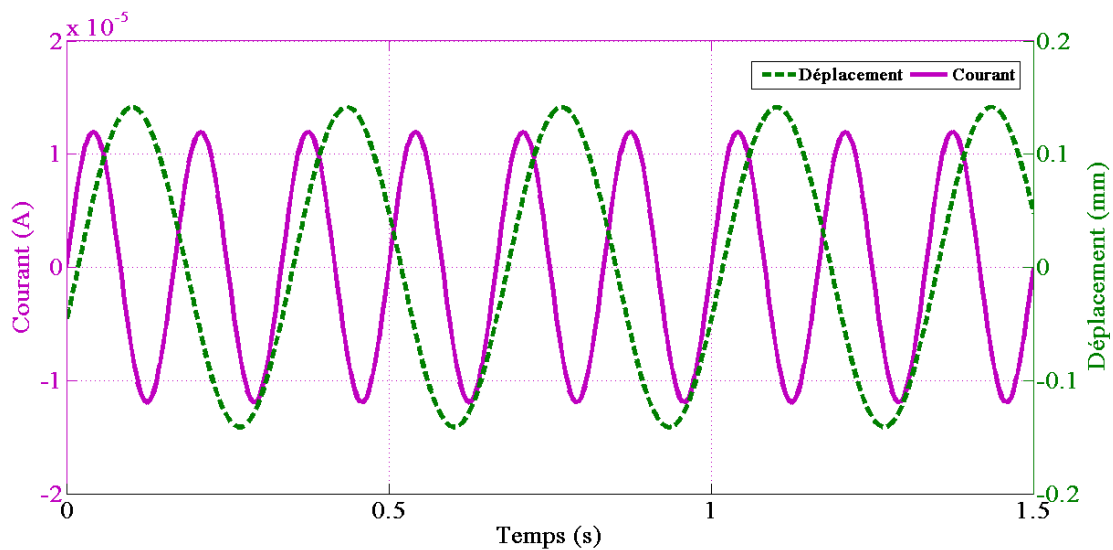


Figure III. 6 : l'évolution pratique de courant et le déplacement dans la structure proposée

III.2.3 Résultats de l'essai expérimental

Cette section présente la configuration pour les deux structures, et ces deux expériences réalisées la récupération d'énergie à partir d'un film piézoélectrique. Ces essais expérimentaux ont été préparés au laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Les mesures relevées par les deux configurations sont représentées dans les figures III.7 et III.8. Le film a été étiré avec une amplitude de déformation maximale de 0,1 % dans les deux structures.

Dans la première structure (Figure III.7), le système mécanique est composé d'un vibromètre et d'un capteur capacitif. Le dispositif de vibromètre sert à produire la force de vibration sous forme sinusoïdale, qui fait entrainer l'échantillon à une vibration transversale. Le capteur capacitif sert à mesurer le déplacement transversal de l'échantillon à partir duquel la déformation S_1 est calculée.

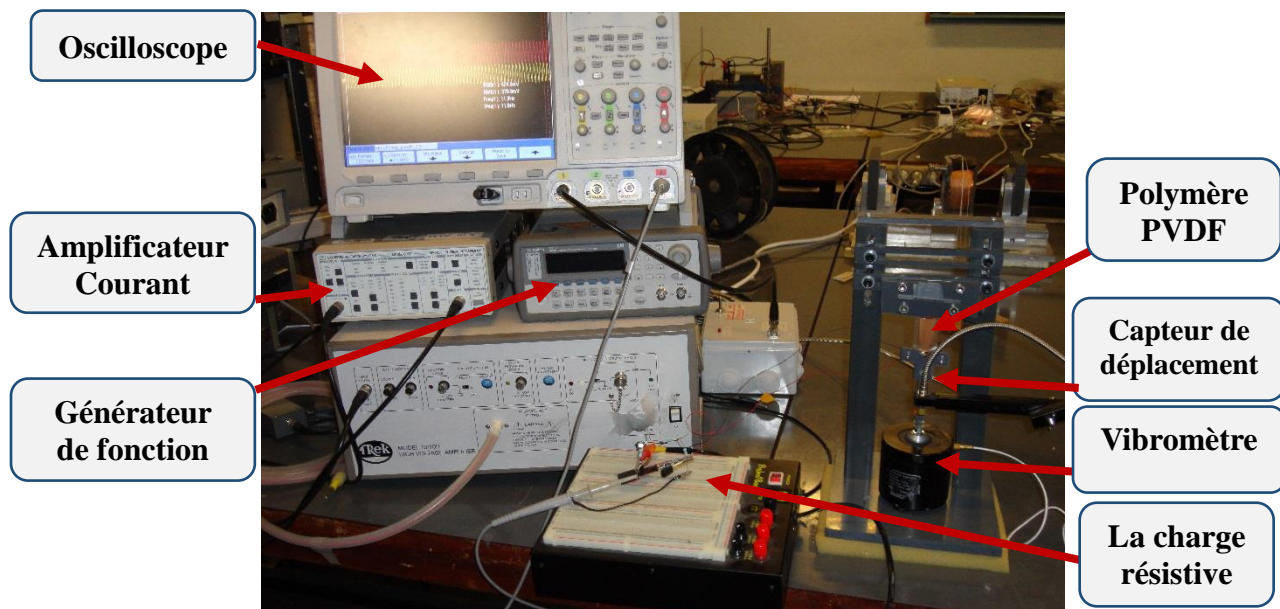


Figure III. 7: Banc expérimentale pour une structure classique

La deuxième structure, est représentée dans la Figures III.8, le film de polymère PVDF est attaché à une extrémité au métal de la poutre vibrante et l'autre extrémité a été attachée à un support fixe. La poutre était excité par le vibromètre, Le courant récupéré est mesuré à l'aide un amplificateur de courant.

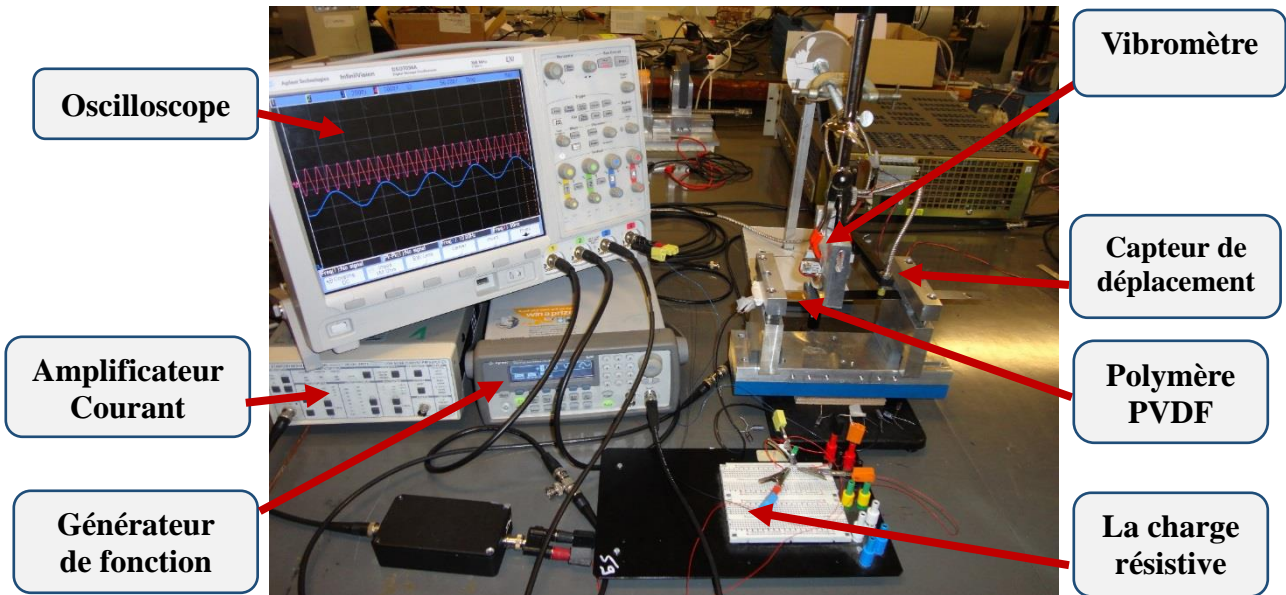


Figure III. 8: Banc expérimentale pour une structure proposé.

La Figure III.9 présente la puissance en fonction de la charge pour une déformation donnée de 0.1 %, représente la puissance récupérée théorique et pratique pour différentes charges et pour une déformation constante.

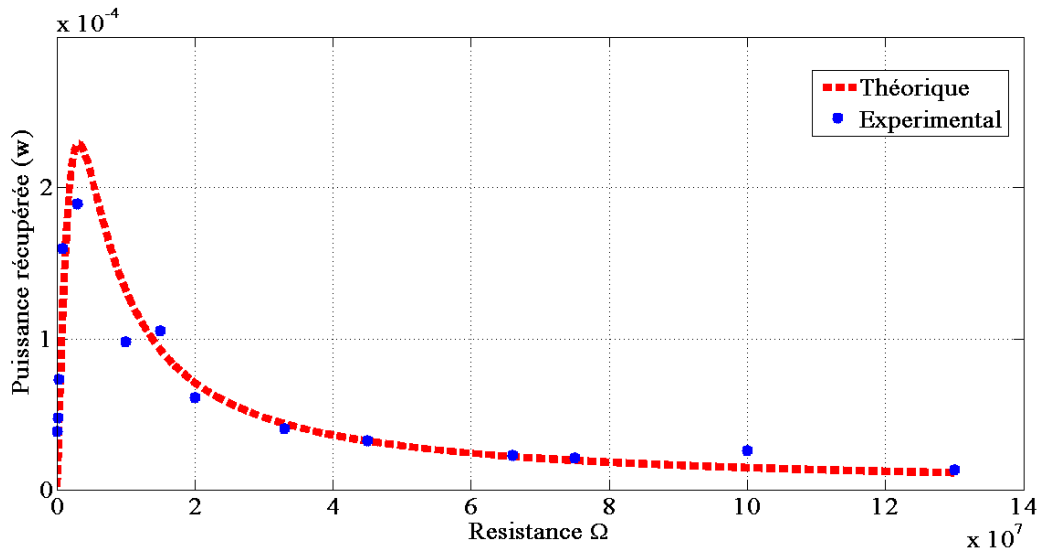


Figure III. 9 : Puissance récupérée théorique et expérimentale en fonction de la résistance

On constate bien une bonne corrélation entre le modèle théorique et la pratique

- Le premier avantage de la configuration proposée l'augmentation de la puissance récupérée par rapport à la technique classique, sans utilisation d'un circuit électronique.
- Le deuxième avantage de cette structure la puissance récupérée augmente avec une diminution de la résistance optimale.
- Le troisième avantage de cette structure rendre les faibles fréquences des vibrations qui se trouvent dans l'environnement à des fréquences plus élevée

III.2.4 Conclusion

Cette étude propose une approche d'une nouvelle structure pour l'amélioration la capacité de conversion de polymères piézoélectrique sans l'utilisation d'un circuit électronique. Basée sur un mécanisme de doubleur de fréquence à travers une structure mécanique proposée, nous pouvons également obtenir un courant dynamique supérieur par apport à celle de la configuration classique. Cet effet rend possible une augmentation significative en termes de puissance récupérée.

Un bon accord entre le modèle théorique et les données expérimentales. Selon les résultats expérimentaux, on voit clairement que la puissance récupérée pourrait atteindre $0,19 \mu\text{w}$, qui représente 75 % de plus que dans les techniques classiques. Cette valeur a démontré l'excellent potentiel de cette technique pour la récupération d'énergie.

La structure proposée dans cette étude représente donc un bon outil pour estimer les potentiels technologiques pour la récupération d'énergies qui collectent les vibrations de l'environnement et de les convertir en électricité afin d'alimenter les appareils MEMS.

III.3 Modélisation analytique de l'énergie électrique récupérée par polymère électrostrictifs

La récupération d'énergie par polymères électrostrictifs est une technologie émergente qui promet densité de puissance élevée, faible coût et d'évolutivité. La puissance peut être produite de manière simple par l'étirement et la contraction d'un film polymère.

À l'heure actuelle, l'enquête sur l'utilisation de polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie (conversion d'énergie mécanique en énergie électrique) commence à montrer le potentiel de cette application.

L'énergie récupérée dépend essentiellement dans le courant induit par la contrainte mécanique et la fréquence.

Des travaux antérieurs de certains des co-auteurs, a indiqué que l'on peut mesurer la constante diélectrique, le module d'Young et le coefficient électrostrictif d'un film polymère par la détermination du courant circulant dans l'échantillon lorsqu'il est entraîné simultanément par le champ électrique et l'excitation mécanique.

Résultats concernant l'amplitude de déformation et la fréquence de champ électrique offrent un cadre pour le développement de techniques de récupération d'énergie qui améliorent la performance globale du système. Les données expérimentales indiquent que le courant induit par le polymère est proportionnelle à la variation de fréquence et la déformation. [41]

III.3.1 Modélisation

D'après l'étude de courant en mode pseudo-piézoélectrique dans le chapitre II, paragraphe II.3.5.5 [38.40] qui s'exprimer leur équation sous la forme :

$$I = \alpha \cdot E_{ac} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} - C_p \frac{\partial V}{\partial t} \quad (III.4)$$

Où $\alpha = \frac{2 \cdot M_{31} \cdot A}{s_{11}^E}$ A représenté la surface active de polymère.

Afin de faciliter le développement théorique, le passage au domaine fréquentiel est utilisé. L'expression de la tension à la borne de la résistance R s'exprime sous la forme :

$$\tilde{V} = \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot R}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R \cdot C_p} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tilde{S}_1 \quad (III.5)$$

D'où l'expression de la puissance dissipée dans la charge R :

$$P_{ac} = \frac{\tilde{V} \cdot \tilde{V}^*}{2 \cdot R} = \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 \cdot R}{1 + (R \cdot C_p \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2} \frac{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (III.6)$$

La charge optimal adaptée est égale à :

$$R_{optimal_ac} = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \quad (III.7)$$

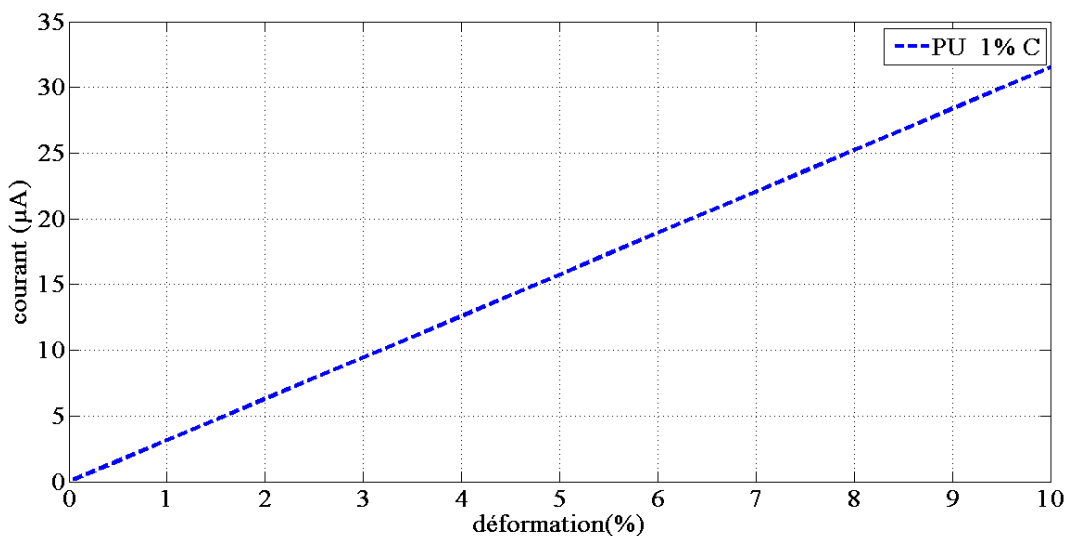


Figure III. 10: la variation de courant générée par PU 1% C en fonction de déformation S

La figure III.10 montre bien que la variation de courant est proportionnelle linéaire en fonction de la déformation.

Le modèle analytique et les résultats précédents sont obtenus en supposant que la capacité C_p constante, mais en real C_p variable, car l'application d'une déformation entraîne une variation de l'épaisseur.

III.3.2 Le modèle analytique développée

A partir des résultats obtenus dans la partie précédente, plusieurs phénomènes restent à éclaircir, tel que la saturation de courant en fonction de la déformation. Pour cela une approche proposée par la suite est basée sur une modélisation prenant au compte la variation de C_p ,

Si on considère C_p variable dans l'équation (III.8) on a obtenu :

$$I = \alpha \cdot E_{dc} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t} C_p V \quad (III.8)$$

$$I = A \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} \cdot E_{dc} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} - C_p \frac{\partial V}{\partial t} - V \frac{\partial C_p'}{\partial t} \quad (III.9)$$

$$C_p' = \frac{\varepsilon A'}{e'} \quad \text{Avec } A' = A + \Delta A$$

Si on prend en considération la variation de l'épaisseur Alor :

$v = L_0 \cdot w_0 \cdot e_0 = L \cdot w \cdot e = \text{Constant}$ Tel que 'v' c'est le volume du film

$$\text{Avec } \lambda_y = \frac{w}{w_0} = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{L}{L_0} \cdot \frac{e}{e_0} = 1 = \lambda$$

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = 1 + s$$

$$\text{D'autre part : } \frac{dC_p'}{dt} = \varepsilon \frac{d\left(\frac{A}{e}\right)}{dt}$$

$$\frac{dC_p'}{dt} = \varepsilon \left[\frac{1}{e} \frac{dA}{dt} - \frac{A}{e^2} \frac{de}{dt} \right] \quad \text{Si } w = w_0$$

$$d(A \cdot e) = e \cdot dA + A \cdot de = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{dA}{A} = -\frac{de}{e}$$

$$dC_p' = \varepsilon \left[\frac{1}{e} dA + \frac{A}{e^2} \cdot \frac{e \cdot dA}{A} \right] = 2 \frac{\varepsilon}{e} \cdot dA$$

$$dC_p' = 2 \frac{\varepsilon A_0}{e_0} \cdot S \quad \Rightarrow \quad dC_p' = 2C_p' \cdot \frac{dS}{dt}$$

D'après l'équation (III.8) on a $V = R.I$

$$I = \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} . A . E_{dc} \cdot \frac{\partial S}{\partial t} - C_p R \frac{\partial I}{\partial t} - RI \frac{\partial C_p}{\partial t} \quad (III.10)$$

On prend $\frac{2M_{31}}{s_{11}^E} . A = \alpha$

$$I = \alpha . E_{dc} \cdot j . \omega_m \cdot S - C_p R I \cdot j \cdot (\omega_e + \omega_m) - RI 2C_p \cdot j \cdot \omega_m \cdot S$$

$$I(1 + C_p R \cdot j \cdot (\omega_e + \omega_m) + 2 \cdot R \cdot C_p \cdot j \cdot \omega_m \cdot S) = \alpha \cdot E_{dc} \cdot j \cdot \omega_m \cdot S$$

$$I = \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot j \cdot \omega_m \cdot S}{1 + j \cdot C_p R (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot \omega_m \cdot S)} \quad (III.11)$$

$$I \times I^* = I^2 = \frac{(\alpha \cdot E_{dc} \cdot \omega_m \cdot S)^2}{1 + [C_p R (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot \omega_m \cdot S)]^2}$$

$$I = \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot \omega_m \cdot S}{\sqrt{1 + [C_p R (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot \omega_m \cdot S)]^2}} \quad (III.12)$$

Tel que la déformation S représente la somme de deux déformations, la déformation dynamique et la déformation statique.

Avec ω_e la pulsation électrique $\omega_e = 2 \cdot \pi \cdot f_e$ et ω_m la pulsation mécanique $\omega_m = 2 \cdot \pi \cdot f_m$

La puissance dissipée dans la résistance R s'exprime sous l'équation :

$$P_{ac} = \frac{1}{2} R \cdot I \cdot I^* = \frac{R}{2} \cdot \frac{(\alpha \cdot E_{dc} \cdot \omega_m \cdot S)^2}{1 + [C_p R (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot \omega_m \cdot S)]^2} \quad (III.13)$$

La puissance est maximale pour une charge donnée, il est possible de déterminer cette valeur en dérivant par rapport à R l'équation (III.13).

$$\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = \frac{(\alpha \cdot E_{dc} \cdot \omega_m \cdot S)^2 [1 - 4R^2 C_p (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot S \cdot \omega_m)]}{2 \cdot [1 + RC_p (\omega_e + \omega_m + 2 \cdot S \cdot \omega_m)]^2} \quad (III.14)$$

L'optimum est obtenu lorsque l'équation (III.14) est nulle $\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = 0$

$$\frac{\partial P_{ac}}{\partial R} = 0 \Rightarrow R_{optimal} = \frac{1}{C_p(\omega_e + \omega_m + 2.S.\omega_m)} \quad (III.15)$$

Soit une expression de la puissance maximale :

$$P_{max_ac} = \frac{\alpha^2 . E_{dc}^2 . \omega_m^2 . S^2}{4.C_p . (\omega_e + \omega_m + 2.\omega_m . S)} \quad (III.16)$$

III.3.3 Les résultats de simulation

Les résultats de simulation et les mesures expérimentales effectuées dans cette partie ont permis de valider le modèle analytique du courant. L'objectif de cette partie, est de trouver la relation entre le courant récupérée en fonction de déformation.

Pour cela le courant délivré par le polymère PU 1% C est représenté par la figure III.11 avec un champ électrique constant 10V/ μ m.

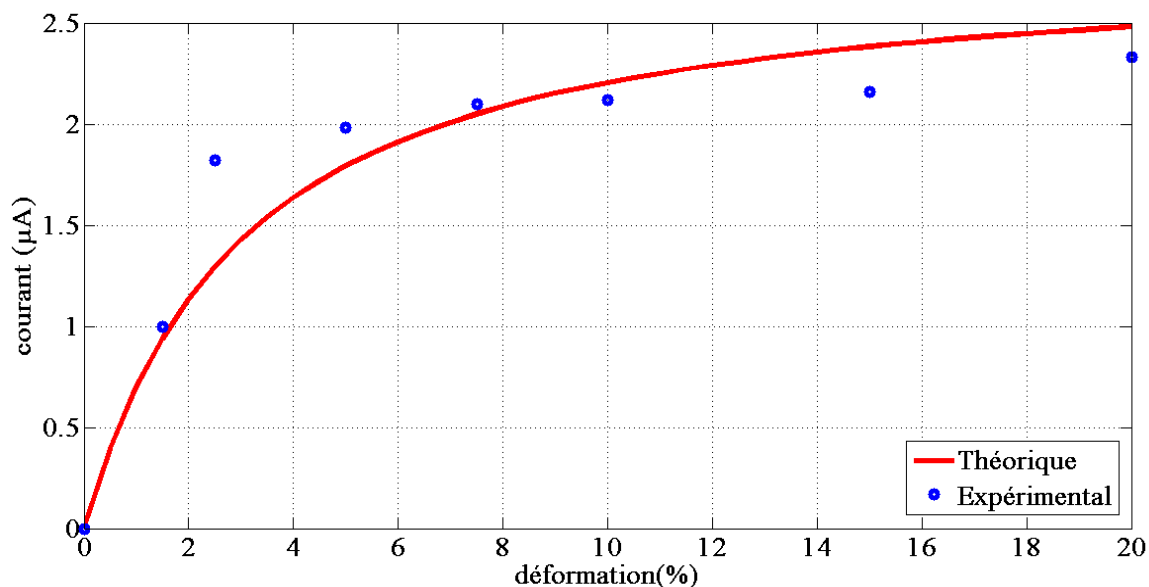


Figure III. 11 : La variation de courant en fonction de déformation

Pour les faibles amplitudes de déformation on remarque bien une dépendance linéaire du courant, avec la déformation comme montre la figure III.11. Par contre pour des valeurs plus élevées à partir de 6.5%, une saturation de courant est clairement visible. Avec ces conditions la puissance théorique et expérimentale récupérée qui correspond est représenté par la figure III.12

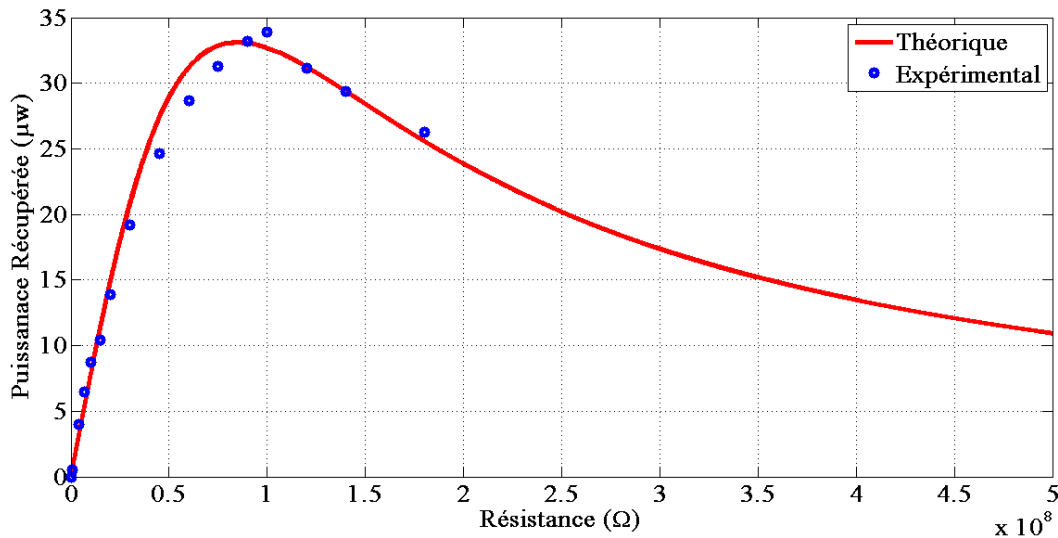


Figure III. 12: Puissance théorique et expérimentale en fonction de la résistance, pour le modèle proposée

La figure III.12 représente puissance récupérée par le polymère PU 1%C soumis à une déformation de 6.5% et champ électrique 10 V/ μm et fréquence mécanique de 3 Hz.

La puissance max récupérée est 33 μw avec une valeur de 85 M Ω de la charge résistive.

Au cours de cette partie, la caractérisation des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie mécanique a été réalisée. On a montré une nouvelle méthode pour augmenter l'efficacité de la conversion dans les polymères électroactifs et les composés, en exploitant l'effet de la saturation du courant récupérée sur les polymères pour augmenter la conversion électromécanique. La structures proposées dans cette partie représente ainsi un bon outil pour estimer l'énergie récupérée et pourront être de bons candidats à la technologie de conversion des vibrations ambiantes en électricité pour alimenter les systèmes portables

III.4 Système de conversion AC-DC de l'énergie récupérée par polymères électrostrictifs

Jusqu'à présent nous avons montré les potentialités des micro-générateurs à base de polymères électroactifs, en utilisant une charge purement résistive pour évaluer l'énergie disponible. Dans la partie qui suit nous présentons la thématique de transfert de l'énergie produite à travers un convertisseur AC/DC

III.4.1 Principe de la conversion

Afin d'effectuer la conversion alternative-continue dans les matériaux électrostrictifs, il faut connecter le pont en parallèle à l'élément électrostrictif et rajouter deux composants figure III.13. Une résistance R_s pour imposer que le courant produit par la conversion mécano-électrique circule principalement dans la boucle où le pont de diode est connecté. et pour garantir un rendement optimal. Il faut donc que l'impédance équivalente de la branche haute tension soit bien plus grande, que celle où impose que le courant I_s soit bien plus faible que le courant I_m circule. La capacité C_b permet de supprimer la composante haute tension aux bornes du convertisseur AC-DC [42].

Par rapport au cas de la piézoélectricité, ne besoins pas d'ajouté aucun composant où le pont redresseur est directement connecté en parallèle avec l'élément piézoélectrique.

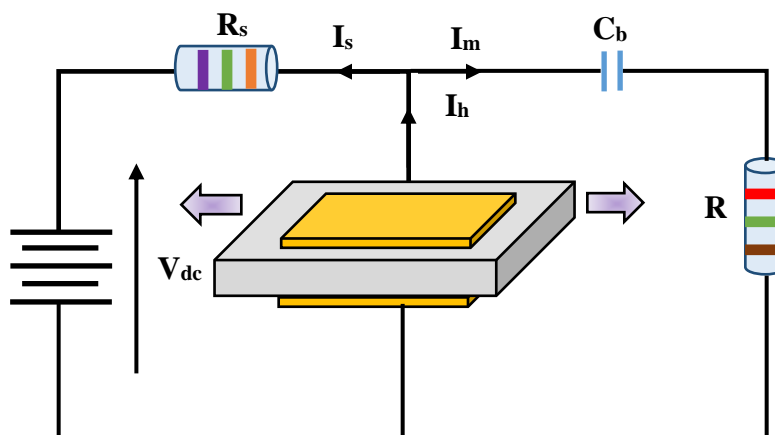


Figure III. 13: Schéma électrique équivalent de la structure de conversion AC

Maintenant que les conditions sur les composants sont fixées, il est possible de calculer l'expression de la puissance récupérée dans la charge R sans conversion AC-DC.

Nous appliquons cette méthode à la structure proposée précédemment afin d'améliorer notre système de récupération.

L'expression de la tension aux bornes de la résistance d'après figure III.13, s'exprime sous la forme :

$$\tilde{V} = \frac{C_b}{C_b + C_p} \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot R}{1 + \frac{R \cdot C_p (j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_e + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m + 2\tilde{S}_M \cdot j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_e)}{C_b + C_p}} j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot \tilde{S}_M \quad (III.16)$$

La puissance dans la résistance R est égale à :

$$P_{recuAC} = \frac{\tilde{V} \cdot \tilde{V}^*}{2 \cdot R} = \left(\frac{C_b}{C_b + C_p} \right)^2 \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 \cdot R}{1 + \left(\frac{R \cdot C_p (\omega_e + \omega_m + 2S_M \cdot \omega_e)}{C_b + C_p} \right)^2} \frac{\omega_m^2 \cdot S_M^2}{2} \quad (III.17)$$

Le transfert de puissance est maximal pour $R_{optimal_ac} = \frac{C_b + C_p}{C_b \cdot C_p \cdot (\omega_e + \omega_m + 2S_M \cdot \omega_e)}$

soit une expression de la puissance dans ce cas :

$$P_{max_ac} = \frac{C_b}{C_b + C_p} \cdot \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2}{C_p} \cdot \frac{(2 \cdot \pi \cdot f_m) S_M^2}{4} \quad (III.18)$$

Si la capacité de blocage C_b est très grande devant la capacité bloquée du polymère C_p , l'expression de la puissance est la même que dans l'équation (II.3.32).

L'approche la plus utilisée est le pont de Graëtz avec des diodes de redressement. Dans notre cas, cette approche est peu intéressante à cause de la tension de seuil des diodes d'environ 0,7V, ce qui est comparable avec les tensions générées par nos dispositifs. En fait, même si on utilise des diodes avec tension de seuil faible et la tension générée dépasse cette valeur, la plupart de l'énergie va être dissipée dans la diode [39].

Pour éviter ce problème lié aux pertes des diodes, une solution consiste à utiliser un doubleur de tension. En effet ce type d'architecture ne présente sous deux diodes avec deux condensateurs comme illustré dans la figure III.14.

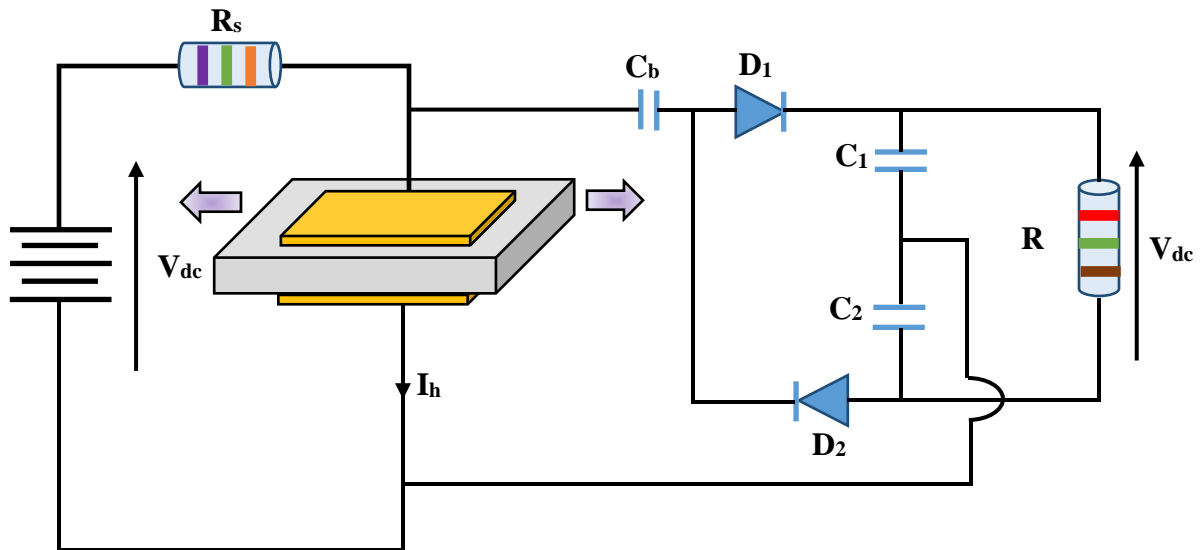


Figure III. 14: Polymère en conversion DC [39]

On constate que la diode D_1 ne conduit que pendant les alternances positives, et que la diode D_2 ne conduit que pendant les alternances négatives). Durant les alternances positives, le condensateur C_1 se charge pendant que le condensateur C_2 est isolé (la diode D_2 étant bloquée). Et durant les alternances négatives, le condensateur C_2 se charge pendant que le condensateur C_1 est isolé (la diode D_1 étant bloquée). On retrouve donc aux bornes de chacun des condensateurs C_1 et C_2 une tension identique, et comme ces deux condensateurs sont montés en série, on dispose bien d'une tension double aux extrêmes

L'expression de la puissance dans la résistance de charge s'écrit sous la forme :

$$P_{recDC} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{dc} \cdot I_m \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{S_1}^{S_m} \alpha \cdot E_{dc} \cdot V_{dc} \cdot dS \quad (III.19)$$

Avec S_m l'amplitude des déplacements et S_1 la valeur du déplacement lorsque le transfert d'énergie commence

La valeur de S_1 , est obtenue en considérant que la dernière conduction est négative :

$$S_1 = \frac{C_p}{\alpha}(V_{dc} + V_D) + K \quad \text{avec} \quad K = \frac{C_p}{\alpha}(V_{dc} + V_D) - S_m \quad (III.20)$$

Où V_D est le seuil de conductivité des diodes

A partir des expressions (III.19) et (III.20), la puissance en DC consommée par la charge R s'exprime sous la forme :

$$P_{recDC} = \frac{4}{T} V_{dc} (\alpha \cdot E_{dc} \cdot S_m - C_p (V_{dc} + V_D) V_{dc}) \quad (III.21)$$

La puissance est aussi égale à :

$$P_{recDC} = \frac{V_{dc}^2}{R} \quad (III.22)$$

En considérant les équations (III.21) et (III.22), la puissance s'écrit :

$$P_{recDC} = \frac{R \cdot 16 \cdot f_m^2 \cdot (\alpha \cdot E_{dc} \cdot S_m - 2C_p \cdot V_D)^2}{1 + (4 \cdot R \cdot C_p (f_e + f_m + 2 \cdot S_m \cdot f_m))^2} \quad (III.23)$$

III.4.2 Partie de simulation

Le but de cette partie est de présenter les principaux résultats obtenus sur un échantillon de PU 1%C A partir des données du tableau :

	<i>Surface</i>	<i>Epaisseur</i>	<i>Module de Young</i>	<i>Permittivité</i>	<i>Capacité Bloqué</i>	<i>Champ E_{dc}</i>
	$A (mm^2)$	$e (\mu m)$	$Y (MPa)$	ϵ_r	$C_b (\mu F)$	(Kv / mm)
Polymère						
PU 1%C	640	50	34	7	0.4	10

Tableau III. 2 : paramètres du polymère PU1%C

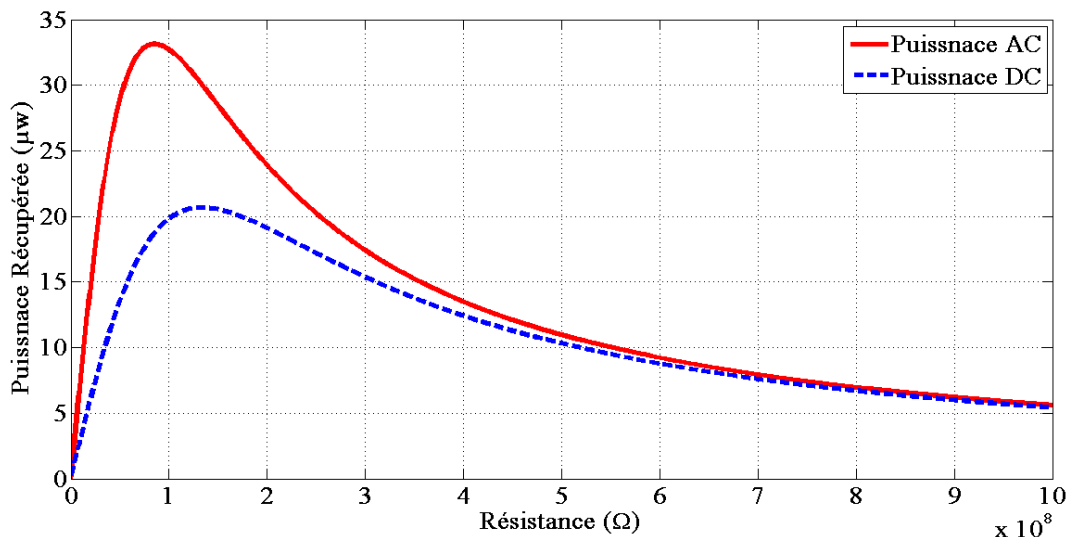


Figure III. 15 : Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 6.5% et un champ électrique de 10V/µm

Cette étude a été effectuée afin de valider la théorie du transfert de la puissance récupérée par un circuit redresseur. Le polymère PU 1% C a été étiré à une fréquence constante de 3 Hz, un champ électrique statique de 10 V / µm, une contrainte de 6.5% et des résistances de différentes valeurs (Figure III.15).

La courbe de puissance DC récupérée et consommé par la charge résistive montre qu'une puissance maximale de 20.6 µW était obtenue avec une résistance de 134 MΩ. La puissance de redresseur optimale était proche, mais légèrement inférieur à celle obtenue par le modèle théorique de la puissance récupérée AC.

Au cours de cette partie, nous avons présenté une technique permet de faire la conversion AC/DC dans les meilleurs résultats où moins pertes. Pour redresser des signaux AC de très faibles puissances il est nécessaire d'optimiser chaque élément constitutif du circuit de redressement.

Nous avons choisis le redresseur doubleur de tension compte tenu de son rendement de conversion AC/DC plus important par rapport aux autres configurations.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle mathématique a été établi pour la maximisation de l'énergie. Utilisant d'un prototype doubleur de fréquence du déplacement, pour sa simplicité, la puissance récupérée a été multiplié par un facteur de 75%. La caractérisation de saturation du courant récupérée nous ont permis de palier vers un nouveau model admissible et d'analyser l'effet de la déformation, Cet effet rend possible une augmentation significative en termes de puissance convertie. Les résultats expérimentaux confrontés à la théorie ont été satisfaisants quant à la récupération de l'énergie. Finalement, grâce aux circuits spécifiques de gestion de l'énergie, nous avons pu tester un système complet de génération.



Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire concernent sur l'étude d'un système de la récupération d'énergie mécanique ambiante susceptible de fournir de l'énergie à des dispositifs électroniques à faible consommation. La recherche bibliographique a révélé un nombre important d'études sur le sujet, en particulier depuis ces dernières années. Ce domaine de recherche est totalement ouvert, comme en témoigne la multiplicité des solutions technologiques mises en œuvre.

Dans la première partie, nous avons effectué une synthèse bibliographique du thème de recherche choisi : la récupération d'énergie. Il existe différentes échelles de récupération d'énergie, du microwatt au mégawatt. Nous nous intéresserons à la plus petite échelle de récupération d'énergie, à savoir le microwatt, dans le but d'alimenter des micro-systèmes autonomes. En effet nous ne disposerons que de peu d'énergie du fait des petites dimensions de nos systèmes.

Cette étude bibliographique focalisée sur état de l'art des ressources et des systèmes de récupération d'énergie ambiante, notamment dans l'environnement humain, nous avons situés en termes d'application dans l'ensemble des systèmes de récupération d'énergie. Ainsi nous avons présenté l'intérêt de ces structures pour les applications dans le domaine du transport, de l'industrie et de la santé.

Ensuite, les trois principaux principes de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique ont été présentés à savoir, l'électrostatique, l'électromagnétique et le piézoélectrique. A l'issue de cette partie, une étude comparative a été présentée de point de vue avantages et inconvénients de chacun de ces convertisseur électromécanique.

Dans le deuxième partie de ce travail un modèle mathématique qui décrit le phénomène de saturation a été établi pour la maximisation de l'énergie Ensuite l'amélioration de l'efficacité de la conversion électromagnétique des polymères PVDF, exploitant l'effet d'un nouveau prototype a été traité. Les résultats expérimentaux confrontés à la théorie ont été satisfaisants quant à la récupération de l'énergie. Finalement, grâce aux circuits spécifiques de gestion de l'énergie, nous avons pu tester un système complet de génération d'énergie. . En conclusion les polymères électroactifs, sont des matériaux souples en expansion : possédant des propriétés physiques particulières, sont de meilleurs candidats dans l'avenir pour développer des micro-générateurs flexibles et des actionneurs souples.

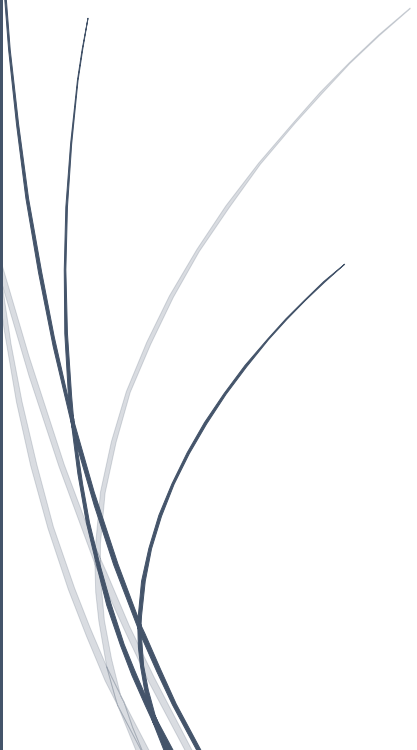
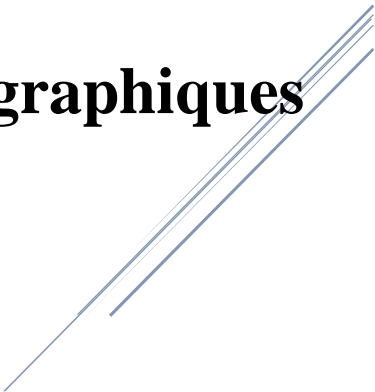
Perspectives

De nombreuses voies d'amélioration de nos structures sont envisageables, citons par exemple :

- L'utilisation des techniques non linéaires pour l'amélioration de la conversion électromécanique
- Automatisation et commande de la polarisation utilisant les électrets
- développement de système de la récupération d'énergie à l'aide des structures hybride.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

-
- [1] **Dhaou BOUCHOUICHA**, « Etude de faisabilité de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante », Laboratoire de Microélectronique de Puissance(LMP), 2010.
-
- [2] **Marianne Lossec**, « Systèmes multi sources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement», laboratoire SATIE, 2011.
-
- [3] **Sébastien Boisseau**, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », l'École Doctorale d'Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal (EEATS), 2006.
-
- [4] http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems/
-
- [5] <http://www.yole.fr/>
-
- [6] **Raphaël Guillemet**, « Etude et réalisation d'un récupérateur d'énergie vibratoire par transduction électrostatique en technologie MEMS silicium », Ecole Doctorale MSTIC, PARIS-EST, 2012.
-
- [7] **Bouhadjar AHMED SEDDIK**, « Systèmes de récupération de l'énergie vibratoire large bande », Laboratoire CEA-Leti, l'École Doctorale électronique, électrotechnique, automatique et traitement du signal, 2006.
-
- [8] **Adrien Badel**, « Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire », Ecole Doctorale de l'Université de Savoie, 2008.
-
- [9] **E.M. Yeatman**. « Advances in power sources for wireless sensor nodes », *Wearable and Implantable Body Sensor Networks*, pages 6–7, 2004.
-
- [10] **Emmanuelle Arroyo**, « Récupération d'énergie à partir des vibrations ambiantes Dispositif électromagnétique et circuit électronique d'extraction synchrone », 2012.
-
- [11] **Maxime Defosseux**, « Conception et caractérisation de micro générateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », Laboratoire TIMA, 2011.
-
- [12] <http://www.zone-ecolo.com>
-

-
- [13] **Airoldi and B. Rivolta**, « Thermal cycling and intermediate R-phase in NiTi system », *Physica Scripta*, vol. 37, pp. 891-894, 1988.
-
- [14] **Q. M. Zhang, V. Bharti, X. Zhao**, « Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) copolymer ». *Science* vol. 280, 1998.
-
- [15] **C. Jean-Mistral**, « Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystèmes autonomes communicants ». PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, CEA, 2008
-
- [16] **B.-L. Gupta and T. Abraham**, « Electro-active polymer actuators - types, applications, new developments, industry structure and global markets », in *INNOVATIVE RESEARCH AND PRODUCTS (iRAP), INC.*, 2008.
-
- [17] **Y. OSADA and J. GONG**, « Stimuli-responsive polymer gels and their application to chemo mechanical systems », *Progress in polymer science*, vol. 18, pp. 187-226, 1993.
-
- [18] <http://gsc11.cemif.univ-evry.fr>
-
- [19] **Y. Bar-Cohen, S. Leary, A. Yavrouian, K. Oguro, S. Tadokoro, J. Harrison, J. Smith, and J. Su**, « Challenges to the application of IPMC as actuators of planetary Mechanisms », presented at International Symposium on Smart Structures and Materials, 2000.
-
- [20] **M. Shahinpoor**, « Conceptual Design, Kinematics and Dynamics of Swimming Robot Structures using Ionic Polymeric Gels muscle », *Smart Materials and Structures*, vol. 1, pp. 91-94, 1992.
-
- [21] **E. Smela**, « Microfabrication of PPy microactuators and other conjugated polymer devices », *Journal of Micromechanical Microengineering*, vol. 9, pp. 1-18, 1999.
-
- [22] **Y. Lid, L. Oh, S. Fanning, B. Shapiro, and E. Smela**, « Fabrication of folding microstructures actuated by polypyrrole/gold bilayer », presented at The 12th international Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, 2003.
-
- [23] **Marcin MARZENCKI**, « conception de micro-générateurs intégrés pour systèmes sur
-

puce autonomes », Laboratoire TIMA, l'université Joseph Fourier, 2007.

[24] **G. Despesse**, « Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micro-systèmes communicants », Thèse de doctorat de l'INPG, 2005

[25] **Amel ZENATI**, « Modélisation et simulation de microsystèmes multi domaines à signaux mixtes : vers le prototypage virtuel d'un microsysteme autonome », laboratoire TIMA 2007

[26] **H. W. Kim et al**, « Energy Harvesting Using a Piezoelectric—Cymball Transducer in Dynamic Environment », Japanese Journal of Applied Physics, vol. 43, no. 9, pp. 6178–6183, 2004.

[27] **Hugo Durou**, « conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium », au LAAS-CNRS 2011.

[28] **H. Frayssignes**, « Etude des effets non linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 9 novembre 2001.

[29] **Salma GHORBEL**, « Couplage électromécanique effectif dans les structures piézoélectriques : expérimentations, simulations et corrélations », Laboratoire LISMMA, Institut Supérieur de Mécanique de Paris, 2009.

[30] **Dejan Vasic**, « Apports des matériaux piézoélectriques pour l'intégration hybride et monolithique des transformateurs », thèse de doctorat : Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2003,

[31] **Thibaut Richard**, « Diminution du coefficient de transmission acoustique d'une paroi à l'aide d'amortisseurs piézoélectriques semi-passifs », thèse de doctorat de laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité de l'INSA, 2007.

[32] **W. P. Mason**, « Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics, New York, Van Nostrand, 1950.

[33] **M. Redwood**, « Transient performance of a piezoelectric transducer », The Journal of the acoustical society of America, 33 (1961) pp. 527-536.

[34] **G. Poulin**, « Contribution au développement d'un générateur piézoélectrique pour applications nomades », Thèse de doctorat de l'Université, 2004

[35] **G. Poulin, E. Sarraute, F. Costa** « Generation of electrical energy for portable devices Comparative study of an electromagnetic and a piezoelectric system », Sensors and Actuators, vol A 116 ,p 461–471, 2004

[36] Piezo Film Sensors Technical Manual- MIT Media Lab , Measurement Specialties, Inc.

-
- [37] **Pierre-Jean COTTINET**, « Actionnement et récupération d'énergie à l'aide de polymères électro-actifs », INSA de Lyon, 2010.
-
- [38] Pierre-Jean Cottinet, Daniel Guyomar, Benoit Guiffard, Laurent Lebrun, « Ambient Energy Harvesting Using Electrostrictive Polymer Composite » 2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications.
-
- [39] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Cherif et al. « An adaptive prototype design to maximize power harvesting using electrostrictive polymers », J. Appl. Phys. Vol 112, 054109 (2012).
-
- [40] Pierre-Jean Cottinet, Daniel Guyomar, Benoit Guiffard, Chatchai Putson, and Laurent Lebrun, « Modeling and Experimentation on an Electrostrictive Polymer Composite for Energy Harvesting », IEEE ,vol. 57, no. 4, April 2010
-
- [41] A. Eddiai, M. Meddad, A. Hajjaji, D. Guyomar, Y. Boughaleb, and B. Sahraoui, « Mechanical Effect on the Performance of Electrostrictive Polymers for Energy Harvesting », IEEE, 978-1-4673-2229-4/12,2012
-
- [42] Pierre-Jean Cottinet, Mickael Lallart, Daniel Guyomar, Benoit Guiffard, Laurent Lebrun, Gael Sebald, and Chatchai Putson, « Analysis of ac-dc Conversion for Energy Harvesting Using an Electrostrictive Polymer P(VDF-TrFE-CFE) », IEEE, vol. 58, no. 1, January 2011
-