

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF
UFAS (ALGERIE)

THESE

Présenté à la Faculté de Technologie
Département d'électrotechnique
Pour l'Obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option: Machines et leurs commandes électriques

Par

M^r : MOUNIR MEDDAD

THEME

**Etude de l'énergie renouvelable dans l'environnement humain
pour alimenter les systèmes électroniques portables**

Soutenu le :

devant un Jury composé de:

Pr L.RAHMANI	Prof à l'université de sétif	Président
Pr S. BELKHIAT	Prof à l'université de Sétif	Rapporteur
Pr A. BOUZID	Prof à l'université de Constantine	Examineur
Pr A. CHAABI	Prof à l'université de Constantine	Examineur
Pr L. H. MOUSS	Prof à l'université de Batna	Examinatrice

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Saâd Belkhiat, Professeur à l'université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie pour l'opportunité et l'envie d'avoir fait cette thèse ainsi que pour sa confiance sans cesse renouvelée. Il a toujours été présent pour me porter une oreille attentive. Ses encouragements ont contribué à l'aboutissement de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur les Professeurs Daniel Guyomar directeur du laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon. Pour sa confiance, qui m'a permis d'explorer les différentes techniques exposées dans ce manuscrit avec une totale liberté de recherche.

J'exprime également ma profonde reconnaissance aux Pr A. BOUZID, Pr A. CHAABI, et Pr L. H. MOUSS de m'avoir fait le plaisir de s'intéresser à mes travaux en acceptant de faire partie du Jury de thèse.

Je souhaite de plus, remercier doublement le Pr. L. RAHMANI de m'avoir fait l'honneur de présider le Jury.

Je remercie aussi chaleureusement Mr Eddiai Adil et Hajjaji abdelwahed, pour ses conseils et l'aide qu'il m'ont apportés tout au long de ce stage et Mr Benjamin Ducharne . et madame Yus Kaori J'adresse également mes plus vifs remerciements à Madame Dorieux Évelyne et Monsieur Defromerie Frédéric de m'avoir aidé

Une thèse n'est pas seulement l'occasion de se former à la recherche, c'est aussi pouvoir rencontrer des personnes formidables. Ainsi je voudrais remercier tous les membres du département d'électrotechnique de l'université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie et les membres du département d'électromécanique de l'université de BBA. Aussi à tout l'équipe de LGEF permanents ou doctorants, pour leur présence, leurs suggestions et leur bonne humeur. Leur aide durant mon stage.

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 encombrements 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 thèse est d'explorer la potentialité des polymères électroactifs pour une application de récupération d'énergie mécanique ambiante. Afin de répondre à la problématique et l'objectif de cette thèse, nous allons dans un premier temps étudier les moyens mis en œuvre pour améliorer les capacités diélectriques du polymère ensuite axer notre travail de recherche sur les Caractérisations électriques, mécanique (module d'Young), électromécanique et thermique. La seconde partie de ce travail concerne la mise en place des modèles analytiques électromécaniques le plus fiable possible et adaptable à tous types de structures et de sollicitations. Ce modèle analytique est validé par une série de tests sur des cas simples de structures à travers d'un banc d'essai, qui permet en même temps de suivre l'évolution des différentes propriétés des échantillons. La partie suivante de ce travail concerne le développement d'une application pratique novatrice : la récupération d'énergie mécanique avec des polymères électrostrictifs. Ce modèle a été dimensionné grâce au modèle développé par les analyses spectrales, puis testé. Ces trois points permettent de démontrer le potentiel de ces matériaux et la rupture technologique qu'ils apportent avec eux.

Mots-clés : *Polymère électro-actifs, Polymère électrostrictif, Caractérisation électrique et mécanique, Contrôle de raideur, Récupération d'énergie mécanique.*

المخلص:

إستخراج من البيئة المحيطة كمية من الطاقة اللازمة لتشغيل الأجهزة الإلكترونية الدقيقة، لا يزال يشكل تحدياً هائلاً قوي الطلب فيما يتعلق مثل هذه النظم من طرف العديد من القطاعات ألهمامة (المنزلي، والنقل، والطبية، العسكرية، والصناعية ...). في الواقع يمكن أن لمستويات المعرفة والدراسة التكنولوجية جعل المواد الذكية الآن مع الخصائص الميكانيكية والكهربائية المطلوبة. مما يجعل من الممكن تصميم نظام منخفض التكاليف، مع انخفاض الحجم المطلوب. إن بوليمرات لها خصائص مثيرة للاهتمام مقارنة مع المواد غير العضوية، وهي خفيفة الوزن، وغير مكلفة، ولينة، والغرض من هذا البحث هو استكشاف إمكانات للبوليمرات ألكتروليتية لتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. للرد على الهدف من هذا البحث، سوف ندرس في البداية وسائل ألكتروليتية لتحسين قدرة عازل البوليمر ثم نركز بحثنا على الأوصاف و الخصائص، الميكانيكية والكهربائية (معامل يونج)، والحرارية. الجزء الثاني من هذا العمل يتعلق في تطوير النماذج التحليلية الكهروميكانيكية كما يمكن الاعتماد عليها قدر الإمكان، وقابلة للتكيف مع جميع أنواع الهياكل. يتم التحقق من صحة هذا النموذج التحليلي من خلال سلسلة من التجارب باستخدام الهياكل الأساسية و بواسطة الاختبار ألتطبيقي، والذي يسمح في نفس الوقت لمتابعة تطور خصائص مختلفة من العينات. الجزء التالي من هذا العمل يتعلق بتطوير طريقة جديدة لمعرفة كمية استرداد الطاقة الميكانيكية من قبل عينة البوليمرية تم استخدام النموذج الذي ألكتروليتية عن طريق استخدام ألتحليل الطيفية، واختبارها. هذه النقاط الثلاث تسمح لنا لإظهار ألكتروليتية الفوائد المحتملة لهذه المواد وألطفرة ألكتروليتية ألتكنولوجية ألتى ستحدثها هذه المواد مستقبلاً.

ألكلمات ألكتروليتية : البوليمرات كهروميكانيكية، ألكتروليتية والكهربائية والميكانيكية، التحكم على صلابة، استرجاع الطاقة الميكانيكية،

Abstract

Extract from the ambient environment energy required to operate a micro-electronic device remains a formidable challenge. Strong demand with respect to such systems arises now many sectors (domestic, transport, medical, military, industrial ...). Indeed the levels of knowledge and technological know-how can now make smart materials with mechanical and electrical properties desired. Making possible the design of system to lower costs, with congestion and lower masses. In addition polymers have interesting properties compared to inorganic materials. They are lightweight, inexpensive, and foldable, the purpose of this thesis is to explore the potential of electroactive polymers for application of mechanical energy harvesting. To meet the problem and has the objective of this thesis, we will initially study the means implemented to improve the capacity of the polymer dielectric then focus our research on the electrical characterizations, mechanical (Young's modulus), electromechanical and thermal. The second part of this work concerns the development of analytical models electromechanical as reliable as possible and adaptable to all types of structures and loads. This analytical model is validated by a series of tests using basic structures through a test, which simultaneously allows following the evolution of the different properties of the samples. The next part of this work concerns the development of innovative practical application: the recovery of mechanical energy with electrostrictive polymers been sized using the model developed by spectral analyzes, and tested. These three points allow us to demonstrate the potential of these materials and the technological breakthrough that they bring with them.

Keywords: *electro-active polymer , electrostrictive polymer, Electrical and mechanical characterization , stiffness Control , power harvesting .*

SOMMAIRE

Tables des matières

<i>Remerciement</i>	i
<i>Résumé</i>	ii
<i>Abstract</i>	iii
<i>Résumé (arabe)</i>	iv
<i>Tables des matières</i>	v
<i>Liste des figures</i>	ix
<i>Liste des tableaux</i>	vxii

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I

I.1 Introduction	5
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 La récupération d'énergie: contexte, choix et compromis.....	8
I.4. Sources Potentielles	9
I.4.1 Vibrations et contraintes mécaniques.....	16
I.4.2 Conversion électromagnétique.....	17
I.4.3 Conversion électrostatique.....	19
I.4.3.1. Fonctionnement à charge constante.....	20
I.4.3.2.Fonctionnement à tension constante.....	21
I.4.4.Conversion piézoélectrique.....	23
I.4.4.1 Le M.I.T. Media Lab.....	26
I.4.4.2. Régime de fonctionnement du générateur piézoélectrique.....	27
I.4.4.3 Contrainte de fonctionnement.....	28
I.4.5.Conversion magnétostrictive.....	29
I.5. Problématique de recherche.....	30
I.6. conclusion.....	30

Chapitre II

II.1 Introduction.....	33
II.2 Les EAPS ioniques.....	34
II.2. 1 Les gels ioniques.....	35
II.2. 2 Les composites polymères-métal ioniques (IPMC).....	36
II.2.3 Les polymères conducteurs ioniques	37
II.3 Les EAPS électroniques	38
II.3.1 Les polymères ferroélectriques.....	39
II.4 Principales caractéristiques des deux familles.....	40
II.5 Les EAPS diélectriques.....	42
II.6 Les polymères à base de feuilles de matériaux électrostrictifs.....	46
II.7 Renforcement des propriétés diélectriques des polymères électro-actifs.....	53
II.7.1 Synthèse des méthodes pour augmenter la permittivité.....	55
II.7.2 Particules diélectriques.....	57
II.8 Choix de la matrice de base et des nano-charges pour l'élaboration des nano-composites.....	58
II.8.1 La matrice de terpolymère P(VDF-TrFE-CFE).....	58
II.8.2 La matrice de polyurethane (PU).....	59
II.9 Processus de fabrication des composites au LGEF.....	60
II.10 Caractérisation électrique.....	63
II.10.1 Phénomène de polarisation à l'échelle microscopique.....	64
II.10.1.1 Polarisation électronique.....	64
II.10.1.2 Polarisation atomique.....	64
II.10.1.3 Polarisation d'orientation (polarisation de Debye).....	64
II.11 Mécanismes de conduction et de pertes dans les polymères.....	66
II.11.1 Conduction en continu et en très basse fréquence.....	66
II.11.2 Pertes diélectriques.....	67
II.11.3 Rigidité diélectrique.....	67
II.12 Résultats expérimentaux : caractérisations électriques.....	68
II.13 Propriétés thermiques.....	77

II .14 conclusion.....	79
------------------------	----

Chapitre III

III.1 Introduction	81
III.2 Caractérisation électromécanique.....	82
III.3 Mesure de la déformation sous champ électrique.....	82
III.4 Mesure et Analyse du module élastique.....	91
III.5 Réalisation d'une application contrôle de raideur avec l'utilisation polymère EAP.....	96
III.5.1 Model analytique.....	97
III.5.2 Force de précontrainte et la force due à l'excitation électrique.....	98
III.5.3 saturation de polarisation.....	99
III.5.4 Dispositif expérimentale.....	100
III.6 Résultats et discussion	102
III.6.1 Variation de la précontrainte.....	102
III.6.2 Variation du champ électrique E_{dc}	104
III.6.3 Variation de l'amplitude du champ électrique E avec $E_{dc}= 0$	106
III.7 conclusion de cette expérience.....	107

Chapitre IV

IV.1 Introduction	109
IV.2 Modélisation.....	112
IV.3 Essai expérimental	116
IV.4 Modélisation et analyse spectrales	122
IV.5 Banc d'essai expérimental.....	125
IV.6 Conclusion.....	135

Chapitre V

V.1 Introduction.....	138
V.2 Principe.....	138
V.2.1 Modélisation de la puissance récupérée en mode pseudo-piézoélectrique.....	138
V.3 Dispositif expérimentale.....	144
V.4 Validation du modèle.....	148

V.5. Banc expérimental de la méthode de décharge corona.....153
V.5.1 Méthode de la polarisation directe.....154
V.6 Conclusion.....160

Chapitre VI

VI.1 Introduction163
VI.2 transfert de l'énergie électrique à partir d'une source de polymère électro-strictif.....164
VI.3 Optimisation en fonction de la capacité de stockage.....170
VI.4 Optimisation de la puissance transférée à l'aide d'un convertisseur DC-DC.....173
VI.5 Application aux techniques SSHI (Synchronized Switch Harvesting).....178
VI.7 Conclusion.....181
V.5 Conclusion181
Conclusion et perspectives.....182
Références bibliographies185
Annexes.....196

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Comparaison des différentes sources de l'énergie ambiante	8
Tableau I-2 : Récupération d'énergie vibratoire – Systèmes électromagnétiques	19

Chapitre II

Tableau II.1: Classification des polymères électro-actifs.....	34
Tableau II.2: Principales caractéristiques des deux familles d'EAP	40
Tableau II.3: Propriétés physico-chimie de Pu –estane.....	60

Chapitre IV

Tableau IV.1: Valeur de B_i calculée à partir de l'équation IV.26.....	124
Tableau IV.2 : Évaluation des amplitudes des rais de courant à différentes charges pour $f_e = 1\text{Hz}$ et $f_m = 6\text{Hz}$	131
Tableau IV.3 : Comparaison entre la puissance de polarisation et celle récupérée à 1 hertz et un champ électrique de 13 MV/m.....	135
Tableau IV.4 : comparaison entre les coefficients mécaniques à 1 Hz et un champ électrique de 13 MV/m.....	135

Chapitre V

Tableau V.1 : Caractéristiques du polymère (PU 1 vt% C).....	148
Tableau V.2 : Propriétés des deux polymères Polyurethane et Polypropylene.....	156
Tableau V.3 : Bilan des puissances pour la structure hybride.....	160

Chapitre VI

Tableau VI.1 paramètres du polymère PU1%C.....	167
-------------------------------------------------------	-----

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Evolution du marché des MEMS par applications de 2007 à 2012 (Yole Développement)	7
Figure I.2 : Modèle d'une batterie nucléaire.....	10
Figure I.3: Evolution de plusieurs domaines de la microélectronique portable etdes batteries11	
Figure I.4 : Application à la détection de snipers (Projet NEST).....	12
Figure I.5: Réseau de capteurs sans fil de surveillance des tempêtes de sable	15
Figure I.6 : Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique.....	17
Figure I.7: Schéma d'un simple générateur électromagnétique.....	18
Figure I.8 : Schéma d'un générateur capacitif.....	20
Figure I.9: Convertisseur électrostatique - Cycle à charge constante.....	21
Figure I.10 : Convertisseur électrostatique - Cycle à tension constante.....	22
Figure I.11: Générateur électrostatique.....	22
Figure I.12 : Chaussure dotée d'un générateur électrostatique.....	23
Figure I.13 : Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite.....	24
Figure I.14 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format cymbale..	25
Figure I.15 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre bimorphe.....	25
Figure I.16 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre unimorphe.....	25
Figure I.17 : Modes 31 et 33 : ces modes de fonctionnement dépendent de la direction relative de la polarisation et de la compression/extension.....	25
Figure I.18: Schéma des touches du clavier Compaq.....	26
Figure I.19: Schéma de la feuille de PVDF et du dimorphe insérés dans la chaussure.....	27
Figure I.20: Principe de fonctionnement d'un générateur magnétostrictif.....	29

Chapitre II

Figure II.1: Exemple de structure de polymère ionique.....	35
Figure II.2: Exemple de pince composée de quatre bras indépendants réalisés en IPMC.....	36
Figure II.3 : "Fleur" micro-origami à base de polymère conducteur.....	37
Figure II.4: Effet piézoélectrique.....	38
Figure II.5 : Exemple d'actionnement de type flexion obtenu avec un polymère ferroélectrique : dans l'état initial (partie gauche) et dans l'état actionné (partie droite).....	39
Figure II.6: Contrainte en fonction de la déformation pour différents matériaux électro-actifs	41
Figure II.7: Travail spécifique en fonction de la fréquence pour différents matériaux électro-actifs.....	41
Figure II.8: Principe de fonctionnement en mode actionneur d'un polymère diélectrique....	43
Figure II.9: Cycle de fonctionnement en mode générateur d'un polymère diélectrique.....	44
Figure II.10: Energies mise en jeu lors du processus de récupération d'énergie.....	44
Figure II.11: Générateur à base de polymère diélectrique inséré dans le talon d'une Chaussure.....	45
Figure II.12: Éclisse passive (à gauche) et active (à droite).....	46
Figure II.13: Récupération de l'énergie mécanique par le mouvement du genou.....	47
Figure II.14 : L'attraction non homogène qui s'exerce sur une molécule entraîne son déplacement vers les régions où cette attraction est la plus prononcée.....	48
Figure II.15: Cycles d'hystérésis pour un polymère irradié et non irradié.....	49
Figure II.16: Cycle à réaliser avec un matériau électro-strictif pour la récupération d'énergie.....	50
Figure II.17: Cycle de récupération de l'énergie sous champ électrique constant lors des phases d'étirement et de compression.....	51
Figure II.18: charges induites sur les faces du diélectrique diminue le champ électrique.....	55
Figure II.19: Distribution des nano-renforts dans les nano-composites.....	56
Figure II.20 : Les conformations des différentes phases de PVDF.....	58
Figure II.21: Structure de l'Estane 58 888.....	59
Figure II.22: Processus de fabrication du polymère.....	63
Figure II.23: Influence des différents types de polarisation sur la permittivité relative.....	65
Figure II.24: Représentation schématique des quatre types de polarisation.....	66

Figure II.25: Banc de mesure SOLATRON.....	68
Figure II.26: Permittivité relative en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane.....	69
Figure II.27 : Indice de perte en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane.....	70
Figure II.28: La phase en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane.....	71
Figure II.29: Conductivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane.....	71
Figure II.30: Permittivité relative en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE).....	72
Figure II.31: Indice de perte en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE).....	73
Figure II.32 : Indice de perte et permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE).....	74
Figure II.33: Permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE) pour des différentes épaisseurs.....	74
Figure II.34: Permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de matrice de polyuréthane avec différentes épaisseurs.....	75
Figure II.35: Permittivité en fonction de l'épaisseur pour les composites à base de polyuréthane avec différentes épaisseurs.....	75
Figure II.36: permittivité en fonction de la fréquence pour les composites de polyuréthane avec les différentes valeurs du champ.....	76
Figure II.37: Indice de pertes en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane avec les différentes valeurs du champ Les pertes diélectriques sont plus faibles en DC.....	77
Figure II.38: DSC thermogramme pour les composites à base de polyuréthane chargé à 1 % de carbone.....	78

Chapitre III

Figure III.1: Montage de mesure de déformation.....	83
Figure III.2: Montage expérimentale de mesure de déformation.....	84
Figure III.3: Déformation (-S3) en fonction du champ électrique pour une fréquence de 100mHz de film de PU 0.5%C. PU 1%C. et film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.....	85
Figure III.4 : Déformation (-S3) en fonction du champ électrique pour film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. avec différentes fréquences.....	86
Figure III.5: Déformation en fonction du champ électrique pour un échantillon de PU 1%C à 100mHz à différents niveau de champ électrique.....	87
Figure III.6: Déformation en fonction du champ électrique pour un échantillon de film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.à 100mHz à différents niveau de champ électrique.....	87
Figure III.7: Déformation en fonction du temps pour un échantillon P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.à100mHz à différents niveaux de champ électrique.....	88
Figure III.8: Déformation en fonction du temps pour un échantillon de PU 1%C à 100mHz à différents niveaux de champ électrique.....	89
Figure III.9: Polarisation en fonction du champ électrique pour différentes amplitudes de champ Pu 1%C 100mHz.....	90
Figure III.10: Polarisation en fonction du champ électrique pour différentes amplitudes de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. champ à 1Hz.....	91
Figure III.11: Variation de la déformation avec l'épaisseur des films de polymères Pu 1%C à 100mHz et pour deux amplitudes de champ électrique.....	91
Figure III.12 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes précontraintes pour film Pu1%C à 1Hz.....	92
Figure III.13 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes épaisseurs pour film Pu1%C a 1Hz.....	93
Figure III.14 : Courbes des contraintes en fonction de la déformation pour les différentes fréquences pour un film de Pu1%C à 57µm.....	93
Figure III.15: Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes fréquences film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.a 57µm.....	94
Figure III.16 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes amplitudes de précontrainte film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.a 57µm a 1Hz.....	95

Figure III.17 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes épaisseur film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. a 1Hz.....	95
Figure III.18 : Prototype de micro-drone COM-BAT.....	96
Figure III.19 : La saturation de polarisation pour matériau polymère électrostrictive.....	99
Figure III.20 : Principe de fonctionnement.....	101
Figure III.21 : Dispositif expérimentale.....	102
Figure III.22.a : Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un faible champ DC (experimental).....	103
Figure III.22.b : Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un faible champ DC (simulation).....	103
Figure III.23.a : Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un fort champ DC (simulation).....	104
Figure III.23.b : Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un fort champ DC (expérimentale).....	104
Figure III.24.a : Variation du champ DC (expérimentale).....	105
Figure III.24.b : Variation du champ DC (simulation).....	106
Figure III.25.a : Variation de l'amplitude du champ avec un champ DC=0 (expérimentale).....	106
Figure III.25.b : Variation de l'amplitude du champ avec un champ DC=0 (simulation)..	107

Chapitre IV

Figure IV.1 : Système de générateur EPAM sur la bouée.....	110
Figure IV.2 : Déformation expérimentale en fonction du champ électrique pour le matériel électrostrictif.....	112
Figure IV.3 : Le schéma électrique équivalent de la configuration.....	115
Figure IV.4 : Dimension du polymère utilisé dans l'essai.....	116
Figure IV.5 : variation de la déformation en fonction du champ appliqué	117
Figure IV.6 : Schéma de l'installation expérimentale.....	118
Figure IV.7 : Variation du courant récupéré en fonction du déphasage entre le champ électrique et déplacement.....	11
Figure IV.8 : Déformation et champ électrique en fonction du temps.....	119

Figure IV.9 : Puissance récupérée, courbes théorique et expérimentale avec un champ électrique de $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et une déformation de 0.5%.....	120
Figure IV.10 : Puissance récupérée pour trois différents signaux de polarisation $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et avec déformation de 0.5%.....	121
Figure IV.11: Le courant en fonction du champ électrique pour différents signaux de polarisation.....	121
Figure IV.12 : Illustration schématique du banc expérimental pour mesurer le courant récupéré.....	125
Figure IV.13 : Photographie de l'installation expérimentale pour mesurer le courant récupéré par polymères électrostrictives.....	126
Figure IV.14: Courant électrique mesurée avec champ de polarisation en fonction du temps $f_m=3\text{Hz}$	127
Figure IV.15: L'analyse spectrale du courant mesuré en court-circuit $f_m=3\text{Hz}$	127
Figure IV.16: Courant électrique mesurée avec champ de polarisation en fonction du temps $f_m=6\text{Hz}$	128
Figure IV.17: L'analyse spectrale du courant mesurée en court-circuit $f_m=6\text{Hz}$	128
Figure IV.18: L'analyse spectrale du courant mesuré avec charge 10Ω et $f_m=6\text{Hz}$	129
Figure IV.19: L'analyse spectrale du courant mesuré avec charge 60Ω et $f_m=6\text{Hz}$	130
Figure IV.20 : L'analyse spectrale du courant mesurée avec charge 90Ω et $f_m=6\text{Hz}$	130
Figure IV.21 : La puissance récupérée avec une déformation constante 5% à $f_e=1$ hertz sous différentes valeurs de f_m (3 Hz et 6 Hz).....	132
Figure IV.22 : Comparaison des deux cycles de la conversion; deux modes de fonctionnement : $f_m = 3$ Hz, 6 hertz.....	133
Figure IV.23: La puissance récupérée avec différentes déformations 4% , 2% , 6.5% à $f_e=1$ et $f_m = 6$ Hz.....	134

Chapitre V

Figure V.1 : Schéma du circuit prototype: (a) l'approche classique, (b) l'approche proposé.....	140
Figure V.2 : Diagramme de la configuration du système mécanique proposé.....	141
Figure. V.3. Schéma électrique équivalent simplifié.....	143

Figure. V.4. Photographie d'un échantillon de polymère d'essai de Pu 1% C avec des électrodes d'or.....	145
Figure V.5: Banc de mesure de la permittivité Solartron 1255.....	145
Figure V.6 : La permittivité diélectrique en fonction de la fréquence	146
Figure V.7 : Banc expérimentale pour une Configuration classique.....	147
Figure V.8 : Banc expérimentale pour une Configuration proposé.....	148
Figure V.9 (a) Courant mesuré et déplacement pour la configuration classique.....	149
Figure .V.9 (b) Courant mesurer et déplacement pour la configuration proposée.....	149
Figure V.10 : Courant récupérée en fonction du champ électrique pour les deux configurations avec une déformation constante $S1$ 0.5%,.....	150
Figure V.11 : Courant récupérée en fonction de la déformation pour les deux configurations avec Champ électrique constante $10V/\mu m$,.....	151
Figure V.12 : Puissance récupérée en fonction de la résistance et la fréquence.....	152
Figure V.13 : Puissance récupérée théorique et expérimentale en fonction de la résistance.....	152
Figure V.13 : principe de polarisation avec effet corona.....	154
Figure V.14: Banc expérimentale pour la polarisation directe.....	155
Figure V.15 : Schéma d'hybridation des deux films polypropylène et Pu1%C.....	156
Figure V.16 (a) : La déformation ($S3$) en fonction du temps ;(b) le courant de court-circuit I_{cc} en fonction du temps.....	157
Figure V.17: Courant de court-circuit à 15Hz en fonction du champ E_{dc} à une déformation constante $S1 = 3\%$	158
Figure V.18 : Courant de court-circuit à 15Hz en fonction de la déformation à un champ $E_{dc} = 0.4 V/\mu m$	158
Figure V.19 : La puissance récupérée expérimentale à 15 hertz en fonction de la charge pour un champ électrique statique $E_{dc} = 0.4 V/\mu m$ et une déformation transversale $S1 = 3\%$	160

Chapitre VI

Figure VI.1- Transfert d'énergie entre deux condensateurs.....	164
Figure VI.2.(a) Schéma électrique utilisée avec conversion AC, (b) pour le redressement de la tension générée DC.....	166
Figure VI.3 Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 0.5% et un champ électrique de $7V/\mu m$	168

Figure VI.4 (a) Schéma mécanique proposée (b) schéma électrique du doubleur de fréquence correspond.....	169
Figure VI.5 puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 0.5% et un champ électrique de 7V/ μm utilisant la structure proposée.....	169
Figure VI.6 Circuit équivalent pour le chargement d'un condensateur.....	170
Figure VI.7. Energie générée en fonction de la charge et de la capacité d'accumulation...	172
Figure VI.8. Energie générée en fonction de la capacité d'accumulation.....	173
Figure VI.9 Circuit électronique permettant l'optimisation de la puissance transférée vers la batterie.....	174
Figure V.10 Puissance générée en fonction de la tension de sortie du redresseur.....	175
Figure VI.11. Puissance générée en fonction du rapport cyclique.....	177
Figure VI.12- Dispositif de commutation SSHI et allure des signaux en l'absence d'une charge.....	178
Figure VI.13 : SSHI parallèle schéma de principe.....	179
Figure VI.14 : Puissance générée en fonction de la charge sur les deux structures classique et proposée avec et sans technique SSHI.....	180

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Ces dernières années, nous sommes les témoins d'une irruption des systèmes autonomes ou sans fil. L'utilisation des téléphones portables, des ordinateurs portables, des baladeurs numériques, des PDA ou des GPS est devenue quotidienne. Ainsi nombreux sont les domaines où la mesure physique via des capteurs est indispensable au fonctionnement de systèmes communicants tels que la surveillance de sites militaires, les machines industrielles, les relevés de données spatiales... Ainsi, ces dernières années, de plus en plus d'environnement sont instrumentés. Ces dispositifs tiennent compte de la puissance et de la polyvalence incroyables dans la communication et la résolution des problèmes. Mais, comme la technologie de portable a grandi énormément, la batterie et la technologie de stockage d'énergie n'est pas entretenue. L'utilisation de la batterie électrochimique comme source est limitée par sa capacité en énergie et encombrant. Le développement des technologies MEMS, et la « mechatronic » permettent d'envisager une alimentation de ces systèmes. Ainsi, récupérer l'énergie ambiante est une alternative prometteuse afin d'assurer l'autonomie énergétique d'appareils nomades. Toutefois, à chaque environnement peut correspondre une ou plusieurs sources d'énergie telles la lumière, le vent, les gradients thermiques, les vibrations mécaniques, ect... Les avantages de cette solution sont évidents : la durée de fonctionnement du dispositif est limitée uniquement par l'existence d'une source externe et, la taille du dispositif peut être réduite. Le développement de l'usage des sources d'énergie renouvelables est donc inévitable (les ressources pétrolières, gazières, etc. commencent à s'épuiser et à engendrer des tensions internationales) mais, qui plus est, particulièrement souhaitable pour la sauvegarde de notre environnement, de la biosphère et de la planète. De nombreux travaux ont été réalisés autour de ces énergies renouvelables. La lumière, présente dans une majorité d'environnements, offre la plus haute densité de puissance pour une source ambiante ($15000 \mu \text{ W.cm}^{-3}$). Elle est suivie par les sources types flux d'air, vibrations mécaniques (autour de $300 \mu \text{ W.cm}^{-3}$), puis gradient thermique ($40 \mu \text{ W.cm}^{-3}$). L'énergie solaire a fait l'objet de bon nombre d'études et son développement est assez avancé, ce qui rend l'innovation technique limitée. L'énergie thermique est moins présente dans l'environnement ambiant. Sa densité de puissance est la plus faible des trois densités énoncée ci-dessus, elle

n'est donc pas la mieux adaptée pour fournir la puissance nécessaire à l'alimentation des capteurs. Nos efforts se focalisent sur les sources ambiantes mécaniques. Elles existent sous différentes formes : déformations, variations de contraintes. Toutes opèrent à des fréquences inférieures à la centaine d'hertz. Cette énergie peut être aussi les vibrations indésirables ou les mouvements permanents d'humains par exemple qui sont convertis en énergie électrique pour alimenter le mobile. L'amélioration des performances et de la compétitivité des dispositifs, sont en cours de développement avec l'évolution des matériaux intelligents du type polymères ou céramique. Ces dix dernières années, les matériaux polymères électroactifs ont suscité un grand intérêt en raison de leur grande déformabilité sous l'action d'un champ électrique. Cette caractéristique spécifique est essentiellement requise dans des applications électromécaniques de type actionneur ou capteur, Les matériaux polymères sont d'autant plus intéressants qu'ils sont faciles à fabriquer à faible coût, très flexibles et de dimensions facilement modulables. Néanmoins, la grande majorité des polymères électroactifs présentent une faible activité électromécanique par rapport aux céramiques ferroélectriques et les grandes déformations observées ($\sim 7\%$) nécessitent des champs électriques élevés (de l'ordre de 150 MV/m). Toutefois, il a été récemment démontré que des déformations importantes sous des champs électriques de 20MV/m pouvaient être atteintes avec certains élastomères polyurethane (PU).

Ce travail entre dans le cadre d'un projet de recherche sur les transducteurs à base de céramiques, Laboratoire Dosage Analyse et Caractérisation. L'objectif est de montrer l'utilité des polymères electrostrictives 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 du laboratoire, qui concerne les polymères électro-actifs. Le second s'intéresse à la caractérisation mécanique et électrique des films de polymère réalisés au laboratoire LGEF afin d'acquérir les données nécessaires pour comprendre les phénomènes observés sur la réponse en actionnement ou en récupération d'énergie, Le procédé de réalisation des films sera aussi abordé. ainsi que la synthèse et la caractérisation de films composites à base d'élastomères chargés avec du carbone, sous différentes formes (poudre nanométrique, nanofils) ou avec un matériau polaire (poudre, cristaux piézoélectriques), Le troisième chapitre présente la modélisation des polymères electrostrictives. Le modèle analytique est réalisé à partir des caractérisations mécaniques et électriques mise en place. Ce modèle est validé par des résultats expérimentaux.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation des micros générateurs à base de polymères électroactifs. Ce modèle permet de démontrer le fort potentiel des matériaux pour la récupération. Pour cela la modélisation en mode générateur pour ce type de matériau sera entreprise. Les mesures réalisées permettent de valider le modèle développé.

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 non-linéaires et les analyses spectrales développées au laboratoire et les adapter pour ce type de structures. Nous donnerons à la fin de cette thèse quelques pistes de développement et d'optimisation et nous terminerons par une conclusion et les perspectives.

CHAPITRE I :

LITTERATURES DE L'ETAT DE L'ART SUR LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RECUPERATION DE L'ENERGIE

Littératures et l'état de l'art sur 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 dispositifs autonomes déjà réalisés. La problématique principale est la réduction de notre impact sur le système écologique, tout en conservant notre qualité de vie. 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 un intérêt croissant pour le domaine des microsystemes autonomes sans fil peut être remarqué. Un système autonome peut être implanté dans un bâtiment, une machine ou le corps humain, généralement, Ces appareils sont conçus pour travailler de manière isolée, souvent dans des endroits difficilement accessibles et pendant de longues périodes. Pendant longtemps les batteries ont favorisé le développement de ces appareils en les rendant énergétiquement autonomes. Néanmoins, cette méthode d'alimentation est devenue insuffisante pour les applications modernes. En effet le remplacement ou la recharge d'un grand nombre de piles, dans un milieu hostile, est souvent économiquement injustifié voire impossible. La diminution considérable de la consommation en énergie des dispositifs électroniques, ainsi que le développement des technologies MEMS, permettent d'envisager une alimentation de ces systèmes à partir d'une énergie ambiante. . 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.

I.2 Généralité sur les microsystemes

Le terme américain MEMS (Micro Electro Mechanical System) qui s'est imposé aujourd'hui pour remplacer les « Microsystemes » européens et les « Micromachines » japonaises, englobe un ensemble de composants réalisés sur silicium à l'aide de micro technologies. Les microsystemes 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. Ils sont appelés MEMS aux Etats-Unis, Micro-machines au Japon et MST (Micro-systèmes Technologies) en Europe. On utilise en France le terme de micro-système [1].

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 [1].

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 [1].

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.

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).

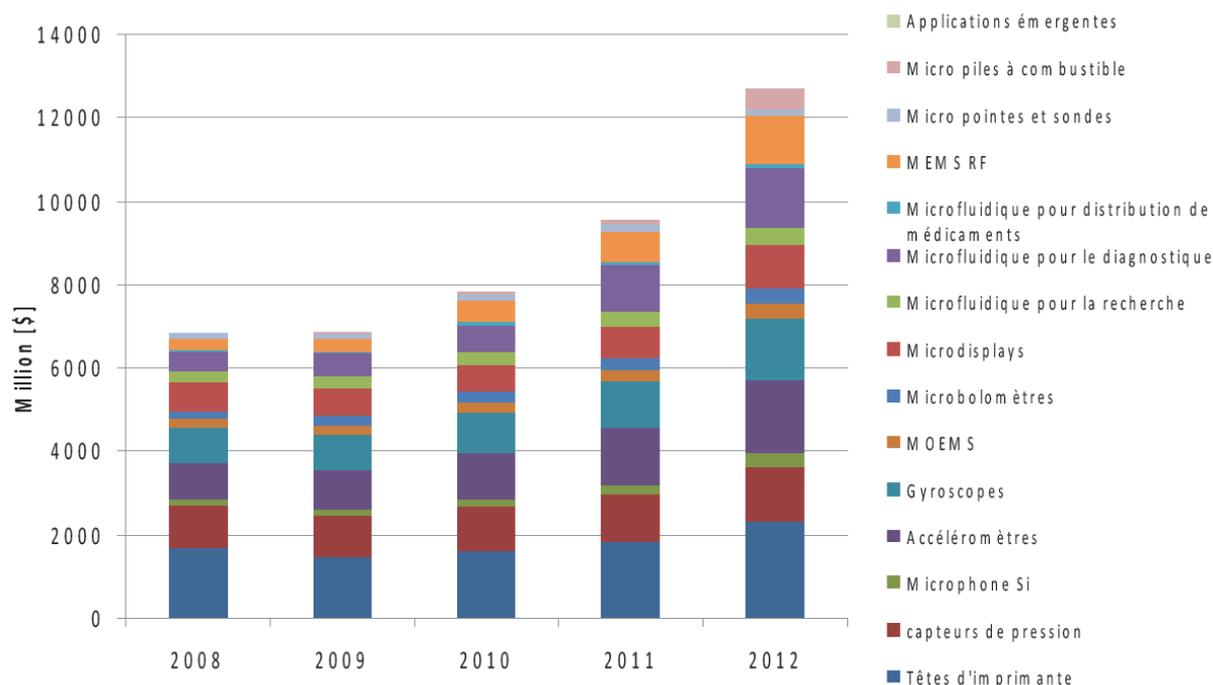


Figure I.1: Evolution du marché des MEMS par applications de 2007 à 2012 (Yole Développement [2])

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,...) [3].

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 [2].

I.3 La récupération d'énergie: contexte, choix et compromis

La thématique de la récupération d'énergie est une thématique assez récente dans l'histoire des environnements intelligents: on peut considérer qu'elle a pris réellement son essor après l'an 2000. Ces dernières années de plus en plus de projets ont vu le jour, de nouveaux axes de recherche ont été examinés et de nouvelles avancées sont régulièrement mises en avant. Notre environnement est rempli d'énergie inutilisée. Un avantage des réseaux de capteurs est leur faible consommation qui permet d'envisager de nouveaux moyens de production. Si certaines sources, comme le solaire et l'éolien attirent de plus en plus l'attention grâce à leur utilisation pour la production quotidienne d'électricité, d'autres sont beaucoup plus confidentielles. Nous allons donc dresser un rapide état des lieux des sources existantes ainsi que de l'énergie pouvant en être extraite grâce aux prototypes réalisés pour y puiser. Cela permettra d'avoir une idée du niveau requis pour être compétitif avec notre approche. Les différentes sources d'énergie sont présentées dans le tableau 1, avec l'énergie moyenne qu'il est possible d'obtenir

Source	Puissance $\mu\text{W}/\text{cm}^3$
Lumière (extérieur)	15000
Lumière (intérieur)	10
Différence de température	40
Energie humaine	330
Flux d'air	380
Variation de pression	17
Vibrations	300

Tableau I.1 : Comparaison des différentes sources de l'énergie ambiante [3].

Pendant longtemps les batteries ont favorisé le développement de ces appareils en les rendant énergétiquement autonomes. Néanmoins, cette méthode d'alimentation est devenue insuffisante pour les applications modernes. En effet le remplacement ou la recharge d'un grand nombre de piles, dans un milieu hostile, est souvent économiquement injustifié voire impossible. La durée de vie de dispositifs ainsi alimentés est directement liée à la quantité de charges initialement stockées dans la pile et donc à sa taille. Il existe alors un compromis entre les dimensions du dispositif et sa longévité. On constate que l'évolution de la densité d'énergie accumulée dans une pile est plus lente en comparaison avec l'évolution des autres domaines touchant la microélectronique [4]. La figure 3 présente le progrès dans le temps de domaines liés à l'électronique et à la télécommunication portable, et l'évolution de la densité d'énergie dans les piles électrochimiques sur une échelle logarithmique entre 1990 et 2003.

Cependant l'utilisation de batterie assez répandue et l'on peut citer en exemple de recherche les piles à hydrogène (qui possède quelques soucis de miniaturisation), ou encore les piles nucléaires qui montrent des densités d'énergie des milliers de fois plus importantes que les piles Li-Ion classique. Figure 2 Une nouvelle source d'énergie pour les dispositifs portatifs est présentée par Lal et Blanchard, de l'université de « Wisconsin » en USA en 2004-2005. Le dispositif conçu s'appelle la micro batterie nucléaire. Cette nouvelle source d'énergie est un effort plus puissant que les cellules de micro fuel. L'efficacité de micro-batteries nucléaires est environ 4 %, mais pourrait produire 50 mW d'énergie électrique avec 10 mg de polonium-210, contenu dans 1 cm³. Cette nouvelle technique nommée génératrice radioactive piézoélectrique. La source radioactive en film mince de nickel-63 est de 4 mm². Sur le sommet de la source est placée, une poutre rectangulaire avec une couche piézoélectrique. L'entraînement mécanique se fait à travers l'échange des électrons entre la plaque radioactive et la poutre. Ces batteries nucléaires peuvent fournir une densité d'énergie des milliers de fois plus grande que ceux des batteries à électrode de lithium [5].

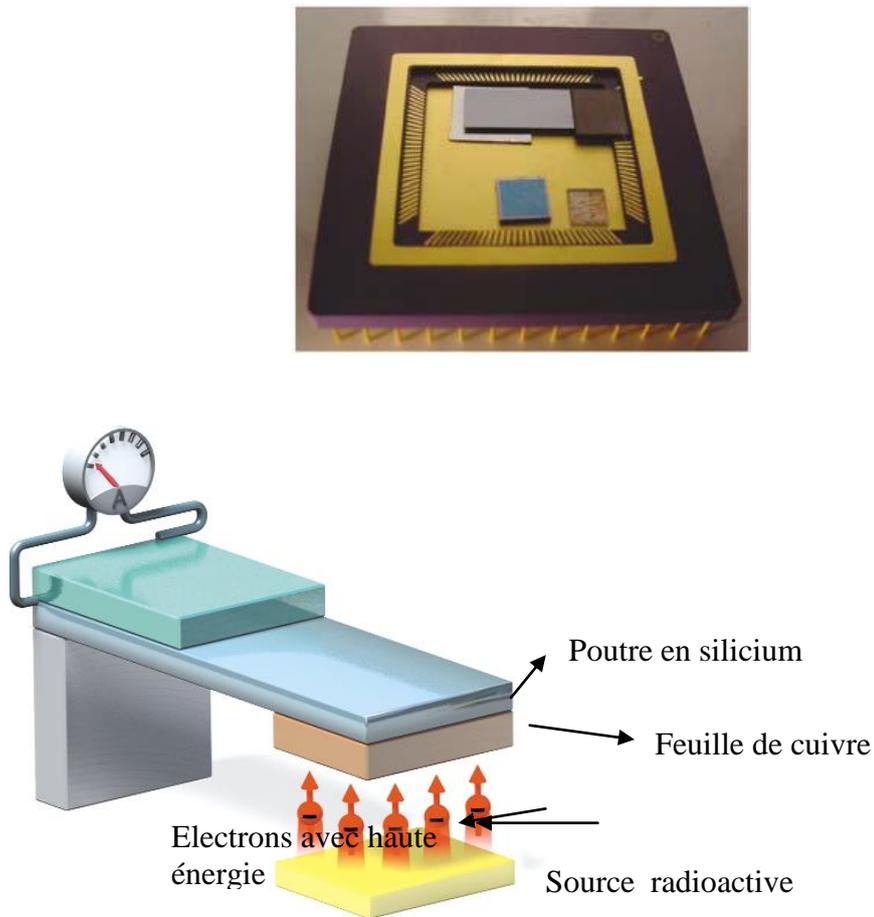


Figure I.2 : Modèle d'une batterie nucléaire

Pour éviter l'utilisation des réservoirs d'énergie avec des capacités limitées, on peut profiter de la diminution considérable de la consommation en énergie de différents dispositifs électroniques. Il est maintenant envisageable d'alimenter un système électronique à partir d'une source d'énergie ambiante (une énergie présente dans l'environnement du dispositif).

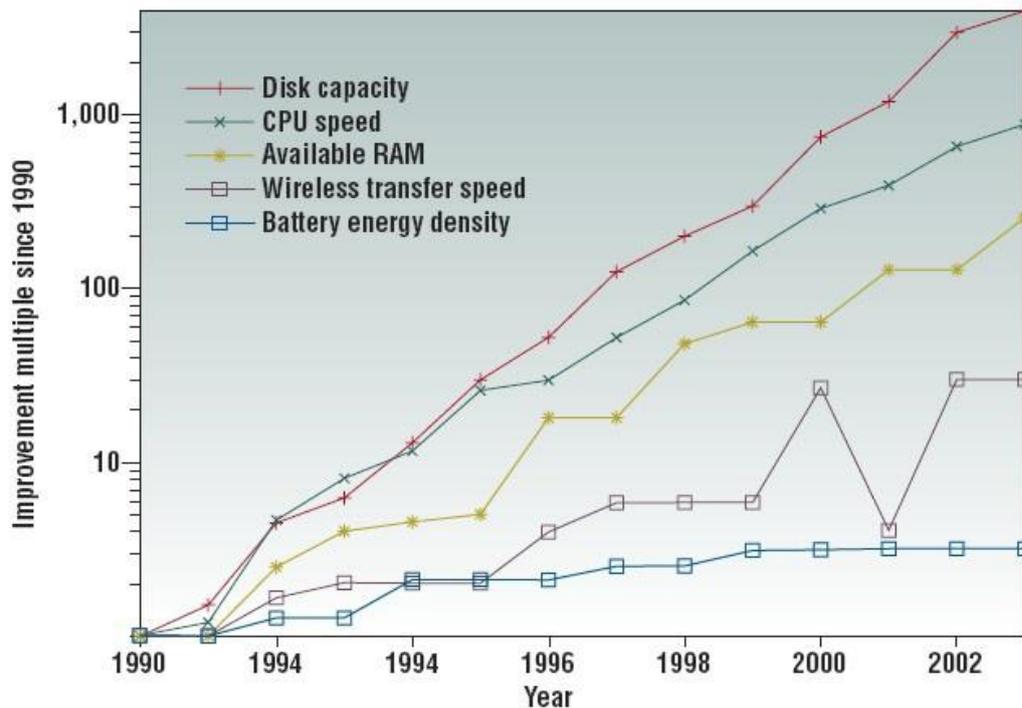


Figure I.3: Evolution de plusieurs domaines de la microélectronique portable et des batteries [6].

Ce graphique montre très clairement que les performances des batteries évoluent plus lentement que toutes les autres caractéristiques. Non seulement la densité d'énergie n'est pas une évolution exponentielle du temps, mais elle semble même atteindre une certaine saturation. Cette tendance pose le problème des sources alternatives d'énergie. Les travaux de Paradiso et Starner [6] récapitulent les différentes sources d'énergies envisageables. Rendre des dispositifs autonomes en termes d'énergie correspond bien à la tendance actuelle en terme de technologie nomades ainsi qu'en terme de développement durable. L'emploi de dispositifs ne nécessite aucune connexion (que ce soit pour alimentation ou la communication) permet de supprimer le câblage coûteux et encombrant. Les recherches initiales (Smart Dust, NEST : projets menés par l'Université de Californie, Berkeley) étaient donc financées par la DARPA [7] avec une visée militaire. Il s'agissait de disséminer plusieurs centaines de capteurs dans la zone à risques (de manière plus ou moins aléatoire). Les capteurs étaient supposés immobiles et devaient résister à la détection et à la destruction.



Figure I.4 : Application à la détection de snipers (Projet NEST)

Il est difficile de prévoir les chiffres d'affaire que générera la récupération d'énergie dans les années à venir puisque cette thématique n'en est qu'à ses débuts. Néanmoins, de nombreux domaines peuvent être demandeurs de ce type de systèmes :

- le transport



Suivre la pression des pneus

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

- la défense et le spatial



Surveillance des frontières



Suivi des appareils (hélicoptères, avions,...)

- le grand public

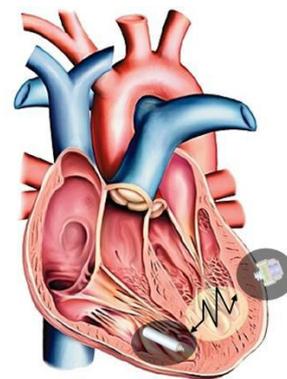
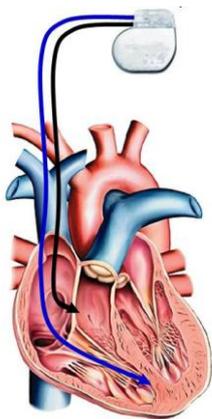


Diminuer la fréquence des rechargements
(lecteur MP3, télécommandes,...)



- le médical

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



Stimulateur actuel Futur stimulateur HBS

8 cm³	Taille du stimulateur	< 1 cm³
Pile 2.5 cm³	Source d'énergie	μ-générateur < 0.5 cm³
1.5 cm³	Circuit électronique	< 0.3 cm³
50 μW	Consommation	35 μW

- l'environnement



Réseau de capteurs dans une serre pour anticiper un tsunami (bouées marines)

Ces réseaux peuvent aussi être utilisés d'un point de vue environnemental non pas pour la recherche mais pour la surveillance de phénomènes naturels. Par exemple, il est envisagé d'utiliser des capteurs sans fil pour détecter les tempêtes de sable. Le principe est de placer des capteurs dans les lieux où généralement les tempêtes de sable se forment, de manière à être informé de la présence d'une tempête (Figure I.5). Des études sont actuellement effectuées sur les possibilités d'architecture du réseau : en effet lors d'une tempête de sable

des nœuds peuvent temporairement être enterrés et avoir une portée d'émission réduite [8]. Les réseaux de capteurs sans fil sont très intéressants pour les surveillances de phénomènes naturels puisqu'ils permettent d'effectuer une surveillance en temps réel des phénomènes, et que les nœuds de capteurs peuvent aisément être déployés par avion dans des endroits peu accessibles.

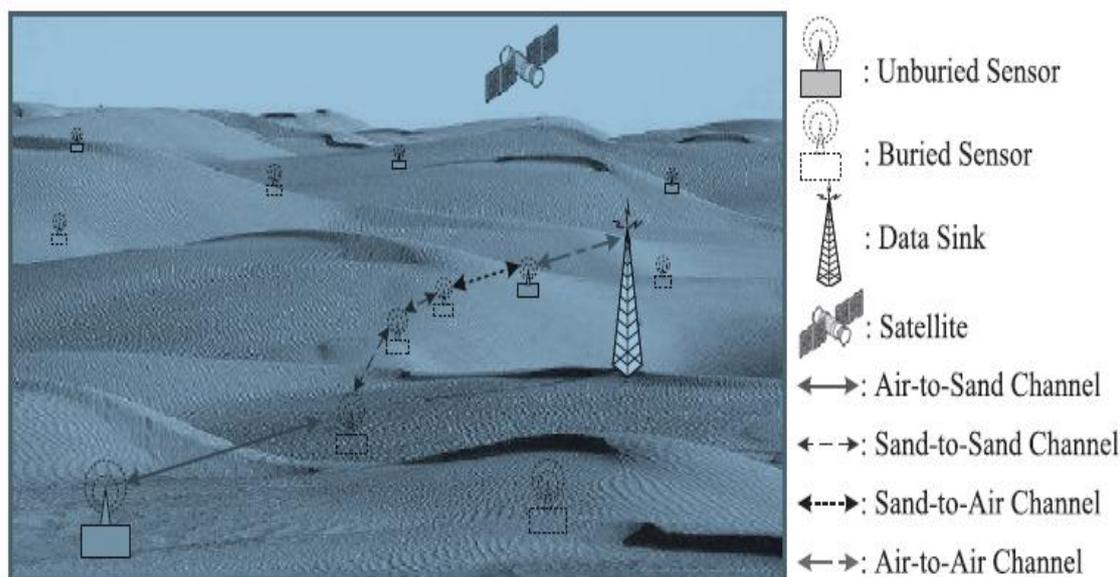


Figure I.5: Réseau de capteurs sans fil de surveillance des tempêtes de sable [8]

I.3 Sources Potentielles

L'intérêt majeur de la récupération d'énergie est la réalisation de microsystèmes complètement autonomes ne nécessitant aucune intervention humaine pendant toute la durée de vie du système. Ceci permet de combler le défaut majeur des piles : la nécessité de les recharger voire de les changer.

La première limite dans l'utilisation des systèmes de récupération d'énergie provient de la physique : la puissance récupérable dépend de la taille du système. Afin de rester dans des dimensions de l'ordre de 1cm^3 , nous retiendrons que la puissance de sortie du système de récupération d'énergie sera de l'ordre de $10\text{-}100\mu\text{W}$. Les microstructures de récupération d'énergie n'ont donc pas vocation à alimenter en continu un ordinateur portable ou un GSM, par contre, elles conviennent parfaitement pour donner l'énergie nécessaire au fonctionnement de capteurs simples (mesures de pressions, d'accélérations, de températures...). Pour ce type

d'applications, la récupération d'énergie devient une solution viable capable de fonctionner pendant plusieurs dizaines d'années.

Plusieurs sources d'énergie ambiante ont été envisagées pour rendre autonome des dispositifs électroniques. Ces différentes sources sont détaillées ci-après.

I.4 Vibrations et contraintes mécaniques

L'idée de récupérer l'énergie mécanique présente dans l'environnement n'est pas nouvelle. Par contre l'idée d'employer les vibrations pour alimenter des dispositifs électroniques est en pleine émergence. Il y a quelques exemples commerciaux de dispositifs alimentés par le mouvement ou les secousses, comme une lampe de poche de la société Applied Innovative Technologies [9] ou la montre Seiko Kinetics [10]. De plus une recherche intensive dans le domaine vise à miniaturiser les générateurs. Selon l'étude faite par Roundy et al. [11] les vibrations constituent une source d'énergie très intéressante avec des densités estimées entre 50 et 250 μ W/cm³.

Un autre avantage de ce type de source est qu'il ne nécessite qu'une liaison mécanique simple avec l'objet en vibration (contrairement à la différence de température et les rayonnements ou le couplage du générateur avec la source est souvent très difficile). La plupart des applications des réseaux de capteurs sans fil concerne des environnements riches en vibrations mécaniques (milieu industriel, transports). 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 micro-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 (piézoélectricité, électromagnétisme, électrostatique) permettent de transformer les vibrations mécaniques en électricité.

I.4.1 Conversion électromagnétique

Beaucoup de systèmes de récupération d'énergie vibratoire sont basés sur le mouvement d'un aimant permanent à l'intérieur d'une bobine. Ce mouvement crée un courant dans la bobine proportionnel à la variation du flux magnétique dans la bobine, donc proportionnel à la vitesse de l'aimant, au champ magnétique moyen généré par l'aimant dans la bobine et à la surface des spires. La valeur de la tension générée est déterminée par la loi de Faraday, selon l'équation I.1

$$e = -n \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (\text{I.1})$$

Avec

e- force électromotrice.

n-nombre de tours de l'inducteur.

Φ -champ magnétique passant par l'inducteur

Une des applications les plus simples de ce principe est la lampe torche représentée sur la Figure I.6. 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.



Figure I.6 : Lampe torche utilisant un générateur électromagnétique

Ces systèmes sont capables de convertir jusqu'à 30% de l'énergie fournie. Ils sont cependant difficiles à miniaturiser, tout d'abord car la densité volumique d'énergie diminue avec la taille du système, et ensuite parce qu'il est difficile d'avoir un système stable avec de forts champs magnétiques. Dans le cas de la récupération d'énergie ambiante, un autre problème se pose : les fréquences en jeu sont inférieures à 100Hz et les bobines ont alors tendance à être plus résistives que selfiques, induisant beaucoup de pertes par effet Joule.

Une structure simple, proposée par Amirtharajah et al. [12] utilisant ce principe de conversion, est présentée à la figure I.7.

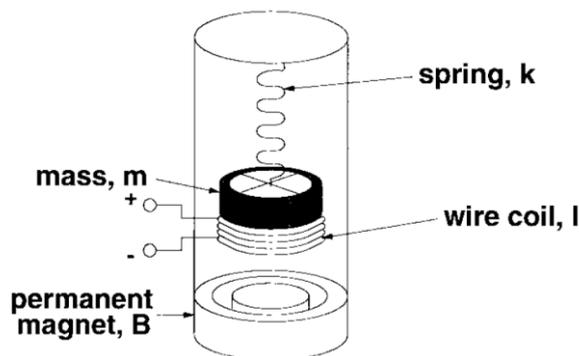


Figure I.7: Schéma d'un simple générateur électromagnétique proposé par Amir tharajah et al. [12].

En suivant le raisonnement de Roundy un dispositif simple peut être analysé en vue d'évaluer sa tension de sortie. Si on considère un inducteur de N tours qui se déplace perpendiculairement dans un champ magnétique d'intensité B à une distance maximale Y , la tension maximale (en circuit ouvert) qui peut être générée est exprimée par l'équation I.2.

$$V_{co} = N.B.L. \frac{\partial Y}{\partial t} \quad (I.2)$$

Pour un champ magnétique maximal de 1 Tesla et un dispositif de 1cm^3 excité à 100Hz, il est très improbable de générer une tension au-dessus de 100mV. De plus en miniaturisant le dispositif, non seulement le nombre de tours dans l'inducteur diminue, mais aussi sa résistance augmente ce qui agrandit les pertes. Une valeur réelle de tension est de l'ordre d'une dizaine de mV voir quelques millivolts ce qui pose de graves problèmes au niveau de la rectification. Une solution utilisant un transformateur n'est pas envisageable en raison des grandes dimensions de celui-ci nécessaires pour le fonctionnement à une faible fréquence.

Un grand nombre de travaux ont été réalisés sur ce sujet. Certaines réalisations concernent des puissances comprises entre $1\mu\text{W}$ et $100\mu\text{W}$ et correspondent à l'échelle des microsystèmes électromécaniques (micro-electromechanical system ou MEMS dans la littérature anglo-saxonne). D'autres réalisations, utilisant des structures plus grandes, atteignent des puissances de quelques centaines de μW .

Le dispositif développé par Li et al [13], permet d'alimenter un émetteur infrarouge. Il occupe un espace de 1cm^3 environ et permet de fournir $70\mu\text{W}$. Comme la puissance nécessaire pour émettre est de 3mW pendant 140ms, l'énergie est tout d'abord accumulée sur un condensateur jusqu'à ce qu'elle soit suffisante pour une émission.

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

Tableau I-2 : Récupération d'énergie vibratoire – Systèmes électromagnétiques.

Auteurs	Puissance μW	Volume mm^3	Tension V	Fréquence Hz
Li [28]	100	1000	-	60
EL-HAMI [29]	1000	240	0.02	320
CHING [30]	830	1000	4.4	110
GLYN-JONES [31]	157	12500	0.005	100
KULAH [32]	2.5	0.06	0.15	10
BEEBY [33]	0.02	100	-	9500
SARI [34]	0.5	1344	0.02	3600
TORAH [35]	58	1000	1.12	52
YUEN [36]	830	50000	1.29	100
KULKARNE [37]	0.148	34.2	-	8080

I.4.2 Conversion électrostatique

Les micro-générateurs électrostatiques sont constitués par un condensateur chargé dont les électrodes peuvent bouger. Contrairement aux systèmes électromagnétiques et piézoélectriques, les générateurs électrostatiques nécessitent d'être pré-chargés avant de pouvoir produire de la puissance[14].

Le schéma simplifié de ce type de générateur est représenté sur la figure I.8. 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.3 [15] :

$$E = \frac{1}{2} V_{in}^2 (C_{max} - C_{min}) \left(\frac{C_{max} - C_{par}}{C_{min} - C_{par}} \right) \quad (I.3)$$

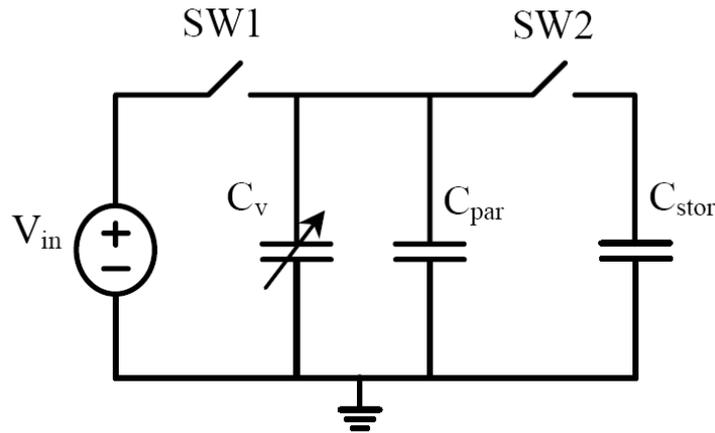


Figure I.8 : Schéma d'un générateur capacitif avec V_{in} – source de tension pour precharger la capacité variable, C_v – capacité variable, C_{par} – capacité parasite et C_{stor} – capacité de stockage.

Deux cas peuvent être envisagés, soit on diminue la capacité à tension constante, dans ce cas des charges électriques sont générées, soit à charge constante, et dans ce cas la tension augmente ainsi que l'énergie électrostatique sur la capacité. Dans les deux cas, le travail mécanique nécessaire à l'écartement des électrodes est converti en énergie électrique.

I.4.2.1. Fonctionnement à charge constante

Au cours d'un cycle de conversion, la structure bouge mécaniquement jusqu'à atteindre sa valeur de capacité électrique maximale C_{max} (C1). Dans cette position, une charge électrique est injectée via une électronique de gestion dans la capacité. En circuit ouvert (C2), la structure bouge mécaniquement (généralement ce sont des vibrations mécaniques qui engendrent les mouvements de la structure) jusqu'à une position où sa capacité électrique est minimale (C3). A ce stade, les charges électriques sont retirées en un temps court devant le mouvement mécanique de la structure (C4).

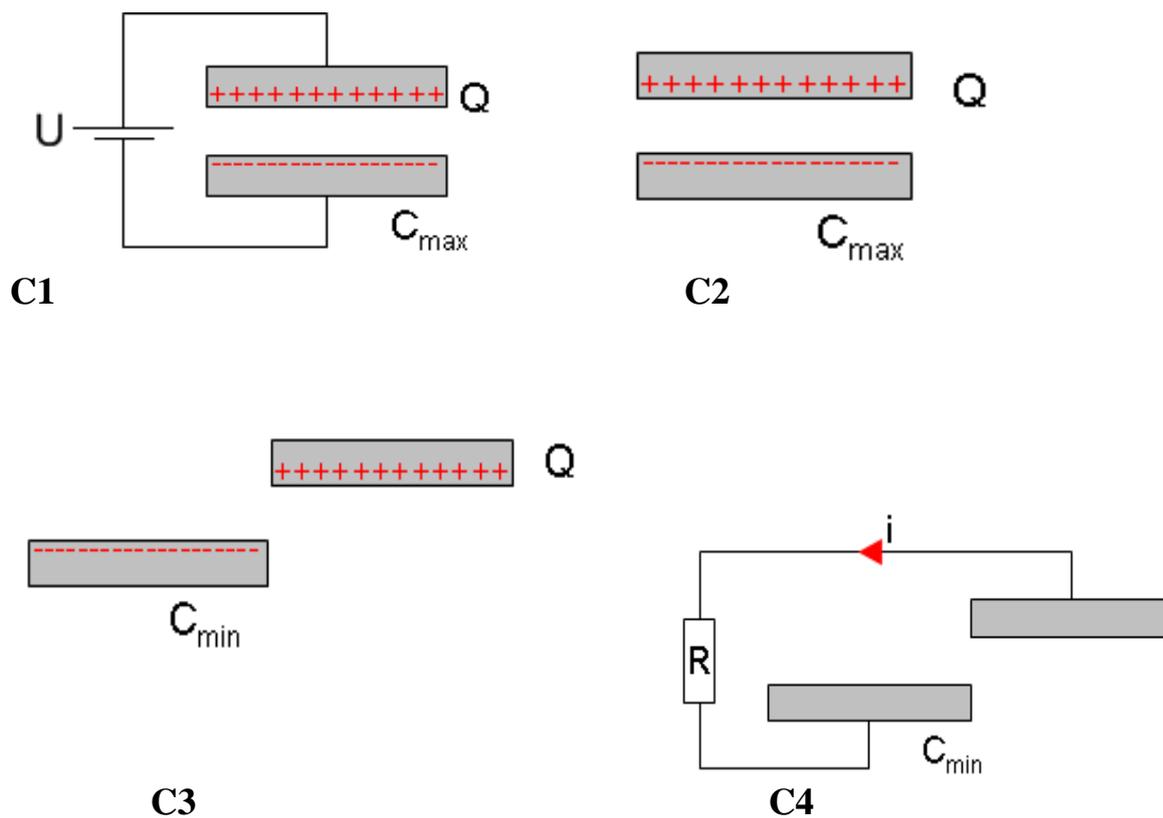


Figure I.9: Convertisseur électrostatique - Cycle à charge constante

I.4.2.2 Fonctionnement à tension constante

La capacité est polarisée à une tension U à l'aide d'une batterie (T1) via une électronique de gestion. Cette tension sera maintenue tout au long du cycle de décroissance de la capacité. La capacité diminue avec une tension constante : la charge diminue et il y a donc circulation d'un courant de recharge de la batterie (T2). Lorsque la capacité atteint sa valeur minimale, la charge encore présente dans la capacité est totalement transférée vers la batterie en un temps court devant le mouvement mécanique (T3).

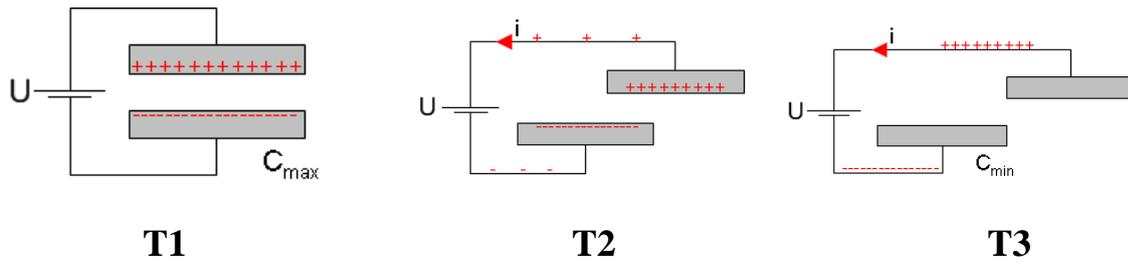


Figure I.10 : Convertisseur électrostatique - Cycle à tension constante

Ghislain Despesse dans sa thèse [16] propose un générateur de puissance fabriqué à partir d'une pièce en tungstène. L'usinage se fait en utilisant l'électroérosion, ce qui élimine la possibilité de miniaturisation (la limite de précision est de $100\mu\text{m}$). Le système montre à la figure I.11 mesurant environ $30\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ et pèse 104 g . La puissance maximale théorique qui peut être tirée de ce générateur est de 1 mW à 50 Hz . Néanmoins, dans le cas pratique, la non symétrie de la structure n'a permis de récupérer que $500\mu\text{W}$. Un test intéressant a été fait en plaçant ce générateur sur le moteur d'une voiture diesel fonctionnant au ralenti avec la fréquence de vibration principale autour de 30 Hz . Une puissance de $232\mu\text{W}$ a été récupérée. Un autre dispositif est aussi étudié, une génératrice électrostatique micro fabrique en silicium. Les problèmes de fabrication n'ont pas encore permis d'obtenir des résultats expérimentaux avec cette structure.

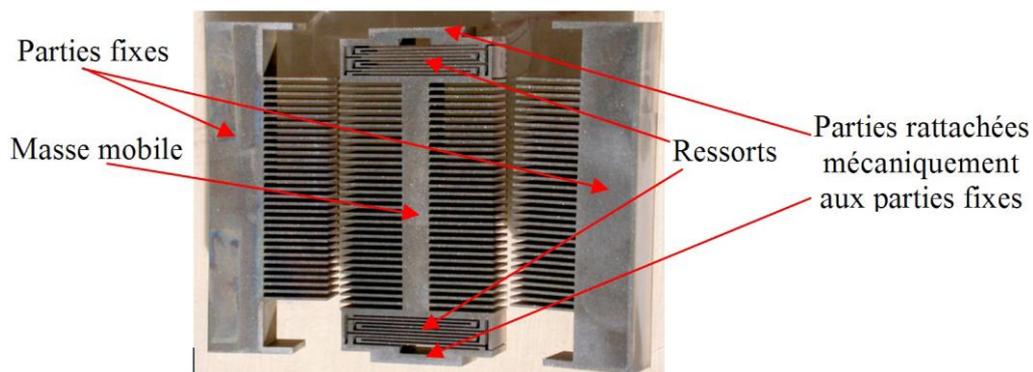


Figure I.11: Générateur électrostatique propose par G. Despesse dans [16].

Bien que la plupart des micro-générateurs électrostatiques soient de très faible puissance, quelques applications font exceptions, comme par exemple la chaussure électrostatique représentée sur la Figure 1-12. Cette chaussure a été développée par le SRI1 (un institut de recherche international indépendant). Elle est capable de produire une puissance de 800 Mw

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.

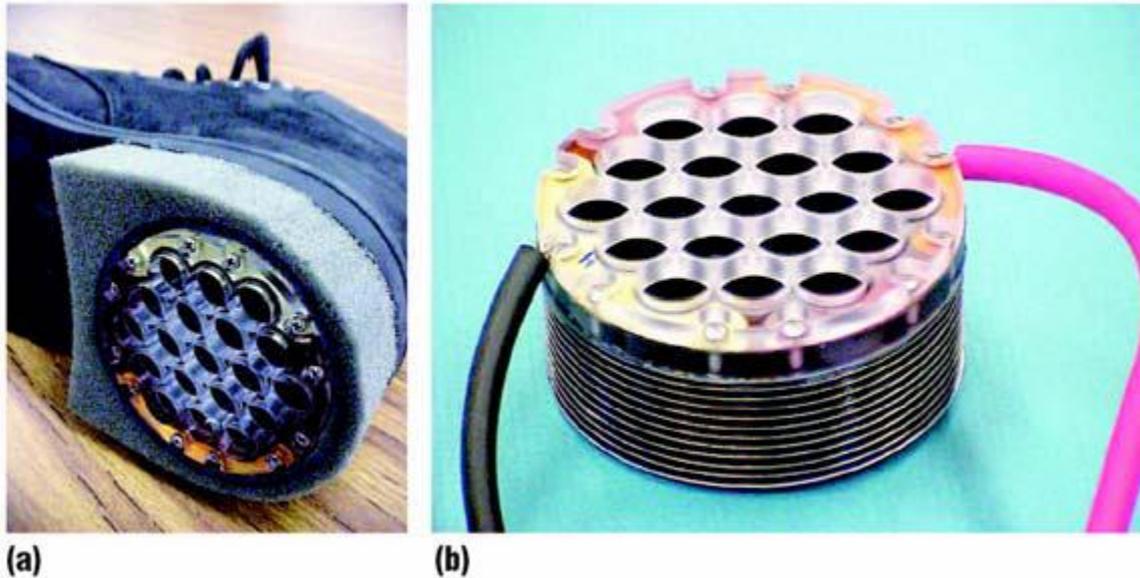


Figure I.12 : Chaussure dotée d'un générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur montrant le soufflet (dessous) et le cadre maintenant le diélectrique (dessus) [16]

I.4.3 Conversion piézoélectrique

Même si la première observation de l'effet piézoélectrique a été effectuée par le minéralogiste français R. Haüy en 1817, c'est aux frères Curie qu'on en attribue la découverte en 1880 à la suite de leurs travaux sur la relation entre structure cristalline et pyroélectricité. Un matériau piézoélectrique se déforme lorsqu'on applique une tension à ses bornes (c'est l'effet direct utilisé par les générateurs), et réciproquement une tension apparaît à ses bornes lorsque le matériau est contraint (c'est l'effet inverse). Les micro-générateurs piézoélectriques sont basés sur l'effet direct de la piézoélectricité, à savoir que l'application d'une contrainte sur un matériau piézoélectrique électrodé entraîne l'apparition d'une tension entre les électrodes. Ce type de convertisseur utilise les contraintes mécaniques en régime quasi-statique c'est à dire que la fréquence de fonctionnement est beaucoup plus faible que la fréquence de résonance propre du système de récupération. L'énergie délivrée par ces générateurs est proportionnelle à la fréquence de répétitions de contraintes utilisées [17]. De plus, ce sont uniquement des

contraintes de fortes valeurs qui peuvent être utilisées, comme le poids d'un homme en marche ou l'appui sur une touche. Les micro-générateurs piézoélectriques peuvent être constitués d'un système mécanique présentant une fréquence de résonance qui couple le micro-générateur aux vibrations ambiantes ou bien les éléments piézoélectriques peuvent être directement sollicités. Les dispositifs utilisant la transduction piézoélectrique exploitent la propriété de certains matériaux ferroélectriques : une polarisation apparaît à leurs bornes lorsqu'ils sont contraints. La nature de l'effet piézoélectrique est étroitement liée à l'apparition de moments dipolaires électriques dans les solides lors de l'application d'une force. Celle-ci peut être soit induite par des ions sur des sites du réseau cristallin ayant un environnement de charge asymétrique (comme dans PbTiO_3 et PZT) ou peuvent être le fait de groupes moléculaires (comme dans le sucre). La Figure I.13 montre la maille cristalline du PbTiO_3 .

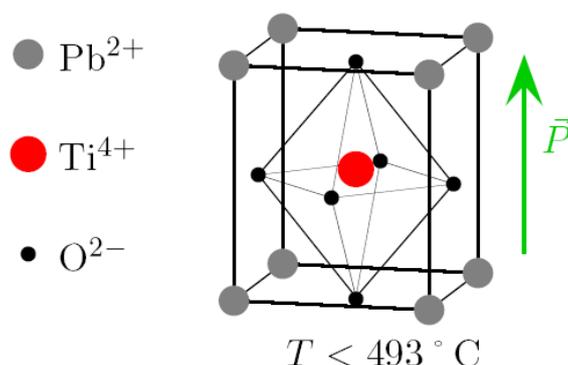


Figure I.13 : Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite : PbTiO_3

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 [18], [19] (voir Figure I.14), membrane ou ressort en S [20]. 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.15) ou monomorphe (une seule couche de matériau piézoélectrique sur une couche de matériau inerte : Figure I.16). 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 (voir Figure I.16) 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

(voir Figure I.17). Permet d'utiliser le mode 33 dans une configuration poutre mais l'optimisation des électrodes et de la poutre est alors plus difficile [21].

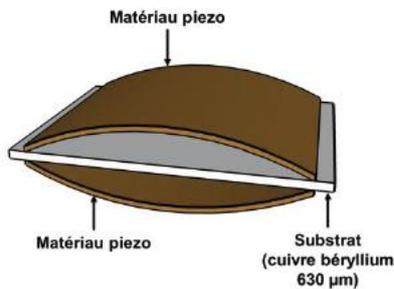


Figure I.14 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format cymbale, d'après [18].

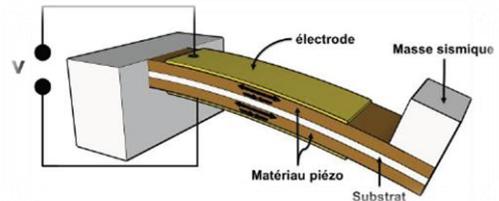


Figure I.15 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre bimorphe

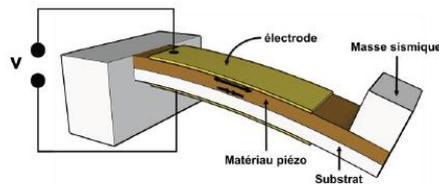


Figure I.16 : Dispositif de récupération d'énergie à partir de vibrations au format poutre unimorphe.

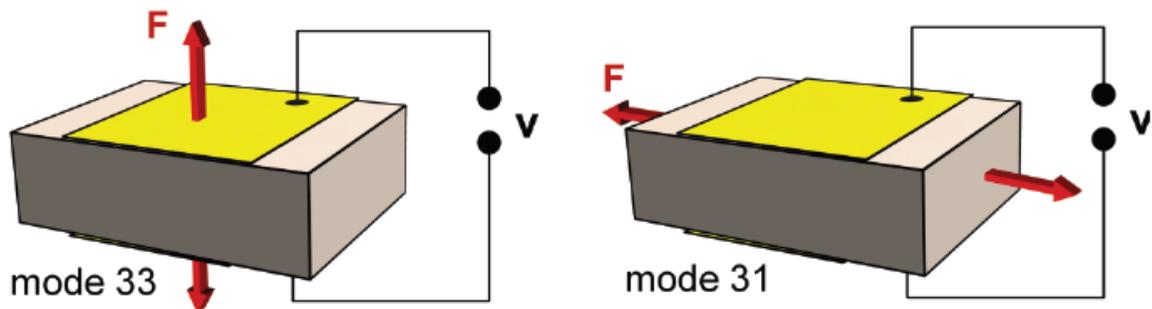


Figure I.17 : Modes 31 et 33 : ces modes de fonctionnement dépendent de la direction relative de la polarisation et de la compression/extension

Deux groupes de recherche travaillent sur des dispositifs capables de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique, par effet piézoélectrique.

I.4.3.1 Le M.I.T. Media Lab

Au sein du M.I.T. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge), une unité appelée MIT Media Laboratory est dirigée par J. Paradiso. Les activités de recherche de ce laboratoire sont caractérisées par le développement conjoint d'un ensemble inhabituel de disciplines (cognition, musique électronique, conception graphique, vidéo, holographie...). Les chercheurs du MIT Media Lab travaillent également sur les interfaces hommes-machines, et sur la génération portable de l'énergie. Dans ce cadre, deux types de dispositifs piézoélectriques ont été mis au point : un prototype de touche et une chaussure piézoélectriques.

- a- 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 [22]. Ce brevet concerne la récupération de l'énergie. Mécanisme dissipé 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.18) et joue le rôle de mini-générateur de courant permettant la charge d'un condensateur.

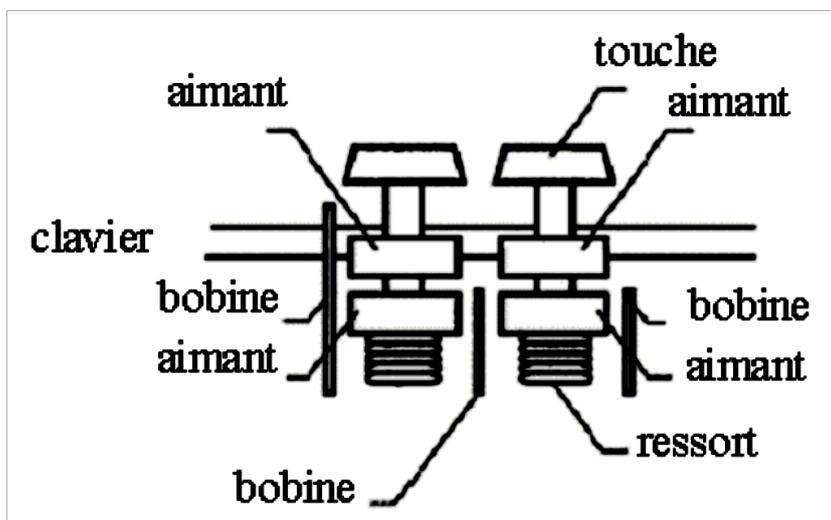


Figure I.18: Schéma des touches du clavier Compaq

- b- Les chaussures piézoélectriques :** L'équipe du M.I.T. a comparé deux dispositifs du point de vue de la puissance générée lors de la marche (fréquence 0,9 Hz) :
- Une feuille de PVDF flexible, placée dans la semelle, récupère l'énergie des mouvements de flexion pendant chaque pas. L'énergie récupérée sur charge adaptée de 250k Ω est de 1,3 mW.

- Un dispositif formé de 2 rubans précontraints et incurvés de céramique PZT, appelé μ (dimorphe), placé dans le talon. L'énergie récupérée sur charge adaptée de $500k\Omega$ s'élève à 8,4 mW.

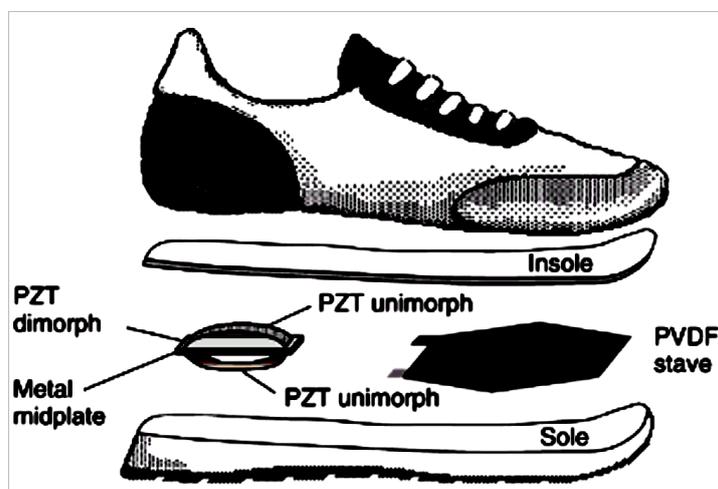


Figure I.19: Schéma de la feuille de PVDF et du dimorphe insérés dans la chaussure [23]..

I.4.3.2 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. La distinction entre ces deux régimes n'est pas nouvelle. Elle est issue des deux types de systèmes d'allumage piézoélectriques. 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 chapitre II, 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.

A- Régime dynamique

Système piézoélectrique fonctionnant en compression. Dans le cas des touches piézoélectriques mis au point par le MIT [24], 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 SP comprimé par choc est l'alimentation de l'électronique embarquée sur les missiles [25].

B- Régime quasi-statique

En régime quasi-statique, le SP 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.

I.4.3.3 Contrainte de fonctionnement

Le respect de certaines limites de champ et de contrainte est nécessaire, sans quoi les céramiques risquent une détérioration :

- **Rigidité diélectrique** : Comme tout matériau isolant, la céramique possède une rigidité diélectrique qui conduit naturellement à une valeur limite de la tension appliquée.
- **Champ coercitif** : De part leurs propriétés ferroélectriques, les céramiques présentent un cycle d'hystérésis P(E). Celui-ci fait apparaître une valeur limite (champ coercitif $E_c \approx 1500\text{V/mm}$), au-delà de laquelle le matériau se dépolarise.
- **Contrainte maximale acceptée** : Les céramiques supportent des valeurs extrêmement élevées de contraintes, jusqu'à 20 MPa. Cependant, elles résistent moins bien aux chocs.
- **Déformation relative maximale** : Une déformation supérieure à $S_{\text{max}} \approx 3 \cdot 10^{-4}$ peut causer des fissures et des cassures au sein des céramiques. De plus, ces poudres compactées et frittées supportent moins bien la dilatation que la compression. C'est pourquoi une précontrainte leur est souvent appliquée en cas de sollicitation alternative.
- **Echauffement** : Lors d'un fonctionnement en haute fréquence, les pertes diélectriques et mécaniques causent un échauffement de la structure. Pour éviter tout risque de dépolarisation, il est souvent conseillé de ne pas dépasser la moitié de la température de Curie, même si cela laisse une marge conséquente.

I.4.4 Conversion magnétostrictive

La magnétostriction, souvent confondue avec le piézomagnétisme, désigne la propriété que possèdent les matériaux ferromagnétiques de se déformer sous l'effet d'un champ magnétique. Le phénomène fut découvert pour la première fois par James Prescott Joule en 1847, qui démontra son existence en mesurant l'allongement d'un échantillon de fer soumis à un champ magnétique [26].

Un transducteur magnétostrictif est typiquement constitué d'un solénoïde traversé par un courant d'excitation servant à générer un champ magnétique variable, à l'intérieur duquel se trouve placé un barreau en matériau ferromagnétique, le tout étant enfermé dans un cylindre assurant la fermeture du circuit magnétique. Afin d'assurer des déplacements bidirectionnels, une magnétisation statique du matériau est obtenue soit au moyen d'un aimant permanent, soit en faisant circuler dans le solénoïde un courant continu qui vient se superposer au courant d'excitation variable. D'autre part, une précontrainte mécanique est généralement appliquée au barreau ferromagnétique au moyen d'un boulon, ceci afin de faire travailler le transducteur en compression et ainsi toujours garantir la transmission des efforts mécaniques à l'interface du transducteur et de la charge appliquée. Les matériaux ferromagnétiques employés peuvent être le fer, le nickel, ou des alliages aluminium-fer (alfenol) ou nickel-cobalt, bien que le matériau le plus couramment utilisé soit le Terfenol-D, du fait de ses bonnes performances magnétostrictives.

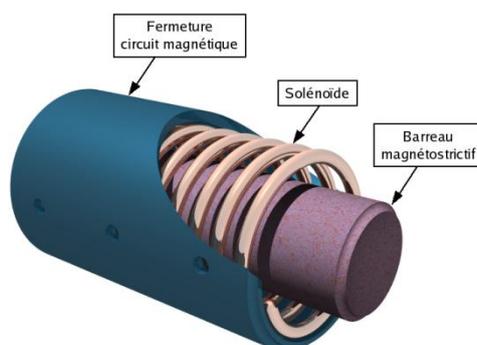


Figure I.20: Principe de fonctionnement d'un générateur magnétostrictif [26]

Les matériaux magnétostrictifs, comme les matériaux piézoélectriques étudiés précédemment, présentent un couplage entre des domaines différents. Pour cette raison, les lois de comportement de ces matériaux sont très similaires. Néanmoins, ce système n'est pas réellement un récupérateur d'énergie vibratoire car la contrainte à laquelle est soumis le

matériau est contrôlée de façon externe. Malgré cela, ce convertisseur démontre le potentiel élevé de conversion énergétique des matériaux magnétostrictifs.

Le principal avantage de la technologie magnétostrictive est le fort coefficient de couplage permettant de générer de fortes puissances électriques. Cependant, comme la technologie électromécanique, la présence d'aimants ou de bobines résulte en des générateurs volumineux

I.4.5 Problématique de recherche

L'objectif de notre étude dans la partie suivante est de proposer un état de l'art des générateurs, basés sur une technologie innovante et alternative aux solutions classiques connues (piézoélectricité, l'électromagnétisme et l'électrostatique).

En effet, le critère majeur de cette étude est le caractère des travaux entrepris concerne la ductibilité. La plupart des générateurs et actionneurs existant ont des structures rigides fabriquées à base de métaux comme les structures électrostatiques ou encore celles à base de céramiques piézoélectriques très fragile comme indiqué dans le paragraphe précédente. 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. Ainsi, les polymères électro-actifs, matériaux souples possédant des propriétés physiques particulières, sont les meilleurs candidats pour développer des générateurs flexibles et des actionneurs souples. 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 du matériau à son utilisation en générateur en passant par sa caractérisation fiable et sa modélisation. De plus en plus d'équipes scientifiques se positionnent dans ce domaine des polymères électro-actifs mais aucune étude comparative ne complète en mode générateur et actionneur n'a été réalisé.

I.5 conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la problématique de la génération d'énergie à l'aide de matériaux intelligents, dans le but d'alimenter des appareils électroniques portables. Depuis quelques années, de nombreux groupes de recherche s'intéressent à la récupération de l'énergie des mouvements dans l'environnement, car même si une faible proportion seulement peut être convertie en énergie électrique, celle-ci permettrait d'alimenter certains appareils portables, Cette étude bibliographique sur les différents type des générateurs nous a convaincu

qu'une architecture de micro convertisseur d'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique fonctionnant en régime dynamique représente un bon choix. Cependant, ces derniers sont en pleine expansion depuis ces dernières années et suscitent un intérêt marqué dans la communauté scientifique. C'est pourtant dans la compréhension de ces mécanismes que nous pouvons trouver les clés de l'optimisation du convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique.

CHAPITRE II :

ETAT DE L'ART DES POLYMERS ELECTROACTIVE (EAP) ET CARACTERISATION ELECTRIQUE

Etat de l'art des EAP élaboration et caractérisation électrique

Ce chapitre se veut un coup de projecteur sur les polymères électro-actifs (EAP) en termes de matériaux, de leurs capacités et de leurs potentiels à former des structures intelligentes. Ces nouveaux matériaux et les applications qui en découlent, continuent à faire l'objet de recherches et de démonstrations applicatives nous présentons un état de l'art portant sur les différents polymères électro-actifs fabriqués au laboratoire LGEF INSA lyon et leurs applications. Une présentation, de toutes les classes de matériaux électro-actifs, de leurs propriétés électriques et de leurs principes de fonctionnement, nous permettra de nous situer par rapport aux objectifs de cette thèse

II.1 Introduction

Les polymères électro actifs, ou « muscles artificiels », sont des composés organiques légers, flexibles et capables de répondre à une stimulation électrique par un changement en dimensions, et en formes. D'une manière générale, dans la famille des polymères électro-actifs, nous pouvons distinguer plusieurs types des capteurs: électrostatique, électromagnétique, piézoélectriques, thermoélectriques... (Comme montré dans le chapitre précédent). La limitation de ces technologies dépend des paramètres suivants : la déformation de l'actionneur, la pression d'actionnement, la rapidité de la réponse, et le rendement énergétique... Généralement l'électro-activité dans un matériau est définie par une réponse réversible d'une ou plusieurs propriétés physico-chimiques. Bar-Cohen [27], [28], [29], a développé une classification de ces polymères, adoptée depuis par la communauté scientifique et qui sert de base à notre étude. Cette classification est reportée dans le tableau II.1.:

	<i>Nom</i>	<i>Principe Physique</i>	<i>Exemple de matériau</i>
Famille électronique	Polymère ferroélectrique	matériau qui possède, à l'échelle des domaines élémentaires, un moment dipolaire permanent (exemple : piézoélectricité).	● piézoélectrique : PZT, PVDF
	Electret	matériau ayant une polarisation électrique non nulle après exposition à un fort champ électrique ou après injection de charges (Corona poling)	● PVDF, Polypropylène (PP) ou PTFE chargé
	Elastomère diélectrique	matériau fonctionnant sur le principe d'une capacité variable : effet électrostatique entre charges	● acrylate : VHB 4910 de 3M® ● silicone : HS3 de Dow Corning®
	Elastomère électrostrictif	matériau électrostrictif qui a la particularité d'être composé d'une matrice flexible et d'un polymère greffé sous forme cristalline.	● matrice : copolymère du chlorotrifluoroéthylène ou trifluoroéthylène ● grèffe : P(VDF-TrFE)
	Papier électroactif	matériau type papier composé d'une multitude de particules (fibre naturelle) formant un réseau et, combinant des propriétés piézoélectriques à une migration ionique	● cellulose prise en sandwich entre deux électrodes métalliques (or, platine...)
	Elastomère électroviscoélastique	matériau composé d'un élastomère en silicone et d'une phase polaire. Il se comporte comme un fluide électrorhéologique	
	Elastomère LCE (liquid cristal elastomer)	matériau qui possède des propriétés piézoélectriques et qui se déforme en réponse à un gradient thermique (Effet Joule	

		pour une activation électrique)	
Famille ionique	Gel ionique	matériau qui devient dense (contraction) ou gonflé (étirement) lors du passage d'un environnement acide à un environnement alcalin	●polyacrylonitrile
	Composite ionique (IPMC)	matériau qui se courbe en réponse à un champ électrique par migration ionique au sein d'une membrane sélective d'ions.	●membrane sélective : Nafion® ou Flemion® ●électrode : platine, or
	Polymère conducteur ionique (CP)	matériau sujet à des réactions d'oxydoréduction qui induisent des variations de volume.	●CP : polypyrrole, polyaniline
	Nanotubes de carbone	matériau dont la balance électronique entre le nanotube et l'électrolyte est modifiée par injection de charges, ce qui induit des changements de dimensions.	
	Fluide Electrorhéologique	matériau sujet à des migration de particules, qui fait varier les propriétés rhéologiques du fluide comme la viscosité	●LID 3354 de ER Fluid Developments Ltd.

Tableau II.1: Classification des polymères électro-actifs [30].

Les polymères électro-actifs ou plus communément «EAP», sont potentiellement intéressants pour de nombreuses applications. Ces polymères répondent à une stimulation électrique par un changement de taille ou un changement de forme significatif. [31]. Les EAP ont attiré beaucoup l'attention des ingénieurs et des scientifiques dans diverses disciplines. Même si les applications des EAP sont encore à un stade embryonnaire, plusieurs recherches ont été entamées au milieu des années 90 sur ces polymères stimulés électriquement, en particulier dans le domaine de la bionique : un domaine d'étude où les mécanismes robotisés sont basés sur des modèles d'inspiration biologique. En effet, plusieurs groupes de recherche ont misé sur ce type de technologie se fondant sur la capacité de ces matériaux à imiter le muscle naturel. De nombreux projets de recherches ont été amorcés pour réaliser des insectes robotisés, des éléments de pilotage de cathéter, des bras robotisés miniature... Cependant, peu d'efforts ont été faits pour tenter une miniaturisation de ces dispositifs pour la récupération d'énergie.

En général, les EAPs peuvent produire des déformations qui peuvent aller jusqu'à deux ordres de grandeur supérieures à celles obtenues avec des céramiques électro-actives (EAC). En outre, les EAP ont des réponses mécaniques supérieures aux alliages à mémoire de forme

(SMA). Ils présentent par ailleurs une réponse plus rapide en plus de leur plus faible densité et de leur plus grande résilience. Une comparaison des propriétés des EAP présentée par Bar Cohen met en évidence les avantages des EAP comme une technologie pour l'actionnement.

II.2 Les EAPS ioniques

II.2.1 Les gels ioniques

Appelés « Ionic EAP » en anglais, ces polymères se basent sur une diffusion d'ions ou de molécules au sein du matériau. Les actionneurs utilisant des « ionics polymers » ont généralement la même structure qu'une pile, soit deux électrodes séparées par un électrolyte.

L'application d'une différence de potentiel à un gel ionique tel que le gel d'acide acrylique par exemple cause le mouvement des ions hydrogène à l'intérieur ou hors du gel. Ceci modifie l'environnement et induit une transition de l'état acide à l'état alcalin se traduisant par une modification de la densité. Le matériau peut alors passer d'un état dense à un état enflé [32]. La Figure II.1 donne un exemple de polymère ionique, il s'agit d'un polymère polyélectrolytes réticulés remplis d'eau. Les deux faces opposées contiennent du métal en grains fins sur une épaisseur d'environ 20 μm . Les particules métalliques, réparties au hasard, se concentrent essentiellement en surface, formant par percolation deux électrodes à large surface de contact.

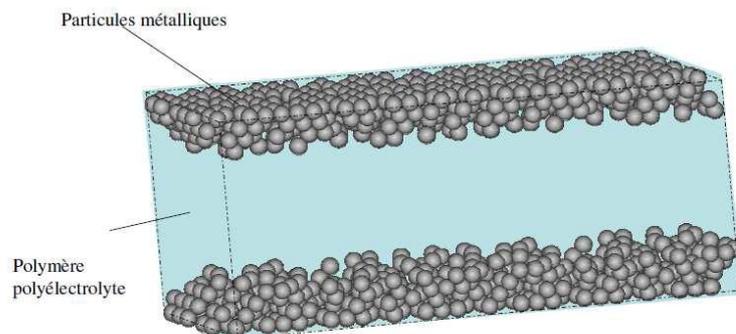


Figure II.1: Exemple de structure de polymère ionique [33]

II.2.2 Les composites polymères-métal ioniques (IPMC)

Les composites polymère-métal ionique (Ionic Polymer Metal Composites : IPMC) sont une des variétés d'EAP [34] [35], et sont utilisés essentiellement pour des déplacements en

fléchissements à des faibles valeurs en tension. Ces systèmes sont réalisés à partir de membranes organiques conductrices d'ions telles que le Nafion et le Flemion sur lesquelles sont déposées des électrodes.

L'application d'un champ électrique entre les électrodes entraîne un déplacement d'ions à l'intérieur du matériau qui, au final, change la répartition du solvant près de chacune des électrodes. Une étape importante démontrant la potentialité applicative des EAP a été franchie en 2003 avec l'émergence du premier produit commercial. Ce produit est un poisson-robot qui est mu par un actionneur utilisant un polymère électro-actif de type IPMC. L'énergie pour l'actionnement est transmise au poisson-robot par l'intermédiaire de bobines d'induction électromagnétique dans le haut et le bas de l'aquarium, induisant un courant dans un solénoïde situé à l'intérieur du poisson. Le poisson-robot et l'aquarium ont été développés conjointement par les sociétés Ikeda-Eamex Corporation et DaiichiKogei, au Japon. Les IPMCs montrent également leurs potentiels au travers d'une pince à quatre bras permettant la saisie d'objet comme représenté à la Figure II.2.



Figure II.2: Exemple de pince composée de quatre bras indépendants réalisés en IPMC.

Il existe deux types de modèles expliquant le mécanisme d'actionnement propre au IPMC :

- Un modèle électrostatique : l'application d'un champ électrique crée des forces électrostatiques d'attraction et de répulsion. La redistribution des cations génère une densité de charge non homogène ce qui produit une force interne sur la chaîne carbonée du polymère. Cette dernière se relâche dans les zones riches en anions et se tend dans les zones riches en cations, ce qui crée la courbure du matériau.

- Un modèle hydraulique : l'application d'un champ électrique crée une migration des cations qui entraînent avec eux des molécules d'eau. Ces dernières engendrent des pressions sur la membrane du polymère ce qui le fait courber.

II.2.3 Les polymères conducteurs ioniques

Les polymères conducteurs sont des matériaux qui se gonflent sous l'action d'un champ électrique induit par l'application d'une différence de potentiel. Suivant le sens de cette différence, il y aura insertion ou réjection d'ions entre le matériau et le milieu environnant. Ceci correspond à une oxydation ou une réduction, ce qui induit un changement de volume en raison de l'échange d'ions avec l'électrolyte.



Figure 11.3 : "Fleur" micro-origami à base de polymère conducteur par Smela et al. [36], [37].

Pour réaliser un polymère électro-actif ionique, le polymère conducteur est mis en association avec un électrolyte afin d'engendrer des réactions d'oxydo-réductions. Ces dernières traduisent une absorption/expulsion d'ion et de solvant au sein du polymère conducteur, soit un changement de volumes au sein du matériau électro-actif. Les polymères conducteurs développent d'importantes forces utiles ($>350\text{kN/m}^2$) et des déplacements modérés (2%) sous de faibles tensions d'alimentation (2V). Ils sont flexibles car leur module de Young vaut 0,8GPa, et travaillent sur une très large plage de fréquence de 10^{-3} à 10^5Hz .

II.3 Les EAPS électroniques

II.3.1 Les polymères ferroélectriques

Découverts en 1969, les films polymères piézoélectriques de type polyfluorure de vinyle (PVDF ou PVDF) sont apparus sur le marché au début des années quatre-vingt. Son élaboration nécessite une phase d'étirement mécanique avant l'étape de polarisation, afin de disposer les chaînes macromoléculaires dans une seule direction. Son faible facteur de couplage électromécanique (0.2 à 0.3) et sa faible tension de claquage sont compensés par quelques propriétés remarquables [38]:

- Découpage facile en formes complexes;
- Flexibilité, appréciée en cas de surfaces non planes;
- Haute résistance mécanique;
- Epaisseur possible de quelques micromètres à une centaine de micromètres;
- Activité piézoélectrique équilibrée dans le plan du film

L'effet inverse correspond à l'apparition d'une déformation lors de l'application d'un champ électrique (figure II.4).

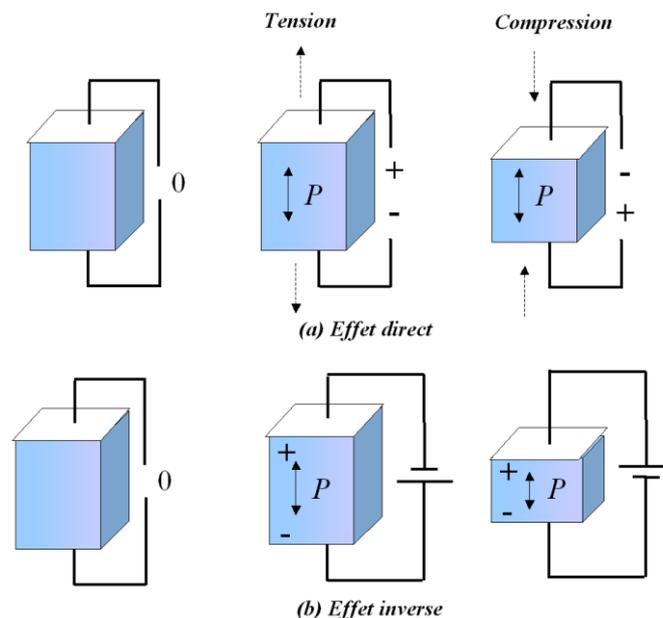


Figure II.4: Effet piézoélectrique

Généralement, une structure à base de polymère électronique est composée du matériau électro-actif pris en sandwich entre deux électrodes. Ces polymères ont des performances attractives au niveau de la conversion électromécanique. Le couplage peut être linéaire

(piézoélectricité) ou non linéaire, tel une évolution au carré (électrostriction, force électrostatique type pression de Maxwell).

Les polyvinylidene fluoride (PVDF) (figure II.5) et ses copolymères sont les matériaux les plus exploités dans la famille des ferroélectriques [29]. L'inconvénient principal de ce type de polymère est l'effet d'hystérésis.

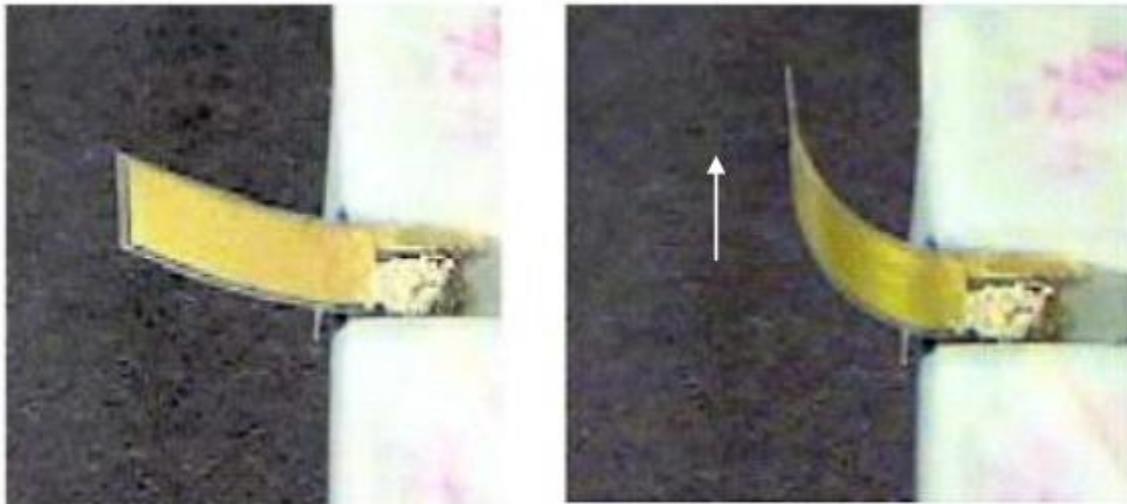


Figure II.5 : Exemple d'actionnement de type flexion obtenu avec un polymère ferroélectrique : dans l'état initial (partie gauche) et dans l'état actionné (partie droite).

II.4 Principales caractéristiques des deux familles

Les EAP peuvent être classés en deux catégories principales : les EAP ioniques et les EAP électroniques. Des caractéristiques propres peuvent être établies en termes d'avantages et d'inconvénients (tableau II.2) [63].

<i>Famille</i>	Avantages	Inconvénients
Famille Electronique	<ul style="list-style-type: none"> • force générée importante. • temps de réponse court. • fonctionne dans des conditions ambiantes. • durée de vie importante 	<ul style="list-style-type: none"> • champ électrique d'actionnement élevé (de 20 à 150 MV/m). • sens de la déformation unique pour les couplages quadratiques

Famille Ionique	<ul style="list-style-type: none"> • déplacements importants. • champ électrique d'alimentation faible (10kV/m). • sens de la déformation fonction de la polarité de la tension 	<ul style="list-style-type: none"> • temps de réponse lent. • faible force générée. • condition d'utilisation particulière (milieux humides...). • couplage électromécanique faible
------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tableau II.2: Principales caractéristiques des deux familles d'EAP [39].

Trois caractéristiques importantes ressortent du tableau précédent pour les polymères électroniques (Tableau II.2), il s'agit de :

- la haute tension nécessaire à l'actionnement
- leur temps de réponse rapide
- la force utile importante

Par contre pour les polymères ioniques les caractéristiques sont aussi au nombre de trois :

- faible tension d'alimentation
- larges déformations
- temps de réponses lents car basés sur une migration ionique

D'après ces caractéristiques Il apparaît de cette première comparaison qu'à chaque famille est adapté un domaine d'application. Il serait donc logique d'utiliser la famille électronique pour une application à haute densité de force, alors que la famille ionique est plus adaptée à une application faible tension.

Une étude menée par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) a permis d'effectuer une comparaison entre différents matériaux électro actifs. Celle-ci est illustrée par les deux graphes de la figure II.6. La figure II.7 a illustre la relation contrainte/déformation relative et permet une comparaison entre les actionneurs et capteurs utilisant les différents polymères. Le but des travaux de recherche ayant pour but de récupérer de l'énergie mécanique, il est nécessaire que les matériaux possèdent une densité d'énergie importante.

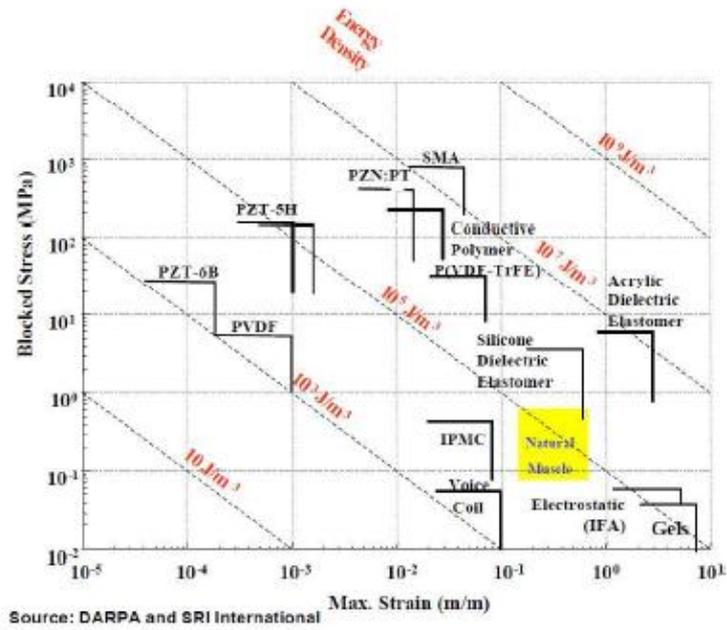


Figure II.6: Contrainte en fonction de la déformation pour différents matériaux électro-actifs [40].

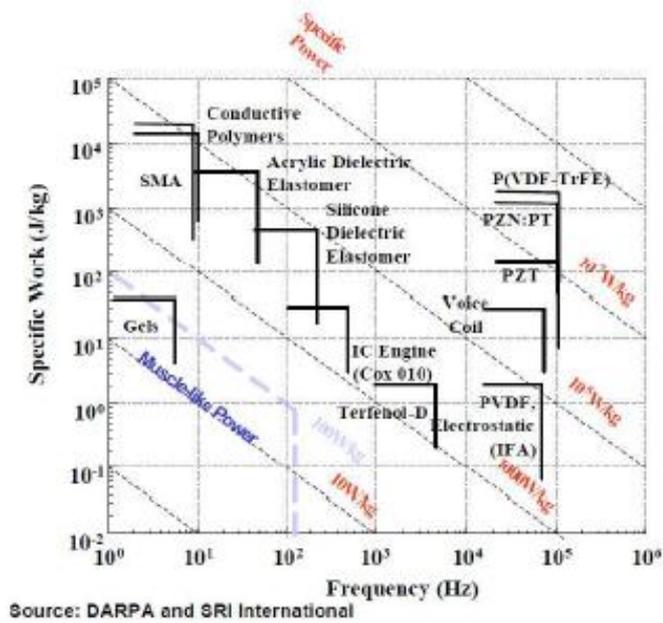


Figure II.7: Travail spécifique en fonction de la fréquence pour différents matériaux électro-actifs [40].

Le premier graphe illustre le fait que les matériaux piézoélectrique donnent des faibles déformations pour des fortes contraintes alors que les polymères électro-actifs, notamment les actionneurs diélectriques, ont une grande déformation pour de plus faibles contraintes.

Le second graphe trace le travail spécifique en fonction de la fréquence. En supposant qu'une haute densité d'énergie en mode actionneur peut conduire à une haute densité d'énergie en mode générateur, Nous remarquons que les matériaux piézoélectriques peuvent fonctionner jusqu'à 100 kHz alors que le fonctionnement des actionneurs utilisant des polymères électro actifs est beaucoup plus à basse fréquence (<1 kHz). Ceci sera un facteur limitant pour un certain nombre d'applications. Il ressort un certain nombre de matériaux comme candidats possibles pour la récupération d'énergie :

- Les polymères électro-strictifs
- les polymères diélectriques
- les polymères piézoélectriques
- les polymères conducteurs
- les gels ioniques types IPMC

II.5 Les EAPS diélectriques

Les polymères diélectriques fonctionnent sur le principe d'une capacité variable. Lorsqu'une tension est appliquée, une pression électrostatique, appelée pression de Maxwell, apparaît aux bornes des électrodes. Dans la fin des années 90, ces matériaux ont commencé à être exploités pour la réalisation d'actionneur. En 1998, le groupe de Pelrine [41]- [42] a démontré la potentialité de nombreux polymères commerciaux à être utilisés comme des polymères diélectriques dans des applications. Cette pression électrostatique induit une pression mécanique sur les électrodes supérieure et inférieure. Si bien que le polymère se contracte selon son épaisseur (3) et s'étend selon son aire (1, 2) comme l'illustre la Figure II.8.

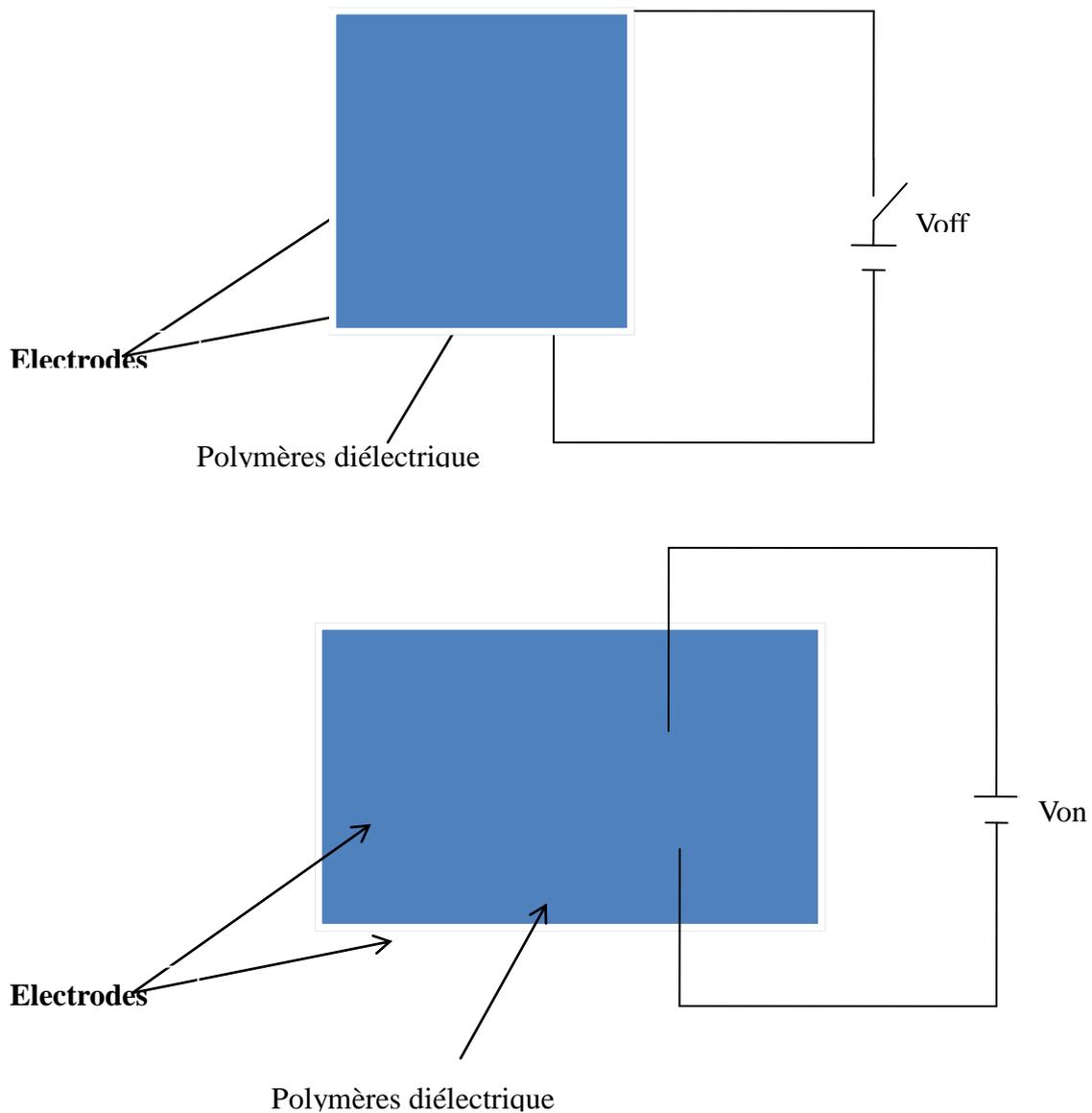


Figure II.8: Principe de fonctionnement en mode actionneur d'un polymère diélectrique

Si on applique une tension électrique à un élastomère étiré, des charges électriques sont déposées au niveau des électrodes. Lorsque l'on relâche la contrainte mécanique, la contraction qui en découle (pression mécanique) travaille contre la pression électrostatique et génère ainsi de l'énergie électrique [43].

Dans un premier temps, le polymère est étiré mécaniquement: phase A à B. Une fois déformé, des charges sur le diélectrique sont appliquées via une tension de polarisation V : phase B à C. Puis, le polymère est libéré et se contracte naturellement jusqu'à un état d'équilibre entre force électrique et force mécanique : phase C à D. C'est la phase dite active : les variations du coefficient d'extension entraînent des variations de capacité. Des charges sont transférées vers

la source de tension, il y a production d'énergie. Enfin, la tension de polarisation V est coupée et le polymère peut retrouver ses dimensions d'origine : phase D à A [30].

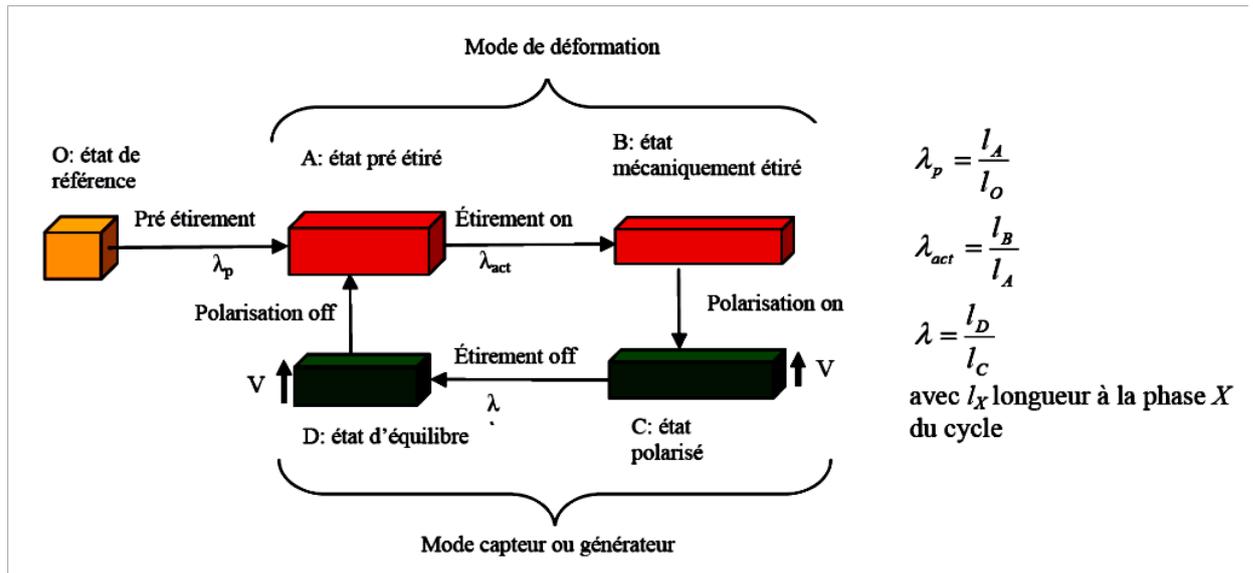


Figure II.9: Cycle de fonctionnement en mode générateur d'un polymère diélectrique [31].

Avant d'étudier les différentes classes de polymères pour la récupération, il convient de poser des hypothèses nécessaires pour fixer une base commune de comparaison. Pour cela il faut partir du rendement global d'un dispositif de récupération d'énergie présenté à la Figure II.10, inspiré de [54].

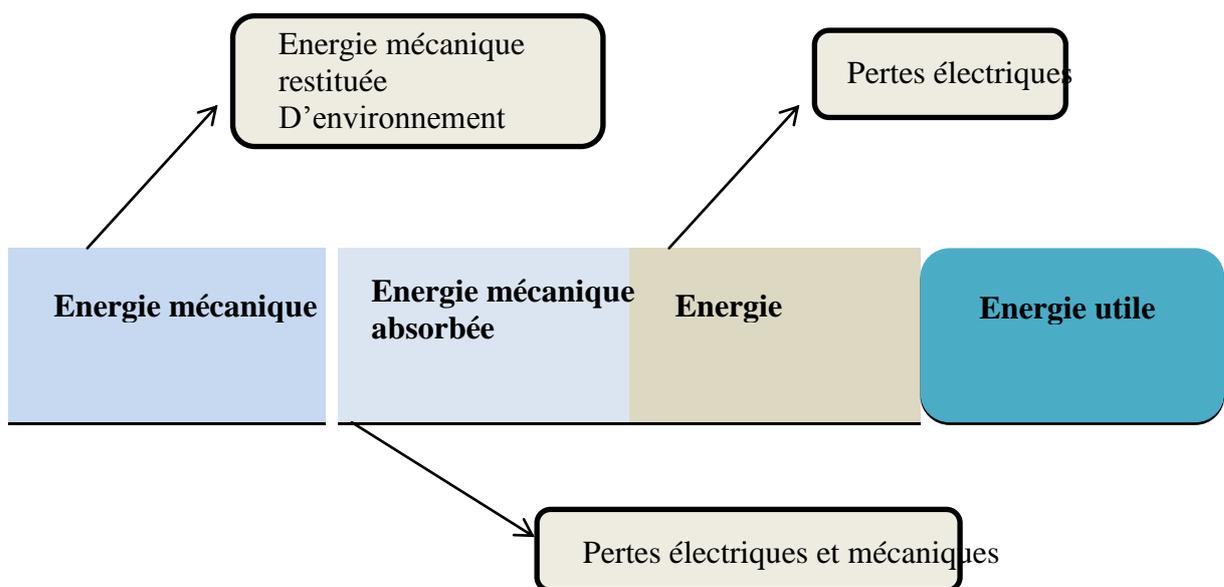


Figure II.10: Energies mise en jeu lors du processus de récupération d'énergie. Une capacité variable en polymère diélectrique souple opère des changements de dimensions selon les trois directions (plan et épaisseur). Ces variations de dimensions induisent des variations de capacité (C_{max} et C_{min}) qui peuvent être plus importantes que celles générées par une capacité variable « classique », mettant en oeuvre des variations selon une seule direction (généralement l'épaisseur).

Plusieurs équipes se sont spécialisées dans leur intégration [44] et leur utilisation [45] en passant par leur caractérisation [46], [47] et leur modélisation. Ainsi, ces polymères diélectriques sont généralement mis en avant comme étant de nouveaux actionneurs pour la robotique, la mécatronique, la biomimétique [48]. Ces actionneurs sont basés sur un élastomère diélectrique et sont généralement constitués d'un film polymère pris en sandwich entre deux électrodes compliantes (ou souples).

Parmi les applications de la littérature, Le laboratoire américain Stanford Research Institute (SRI International), a créé un générateur utilisant des polymères diélectriques insérés dans le talon d'une chaussure [43].

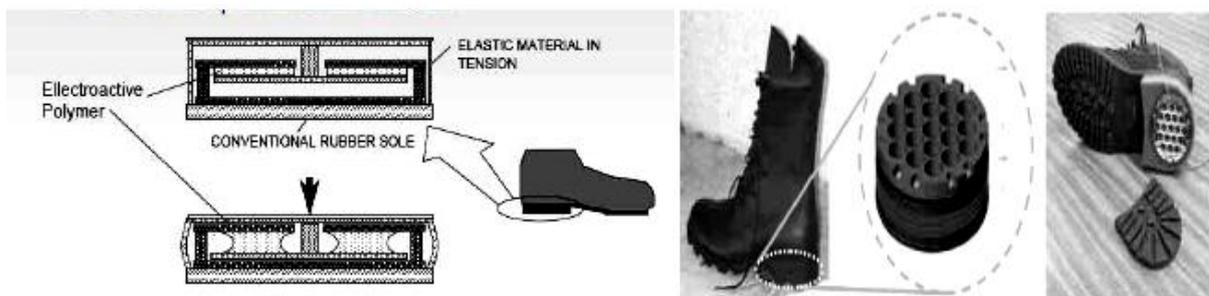


Figure II.11: Générateur à base de polymère diélectrique inséré dans le talon d'une chaussure

La force d'impact, générée par le pied au niveau du talon de la chaussure, étire l'élastomère via un système mécanique. En position étirée, des charges sont injectées. Puis, lorsque le pied se soulève, l'élastomère retrouve sa position d'origine et génère de l'énergie électrique par variation de capacité. La seule donnée expérimentale sur ce générateur est la densité d'énergie électrique récupérée.

D'autres applications, en particulier dans le domaine de la santé, sont potentiellement intéressantes pour l'avenir. On citera les éclisses dans le domaine médical, puisque de tels actionneurs ont un comportement contrainte-déformation similaire à celui du muscle naturel. Ces caractéristiques sont également bien adaptées pour des applications d'actionneurs pour la

robotique d'inspiration biologique voire pour les applications médicales ou biomédicale où pour tout système pour lequel la reproduction des performances du muscle humain est désirée. Cette dernière voie offre la promesse de prothèses, de structures de type exosquelette pour les personnes à mobilité réduite, et même de cœur artificiel. Bien que ces applications biomédicales soient encore à réaliser, les premières réalisations utilisant ce type d'actionneurs pour la robotique sont effective [49].

La figure II.12 illustre la version électro active en développement, pour laquelle il est possible de moduler l'effort contrariant l'abaissement du doigt. Ce type d'actionneur est compatible avec une imagerie IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) de sorte que l'on peut observer directement l'action des muscles ou l'évolution des lésions des tissus mous pendant la rééducation du patient.

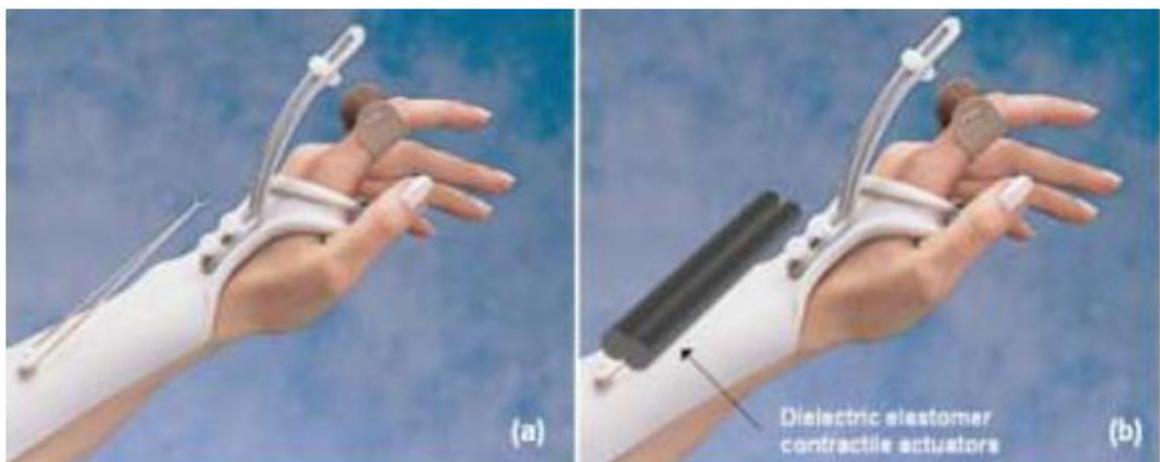


Figure II.12: Éclisse passive (à gauche) et active (à droite).

Dans le domaine réciproque de la récupération d'énergie, le CEA-Leti [30] a développé un dispositif de récupération d'énergie à base de matériau acrylique. L'énergie mécanique liée au mouvement, humain en l'occurrence, est transformée en énergie électrique et constitue une source d'énergie électrique autonome à l'utilisateur. Ce dispositif a été intégré dans une genouillère à cause de l'amplitude du mouvement de cette articulation par rapport aux autres articulations du corps humain (figure II.13).



Figure II.13: Récupération de l'énergie mécanique par le mouvement du genou.

II.6 Les polymères à base de feuilles de matériaux électrostrictifs

Electrostriction est une propriété de tous les matériaux diélectriques, et est provoqué par la présence des domaines électriques aléatoire-alignés dans le matériel. Quand un champ électrique est appliqué au diélectrique, les côtés opposés des domaines deviennent différemment chargés et s'attirent, réduisant l'épaisseur matérielle dans la direction du champ appliqué (et augmentant l'épaisseur dans les directions orthogonales dues au rapport de Poisson). L'inversion du champ électrique ne renverse pas la direction de la déformation. C'est un phénomène sous-jacent à la polarisation d'un milieu soumis à un champ électrique est l'interaction mutuelle qui se produit quand les dipôles électriques (molécules polarisées) s'alignent dans la direction du champ. L'attraction des pôles opposés de ces dipôles provoque la contraction du milieu parallèlement au champ électrique appliqué (voir figure II.14). Ce rétrécissement de la matière sous champ électrique est appelée électrostriction. A la différence du phénomène piézoélectrique (effort mécanique engendré par l'application d'un champ électrique et réciproquement) qui est spécifique à un type restreint de cristaux, l'électrostriction est un phénomène qui concerne tous les milieux diélectriques.

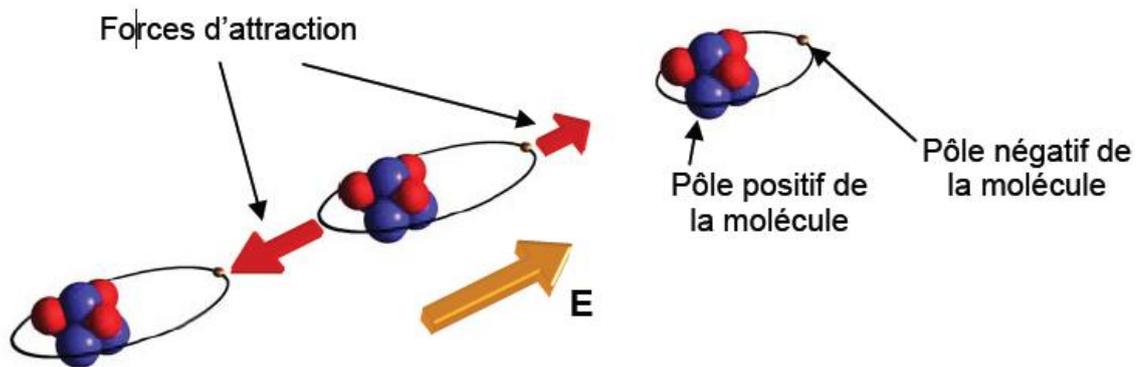


Figure II.14 : L'attraction non homogène qui s'exerce sur une molécule entraîne son déplacement vers les régions où cette attraction est la plus prononcée.

L'attraction des dipôles électriques est proportionnelle à trois facteurs. Elle est proportionnelle à l'intensité du champ électrique, à la polarisation des molécules et la proximité des molécules les unes aux autres. Si cette attraction est homogène, c'est-à-dire, si les molécules s'attirent partout avec la même intensité, il est évident que la résultante de ces attractions sur une molécule est nulle. Si en revanche cette attraction varie dans l'espace alors une force se crée suite à la contraction non homogène du milieu; l'électrostriction induit aussi un déplacement de la matière.

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. Il est l'un des principaux phénomènes de couplage électro-mécaniques dans les matériaux diélectriques. Elle est caractérisée par une dépendance quadratique de la déformation de la couche par une polarisation induite par un champ électrique. Il convient de noter que le connexe effet piézoélectrique se produit seulement dans une classe particulière des diélectriques [50] [51]. Electrostriction est à quadratique effectué, à la différence de la piézoélectricité, qui est à effet linéaire. La plupart des exemples remarquables des polymères électro-actifs manifestant un effet électro-strictif pertinent sont représentés par des copolymères à base de poly (fluorure de vinylidène) (PVDF) avec du trifluoroéthylène (P (VDF-TrFE)), avec du tétrafluoroéthylène (P (VDF-TFE)) et avec Hexafluoropropylene (P (VDF-HFP)) [76]. Ces matériaux ont généralement une structure semi-cristalline moléculaire (cristaux plongés dans une matrice amorphe). De tels polymères ont typiquement des modules d'élasticité de l'ordre de 1 à 10 GPa. En appliquant un champ électrique élevé (de l'ordre de

100 V/ μm ,) pour un polymère (VDF-TrFE) préalablement irradié avec des électrons, des déformations jusqu'à 4% ont été mesurées avec une force relativement grande et un temps de réponse de l'ordre de quelques microsecondes.

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.1).

$$\begin{cases} S_{ij} = s_{ijkl}^E \cdot T_{ij} + M_{mnij} \cdot E_n \cdot E_m \\ D_m = \varepsilon_{mn} \cdot E_n + 2 \cdot M_{mnij} \cdot E_n \cdot E_{ij} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

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

M_{mnijk} 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.2).

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

Toutefois, sous un champ électrique fort ($E > E_0$, valeur seuil), la polarisation P est saturée à une valeur P_s (figure II.15)

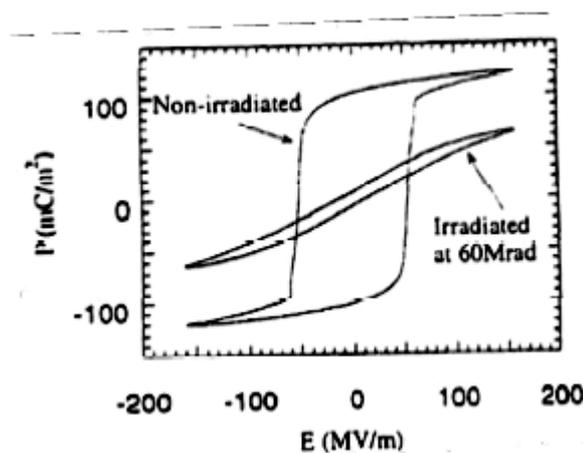


Figure II.15: Cycles d'hystérésis pour un polymère irradié et non irradié [52].

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.16

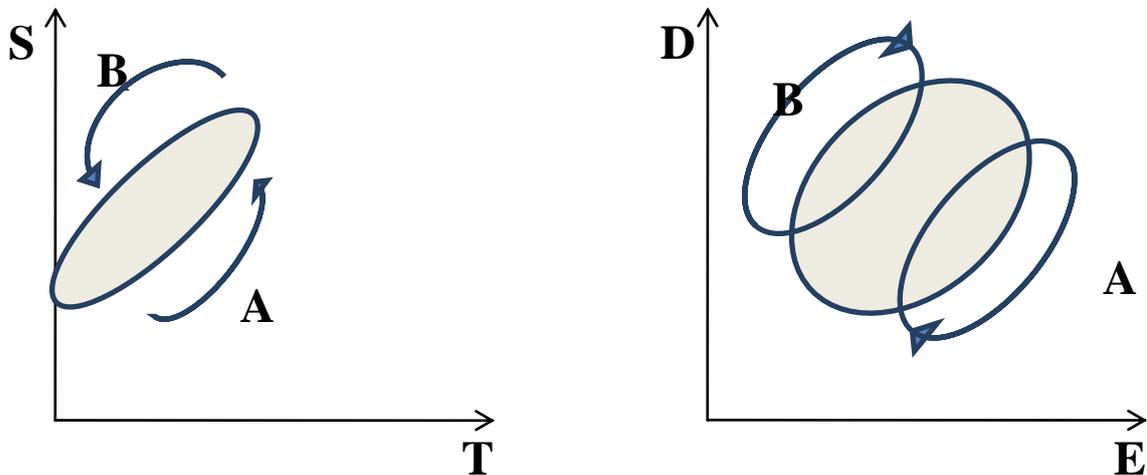


Figure II.16: Cycle à réaliser avec un matériau électro-strictif pour la récupération d'énergie [51]

L'énergie électrique récupérée est maximale pour une combinaison particulière de conditions aux limites lors de la réalisation de ce cycle (figure II.16). Ainsi, à partir des équations intrinsèques de l'électrostriction, 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.

L'énergie électrique récupérée est maximale pour une combinaison particulière de conditions aux limites lors de la réalisation de ce cycle (Figure II.16). Ainsi, à partir des équations intrinsèques de l'électrostriction (II.1 et II.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 adéquates, on calcule dans un premier temps l'énergie récupérable grâce à un coefficient de couplage k dont la définition est calée sur celle des matériaux piézoélectriques. Si nous notons 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).

$$K = \sqrt{\frac{W_1}{W_1 + W_2}} \quad (\text{II.3})$$

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. [51] [52], il est possible de déterminer le facteur de couplage optimal. La figure II.17 illustre le cycle ayant le coefficient de couplage le plus important. Les auteurs l'ont nommé cycle à charge constante.

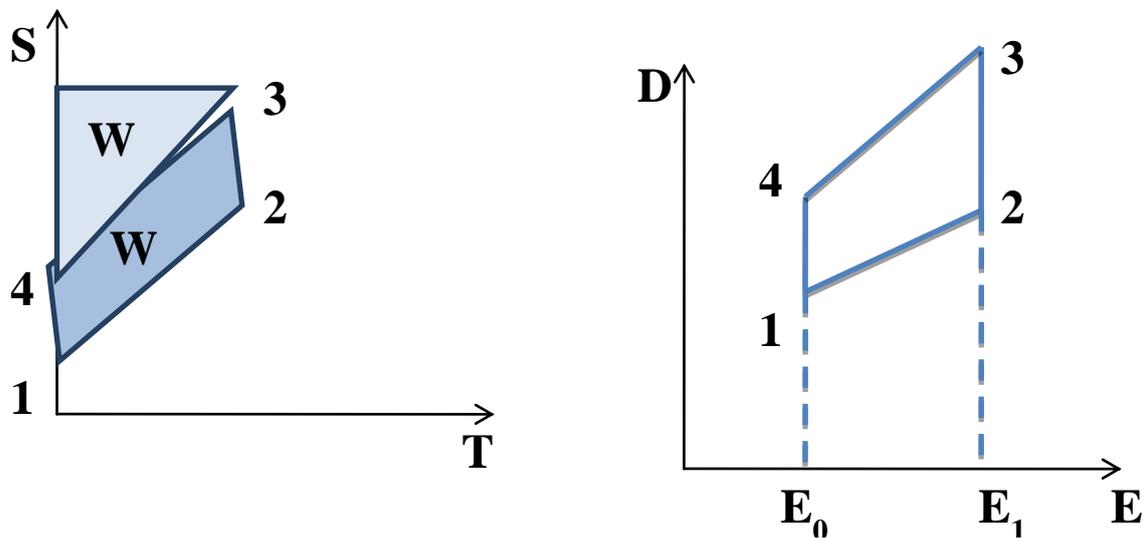


Figure II.17: Cycle de récupération de l'énergie sous champ électrique constant lors des phases d'étirement et de compression [50]

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.17, l'expression du coefficient de couplage k , à partir de l'équation II.3, est donné par l'équation II.4.

$$k = \sqrt{\frac{M(E_1^2 - E_0^2)}{\frac{1}{2} s T_{\max} + M(E_1^2 - E_0^2)}} \quad (\text{II.4})$$

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.2).

Le premier type de polymère largement utilisé est le P(VDF-TrFE) qui est un copolymère dérivé du PVDF. L'inconvénient de ce type d'actionneur reste la tension de mise en œuvre ($100\text{V}/\mu\text{m}$), qui est une caractéristique de presque toutes les variétés de matériaux d'actionnement au sein du groupe des EAP électroniques. Des études récentes [53] ont montré qu'une réduction drastique des champs électriques peut être obtenue en mélangeant à la matrice polymère un élément fortement diélectrique.

Pour obtenir de bon couplage électromécanique, il faut l'utiliser près de la transition ferroélectrique-paraélectrique [54], [55], [56], [57], [58], [59]. Or, cette transition s'opère à une température supérieure à la température ambiante, et une hystérésis électrique large y est observée. 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. Le second polymère électrostrictif est un terpolymère (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 [60], [61], [62]. Mais ces caractéristiques sont bien meilleures que pour les copolymères.

En particulier, les matériaux composites réalisés par dispersion de phtalocyanine de cuivre (CuPc) dans une matrice de P (VDF-TrFE) ont montré une déformation de 2% avec un champ électrique appliqué de $13\text{ V}/\mu\text{m}$, soit moins d'un sixième de la valeur habituelle nécessaire à la déformation d'une

matrice de polymère pur. La figure 1.6 montre la déflexion d'un polymère électrostrictif de ce type réalisé par [63].

II.7 Renforcement des propriétés diélectriques des polymères électro-actifs

Les propriétés électromécaniques des polymères électrostrictifs ou élastomères diélectriques sont intrinsèquement régis 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. Pour augmenter les propriétés diélectriques des polymères trois méthodes peuvent être envisagées :

- La première repose sur la dispersion de nano-objets diélectriques et inorganiques 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.
- La seconde méthode consiste à disperser dans la matrice polymère des nano-objets diélectriques et organiques pour conserver la flexibilité. Il faut veiller à ce que la miscibilité et la compatibilité chimique restent bonnes.
- La troisième consiste à incorporer des nanoparticules conductrices. L'avantage est d'obtenir de bonnes augmentations de la constante, avec d'assez faibles taux de nanoparticules compte tenu de leur caractère conducteur. Ceci se fait avec une augmentation raisonnable du module d'Young. Le point délicat reste le contrôle de la percolation.

Dans le cas d'un polymère électro-strictif la relation entre la déformation et le champ électrique pour des faibles amplitudes de champ électrique s'exprime sous la forme (II.5).

$$S_{ij} = M_{ij} \cdot E_i^2 \quad (\text{II.5})$$

Ou S_{ij} est la déformation et M_{ij} le coefficient d'électrostriction.

Des études antérieures menées par Eury [64] puis par Guillot [65] ont démontré que le coefficient d'électrostriction est proportionnel à la permittivité et le module d'Young (Y) (équation II.4),

$$M_{ij} \propto \frac{\epsilon_0 (\epsilon_r - 1)}{Y \cdot \epsilon_r} \quad (\text{II.6})$$

Ces équations démontrent bien qu'un renforcement de la permittivité des matériaux engendre une augmentation des performances des polymères électro-strictifs et élastomères diélectriques. Il est donc primordial de développer des méthodes capables d'augmenter les propriétés diélectriques tout en garantissant un module Young faible pour conserver le caractère souple des polymères.

La distinction entre un diélectrique et un conducteur repose, en fait, sur le nombre de charges libres qu'il contient. A température normale, un bon diélectrique contient des électrons libres, relativement en petit nombre mais suffisant pour provoquer une certaine conduction électrique. Un diélectrique peut être considéré comme un mauvais conducteur et, en plus de sa permittivité électrique ϵ , sera caractérisé par une conductivité électrique σ . La Figure II.18 représente la situation où une tension constante est appliquée à un ensemble de plaques de condensateur. Les lignes de champ électrique ne peut commencer qu'à partir des charges positives, et se termine aux charges négatives. Ainsi, la concentration de charge de surface s'accumule sur les plaques du condensateur. La charge d'accumulation continue, jusqu'à ce que la chute de tension sur les plaques de condensateur corresponde à celle de la source de tension. La relation entre la quantité de charge libre, Q, et la chute de tension, V et donnée par $Q=CV$ avec C représente la capacité de l'échantillon, Le constant diélectrique peut être calculée, en supposant que l'échantillon approchée à un condensateur à plaques parallèles simple s'exprime ainsi:

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot e}{\epsilon_0 A} \quad (\text{II.6})$$

A est la surface des plaques, et est la distance entre eux. ϵ_0 la permittivité du vide, $8,854 \times 10^{-12}$ F/m. La densité des lignes de champ est connu sous le nom de la densité de flux électrique, ou la densité de flux simplement, pour le vide et est donnée par,

$$D = \epsilon_0 E \quad (\text{II.7})$$

Où E représente les composantes du champ électrique entre les plaques.

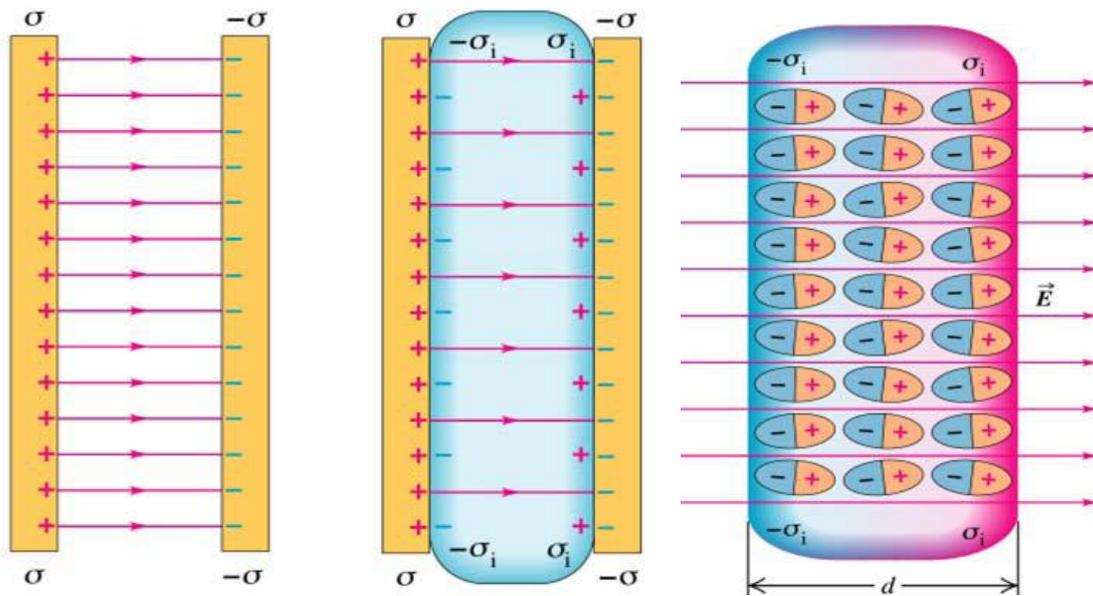


Figure II.18: charges induites sur les faces du diélectrique diminue le champ électrique
(www.physics.sjsu.edu)

II.7.1 Synthèse des méthodes pour augmenter la permittivité

La première approche consiste à disperser des particules de manière aléatoire dans une matrice de polymère. La seconde exploite plus le principe des composites, avec un alignement des particules (dipôle) au sein de la matrice avec le champ électrique par exemple. La troisième consiste à synthétiser de nouveaux polymères pour obtenir les caractéristiques désirées.

Qu'est-ce qu'un nano-composite ?

Un matériau composite résulte de l'association de matériaux de nature différente qui, de ce fait, ne se mélangent pas (non miscibles) et constituent une structure hétérogène. Cet assemblage confère au matériau résultant des propriétés qu'aucun des matériaux de départ ne possède individuellement. On utilise le terme nano-composite dès que l'un des matériaux insérés a au moins une de ses trois dimensions géométriques de l'ordre de quelques nanomètres, nommé couramment nano-renforts. On compte trois types de nano-renforts classés selon leur géométrie : des nanoparticules (souvent de forme sphérique), des nano-fils ou nano-fibres (de longueurs variables) et des nano-feuillets (ayant la forme d'une feuille de papier).

Lors de l'élaboration d'un matériau nano-composite, il y a deux difficultés principales à surmonter: l'assurance d'une répartition homogène et l'absence d'agrégation des nanoparticules au sein du matériau (figure II.19).

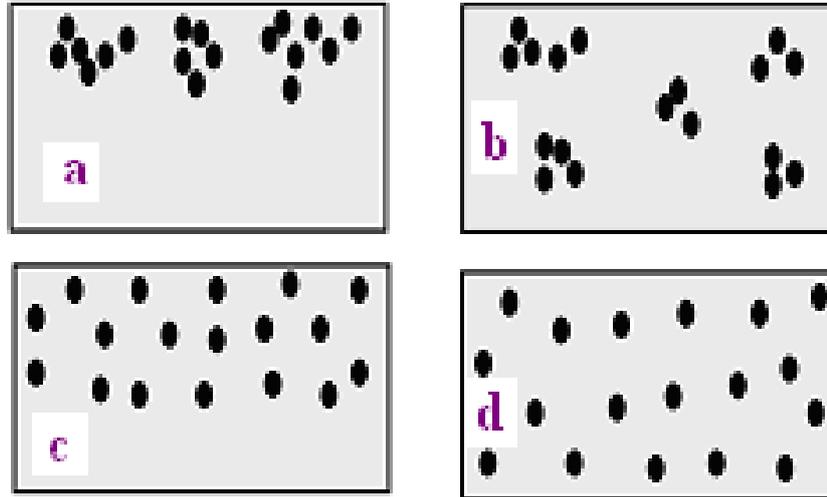


Figure II.19: Distribution des nano-renforts dans les nano-composites.

- (a) Mauvaise répartition des nanoparticules et agrégats au sein de la matrice.
- (b) Bonne répartition mais présence d'agrégats.
- (c) Mauvaise répartition, absence d'agrégats.
- (d) Bonne répartition des nanoparticules et absence d'agrégats

Divers procédés de fabrication ont été mis au point pour les différents types de nano-composites afin d'obtenir une répartition idéale des nano-charges comme modélisé par (d) de la figure II.19. On distingue deux méthodes : la fabrication ex-situ, par mélange direct des nano-renforts avec le matériau de départ préalablement fondu et la fabrication in-situ, avec une croissance directe des nano-renforts au sein même de la matrice par des réactions chimiques. On référence trois techniques principales pour les nano-composites a matrice polymère et de nano-renforts (particules, fibres, etc.): la dispersion par voie solvant, la dispersion par voie fondu et la polymérisation in-situ. Certaines de ces méthodes nécessitent d'ajouter un agent surfactant dispersant, de fonctionnaliser ou de greffer des particules par des fonctions acides, amines ou des chaînes alkyles pour l'amélioration de la dispersion ou de l'adhésion polymère/charge.

II.7.2 Particules diélectriques

L'utilisation des matériaux inorganiques avec de grande permittivité diélectrique, est une technique largement développée depuis une vingtaine d'année pour accroître la permittivité d'un composite. Les poudres à base de céramique ferroélectrique ou piézoélectrique en font des candidats de choix pour leur grande permittivité. Les résultats d'études récentes ont montrés un accroissement de la permittivité d'un facteur 4 pour une matrice silicone chargée à 30% en volume par de la poudre de PMN-PT à 10Hz [66].

Au laboratoire LGEF, le choix d'une dispersion de nano-charges conductrices par voie fondue dans une matrice polymère montre une bonne augmentation de la constante diélectrique avec un faible taux de nano-objets et donc une conservation du module d'Young. Il convient de noter que le seuil de percolation est atteint avec des assez faibles taux de nano-objets.

Qu'est-ce que la percolation ?

La percolation (du latin " percolare ", couler a travers) est un processus physique critique (changement brusque) qui décrit pour un système, une transition d'un état vers un autre. L'ajout de charges conductrices provoque une accumulation de charges a la frontière entre les deux milieux (matrice, particules). Ces charges présentes dans le polymère ne contribuent pas seulement à la conduction, mais elles augmentent la polarisation interfaciale, donc la permittivité. A partir d'une concentration critique (seuil de percolation), elles induisent une transition entre un état diélectrique et un état conducteur. Seule l'étude expérimentale de la conduction d'un milieu statistiquement aléatoire, avec des inclusions conductrices et non conductrices, indique qu'en dessous d'une certaine concentration de ses inclusions, le milieu est isolant et au-dessus de cette concentration, le système est conducteur. Pour une fraction v_f d'inclusions conductrices, plus faible que la fraction critique, il peut y apparaître seulement des amas conducteurs localisés, isolés les uns des autres. Lorsque le dopage atteint la valeur critique appelée "seuil de conduction ou de percolation", déterminé expérimentalement, un amas conducteur continu apparaît. Ce seuil dépend fortement de la taille des particules et de leur forme [67]. Malheureusement le maximum de permittivité est obtenu pour les valeurs proches de la percolation.

La valeur de ce seuil de percolation (sans dimension) dépend fortement des microstructures du composite, de la distribution des charges dans la matrice (influencée par les paramètres géométriques, tel que la taille, la forme et l'orientation des particules). L'inconvénient est que

la permittivité augmente en parallèle avec la conduction par conséquent les pertes. Des résultats encourageants laissent supposer que cette méthode de charge est très prometteuse pour l'augmentation des propriétés électromécaniques des polymères électro-actifs.

II.8 Choix de la matrice de base et des nano-charges pour l'élaboration des nano-composites

Les matrices de bases choisies sont des polymères électroactifs : ce sont des composés organiques légers, flexibles et capables de répondre à une stimulation électrique par un changement de dimension et de forme. Parmi ces polymères on compte les élastomères electrostrictifs qui ont la particularité d'être composés d'une matrice flexible et d'une matrice cristalline (semi-cristallin).

II.8.1 La matrice de terpolymère P(VDF-TrFE-CFE)

Les polymères ferroélectriques depuis plus d'une vingtaine d'années ont été un important sujet et enjeu de recherche scientifique. Il a été choisi de travailler sur cette matrice basée sur une nouvelle classe de terpolymères semi-cristallin comprenant du fluorure de vinylidène (VDF) et du trifluoroéthylène (TrFE), Dans le copolymère avec TrFE ces polymères ferroélectriques présentent une transition de Curie, où une transition de phase entre le ferroélectrique et les phases paraélectriques se produisant lorsque la température augmente. La figure II.20 montre les conformations moléculaires pour le polymère à base de PVDF. [68]

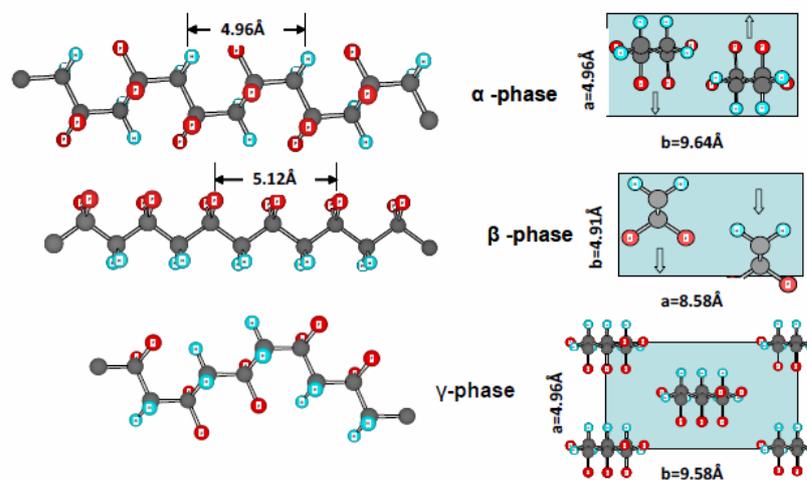


Figure II.20 : Les conformations des différentes phases de PVDF.

Il a été choisi de travailler avec cette matrice basée sur une nouvelle classe de terpolymères semi-cristallin (figure II.17) [69] comprenant du fluorure de vinylidène (VDF), du trifluoroéthylène (TrFE), et 1, 1-chlorofluoroéthylène (CFE), synthétisée à Piezotech SA via un procédé de polymérisation en suspension. De bonnes caractéristiques électromécaniques avec conservation des avantages de souplesse, de légèreté et de résistance mécanique élevée ont été observées. Cette matrice présente une permittivité relativement élevée (autour de 30) et un module d'Young autour de 80 MPa.

II.8.2 La matrice de polyurethane (PU)

Cette matrice présente une permittivité plus faible que celle du terpolymère (6 environ) et un module d'Young plus bas également (30 MPa), donc une plus grande souplesse. Le mot polyurethane fait référence aux macromolécules comportant le motif constitutif de la fonction chimique uréthane : NHCOO. L'urethane est produit par la réaction d'un isocyanate et d'un alcool. Il occupe une place importante dans l'industrie des matières plastiques en raison d'une grande diversité, selon la nature des monomères de départ et l'ajout d'autres substances. Le polyurethane présente une grande résistance à la rupture et une haute flexibilité. Au laboratoire LGEF, on utilise essentiellement le PU 58 888 NAT 021 (Estane, Lubrizol) dont la structure est présentée à la figure II.21.

Il est constitué de trois segments :

- le diisocyanate (c'est-à-dire 4,4 méthylène bis (phenylisocyanate) (MDI) segments rigides,
- L'allongeur de chaînes est le 1,4-butane diol (BDO) segments rigides,
- le macrodiol est un polyéther, le poly(oxytetraméthylène) (POTM), segments souples.

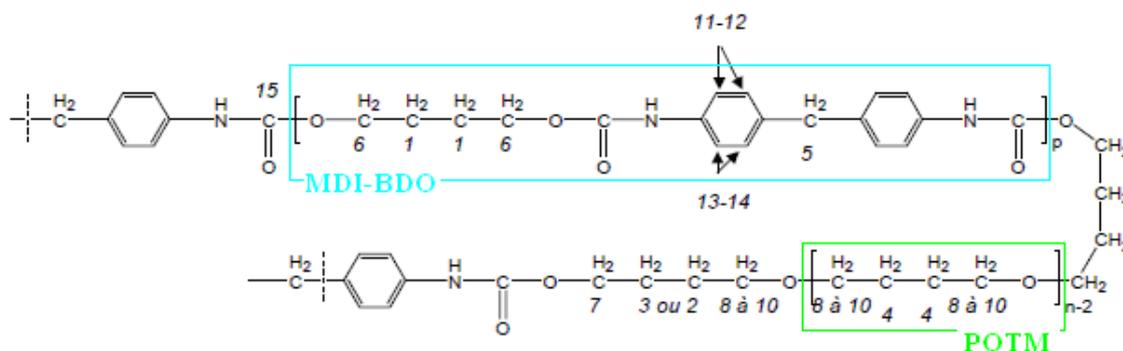


Figure II.21: Structure de l'Estane 58 888. Les chiffres en italique sont utilisés pour désigner les différents carbones, n est le degré moyen de polymérisation du POTM et p le nombre moyen d'unités MDI-BDO

Plusieurs propriétés physico-chimiques de PU-Estane58 888 sont représentés dans le tableau II.3.

Tableau II.3: Propriétés physico-chimie de Pu -estane

Caractérisation	Polyuréthane (TPU58 888)
Poids Moléculaire g.mol^{-1}	1000
Densité g.cm^3	1.13
Temperature de fusion $^{\circ}\text{C}$	160
Contrainte de rupture Mpa	38
Allongement de rupture	640%

Le LGEF a orienté son investigation sur l'ajout de nano-charge conductrice qui laisse espérer pour un même volume de meilleures caractéristiques électrique et mécanique. Les charges étudiées sont uniquement un seul type, noir de carbone (C). Il a été choisi d'utiliser le noir de carbone de la société Aldrich pour son faible seuil de percolation et la très bonne conduction des nano-charges de carbone . La nano-poudre est obtenue par un dérivé de la technique Furnace.

II.9 Processus de fabrication des composites au LGEF

A l'aide des études menées au laboratoire, il a été choisi de réaliser des composites par le procédé ex-situ, en utilisant la méthode par voie solvant. Le processus d'élaboration présenté ci-dessous est décrit pour la réalisation d'un composite à l'aide de polyuréthane. Mais il peut être généralisé à d'autres types de matrices,

- Premièrement, on chauffe pendant 3h à 80°C des granules de polyuréthane (PU) pour éliminer les molécules d'eau.

Ensuite, on les dissout dans du DMF (N-N-DiMethylFormamide, 99%) à 80°C, pendant 2h, pour une dissolution complète du polymère. Durant cette étape, le bécher est recouvert de parafilm et d'une plaque en verre, pour limiter l'évaporation du solvant.

- La seconde étape consiste à disperser des particules dans le solvant. La dispersion est effectuée à l'aide d'une sonde à ultra-sons (UP400S Hielscher) pour éviter la formation d'agrégat, pendant 20 minutes (cycle à 0,75 et l'amplitude à 75). La quantité de charges à incorporer est calculée selon l'équation: , avec m_c et m_{pu} respectivement, la masse des nano-charges et du PU, d_c et d_{pu} les densités respectives du carbone et du PU et x le pourcentage volumique des nano-charges pour la composition choisie.

$$m_c = \left(\frac{x}{100}\right) \times m_{pu} \times \left(\frac{d_c}{d_{pu}}\right) \quad (\text{II.8})$$

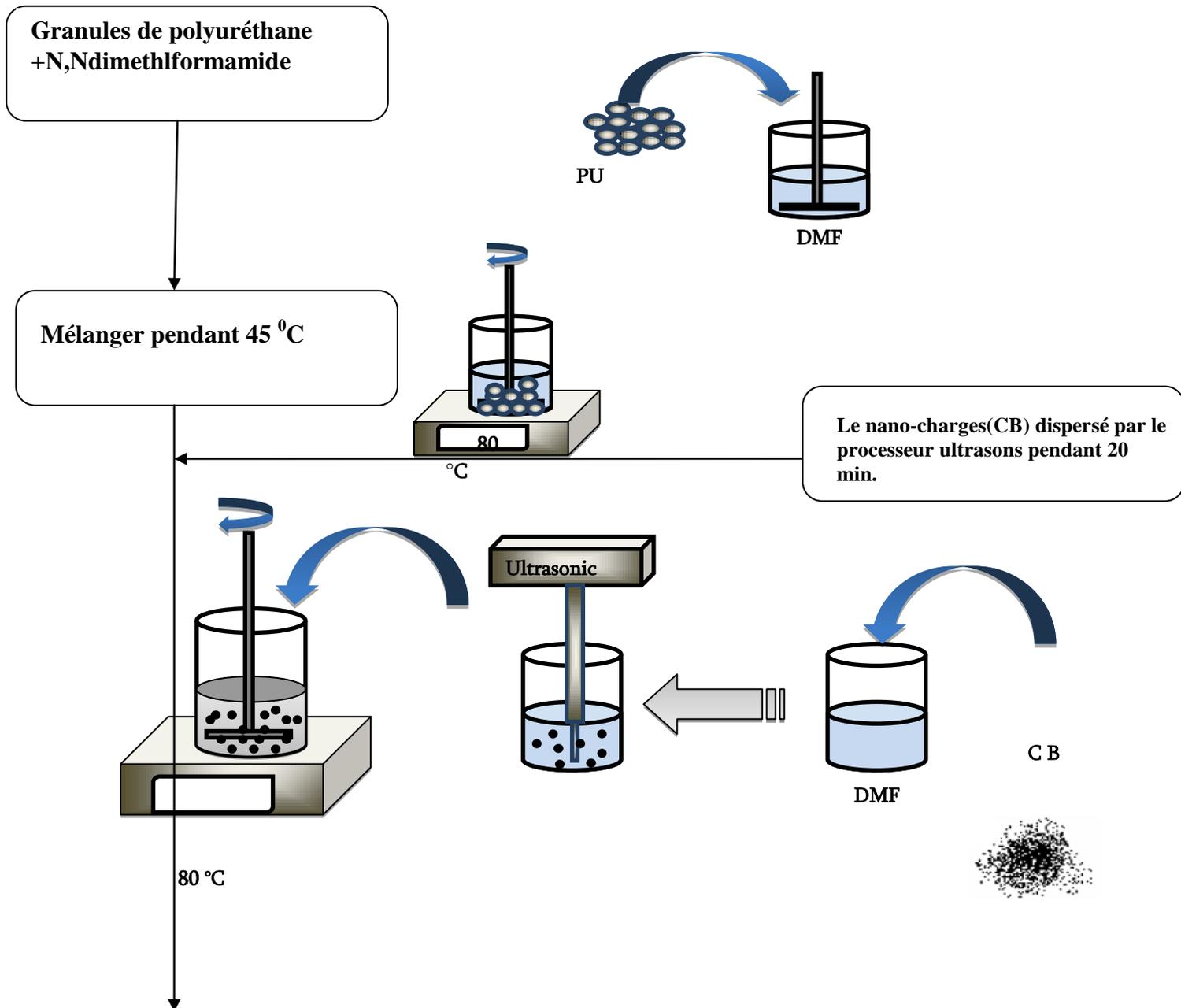
Troisièmement, on mélange les nanoparticules préalablement dispersées dans du DMF avec la solution de polymère, le tout sous agitation mécanique à l'aide d'une pale (type demi lune) avec une vitesse de rotation de 100 trs/min à une température de 80°C. Le contrôle du temps permet l'obtention d'une solution convenablement et suffisamment visqueuse.

Les charges étant pulvérulentes on prépare la veille la balance à précision : en plaçant du papier, une spatule, un bécher et un flacon d'éthanol (pour que l'énergie électrostatique puisse être dissipée). De plus, une sédimentation des nano-objets est possible et donc ne nous permet pas de conserver plus de 15 jours les solutions de polymères chargés. On remarquera que plus la solution est visqueuse plus elle se conserve longtemps. En effet, la vitesse de sédimentation est déterminée par la compétition entre la force gravitationnelle et la force hydrodynamique.

Les films sont ensuite déposés manuellement sur une plaque en verre avec un applicateur Elcometer , et sèches dans un four à 60°C toute la nuit.

Ensuite, pour l'élimination complète du solvant, on les place dans une étuve à 125°C pendant 3h, après les avoir décollés du support en verre. Pour les films à base de terpolymère, le traitement se fait en étuve sous vide à 85°C pendant 6 h à 100 mbar. On compte au final une évaporation du solvant à 90% de la solution déposée, ainsi pour obtenir un film de 50µm on devrait utiliser une cale pour l'applicateur de 500µm à la viscosité optimale. On notera que plus la solution est visqueuse plus l'épaisseur de la cale de l'applicateur à utiliser est petite (inférieur à 500 pour un film d'une épaisseur de 50µm). Néanmoins, avant de pouvoir déposer

des films, il faut attendre au moins 2 jours après la préparation de la solution pour que celle-ci puisse dégazer.



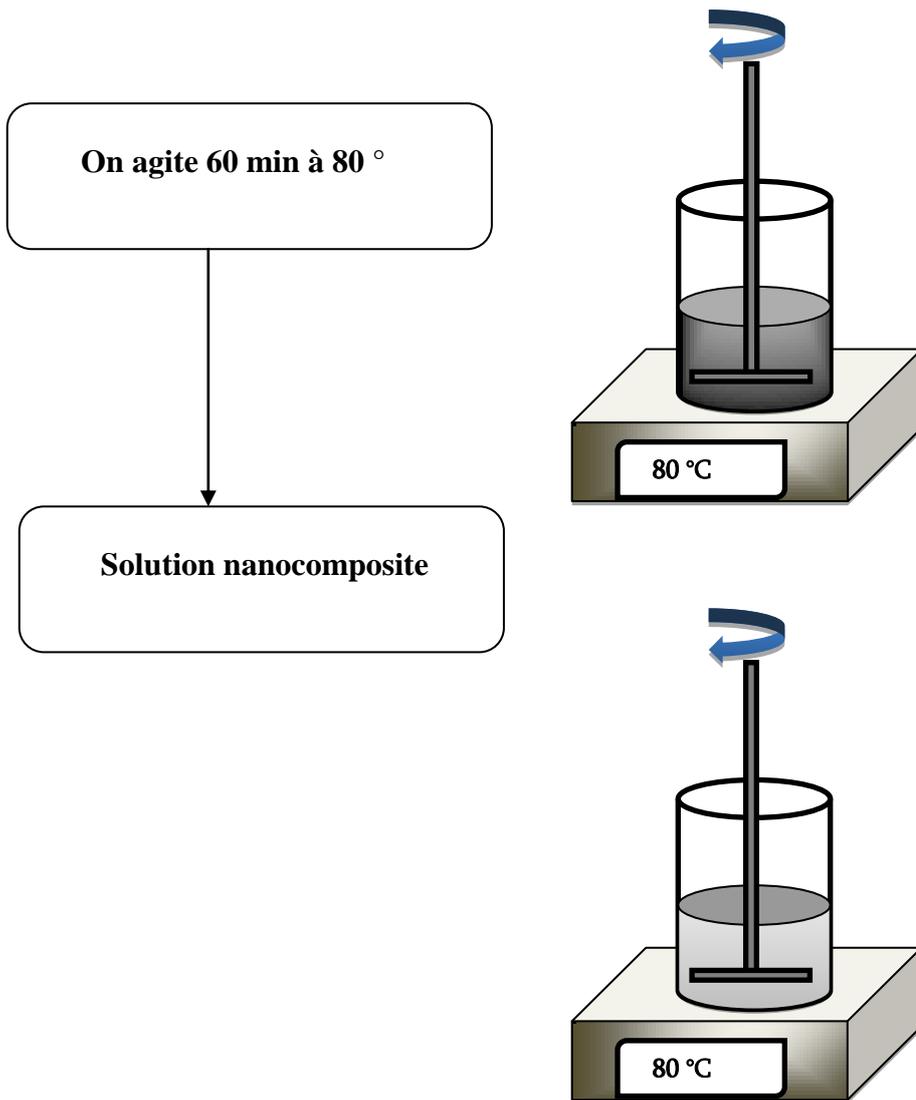


Figure II.22: Processus de fabrication du polymère.

II.10 Caractérisation électrique

La caractérisation est une phase très importante pour caractériser le comportement du film polymère utilisé dans cette thèse afin d'utiliser ces données dans les prochains manipulations. Pour cela dans un premier temps, un rappel succinct sur les propriétés diélectriques des polymères va être exposé. Les propriétés électriques d'un polymère concernent : les propriétés diélectriques (permittivité et $\tan\delta$), les propriétés d'isolement (résistivité ou conductivité) et les champs de claquage ou rigidité diélectrique. Ces propriétés varient en fonction de la température et de la fréquence.

Un diélectrique parfait est un milieu non conducteur susceptible de se polariser sous l'effet d'un champ électrique extérieur [70]. Il apparaît dans le milieu diélectrique des moments

dipolaires repartis de façon homogène dans l'ensemble du matériau qui viennent partiellement compenser la densité surfacique de charges des électrodes

II.10.1 Phénomène de polarisation à l'échelle microscopique

L'application d'un champ électrique sur un diélectrique conduit à la polarisation de ce diélectrique. Les figures (II.23) et (II.24) montrent que le vecteur de polarisation correspondant résulte de plusieurs contributions : électronique, atomique, d'orientation et de charge d'espace [71].

II.10.1.1 Polarisation électronique

Quand un champ électrique est appliqué sur un matériau, le nuage électronique dans chaque atome est déplacé par rapport au noyau. On peut l'observer jusqu'à une fréquence 10^{15} Hz, figures (II.23) et (II.24)

II.10.1.2 Polarisation atomique

Si on applique un champ électrique sur une molécule constituée par deux atomes A et B d'électronégativités différentes, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant une polarisation atomique. On peut observer ce phénomène jusqu'à une fréquence de 10^{12} Hz figure (II.24).

II.10.1.3 Polarisation d'orientation (polarisation de Debye)

Dans les matériaux constitués par des molécules qui possèdent des moments dipolaires permanents, lorsqu'on applique un champ électrique, les molécules tendent à s'orienter dans le sens du champ. Dans les matériaux macromoléculaires cette polarisation joue un rôle important. Dans un milieu condensé, quand un champ électrique constant est appliqué, la polarisation d'orientation n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale et de même, à la coupure du champ. Dans un champ électrique alternatif, les molécules ne peuvent pas s'orienter instantanément; elles sont soumises à des forces que Debye assimile à des forces de viscosité.

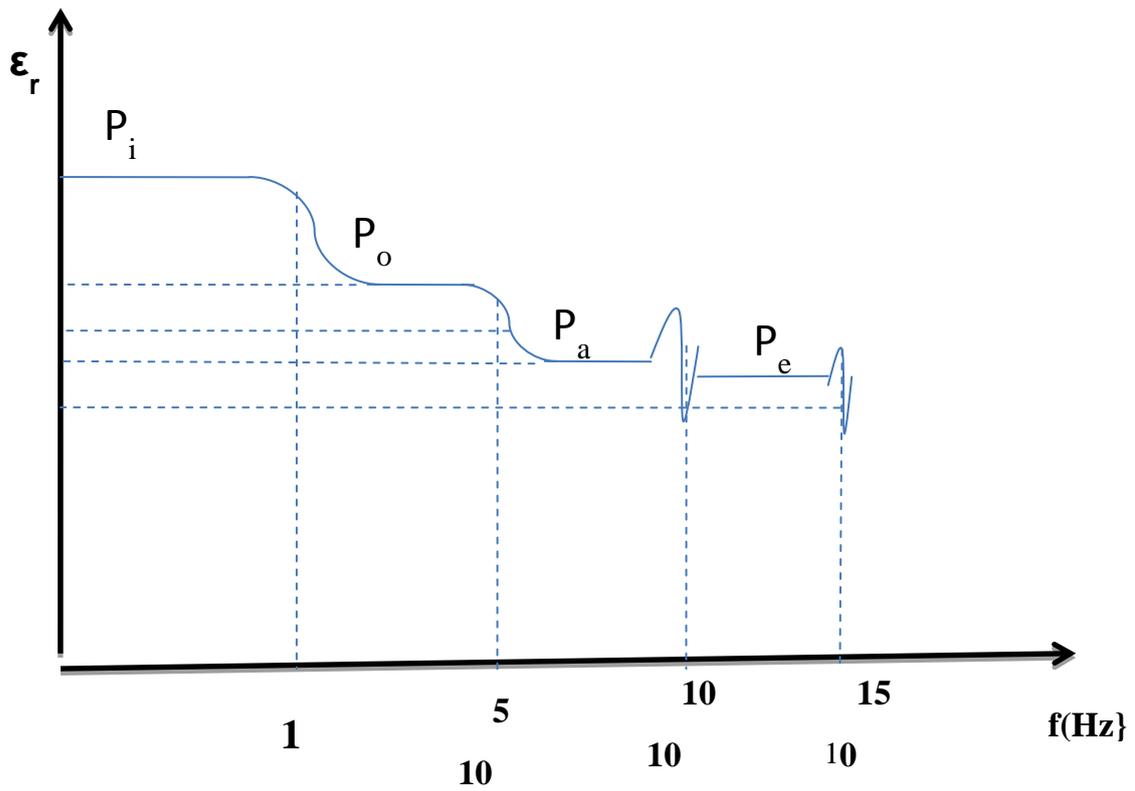


Figure II.23: Influence des différents types de polarisation sur la permittivité relative [72].

p_a : polarisation atomique

p_e : polarisation électronique

p_i : polarisation interfaciale

p_o : polarisation orientation

ϵ_r : permittivité relative

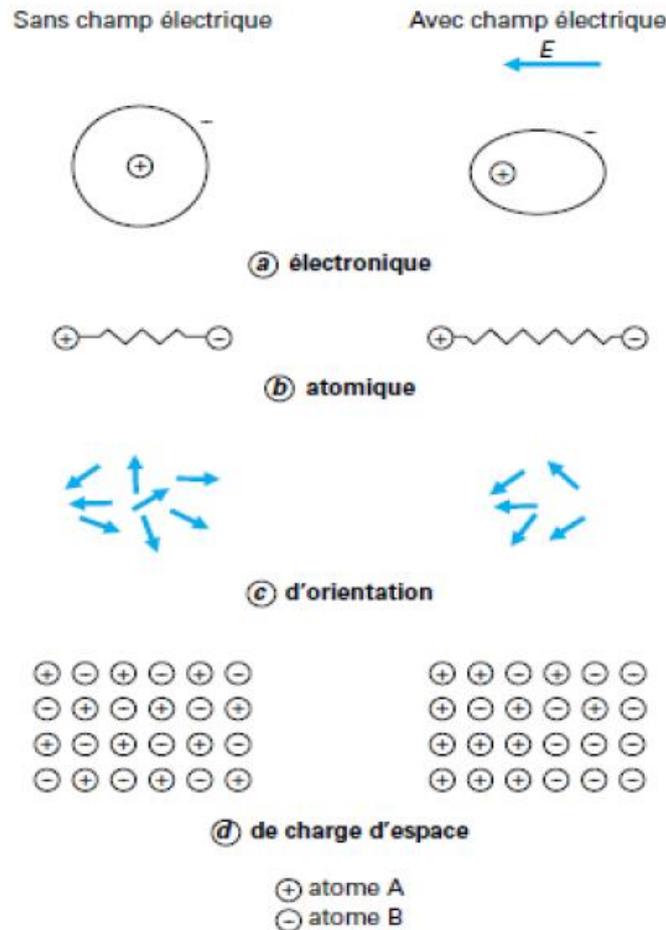


Figure II.24: Représentation schématique des quatre types de polarisation

II.11 Mécanismes de conduction et de pertes dans les polymères

Les diélectriques ne sont pas parfaits. Il peut y avoir des mouvements de charges libres surtout en très basse fréquence et un déphasage entre la polarisation et le champ électrique appliqué qui constitue les pertes diélectriques.

II.11.1 Conduction en continu et en très basse fréquence

Les matériaux plastiques trouvant beaucoup d'applications comme isolants, ils doivent avoir une grande résistivité. La résistivité est l'inverse de la conductivité, elle s'exprime en Ω/cm ou alors S/cm . Il est donc important de comprendre les mécanismes de conductivité pour prédire les effets de différents facteurs tels que les variations de température ou l'effet de la présence d'impuretés. On distingue deux types de conductivité :

- une conductivité électronique, due à un déplacement d'électrons dans une partie plus ou moins étendue de la substance ;

➤ une conductivité ionique, due à une migration d'ions.

Expérimentalement, la conductivité σ et la résistivité p des polymères suivent la loi d'Arrhenius:

$$p = p_{\infty} \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{II.9})$$

Avec

p_{∞} (W /cm) résistivité limite à température infinie,

E_a (J/ mol) l'énergie d'activation du phénomène,

T (K) la température thermodynamique,

R (= 8,3147 J/ K.mol) la constante des gaz parfaits.

II.11.2 Pertes diélectriques

Pour tenir compte de ces pertes, on exprime le constant diélectrique sous forme complexe :

$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$. La permittivité complexe ε est donc une grandeur dépendante de la fréquence que l'on peut exprimer dans le cas d'un mécanisme de polarisation interfaciale de type Maxwell-Wagner sous la forme

$$\varepsilon = \left[\varepsilon_{\infty} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + (w\tau)^2} \right] - j \left[\frac{\sigma}{w\varepsilon_0} + \frac{w\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty})}{1 + (w\tau)^2} \right] \quad (\text{II.10})$$

ε_s permittivité électrique statique (f=0),

ε_{∞} permittivité électrique a fréquence infinie,

τ (s) temps de relaxation,

ω (rad/s) pulsation de la fréquence ($w = 2\pi f$)

σ conductivité précédemment introduite

La tangente de l'angle de perte ($\text{tg}\delta$) est définie par $\text{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$, appelée couramment facteur de dissipation diélectrique.

II.11.3 Rigidité diélectrique

La Rigidité diélectrique (champ de claquage) d'un diélectrique représente la valeur maximale du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit) [73]. La valeur maximale de la tension électrique appliquée aux bornes, est appelée tension de claquage. Si le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique

du matériau, le matériau peut voir ses propriétés physiques modifiées. La rigidité diélectrique est diminuée avec :

- Le temps d'application de la tension.
- L'augmentation de la température.
- L'augmentation de l'épaisseur de l'échantillon

II.12 Résultats expérimentaux : caractérisations électriques

Les trois grandeurs électriques suivantes seront étudiées : la permittivité, la conductivité, les pertes diélectriques ($\tan\delta$). La permittivité du matériau traduit sa capacité à stocker les charges, alors que la conductivité indique sa faculté à les transférer. L'annexe 1 décrit le mode opératoire utilisé pour la préparation des électrodes nécessaire à la détermination des données électriques, au-dessus de cette valeur notre composé est considéré comme conducteur, et non diélectrique. L'influence du solvant, des nano-charges et de la matrice sur les propriétés électriques a été systématiquement étudiée.

Afin d'évaluer l'influence de la matrice sur les propriétés électriques, des nano composites ont été réalisés en utilisant dans le premier cas le PU comme polymère hôte et dans le second cas le terpolymère (T30). Les caractéristiques électriques des échantillons polymères sont mesurées par un banc de mesure SOLATRON au laboratoire MATAIS.

**Echantillon entre
deux électrodes**

**Appareil de
commande et
mesures**

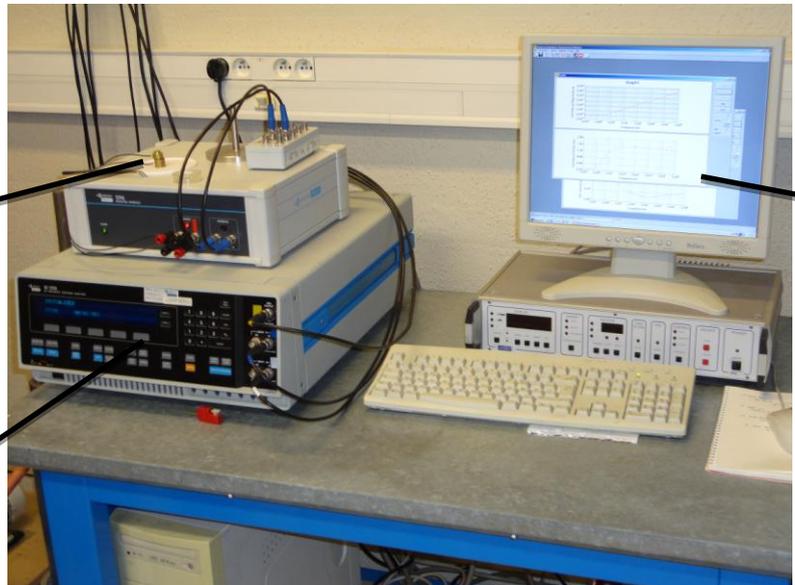


Figure II.25: Banc de mesure SOLATRON laboratoire MATAIS

Les figures (II.26 et II.31) tracent l'évolution de la permittivité relative pour les différents matériaux étudiés avec les composites à base de matrice de polyuréthane et à base de matrice de P(VDF-TrFE-CFE) en fonction de la fréquence. On distingue deux zones de fonctionnement intéressant la zone inférieure à 1Hz et la zone entre 10Hz et 10KHz. A faible fréquences une augmentation remarquable de la permittivité. Il existe un facteur 5 entre les permittivités du polyuréthane et celle du terpolymère (T30). Ce facteur est ramené à 3 après incorporation des nano-charges. La diminution des permittivités en fonction de la fréquence est plus marquée dans le cas du ter polymère (T30) que dans celui du PU.

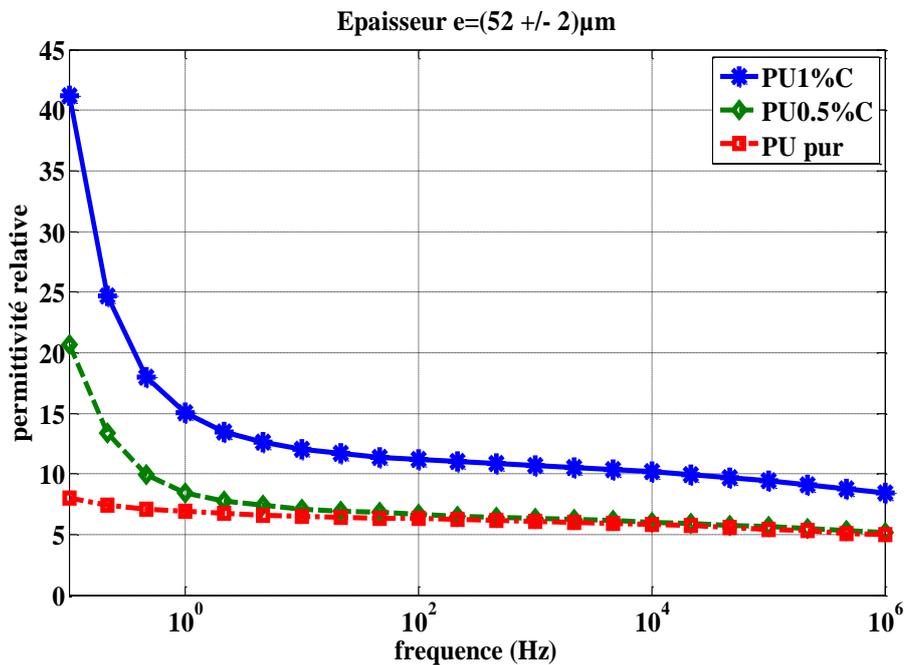


Figure II.26: Permittivité relative en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane

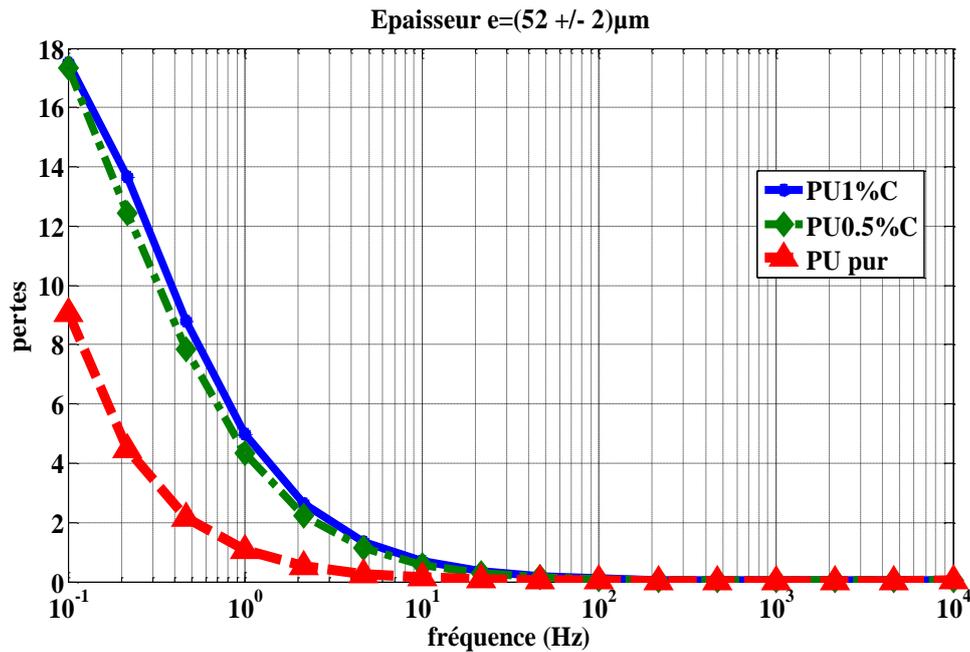


Figure II.27 : Indice de perte en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane

Pour les fréquences inférieures à 1Hz une augmentation significative de la permittivité est observée pour les différents types utilisés dans cet essai ainsi que des pertes. Pour les faibles fréquences l'ensemble des phénomènes de polarisation interviennent, en plus de la polarisation interfaciale ou de maxwell. L'amplitude élevée des pertes en basse fréquence s'explique par le phénomène de conduction dans les polymères. Les impuretés contribuent également à la conductivité des isolants.

Pour les fréquences comprises entre 10Hz et 100kHz, la permittivité relative du polymère est quasi constante. Cela correspond au plateau de la polarisation d'orientation figure II.23. Cela laisse supposer que le caractère dipolaire est renforcé dans les composites grâce aux charges conductrices.

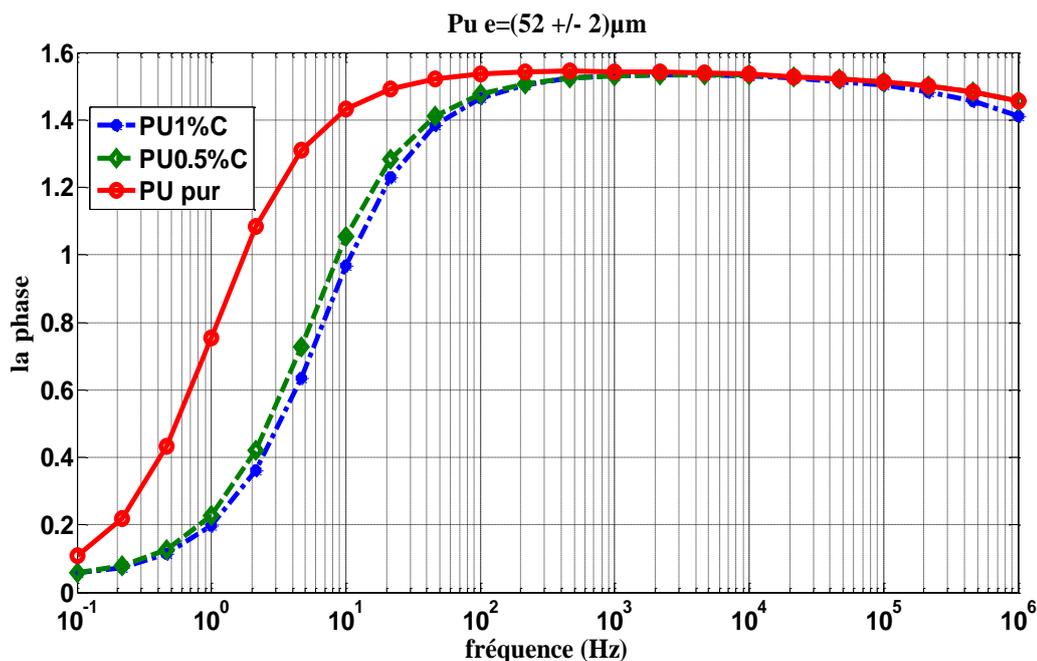


Figure II.28: La phase en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane

La conductivité électrique est l'inverse de la résistivité. Elle correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de longueur et de 1 m² de section. Pour ces dernières, la valeur de la conductivité dépend de la nature des ions présents dans la solution et de leurs concentrations.

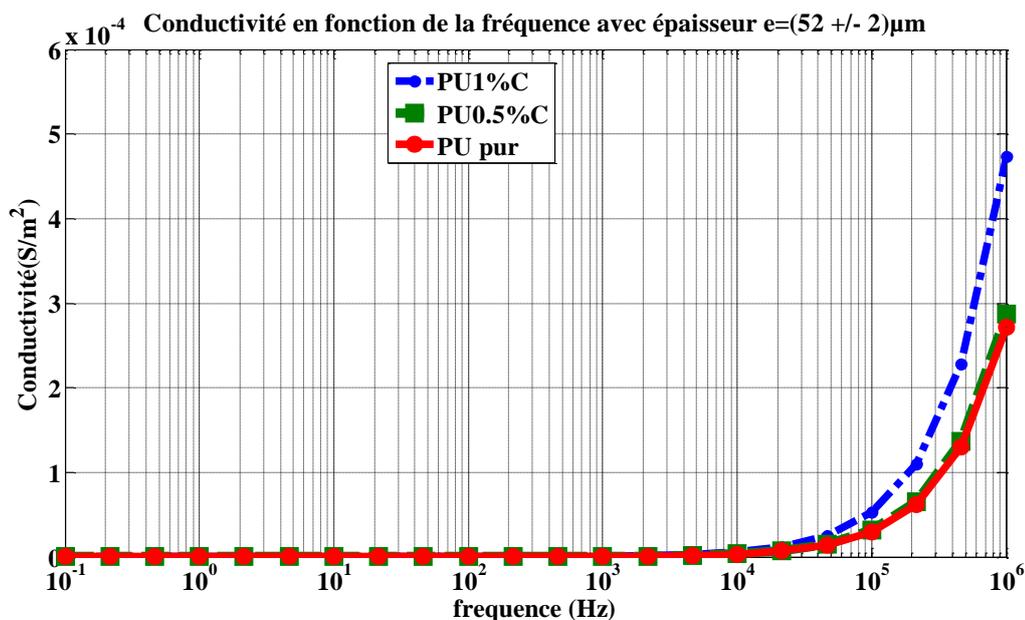


Figure II.29: Conductivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane

Malgré l'inconvénient que la permittivité augmente en parallèle avec la conduction donc les pertes, des résultats encourageants laissent supposer que cette méthode de charge est très prometteuse pour l'augmentation des propriétés électromécaniques des polymères électro-actifs, Les permittivités relatives sont plus élevées avec les pertes dans le cas des composites que celle de leur matrice de départ figure. II.28 figure II.29. L'effet majeur de la présence de charges dans un diélectrique est la modification de la distribution interne du champ électrique, ce phénomène est largement amplifié lorsque des particules conductrices sont dispersées dans la matrice diélectrique car elles sont équivalentes à des dipôles.

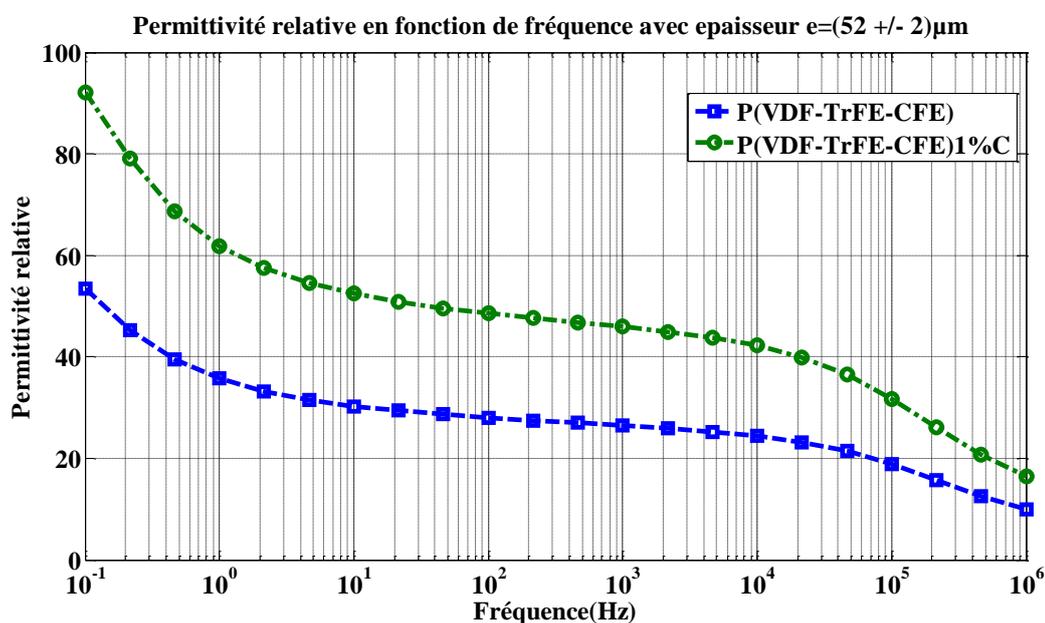


Figure II.30: Permittivité relative en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE)

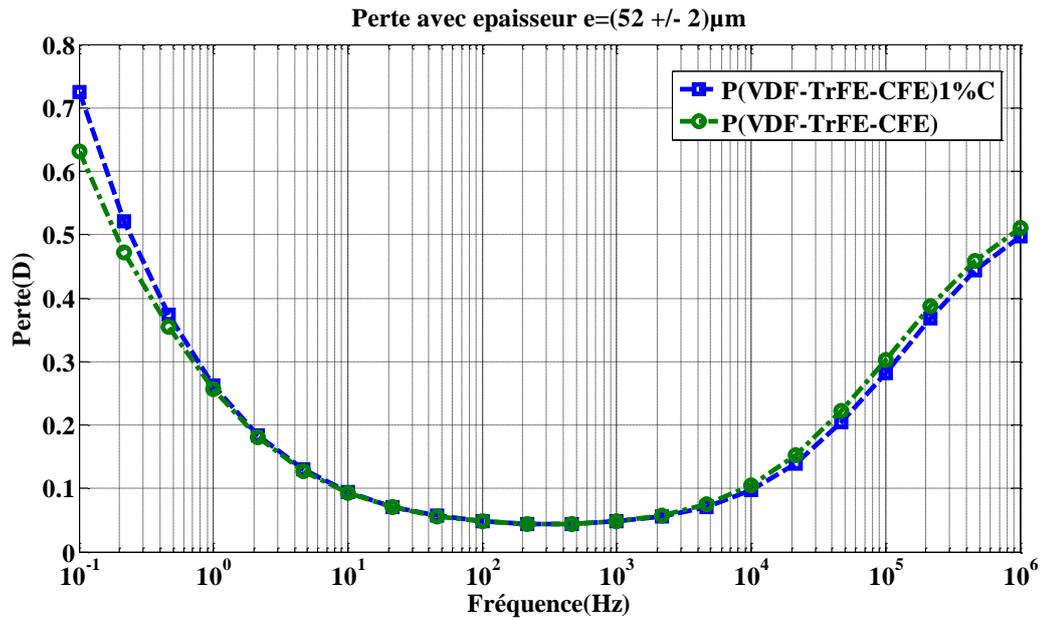


Figure II.31: Indice de perte en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE)

L'ajout de particules dans une matrice influe fortement sur les caractéristiques mécaniques des polymères comme cela sera démontré dans les figures II.30 et Figure II.31. Ces particules permettent la création de nouveaux dipôles mais engendrent aussi un déséquilibre dans la structure du polymère d'où une favorisation de la polarisation d'orientation traduit par une augmentation de la permittivité.

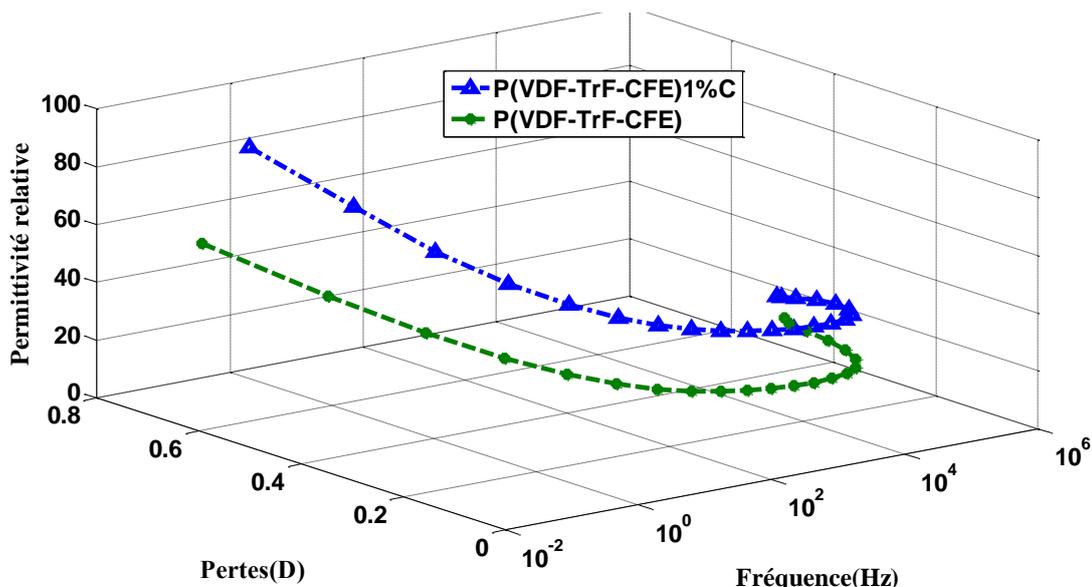


Figure II.32 : Indice de perte et permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE)

Il est intéressant de noter que pour les deux matrices de polymère électro-actif étudiées ici, une forte dépendance de la permittivité avec l'épaisseur des films est observée. Les figures 28 et 30 montrent bien qu'il existe une permittivité élevée avec une épaisseur optimale environ 50 μm pour les composites à base de polyuréthane par contre avec les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE) la permittivité augmente avec l'augmentation de l'épaisseur

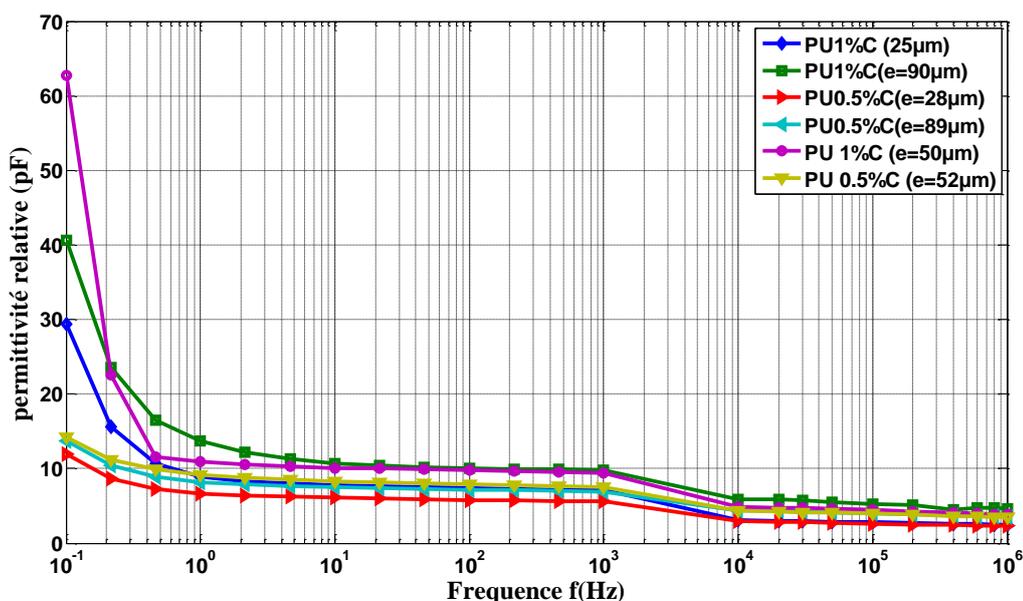


Figure II.33: Permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de P(VDF-TrFE-CFE) pour des différentes épaisseurs

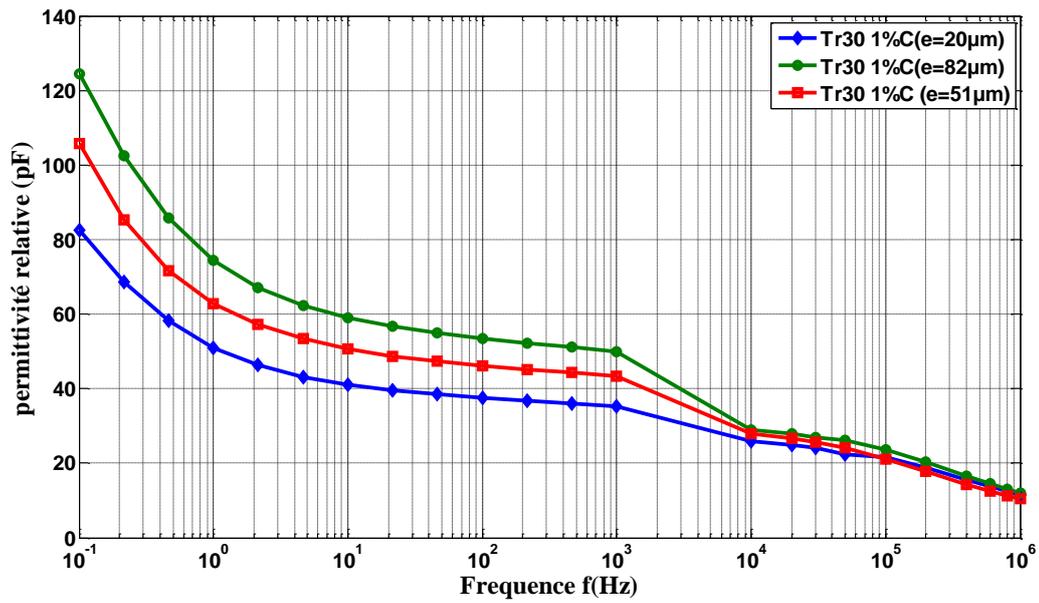


Figure II.34: Permittivité en fonction de la fréquence pour les composites à base de matrice de polyuréthane avec différentes épaisseurs.

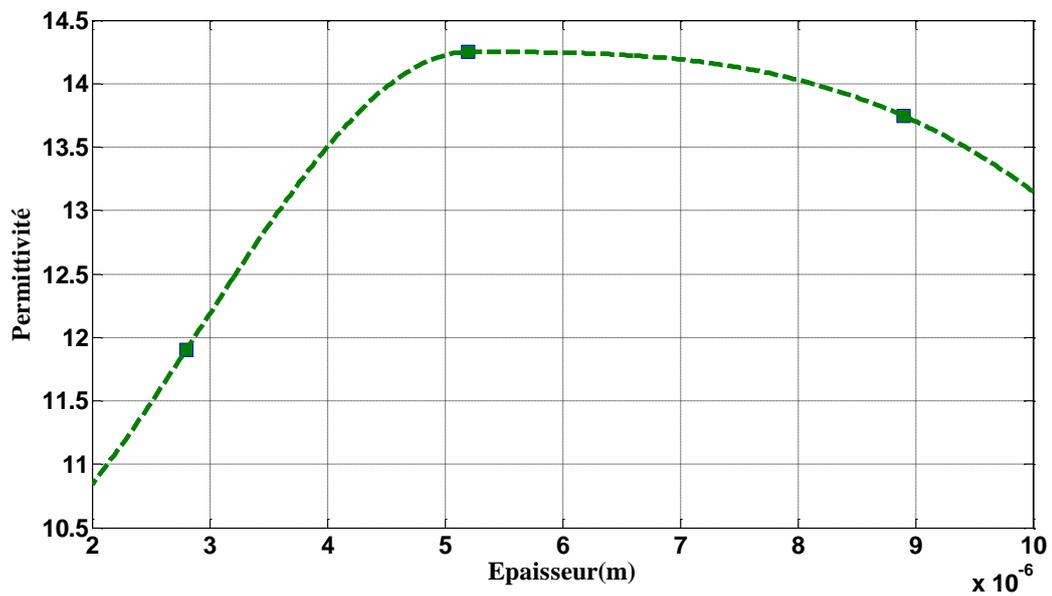


Figure II.35: Permittivité en fonction de l'épaisseur pour les composites à base de polyuréthane avec différentes épaisseurs

Finalelement les figures II.36 et II.37 tracent l'évolution de la permittivité et les pertes obtenues en fonction du champ électrique, pour un échantillon à base de polyuréthane chargé à 1.2 % carbone

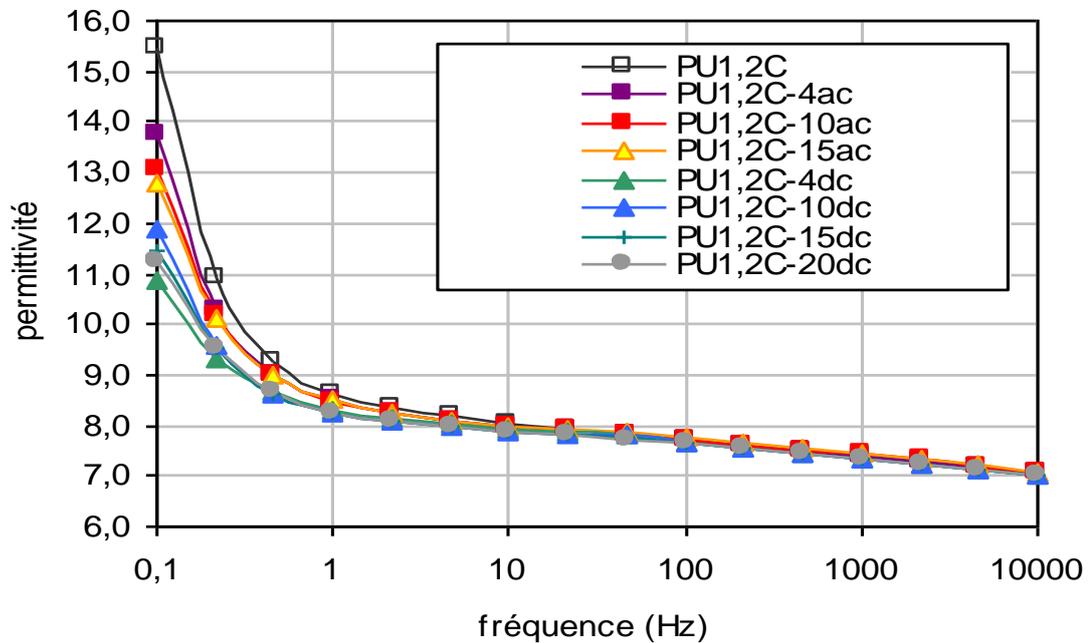


Figure II.36: permittivité en fonction de la fréquence pour les composites de polyuréthane avec les différentes valeurs du champ

D'après cette figure on remarque bien une légère diminution de la permittivité avec l'application d'un champ AC ou DC.

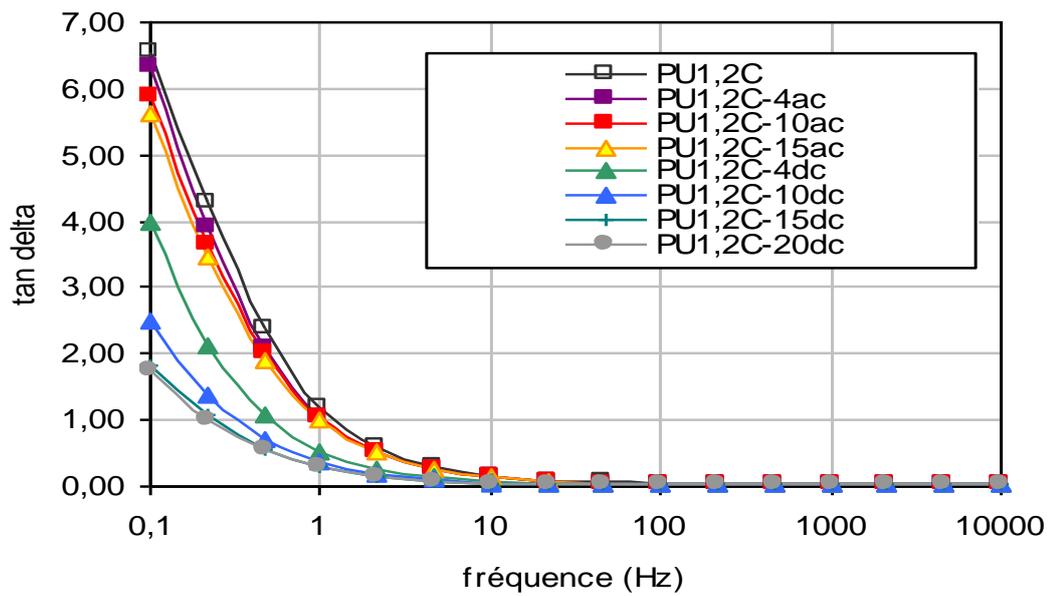


Figure II.37: Indice de pertes en fonction de la fréquence pour les composites à base de polyuréthane avec les différentes valeurs du champ. Les pertes diélectriques sont plus faibles en DC.

II.13 Propriétés thermiques

La caractérisation thermique englobe toute une série de techniques de caractérisation des matériaux fondée sur l'étude des variations de propriétés physico-chimiques en fonction de la température. Dans le cas des polymères, l'analyse de la réponse thermique permet de mettre en évidence et de donner une interprétation microscopique des phénomènes tels que les changements de phases. Les caractérisations thermiques ont été effectuées par analyse thermique différentielle (DSC). L'analyse thermique différentielle permet de mesurer les températures et les flux de chaleurs associées aux transitions de phase dans les polymères en fonction de la température dans une atmosphère contrôlée. Ces mesures fournissent des informations quantitatives et qualitatives sur les transformations physico-chimiques entraînant des échanges de chaleur endothermiques (fusion) ou exothermiques (cristallisation) ou encore la température de transitions vitreuses.

Les essais DSC ont été réalisés à l'aide d'un appareil modèle **131evo de Setaram**. C'est une DSC à flux de chaleur. Son principe de fonctionnement consiste à mesurer la variation de la différence de température (ΔT) entre l'échantillon (P) et la référence (R) lorsque la température du four change. Les creusets P et R sont dans le même four et reposent sur un disque ayant une bonne conductivité thermique reliés à un four massif dont la température est

programmable. Chaque creuset est entouré d'un thermocouple relié à l'ordinateur et permet la mesure précise de ΔT . Lorsqu'un changement de phase a lieu dans l'échantillon, la chaleur émise ou absorbée par ce dernier modifie le flux de chaleur résultant vers l'échantillon. Toute différence de flux entre P et/ou R et le four se traduit par un ΔT entre P et R et est caractéristique d'une transition de phase.

20 mg d'échantillon sont pesés à l'aide d'une balance à précision ($\pm 0,01\text{mg}$), dans un creuset en aluminium de $120\mu\text{l}$. Pour assurer un bon contact avec le fond du creuset, les échantillons sont découpés en petits morceaux de surface similaire à celle du creuset. L'échantillon d'abord refroidi à -100°C puis est chauffé jusqu'à 210°C , puis refroidi jusqu'à température. Les analyses se font sous azote avec des vitesses de chauffe et refroidissement de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Les résultats de cette analyse sont représentés par la figure (II.38)

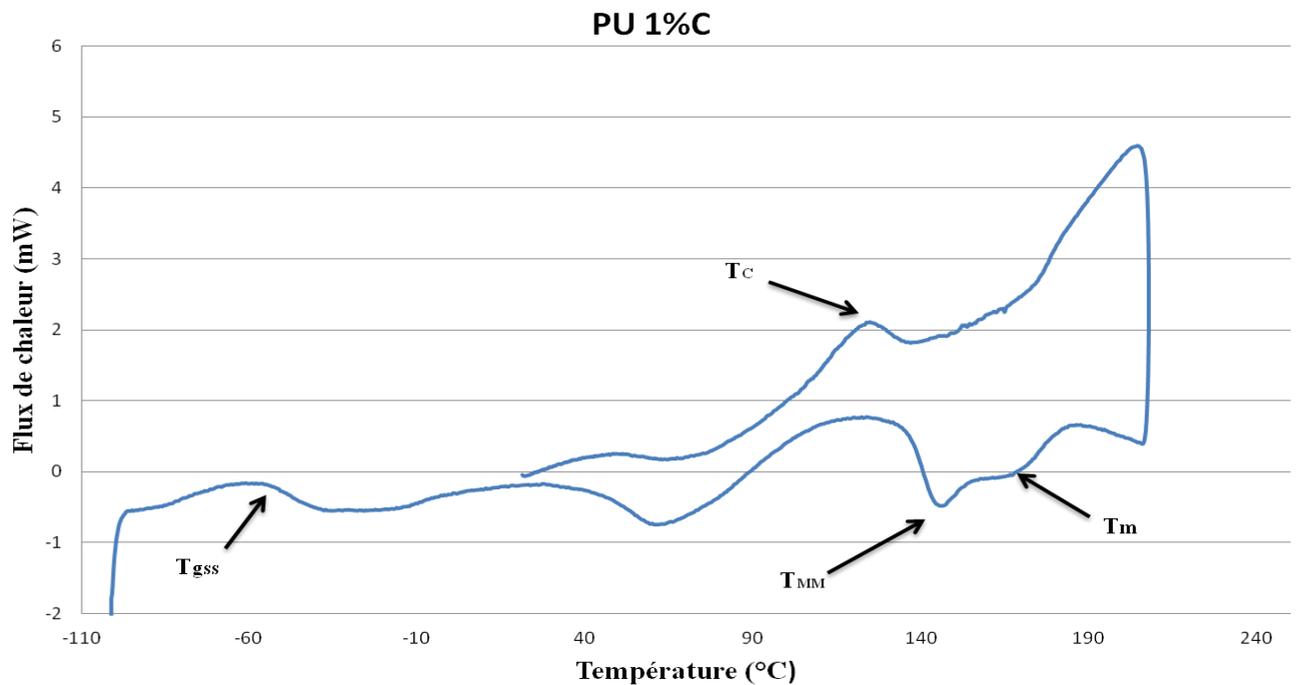


Figure II.38: DSC thermogramme pour les composites à base de polyuréthane chargé à 1 % de carbone

D'après la figure II.38 on remarque que la température de transition (T_{gss}) atteint une valeur (-60°C). Si cette température est inchangée, pas de modification du taux de micro-séparation de phases. La température de recristallisation (T_c) est de l'ordre de (100°C). Cette valeur due à l'effet de relaxation des chaînes de polymères, pour la température de micro-mélange (T_{MM}), elle augmente à (140°C). L'augmentation de la cristallinité de l'échantillon doit s'accompagner d'une augmentation

de ces températures et/ou de l'enthalpie globale. Finalement la température de fusion (T_m) atteint une valeur de (180°C).

II .14 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de polymères, leurs principales caractérisation électrique sa propriétés et leur domaine d'application. Un état de l'art complet avec quelques d'applications existantes utilisant les polymères électroactifs . On a présenté le procédé de fabrication de la solution de ces matériaux electrostrictive, avec une analyse expérimentale cette analyse consiste à étudier les courbes de permittivité les pertes diélectriques, pour analyser l'influence des particules sur la réponse électromécanique de ces polymères. Les effets du l'épaisseur, de la fréquence, et pour deux différents type de polymères P(VDF-TrFE-CFE) et PU ont été étudiés .

CHAPITRE III :

CARACTERISATION ELECTROMECHANIQUE DES POLYMERES ELECTROACTIVE (EAP)

Caractérisations électromécanique des polymères électroactifs (EAP)

Ce chapitre présente dans une première partie quelques notions de base relatives à la caractérisation du comportement électromécanique des matériaux, et plus précisément de déterminer la dépendance de leur déformation avec l'amplitude du champ électrique. Le but de ce chapitre consiste à augmenter l'activité électromécanique au sein de nos polymères à l'aide de nano-charge. Dans cette partie l'influence des charges sur les caractéristiques mécaniques des nano-composites, sera entreprise afin d'avoir les outils nécessaires à la compréhension des résultats présentés dans les prochains chapitres de la récupération. Un modèle de contrôle de raideur sera réalisée. Cette modélisation analytique est complétée et validée par une série de résultats expérimentaux. Permettant ainsi de définir les lois de comportement afin de démontrer le domaine privilégié d'utilisation des muscles artificiels.

III.1 Introduction

Les systèmes électromécaniques (MEMS) sont classiquement composés d'un film piézoélectrique de quelques microns d'épaisseur, déposé sur un substrat généralement en silicium. L'utilisation de polymères en lieu et place de ces matériaux offrent des perspectives intéressantes pour le micro-actionnement avec des applications par exemple en micro-fluidique (valves, pompes..). Les polymères diélectriques sont tous électrostrictifs. Cependant certains présentent une déformation plus importante sous l'effet d'un champ électrique que celle prévue par le seul effet électrostatique (ou effet de Maxwell). Ainsi dans le cas du polyuréthane, l'effet de Maxwell ne participe que pour 15% à la déformation totale du film, 85% étant liée aux propriétés intrinsèques du polymère. Par ailleurs, il a été montré au laboratoire (LGEF), que la déformation mécanique sous un champ électrique donné pouvait être augmentée de façon significative par l'incorporation de nano-objets conducteurs ou semi-conducteurs dans la matrice polymère. Un des principaux défis technologiques est l'intégration à l'échelle des MEMS ou des composants micro-fluidiques d'électrodes souples et étirables (« compliants électrodes »). En effet, contrairement aux PZT, les polymères électroactifs ne sont pas capables d'entraîner une électrode ou un corps d'épreuve très rigide. Deux types d'électrodes souples sont étudiées : des électrodes métalliques structurées ou des électrodes en polymères conducteurs, ce qui conduirait à la réalisation de microsystèmes tout polymère. Une autre difficulté à surmonter consiste à améliorer l'adhérence entre les électrodes et le matériau actif. Cette adhérence se révélant généralement trop faible. Dans l'approche impliquant des électrodes métalliques, leur micro-structuration de surface par divers procédés d'attaque favorise l'accroche du polymère sur le métal. Pour ces dispositifs, la géométrie de l'électrode sera étudiée afin de minimiser l'influence de la rigidité du métal. Dans l'approche tout polymère, des travaux sur la réalisation d'électrodes en polymère dopé au carbone.

Selon une étude de marché de l'Innovative Research and Products Inc (iRAP) intitulé "polymère électroactifs: actionneurs et capteurs- types, applications, nouveaux développements, structure Industrielle et marché global" [74], le marché mondial pour les actionneurs et les capteurs à base d'EAP a atteint un volume de 15 millions de dollars en 2007. Ce montant devrait passer à 247 millions de dollars d'ici 2012. L'Amérique du Nord jouera un rôle majeur avec environ 66% de part de marché dès 2007, suivi par l'Europe à 21,3%, le Japon à 9,3%, et le reste du monde à 3,3%. Le taux de croissance devrait être de 71,3% à 91,8% pour ces quatre grandes régions durant la période 2007-2012.

III.2 Caractérisation électromécanique

Lorsque l'on applique une tension, une pression électrostatique, appelée pression effective de Maxwell, apparaît aux bornes des électrodes (équation III.1[75],).

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \quad (\text{III.1})$$

Avec

ϵ_0 : permittivité diélectrique du vide

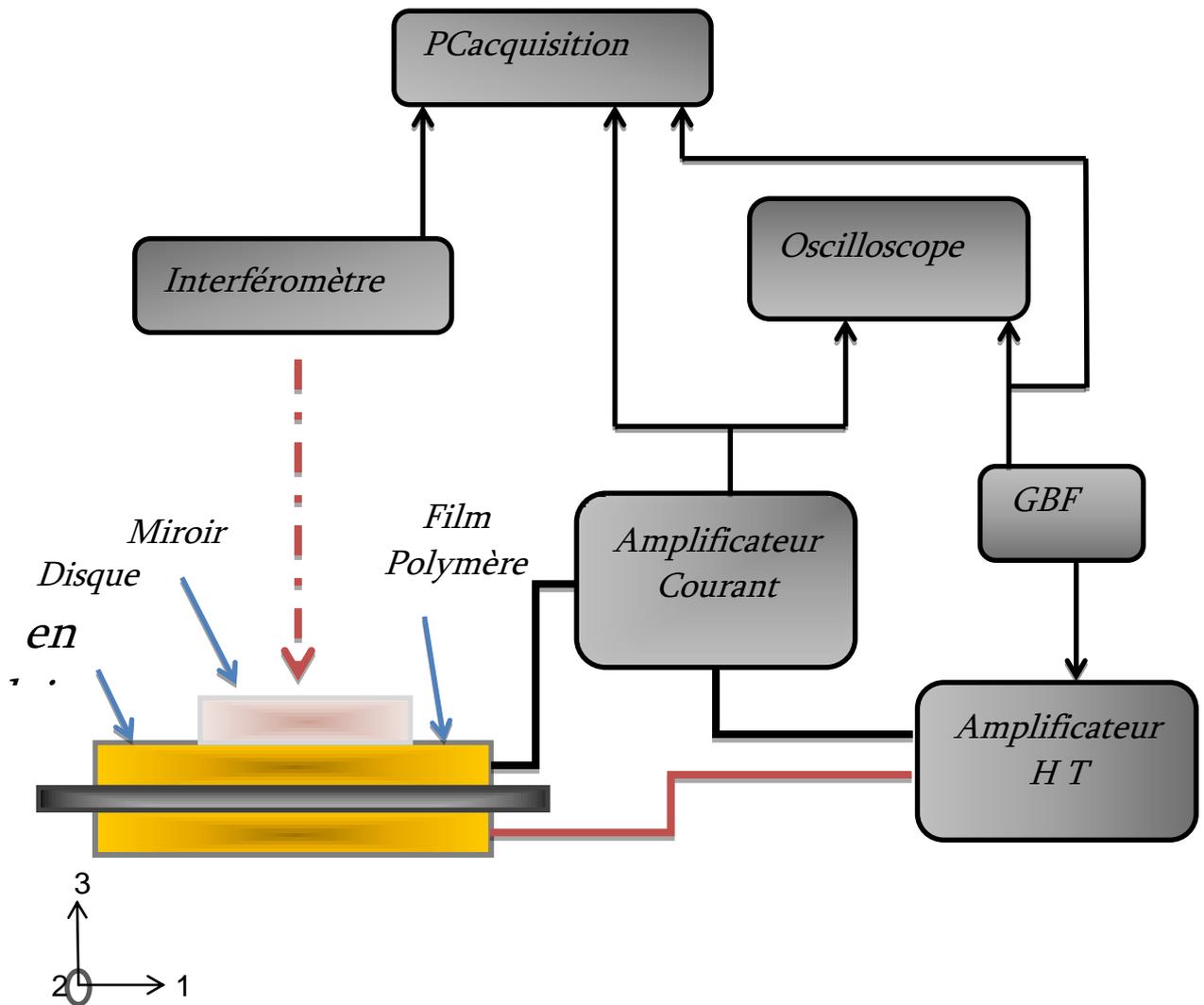
ϵ_r : permittivité relative du diélectrique

E : champ électrique en MV.m^{-1}

Cette pression électrostatique induit une pression mécanique sur les électrodes supérieure et inférieure. Si bien que le polymère se contracte selon son épaisseur et s'étend selon son aire, la pression effective de Maxwell σ pour un polymère diélectrique est le double de la pression de Maxwell obtenue pour une capacité classique à électrodes planes et parallèles. La capacité à base de diélectrique se déforme en surface ce qui n'est pas le cas d'une capacité classique. Afin d'évaluer le potentiel des composites utilisés dans ce manuscrit, les travaux entrepris étudieront la dépendance de leur déformation avec le champ électrique, la contrainte mécanique, la fréquence et la température. C'est pourquoi une étude complète est nécessaire pour avoir une meilleure compréhension des phénomènes.

III.3 Mesure de la déformation sous champ électrique

La figure III.1, synthétise le protocole de mesure qui va être appliqué au polymère.



La figure III.1: Montage de mesure de déformation.

Le principe de mesure est illustré dans la figure III.2. Il présente le montage expérimental utilisé pour mesurer la déformation. Le film de polymère est placé horizontalement entre deux électrodes (pour éviter de mesurer des mouvements de flexion du film) de 20mm de diamètre, un miroir est placé sur l'électrode supérieure en laiton sur lequel le laser vient se projeter. L'acquisition a été réalisée à partir d'un oscilloscope numérique, piloté par un PC, elle se fait simultanément sur les deux voies (première voie pour la tension et la deuxième pour le courant électrique qui traverse l'échantillon). Une précontrainte de 0,05N est appliquée sur l'échantillon, elle correspond aux poids de l'ensemble miroir plus électrode en laiton (poids de 5g). La haute tension est délivrée par un amplificateur haute tension TREK Model 10/10 B de gain 1000 piloté par un générateur de fonction Agilent 33220A, lui-même contrôlé par le PC pour synchroniser les mesures de tension, courant et déformation. La déformation est mesurée par un bloc laser interféromètre Agilent 5519A double faisceau dont la résolution est

de l'ordre de 10nm. Un circuit de protection a été réalisé au moyen des deux diodes transil. Pour visualiser le courant de l'échantillon, un amplificateur de courant (Keithley Model 428 Current Amplifier) converti le courant en une tension et l'amplifie par un gain G .

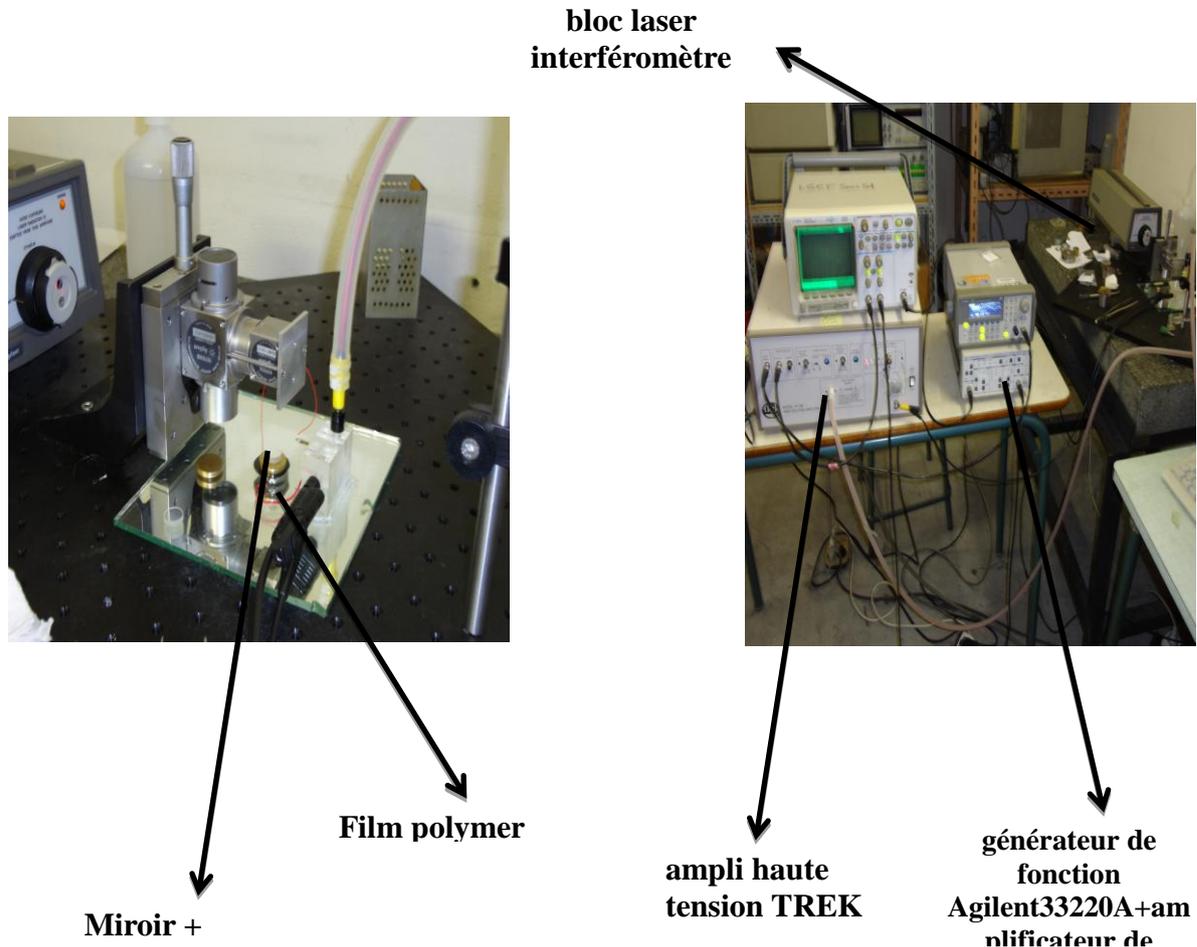


Figure III.2: Montage expérimentale de mesure de déformation.

Avec l'utilisation du dispositif expérimental décrit au paragraphe précédent, la polarisation ainsi que la déformation due à l'application du champ électrique ont été mesurées, en fonction de l'amplitude du champ électrique dynamique variant de 0 à 20 V/ μm pour une fréquence de 100 mHz. La Figure III.3 illustre l'évolution de la déformation en fonction du champ électrique et pour différents films de PU1%C, PU0.5%C et P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. Avec l'application de faibles amplitudes de champ électrique inférieur à 4V/ μm on voit clairement une dépendance quadratique de la déformation avec le champ électrique, et dans cette plage de fonctionnement la déformation du polymère PU1%C est plus élevée par

apport à PU0.5%C et P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. Par contre pour des valeurs supérieures, une saturation de la déformation est clairement visible pour les trois différents polymères avec une déformation du P(VDF-TrFE-CFE) 1%C plus élevée est observée.

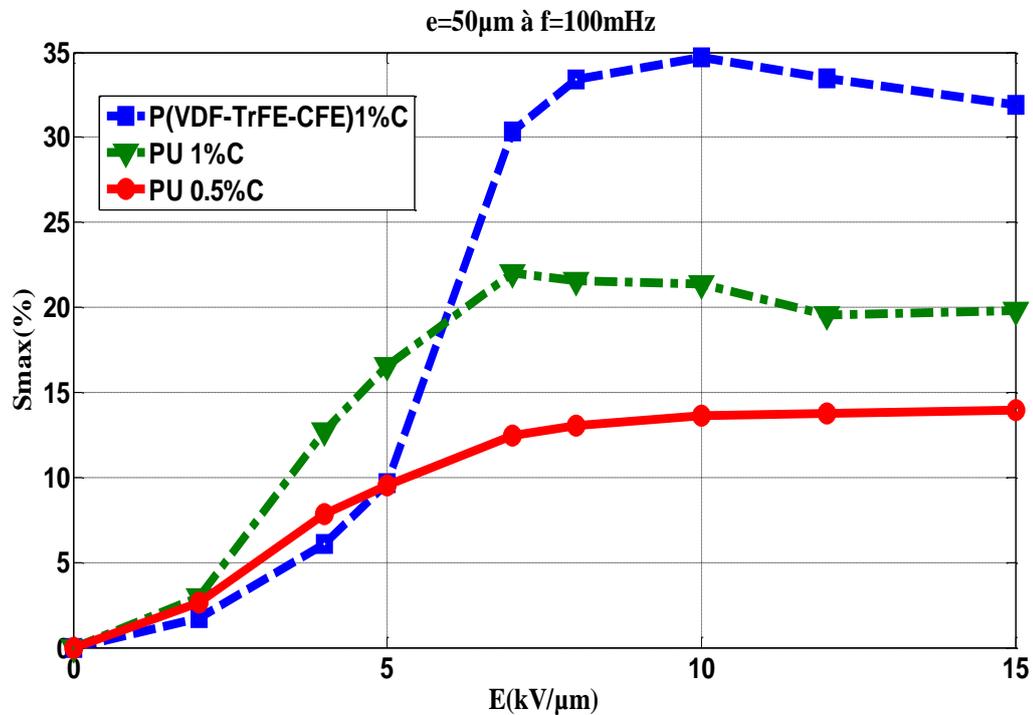


Figure III.3: Déformation (-S3) en fonction du champ électrique pour une fréquence de 100mHz de film de PU 0.5%C. PU 1%C. et film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.

Il est intéressant de noter que pour les deux matrices de polymère électro-actif étudiées ici, une forte dépendance de la déformation avec la fréquence des films est observée Figure III.4. En effet avec l'application des différentes amplitudes du champ électrique les résultats sont totalement différents pour les différentes fréquences. Les niveaux de déformations sont plus élevés pour les faibles fréquences ceci est due à la polarisation interfaciale et Maxwell qui intervient avec les faibles fréquences.

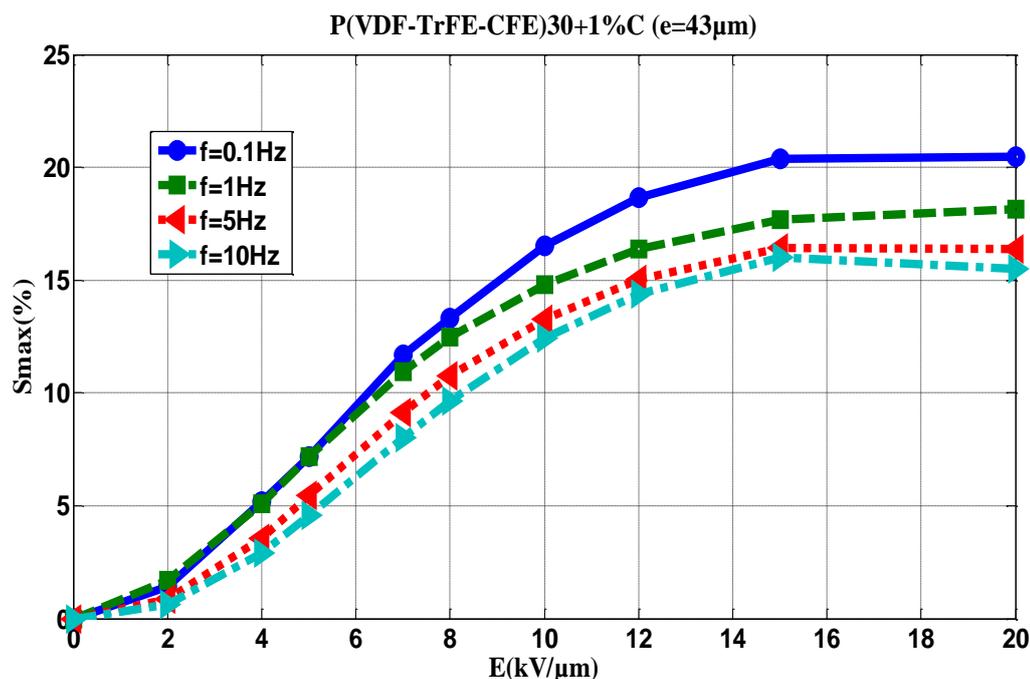


Figure III.4 : Déformation (-S3) en fonction du champ électrique pour film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. avec différentes fréquences

Il a été montré au cours des chapitres précédents de cette thèse, que les polymères électrostrictifs et sous l'effet d'un champ électrique, qu'une polarisation au sein du matériau était induite. Sous l'effet de cette polarisation, le matériau se déforme dans la limite de son élasticité. La réponse de la déformation en fonction du champ électrique varie en fonction de l'amplitude du champ appliqué, comme il est montré dans la Figure III.5. Ces différentes mesures ont permis de mettre les matériaux fabriqués au laboratoire dans une condition réelle d'utilisation. Un phénomène de saturation de la déformation est observé, La réponse des composites chargés à l'aide de particules conductrices pour PU 1%C est supérieure à celle des matrices P(VDF-TrFE-CFE) 1%C Figure III.6 .

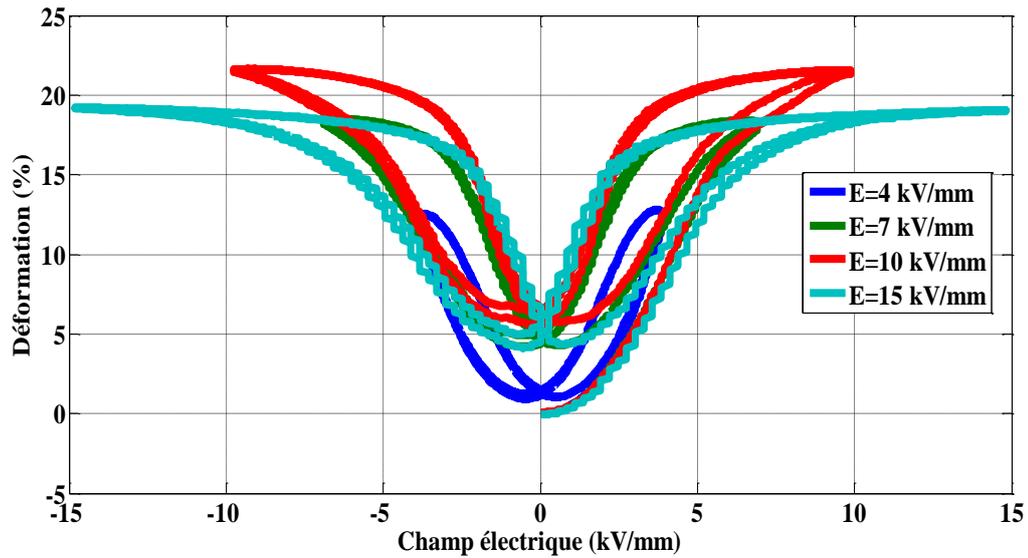


Figure III.5: Déformation en fonction du champ électrique pour un échantillon de PU 1%C à 100mHz à différents niveaux de champ électrique.

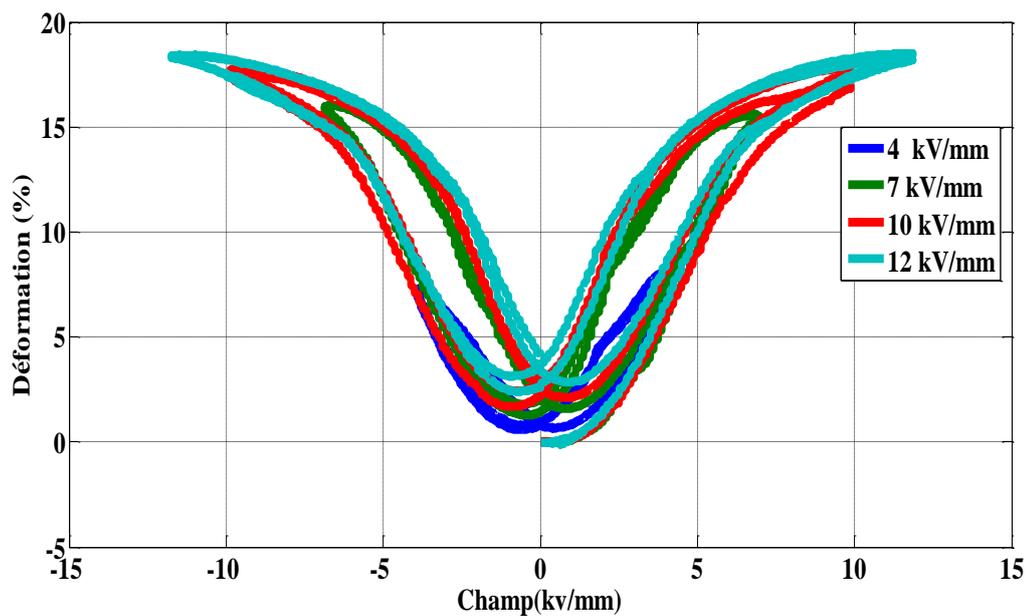


Figure III.6: Déformation en fonction du champ électrique pour un échantillon de film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. à 100mHz à différents niveaux de champ électrique

Les figures III.7 et III.8 montrent les résultats typiques du comportement de chaque type de polymère et la variation des déformations S par rapport au temps avec différentes amplitudes du champ électrique. Plus on augmente le champ électrique, plus il y aura une augmentation de la déformation. Une saturation de 10% est observée pour la matrice P(VDF-

TrFE-CFE) par contre cette valeur elle est de l'ordre de 8% avec PU 1%C pour la même amplitude du champ 20kV/mm. Pour des amplitudes de faible champ électrique la réponse mécanique atteint un niveau de 10% pour la matrice PU 1%C, deux fois plus grande que celle obtenue avec P(VDF-TrFE-CFE) pour un champ de 6kV/mm.

On peut conclure pour les faibles champs électriques que le PU 1%C entraîne un accroissement de l'activité électromécanique importante et cela malgré une permittivité relative importante dans le cas des films de P(VDF-TrFE-CFE). Cela s'explique par le fait que les constantes élastiques entre les deux types de matrice sont très grandes. Ces caractéristiques sont traitées dans les prochains paragraphes.

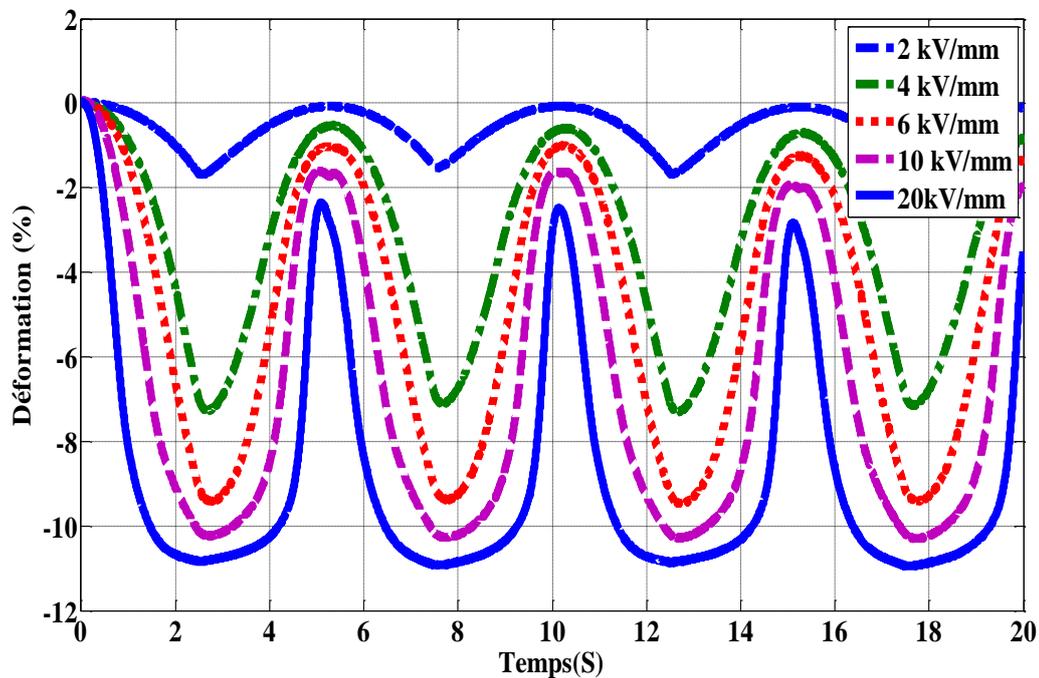


Figure III.7: Déformation en fonction du temps pour un échantillon P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. à 100mHz à différents niveaux de champ électrique

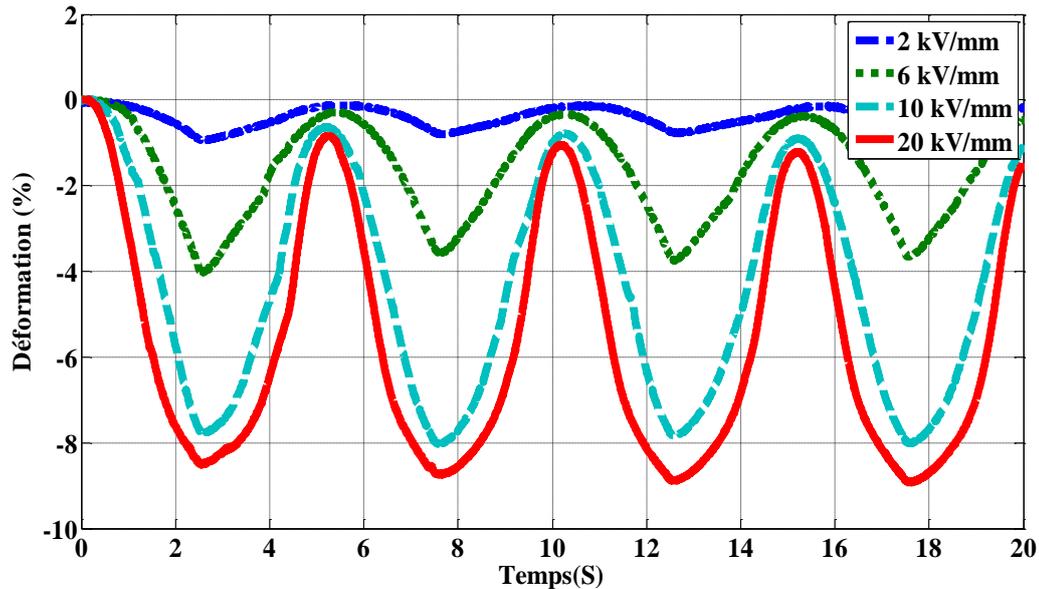


Figure III.8: Déformation en fonction du temps pour un échantillon de PU 1%C à 100mHz à différents niveaux de champ électrique

Le courant mesuré pour ces essais pratiques sert de remonter à la polarisation. Les figures suivantes, Figure III.9 et Figure III.10, tracent l'évolution de la polarisation obtenue à partir des mesures de courant, en fonction du champ électrique à 0.1Hz, pour un échantillon de Pu 1%C et à 1Hz pour P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. La première observation concerne l'élargissement de la surface des cycles lorsque l'amplitude du champ dynamique augmente. Cela provient sans doute des pertes dans les polymères qui ont un caractère non-linéaire pour des niveaux de champ électrique élevé.

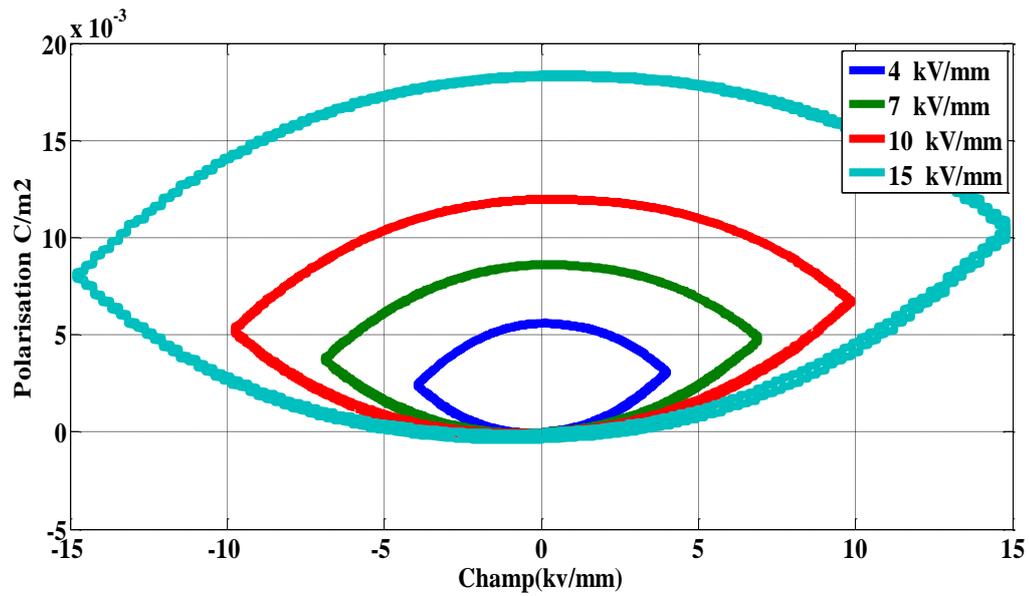


Figure III.9: Polarisation en fonction du champ électrique pour différentes amplitudes de champ Pu 1%C 100mHz

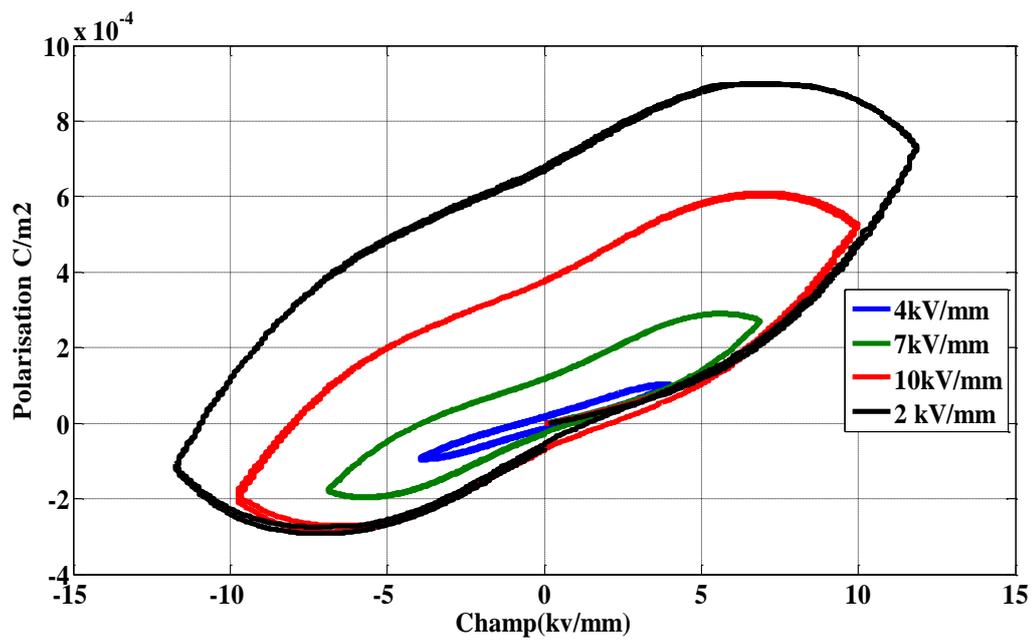


Figure III.10: Polarisation en fonction du champ électrique pour différentes amplitudes de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. champ à 1Hz

Le dispositif expérimentale permet de visualiser une autre caractéristique très importante, la dépendance qui existe entre la déformation, l'épaisseur de l'échantillon et le champ électrique. La figure III.11 montre bien cette dépendance, avec des valeurs de champ faible. La variation de déformation avec l'épaisseur s'explique par la structure des polymères et la distribution non-uniforme du champ électrique. Il est clair d'après cette figure qu'avec l'application d'un champ élevée les films minces ont tendance à mieux se déformer et avec l'augmentation de l'épaisseur cette déformation diminue progressivement. Pour les films épais le phénomène inverse est bien observé. A faible champ la déformation augmente avec l'augmentation de l'épaisseur.

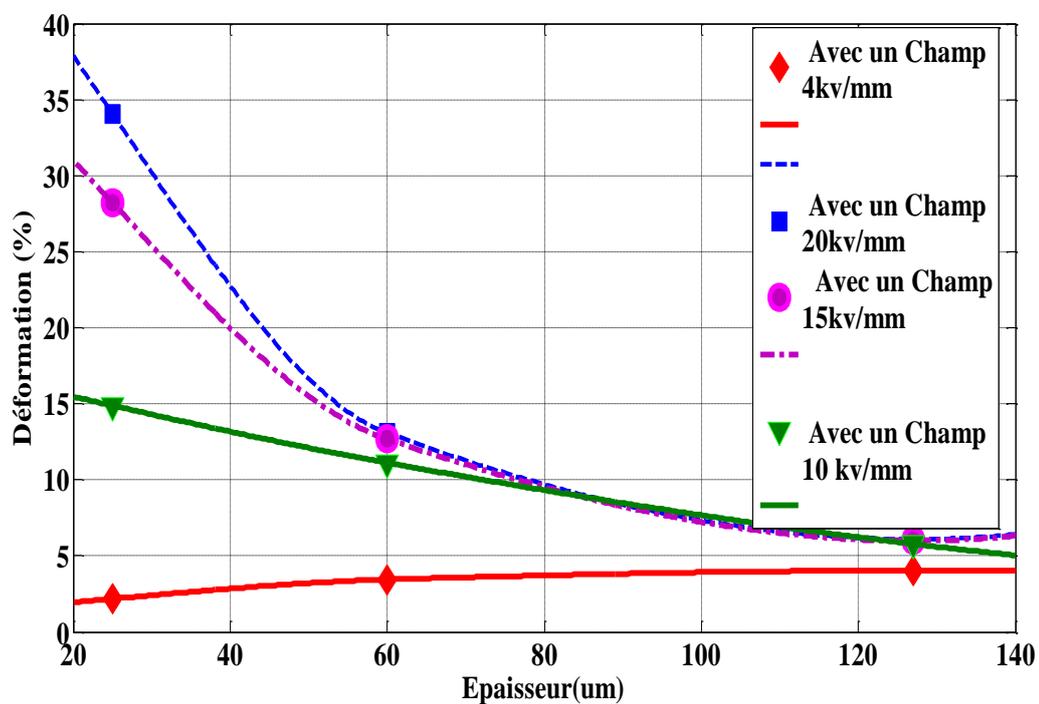


Figure III.11: Variation de la déformation avec l'épaisseur des films de polymères Pu 1%C à 100MHz et pour deux amplitudes de champ électrique

III.4 Mesure et Analyse du module élastique

Au cours de cette partie une étude des propriétés mécaniques des polymères a été réalisée, afin de mieux comprendre le comportement hyper élastique des polymères. Le module d'Young est une constante élastique intrinsèque au matériau, plus cette constante est faible plus le composé est flexible. L'étude des propriétés mécaniques des polymères se révèle complexe en raison de la diversité des comportements observés en fonction de la température, de la déformation ou de la fréquence de sollicitation. Notre intérêt se porte essentiellement sur

la déformation. La démarche proposée consiste à mesurer le module d'Young (annexe 2) pour les différents nano composites étudiés. Le module d'Young suit une loi linéaire en fonction de la déformation et de la contrainte. Cependant, quand l'élongation devient plus élevée, la courbe de déformation dérive de cette tendance linéaire et un cycle d'hystérésis significatif apparaît traduisant l'existence de pertes mécaniques. On peut en effet visualiser sur la figure III.12, une hystérésis plus large pour une amplitude du champ électrique imposée plus importante.

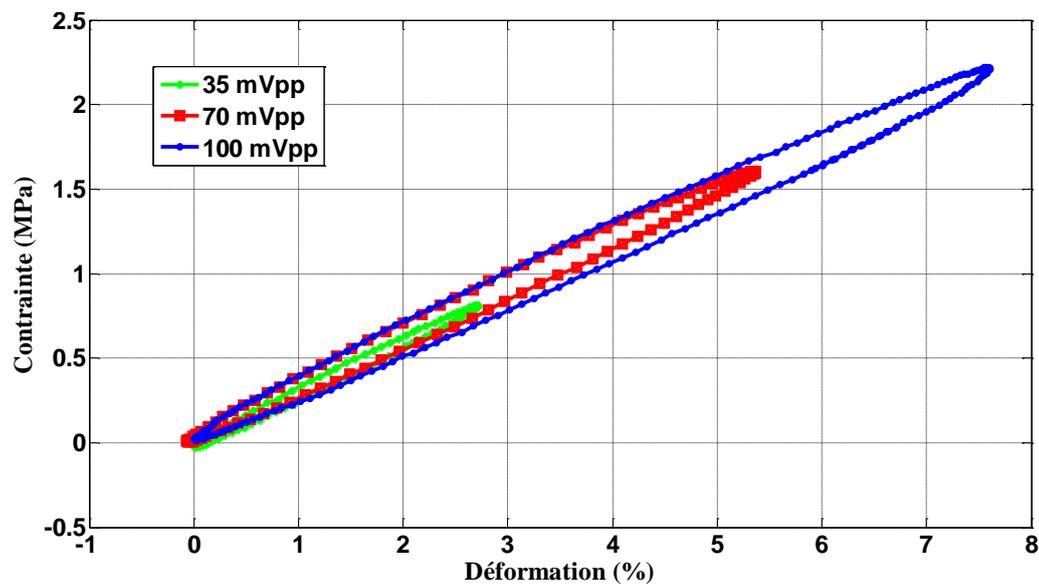


Figure III.12 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes précontraintes pour film Pu1%C à 1Hz.

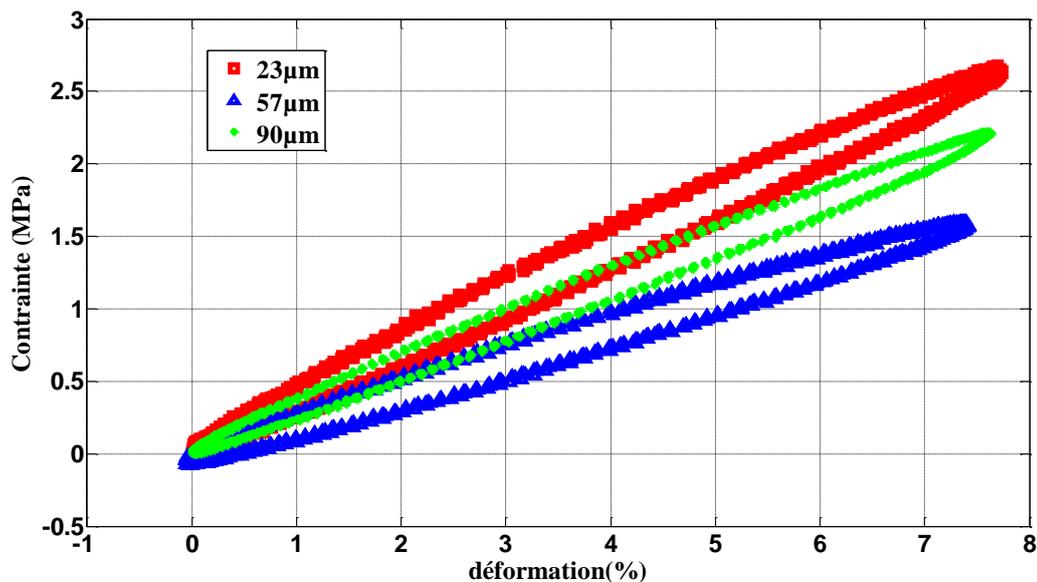


Figure III.13 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes épaisseurs pour film Pu1%C à 1Hz

La figure III.14 présente les courbes contraintes en fonction de la déformation d'un film pur de PU Pu1%C à 57 μm pour les différentes valeurs de la fréquence. Ces résultats montrent clairement que le module de Young du matériau (donné par la pente des courbes) décroît avec l'augmentation de la fréquence. Cette augmentation est d'autant plus importante que la fréquence est importante.

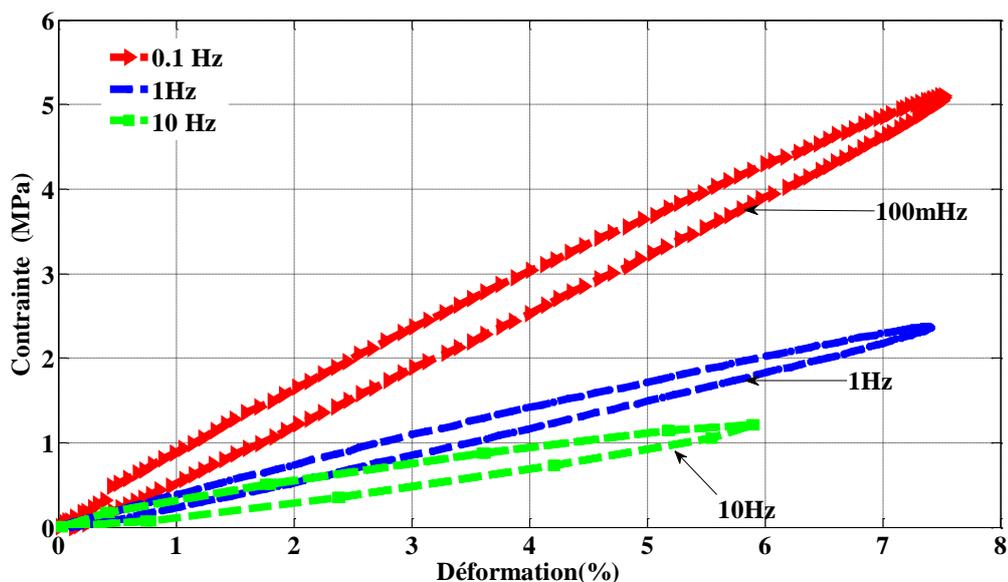


Figure III.14 : Courbes des contraintes en fonction de la déformation pour les différentes fréquences pour un film de Pu1%C à 57 μm

La figure III.15 montre clairement que, la zone du cycle d'hystérésis est restée quasiment inchangée avec le changement de fréquence, par conséquent, lorsque nous augmentons la fréquence, la pente de la courbe augmente ce qui signifie l'augmentation de l'amplitude du module de Young. Pour les fréquences inférieures à 20Hz, il est intéressant de noter que les pertes mécaniques dans le polymère sont faibles.

Il est à noter que pour de faibles amplitudes de déformation, la boucle d'hystérésis est très faible, c'est à dire, on peut négliger les pertes mécaniques Figure III.16. D'autre part, pour des amplitudes de déformation élevées, ou bien pour les films épais Figure III.17 le cycle devient plus large, ce qui signifie que la dissipation d'énergie mécanique est importante. La modification de la fréquence affecte seulement l'amplitude des paramètres mécaniques (Y) et conserve l'énergie mécanique générée par le polymère. Donc, à partir de cet essai, on peut voir clairement la dépendance des pertes mécaniques de la variation de l'amplitude de déformation et de la fréquence, afin que nous puissions minimiser l'énergie mécanique dissipée dans les polymères électroactifs.

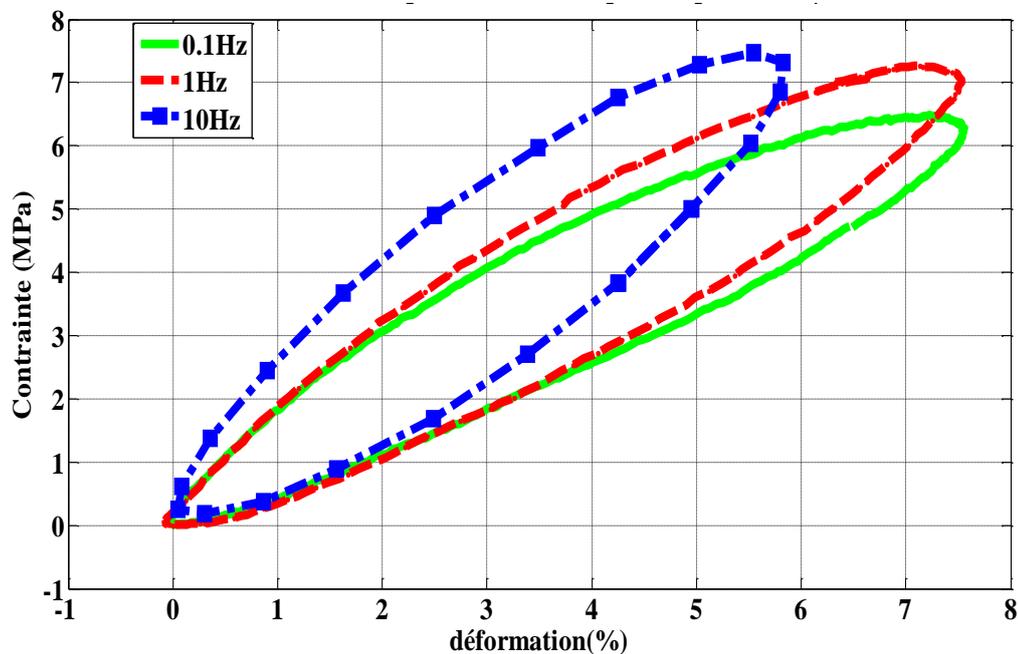


Figure III.15: Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes fréquences film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C.a 57µm

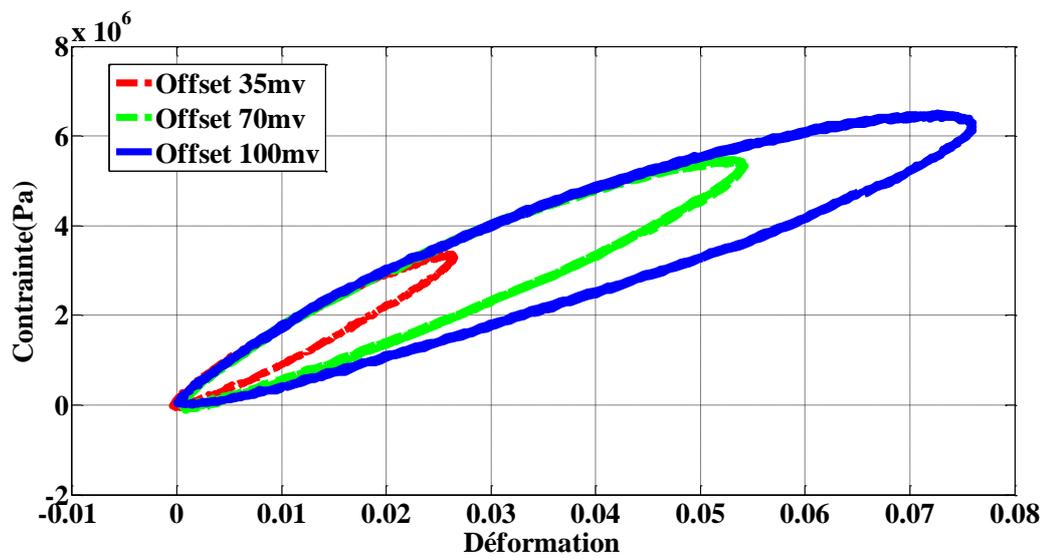


Figure III.16 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes amplitudes de précontrainte film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. a $57\mu\text{m}$ a 1Hz

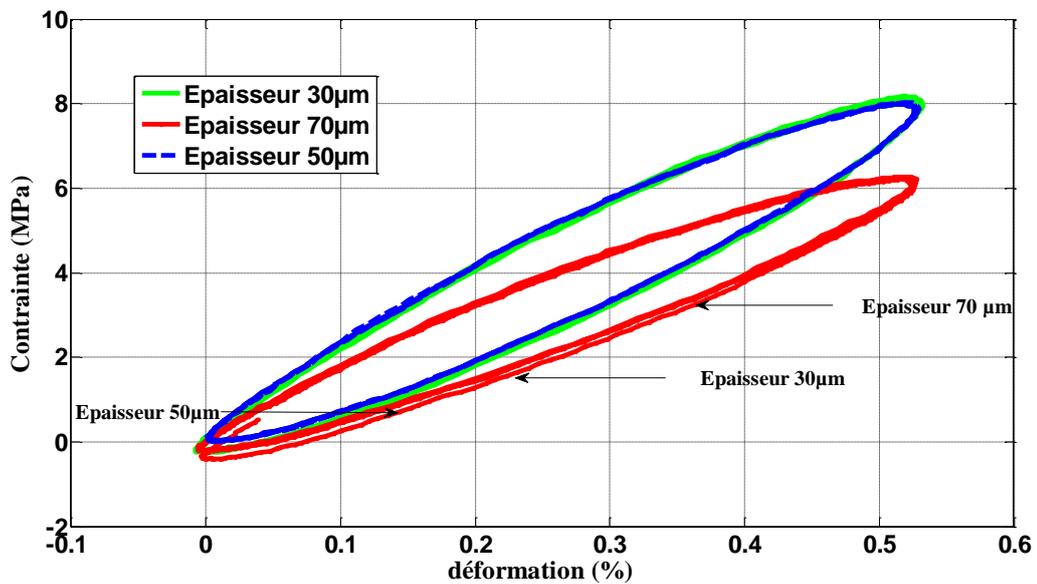


Figure III.17 : Courbes contraintes en fonction de la déformation pour les différentes épaisseur film de P(VDF-TrFE-CFE) 1%C. a 1Hz

III.5 Réalisation d'une application contrôle de raideur avec l'utilisation polymère EAP

La connaissance du comportement mécanique des surfaces des polymères est d'un grand intérêt pour de nombreux secteurs industriels d'applications, en particulier lorsque les surfaces sont soumises à des phénomènes d'abrasion. La raideur adaptative est un axe très intéressant à ouvrir comme thème de recherches, telles que la suspension du véhicule ou les membranes pour haut-parleur acoustique. Le champ d'application existe largement, si la rigidité du matériau peut être facilement modifiée. Il y a un effort croissant [76]- [77] afin de déterminer le comportement constitutif des surfaces des matériaux. En général, il y a seulement deux façons de changer la rigidité, un changement total du matériau ou un changement de la structure. La diversité des matériaux polymères et leur aptitude à la mise en œuvre par des procédés économiques et productifs peuvent être avantageusement mis à profit pour la réalisation d'actionneurs en exploitant de multiples propriétés. Les structures de type unimorphe sont utilisées pour différentes applications dans de nombreux domaines à forte croissance, comme le développement de micro-drones à ailes battantes, par exemple le projet COM-BAT, ce projet qui est en cours à l'université de Michigan en partenariat avec les universités de Californie, Berkeley, et du Nouveau Mexique, USA, à des fins purement militaires. L'objectif est un robot de 15 cm d'envergure, équipé de petites caméras, microphones et détecteurs de radiations nucléaires et de gaz empoisonnant (figure III.18). La structure unimorphe trouve aussi des applications pour la réalisation de micromanipulateur. Comparé à la technologie piézoélectrique, le cycle d'hystérésis est faible donc le système est plus facile à contrôler.



Figure III.18: Prototype de micro-drone COM-BAT [78]

En effet contrairement au système électromagnétique où de grandes précisions sont nécessaires à la réalisation de ceux-ci (entrefer mini, alignement), les polymères apportent une grande simplicité de fabrication. En comparaison avec la plupart des matériaux électro-actifs, tels que les céramiques piézoélectrique ou magnétostrictive, les polymères sont relativement souples. Par exemple les polymères utilisés dans cette thèse ont un module de Young de 20 MPa et peuvent se déformer de 20%, dans le cas d'une matrice de silicium. Une souche extra-large de 380% a été obtenue [79]- [80]. Tandis qu'une céramique peut produire une déformation de seulement 0.1% et a un module de Young de 65GPa. Ces caractéristiques grandes déformations et souplesse, ouvrent la voie à de nouveaux systèmes d'actionnement. Un des défis principaux de la technologie d'EAP est qu'il est en grande partie pas encore traité, puisqu'ils se composent de matériaux non linéaires qui doivent être caractérisés et être modélisés pour être employés avec le mouvement prévisible et qu'on peut répéter de la manière prescrite pour un dispositif de contrôle [81].

Une méthode innovante est proposée de modifier la rigidité de la matière d'une structure de type unimorphe à l'aide des polymères électrostrictifs. Dans le présent document, la théorie est détaillée, puis, les résultats de la simulation sont comparés avec ceux obtenus expérimentalement.

III.5.1 Model analytique

Le but du paragraphe est de développer un modèle simple de structure à base de polymères électrostrictifs afin d'avoir un outil pour le contrôle de raideur et pour analyser les données afin de les utiliser dans le prochain chapitre.

Aussi, pour un matériau purement électrostrictif, seuls les termes de puissances paires sont pris en compte. En négligeant les termes d'ordre élevés, la relation de la contrainte dans une direction τ s'écrit, ainsi :

$$\tau = cS + \alpha P^2 \quad (\text{III.1})$$

Avec c et S sont le coefficient mécanique et la déformation. On considère que l'élasticité et la déformation suivant la direction 1. α et P sont le coefficient électrique et la polarisation. Il existe un coefficient électrique et une polarisation créée par induction électrique. L'échantillon électrostrictif soumis à une précontrainte induit une force. Cette dernière $\Delta\tau$ est représentée par un terme négative, additionné au contrainte initial τ_0 ,

$$\tau_0 + \Delta\tau = cS_0 + \alpha P^2 \quad (\text{III.2})$$

Avec S_0 correspond à la déformation initiale. Multiplions cette équation avec la surface A , on obtient la force et la raideur à partir de la relation suivante (III.3)

$$K=cA/L \quad (III.3)$$

Donc de l'équation (III.2),

$$F_0+\Delta F=Ku_0+\alpha AP^2 \quad (III.4)$$

Avec L la longueur du l'échantillon initial et u la déformation initiale

La raideur est obtenue à partir de l'expression suivante:

$$K=-F/u \quad (III.5)$$

Donc l'équation (III.4) devienne :

$$-K_0-\Delta K=K+\alpha AP^2/u_0 \quad (III.6)$$

Par ailleurs, la force pure de pré-déformation est obtenue pour:

$$\tau_0=cS_0=0 \quad (III.7)$$

Donc ,

$$\Delta\tau=cS_{ele}=\alpha P^2=0 \quad (III.8)$$

L'équation (III.6) peut être écrite comme suit :

$$-K_0-\Delta K=K(1+u_{ele}/u_0) \quad (III.9)$$

Ainsi:

$$K=-(K_0+\Delta K)/(1+S_{ele}/S_0) \quad (III.10)$$

Dans l'équation, (III.10), on voit clairement que la raideur de K de l'échantillon peut être facilement variée avec la variation de S_{ele} .

III.5.2 Force de précontrainte et la force due à l'excitation électrique

À partir de l'équation constitutive, la déformation dans une direction S_1 écrite sous la forme:

$$S_1 = s \tau_1 - \alpha_{31} Q P_3 \quad (III.11)$$

Avec s représente la compliance élastique et Q la charge électrique, τ_1 correspond à la déformation suivant la direction 1 sans variation d'excitation électrique et P_3 la variation de la polarisation suivant l'axe 3 sans la variation de l'excitation mécanique. Le coefficient α_{31}

traduit l'effet entre les deux directions 1 et 3. d'où la force suivant la direction 1 peut être calculée par la relation suivante:

$$F_1 = A\tau_1 = A(S_1 - \alpha_{31}QP_3) / s \quad (\text{III.12})$$

Avec

A représente la surface de la section transversale lorsque les deux côtés de l'échantillon sont fixés, et prolongés légèrement, la pré-déformation se produit. Lorsque le champ électrique sinusoïdal est appliqué à l'échantillon suivant la direction 3, la déformation à la compression se produit suivant la direction 1. Dans ce cas le coefficient électrique du polymère est négatif.

Tenant compte de la condition de fixation comme mentionné ci-dessus, la variation de la déformation et une force supplémentaire négative $F_{\text{électrique}}$ apparaît. On peut écrire l'équation suivante :

$$F_{\text{total}} = F_{\text{mécanique}}(\text{pre-strain}) + F_{\text{électrique}}. \quad (\text{III.13})$$

III.5.3 saturation de polarisation

Sous l'effet d'un faible champ la variation de la polarisation par rapport à ce champ électrique est linéaire, $P = \epsilon E$, cette variation devient, non linéaire, lorsque E est élevé dans un matériau polymère, [82]- [83].figure (III.19)

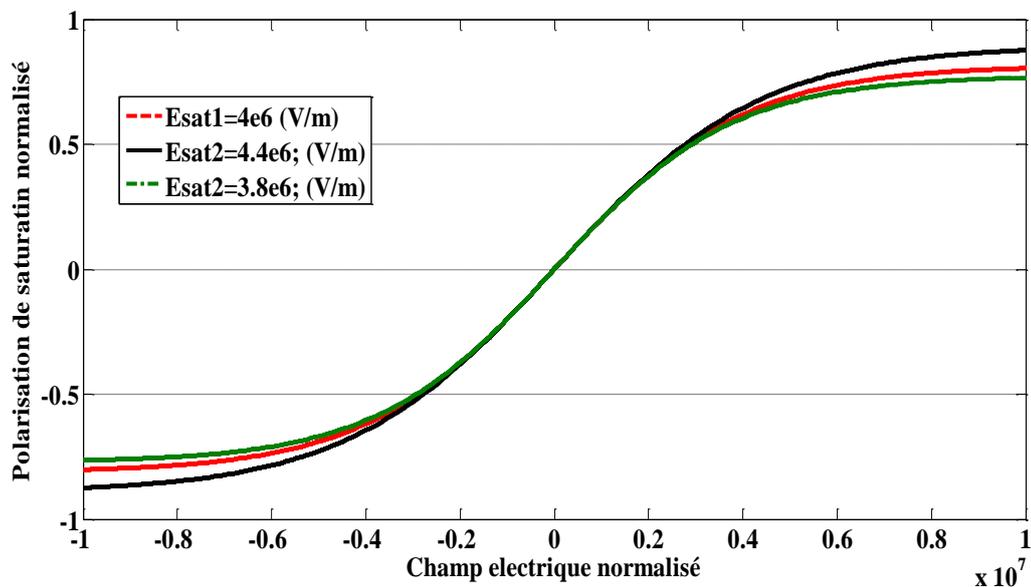


Figure III.19: La saturation de polarisation pour matériau polymère électrostrictif

Cette non-linéarité apparaît également dans la relation de $S(E)$. Nous considérons ici que la saturation de déformation de matériau polymère est due à la saturation électrique. De nombreuses approches peuvent exister, nous proposons l'équation suivante qui tient compte de la saturation de la polarisation,

$$P = \epsilon E_{\text{sat}} \tanh(E/E_{\text{sat}}) + 2\alpha \epsilon S P \quad (\text{III.14})$$

Avec ϵ et E_{sat} correspondent respectivement à la permittivité relative de l'échantillon et le champ de saturation

Le second terme est linéaire par rapport à P mais assez faible par rapport à E :

$$P = \epsilon E_{\text{sat}} \tanh((E + 2\alpha \epsilon S P)/E_{\text{sat}}) \quad (\text{III.15})$$

La déformation induite par l'excitation électrique peut être donnée par la relation suivante:

$$S_{\text{ele}} = Q P^2 = Q \times (\epsilon E_{\text{sat}} \tanh((E + 2\alpha \epsilon S P)/E_{\text{sat}}))^2 \quad (\text{III.16})$$

III.5.4 Dispositif expérimentale

Un échantillon de polyuréthane élastomère (PU), est préparé par la méthode traitée dans le chapitre précédent. Les échantillons ont été coupés en deux types de dimensions. Le premier ayant une forme de disque avec un diamètre de 20 mm pour la mesure de la déformation. L'autre est un $40 \times 16 \times 16 \text{ mm}^3$ pour la mesure de la force électrique créée avec précontrainte. Des électrodes ont été pulvérisées sur les deux côtés des deux formes de l'échantillon dont l'épaisseur est de l'ordre de quelques nm. Pour obtenir la relation entre déformation et champ électrique pratiquement, on augmente linéairement le champ électrique à appliquer jusqu'à 30 MV / m. Les échantillons ont été mis horizontalement entre un disque en acier et en laiton afin d'éviter un mouvement de flexion (figure III.20):

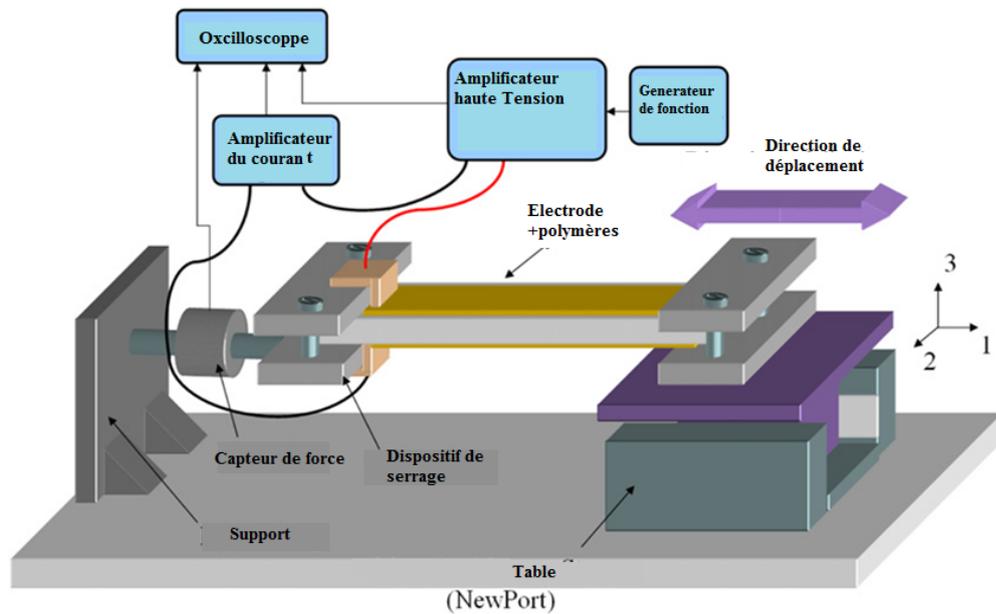


Figure III.20: Principe de fonctionnement

Le champ électrique induit par la déformation a été mesuré avec précision avec un interféromètre faisceau laser (Agilent 10889B) avec une précision de l'ordre de 5 nm. Le courant a été mesuré en utilisant un amplificateur haut sensibilité actuelle.

Le dispositif expérimental construit au laboratoire LGEF est représenté par la figure III.21, La détermination de la constante diélectrique, le module de Young et les coefficients de films polymères électrostrictifs à électrodes sont déterminés comme mentionné dans les parties précédentes.

Utilisation la même configuration, la pré-déformation dans une direction a été appliquée. La force a été obtenue à l'aide d'un moteur linéaire XFTC300 et un capteur spécialisée pour la détection de force miniature de la Compagnie de FGP, sa précision est de l'ordre de 0,05 N.

Un champ électrique sinusoïdal de 1 Hz, $E = E_{dc} + E_{amp} \cos(\omega t)$, a été appliquée avec plus ou moins une polarisation continue E_{dc} . Ici, ω la polarisation continue correspond à la pulsation de l'excitation électrique et t est le temps.

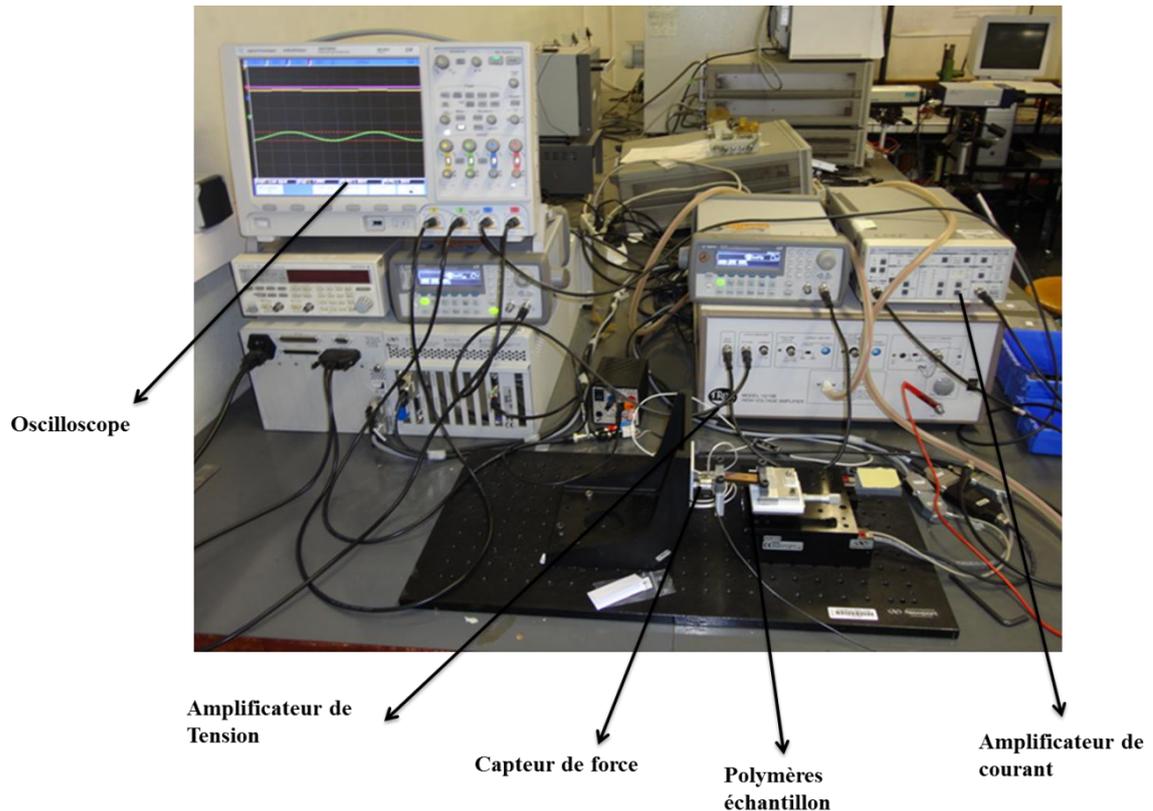


Figure III.21: Dispositif expérimental

III.6 Résultats et discussion

III.6.1 Variation de la précontrainte

L'échantillon du polymère a été étiré dans diverses valeurs de précontrainte qui a créé une préforce variant de 0,24, 0,41, 0,57 et 0,74 N. Le champ électrique sinusoïdal a été induit avec $5 \text{ V} / \mu\text{m}$ comme valeur de E_{dc} et $2,5 \text{ V} / \mu\text{m}$ comme valeur de E_{amp} . Figure III.22 (a) montre la variation de la force totale. Lorsque le champ électrique augmente, la force diminue, et quand le champ diminue, la force augmente. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure III.22 (b).

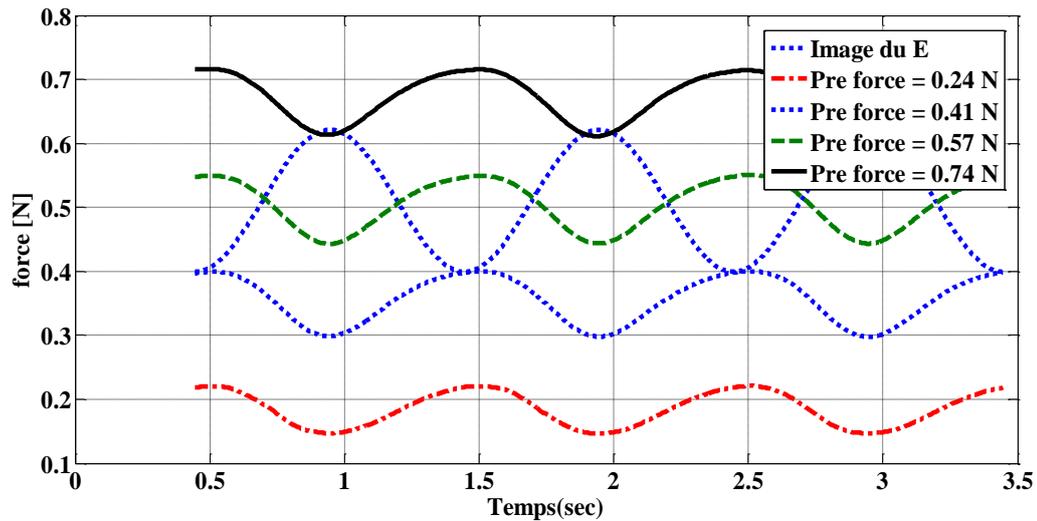


Figure III.22.a: Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un faible champ DC (experimental)

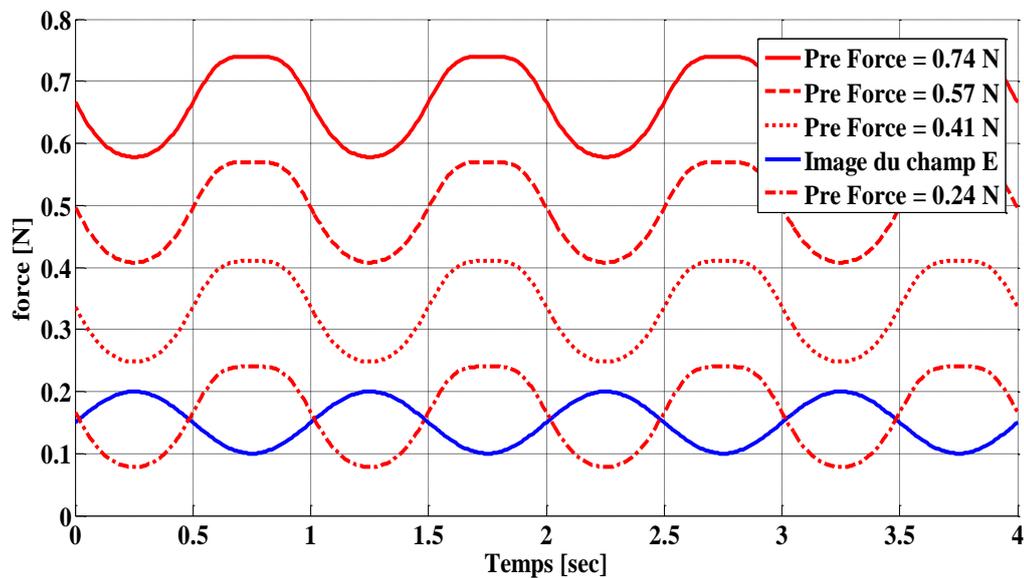


Figure III.22.b: Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un faible champ DC (simulation)

Les saturations lors des pics supérieurs semblent un peu plus claires avec plus de pré-déformation. Les pics de saturations inférieures ont la tendance inverse. La figure III.23 montre bien cette tendance. Avec l'application d'un champ important, $E_{dc} = 3.25 \text{ V}/\mu\text{m}$ and $E_{amp} = 3.25 \text{ V}/\mu\text{m}$

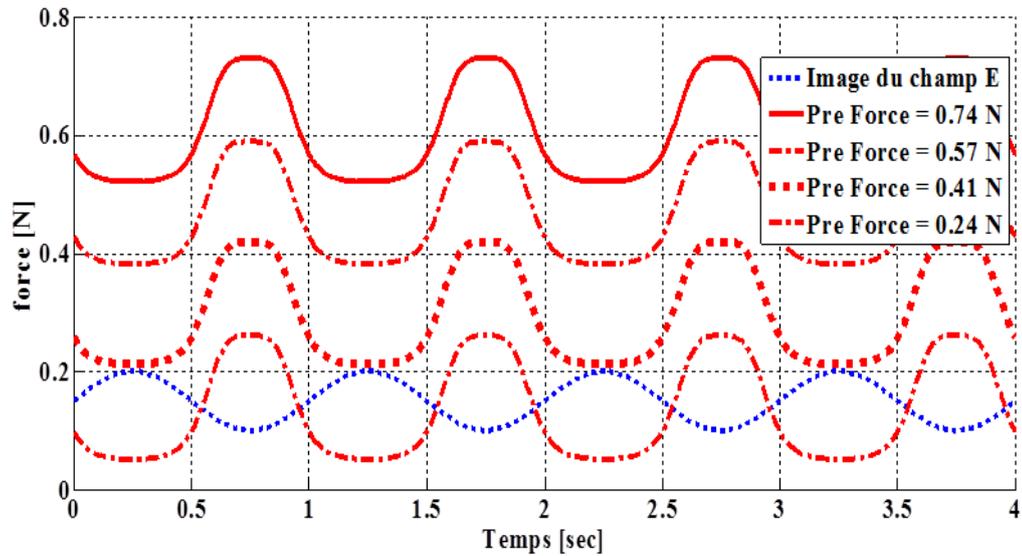


Figure III.23.a: Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un fort champ DC (simulation)

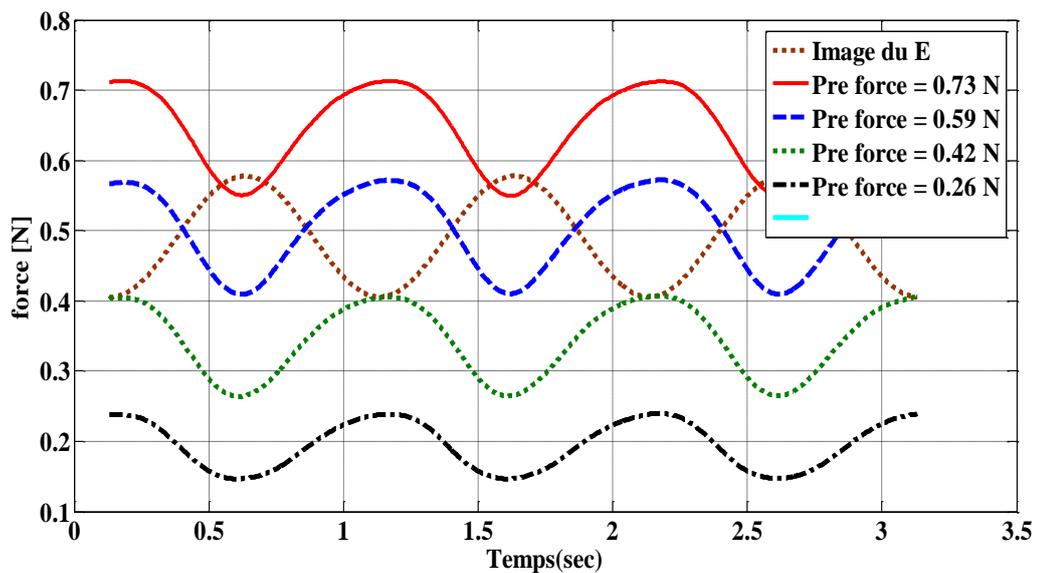


Figure III.23.b: Variation de la force de précontrainte avec l'application d'un fort champ DC (expérimentale)

La condition $E_{dc} = 3,25 \text{ V} / \mu\text{m}$ avec $E_{amp} = 3,25 \text{ V} / \mu\text{m}$ représenté par un trait fin continu sur la figure III.23 donne l'évolution de la modification de la rigidité de 24%.

III.6.2 Variation du champ électrique E_{dc}

Dans cette partie le film a été étiré avec $F = 0,74$ N, puis, l'amplitude du champ électrique a été fixée à $5,27$ V / μm et on fait varier partiellement la composante DC. La figure III.24(a) montre les résultats expérimentaux avec les valeurs suivantes de $E_{dc} = -25$ V / μm et -10 V / μm , 0 , 20 , et 25 V / μm . Figure III.24. (b) montre les résultats de simulation. Lorsque le champ électrique augmente, la force diminue, et vice versa. Dans ce cas, le champ électrique représenté en trait gras (Fig,24,a) est négatif avec $E_{DC} = -25$ V / μm . La force a une tendance opposée à la figure 5 (a). Les traits en pointillés représentent le résultat pour $E_{dc} = 0$ V / μm . On remarque clairement que la fréquence a doublé.

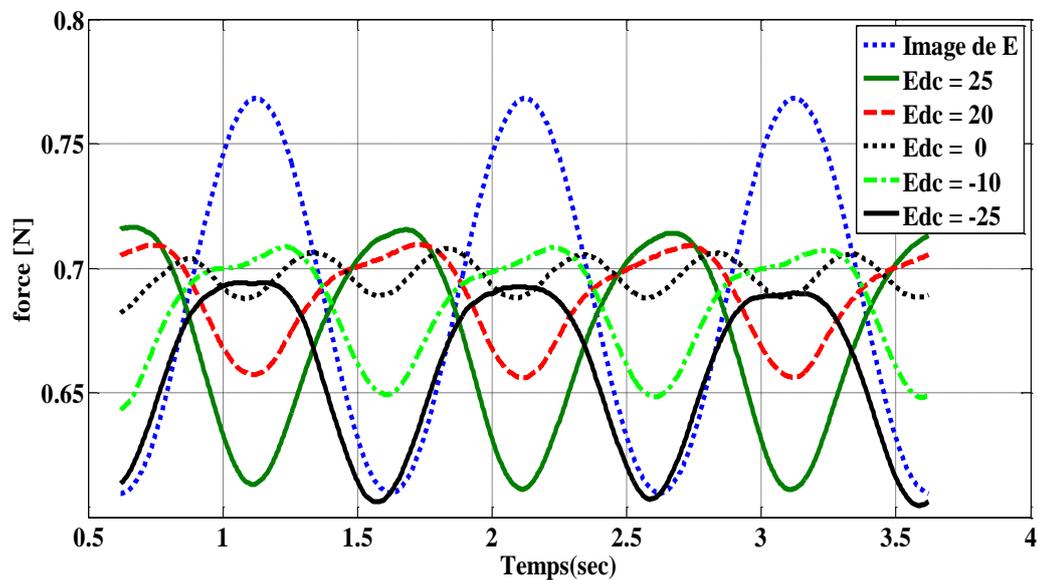


Figure III.24.a: Variation du champ DC (expérimentale)

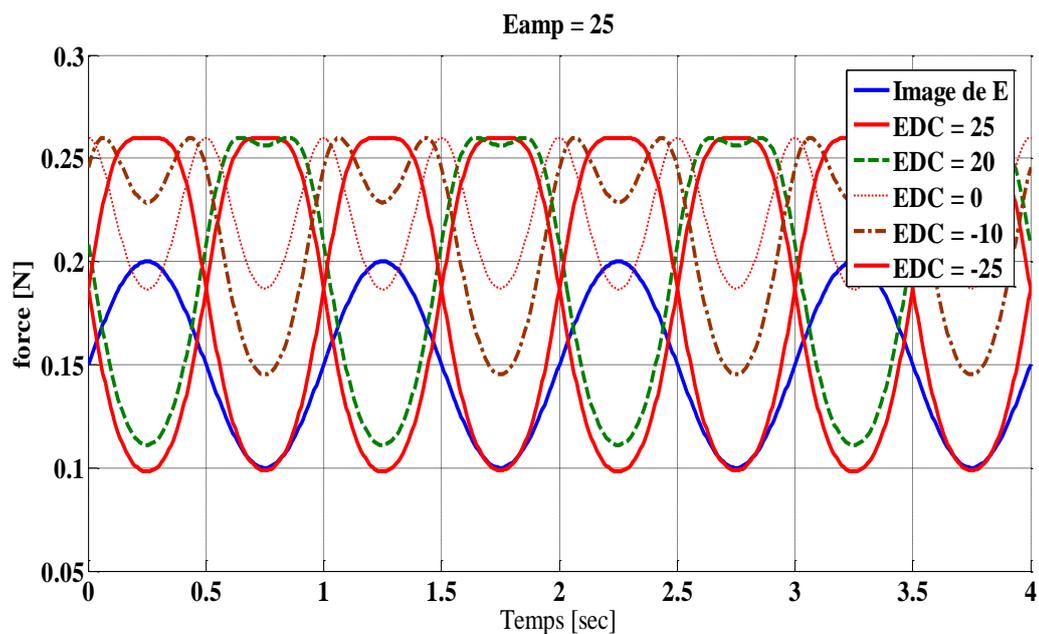


Figure III.24.b: Variation du champ DC (simulation)

III.6.3 Variation de l'amplitude du champ électrique E avec $E_{dc} = 0$

Le film a été étiré avec $F = 0,74$ N, et l'amplitude du champ électrique E variait de 13 à 36 V / μm avec, $E_{DC} = 0$ V / μm . La Figure III.25. (a) montre les résultats expérimentaux et (b) montre les résultats de simulation. On remarque bien que les pics inférieurs augmentent avec l'amplitude du champ électrique.

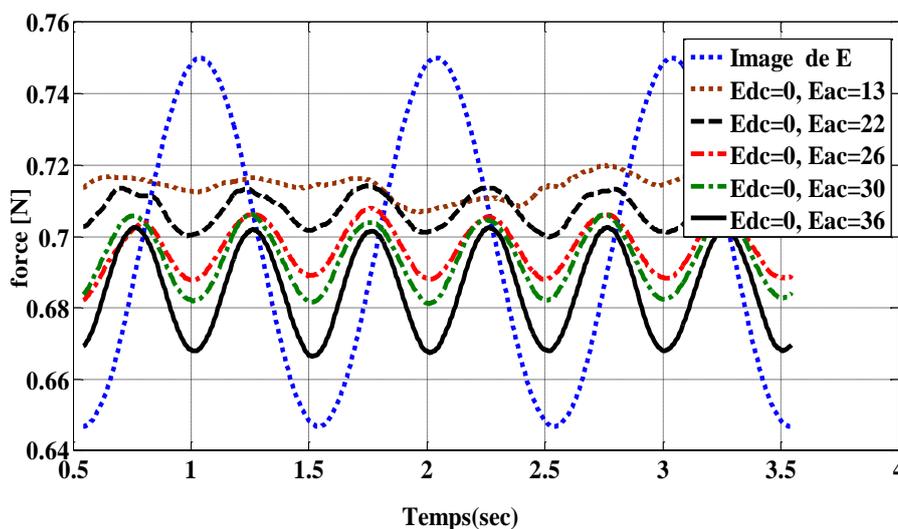


Figure III.25.a : Variation de l'amplitude du champ avec un champ DC=0 (expérimentale)

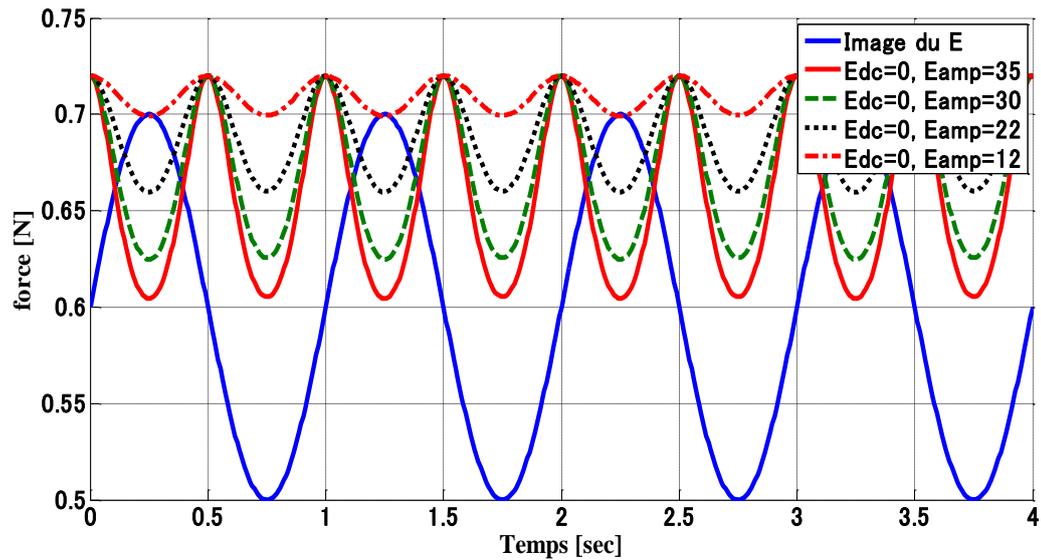


Figure III.25.b : Variation de l'amplitude du champ avec un champ DC=0 (simulation)

III.7 conclusion de cette expérience

Dans cette partie on a présenté une méthode simple classique pour modifier la raideur de matériau. Avec l'application de pré-étirement d'un polymère EAP, élastomère diélectrique, et une induction de champ électrique modéré est suffisante pour changer sa raideur. Avec l'utilisation d'une simple équation de raideur dans la fonction du rapport des déformations créées par le pré-étirage et l'excitation électrique. Une bonne corrélation existe entre le modèle théorique de simulation et l'expérience, En conséquence, pour le champ électrique $<6,5 \text{ V} / \mu\text{m}$ a donné 24% de variation de la raideur. Nous avons vu aussi que la composante du champ DC joue un rôle important. Quand il n'y a pas la composante DC $E_{dc}=0$, la rigidité varie avec une fréquence double par rapport au champ électrique.

CHAPITRE IV :

RECUPERATION DE L'ENERGIE PAR LES POLYMERES ELECTROSTRICTIVES

Récupération de l'énergie par polymères électrostrictives

Ce chapitre, concernera la modélisation et la réalisation expérimentale des prototypes pour la récupération d'énergie du mouvement vibratoire utilisant les polymères électrostrictives. La récupération énergétique dépend étroitement du comportement mécanique du dispositif ainsi que du coefficient de couplage électromécanique du polymère. Nous commencerons dans ce chapitre par un modèle analytique qui consiste à caractériser les propriétés relatives à la récupération d'énergie vibratoire en utilisant l'analyse spectrale FFT. Nous démontrons les points forts des polymères électrostrictives dans le domaine de la récupération d'énergie. Les modèles développés sont confrontés aux mesures expérimentales.

IV.1 Introduction

L'énergie a toujours été omniprésente dans la vie de l'homme et indispensable à sa survie. Elle met en mouvement chaque chose tout comme elle met en mouvement la société. Elle est le moteur de l'humanité. L'énergie électrique représente actuellement 12% de la totalité de l'énergie traitée par les hommes sur la terre. Cette proportion va encore croître considérablement au cours des prochaines années (34% prévus en 2025) dans un contexte de diminution des ressources combustibles fossiles, d'une plus grande utilisation des énergies renouvelables et d'un plus grand respect de l'environnement. Les sources d'énergie n'étant pas intarissables, toutes ces pertes risquent de mener l'humanité à sa propre perte. C'est pourquoi il faut dès à présent trouver des solutions pour réduire ou mieux, récupérer ces pertes. Il faudra également se poser la question de l'efficacité de ces méthodes de récupération.

L'énergie, que nous dépensons aujourd'hui sans compter sera demain un problème de société majeur. En effet, les ressources fossiles telles que le pétrole, le gaz et le charbon, sont actuellement massivement utilisées. Or ce sont des énergies non renouvelables, elles se sont formées pendant des millions d'années, et elles sont en train de s'épuiser [84].

Cependant, la quantité d'énergie extraite reste généralement faible avec les techniques classiques développées jusqu'à présent, notamment dans le cas de structures peu couplées et/ou vibrant hors résonance. Notons qu'il existe aussi des structures, basées sur une conversion électromécanique ou électrochimique, sont prometteuses mais répondent à un cahier des charges différent du nôtre et ciblent essentiellement des applications pour la génération d'énergie électrique. Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme.

Comme nous l'avons vu, les principales sources d'énergies actuelles ne sont pas renouvelables. Il s'agit des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel...) ou nucléaires (uranium, plutonium) qui sont issus de gisements qui finiront par se tarir à plus ou moins longue échéance. Quelles sont les alternatives existantes en matière d'énergies renouvelables à l'heure actuelle ? A quels problèmes sont confrontées leur mise en place et leur expansion. L'un des défis du développement par exemple des systèmes pratiques est de rendre l'énergie des ondes à la fois peu coûteux et durable. Les systèmes d'alimentation actuelle utilisent un système qui convertit le mouvement linéaire des ondes en un mouvement rotatif d'un générateur électromagnétique. Ces systèmes, qui comprennent souvent des transmissions hydrauliques et des turbines rotatifs, sont relativement coûteux et nécessitent un

entretien. Il est très important d'élaborer le rapport coût-efficacité. Les systèmes de prise de force pour vague d'énergie ont été reconnus par la communauté de recherche comme un facteur clé dans la réalisation de l'utilisation pratique de l'énergie des vagues pour l'alimentation électrique [85]. Le Polymère électro-actif ou muscle artificiel (EPAM), également connu en tant que diélectrique élastomère dans la littérature, est en cours d'être développé pour une grande variété d'applications comme actionneur [86]. Les EPAM ont plusieurs caractéristiques qui les rendent potentiellement bien adaptés pour les systèmes d'ondes de puissance tel que:

Une haute densité d'énergie avec de matériaux EPAM

- Faible coût de la matière.
- Haute efficacité de conversion d'énergie indépendante de la vitesse de déformation (fréquence de fonctionnement).
- Matériaux non-toxiques et non sensibles à la corrosion sensibles

Selon les estimations, une ligne de générateurs de 1 km de longueur de polymère électroactive au bord de la mer pourrait facilement produire 2 MW d'électricité. Il est facile d'imaginer que cette quantité d'énergie pourrait être une source importante d'alimentation [87]. La profondeur nominale de l'eau est estimée à 5 m. Des essais de production d'électricité par vagues de l'océan ont été faits permettant de déterminer la capacité de survie de l'EPAM dans l'environnement du milieu marin.

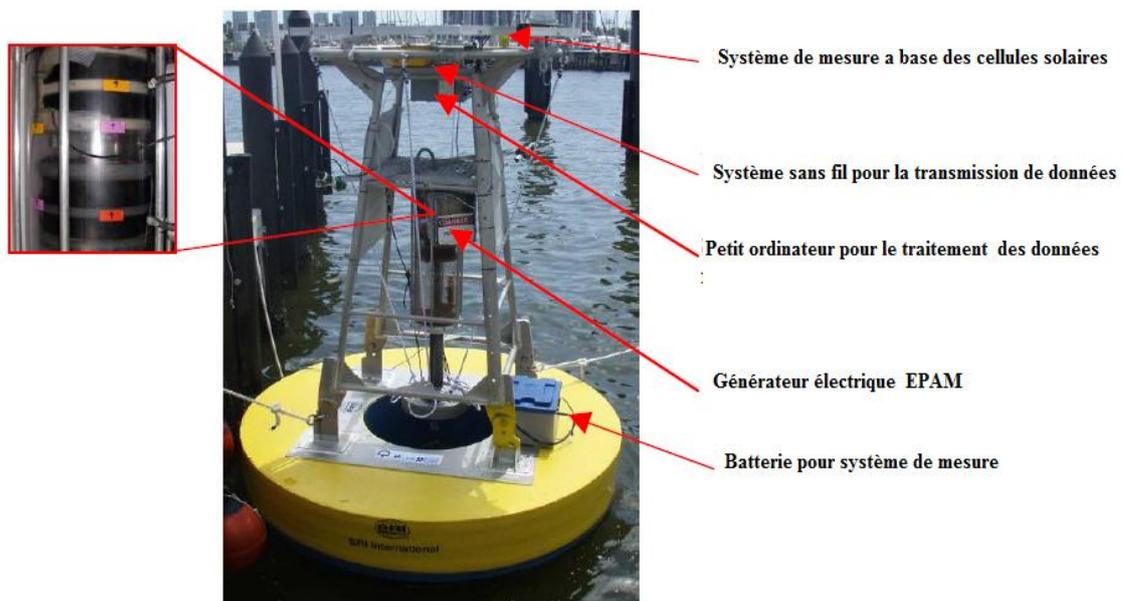


Figure IV.1: Système de générateur EPAM sur la bouée [87].

Cependant, si l'on est attentif aux récentes réalisations, on peut observer une amélioration sensible des performances des dispositifs de la récupération d'énergie. Les progrès de la technologie a mené à la mise au point de circuits électroniques et de capteurs avec la consommation d'électricité extrêmement faible. Les principaux moteurs de ce développement sont la forte croissance des applications portables (téléphones, microordinateurs...), la demande en moyens de transport non polluants et, enfin, les besoins des réseaux de distribution d'énergie [88].

L'idée de base dans cette partie est d'utiliser l'énergie électrique convertie à base de polymères électrostrictives afin de réaliser des micro-générateurs de très faible puissance, c'est-à-dire de quelques μW à quelques centaines de mW. Ces micro-générateurs répondent à un besoin croissant lié à la prolifération des capteurs, micro-actionneurs et autres dispositifs électroniques embarqués. Le but principal est d'évaluer les propriétés des polymères électrostrictifs pour la récupération d'énergie. Les tendances récentes dans la recherche de conversion électromécanique ont démontré les avantages de l'utilisation de ces polymères. Ces micro-générateurs peuvent être constitués d'un système mécanique présentant une fréquence de résonance qui couple le micro-générateur aux vibrations ambiantes, ou bien les éléments électrostrictifs peuvent être directement sollicités. À l'heure actuelle, les travaux scientifiques menés dans ce sens commencent à montrer leur potentiel. La première partie de ce chapitre se concentre sur les effets d'un composite de polymère électrostrictifs (EPC) soumis à différents champs électriques dans le but de comprendre les variations de la réponse du système et d'augmenter la puissance récupérée. Afin d'atteindre cet objectif, de nombreuses études sur le matériau lui-même ont été consacrées à l'augmentation de la récupération d'énergie [89].

Le fonctionnement des polymères électrostrictifs est similaire à un actionneur élastomère diélectrique qu'on peut représenter par un condensateur à armatures planes parallèles. La contrainte et la réponse en déformation induite de ces polymères est généralement proportionnelle au carré du champ électrique appliqué comme l'indique la figure IV.2.

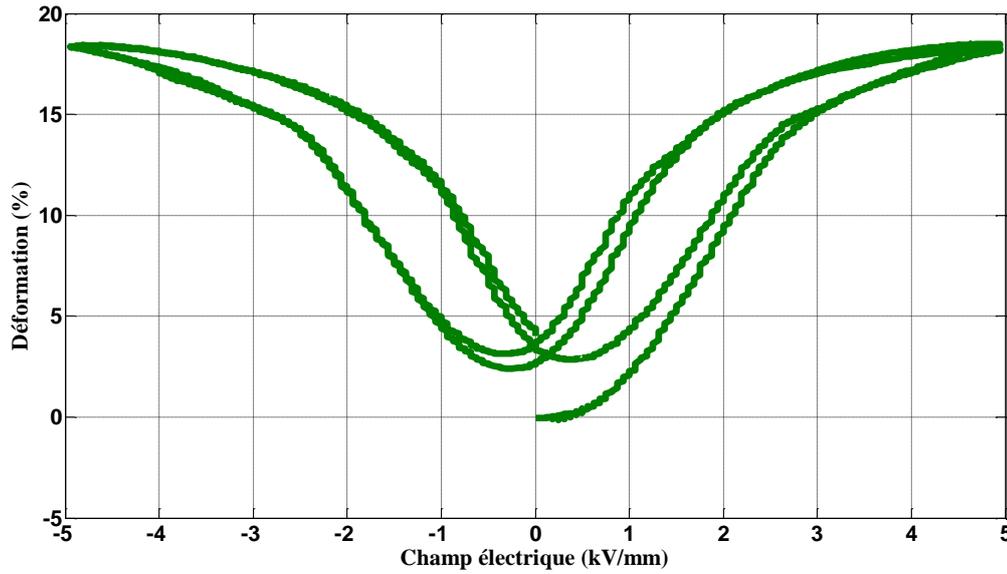


Figure IV.2 : Déformation expérimentale en fonction du champ électrique pour le matériel électrostrictif.

IV.2 Modélisation

Cette section vise à exposer un calcul théorique de la puissance de sortie maximale qui peut être obtenue à partir de matériaux électrostrictifs. Les formules de Devonshire et Kay permettent d'exprimer la fonction élastique de Gibbs G pour l'énergie libre du matériau comme suit [115]:

$$G = \frac{1}{2} \varepsilon_{mn}^T P_m P_n - \frac{1}{2} s_{ijkl} T_{ij} T_{kl} - Q_{ijmn} T_{ij} P_m P_n \dots \quad \text{IV.1}$$

ε_{mn}^T représente la permittivité diélectrique à contrainte constante, s_{ijkl} est le tenseur de souplesse à champ électrique constant, Q_{ijmn} est le coefficient d'électrostriction, $P_m, P_n \dots$ sont les composantes de la polarisation, T_{ij}, T_{kl} sont les tenseurs des contraintes de rang 2 (notation d'Einstein). Les indices $i, j, m=1,2,3$ correspondent aux axes orthogonaux.

Les équations (IV.2) et (IV.3) expriment respectivement la déformation S_{ij} et le champ électrique E_m

$$S_{ij} = -\left(\frac{\partial G}{\partial T_{ij}}\right) = s_{ijkl} T_{kl} + Q_{mij} P_m^2 \quad \text{IV.2}$$

$$E_m = -\left(\frac{\partial G}{\partial P_m}\right) = \beta_{mn} P_n - 2Q_{mij} P_m T_{ij} \quad \text{IV.3}$$

L'inverse de la susceptibilité diélectrique peut être calculé par la relation (IV.4)

$$\beta = \left[\frac{dE_m}{dP_n} \right] = \left[\frac{d^2 G}{P_m P_n} \right] \quad \text{IV.4}$$

Vu l'accouplement entre les propriétés diélectriques et élastiques des solides, l'électrostriction a une propriété de tenseur reliant la contrainte mécanique, à un champ électrique appliqué, ou à la polarisation,

Il faut prendre en compte les symétries du système pour réduire leur nombre ; les propriétés de symétrie vont jouer sur le nombre de coefficients non nuls. En négligeant les termes d'ordre élevé, les équations d'électrostriction peuvent être représentées par les équations suivantes.

$$\begin{cases} E_m = \varepsilon_{mn}^T P_n + 2Q_{klmn} T_{kl} P_n \\ S_{ij} = s_{ijkl}^P T_{kl} + Q_{ijkl} P_m P_n \end{cases} \quad \text{IV.5}$$

Ainsi la déformation et la polarisation sont représentées respectivement par les relations suivantes

$$\begin{cases} S_{ij} = M_{ijkl} E_k E_l + s_{ijkl}^E T_{kl} \\ P_i = \varepsilon_{ik}^T E_k + 2M_{ijkl} E_l T_{kl} \end{cases} \quad \text{IV.6}$$

A partir de ces équations on peut écrire l'équation suivante

$$\begin{cases} \tau_{ij} = Y_{ijkl}^P S_{kl} + \alpha_{ijmn} P_m P_n \\ P_n = \varepsilon_{mn}^S E_{sat} \operatorname{th}\left(\frac{E_m}{E_{sat}}\right) + 2\alpha_{klmn} \varepsilon_{mn}^S P_n S_{kl} \end{cases} \quad \text{IV.7}$$

S_{kl} est la compliance élastique, ε_{mn}^S est la constante diélectrique sous déformation constante, E est le champ électrique, E_{sat} est le champ de saturation, P_m est la polarisation, Y_{ijkl}^P est le module de Young sous polarisation constante, Q est le coefficient d'électrostriction, τ_{ij} est la contrainte mécanique et $\alpha_{ijmn} = Q_{ijkl} Y_{klmn}$

En tenant compte de la saturation de la polarisation de l'équation IV.5

$$\begin{cases} \tau_1 = Y_{11} \cdot S_1 + \alpha_{31} \cdot P_3^2 \\ P_3 = \epsilon_{33} \cdot E_{sat} \cdot th\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right) + 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot P_3 \cdot S_1 \end{cases} \quad \text{IV.8}$$

En supposant que la déformation et le champ électrique sont uniformes sur l'échantillon, on peut exprimer l'équation macroscopique du courant,

$$I = A \frac{\partial D}{\partial t} \quad \text{IV.9}$$

Avec A représenté la surface de l'électrode superposée à l'échantillon du polymère. A partir des équations précédentes on peut facilement déduire l'équation suivante :

$$\frac{\partial P_3}{\partial t} = \epsilon_{33} \cdot (1 - th^2\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right)) \cdot \frac{\partial E_3}{\partial t} + 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot P_3 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} + 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1 \cdot \frac{\partial P_3}{\partial t} \quad \text{IV.10}$$

$$\frac{\partial P_3}{\partial t} = \frac{\epsilon_{33} \cdot (1 - th^2\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right)) \cdot \frac{\partial E_3}{\partial t} + 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot P_3 \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t}}{1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1} \quad \text{IV.11}$$

Le courant induit par la vibration transversale peut être déduire ci-dessous:

$$I = A \cdot \frac{\partial P_3}{\partial t} = A \cdot \left[\frac{\epsilon_{33} \cdot (1 - th^2\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right)) \cdot \frac{\partial E_3}{\partial t}}{1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1} + \frac{2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33}^2 \cdot E_{sat} \cdot th\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right) \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t}}{(1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1)^2} \right] \quad \text{IV.12}$$

Le champ électrique total est égal à la somme du champ statique E_{dc} et du champ électrique alternatif E_{ac} , à travers la résistance R,

$$E_3 = E_{dc} + E_{ac} \quad \text{IV.13}$$

Le champ créé par la charge peut être donné par la relation :

$$E = -\frac{V}{e} = -\frac{R \cdot I}{e} \quad \text{IV.14}$$

Avec e est l'épaisseur de l'échantillon, l'expression IV.12 devient :

$$I = A \cdot \left[\frac{\epsilon_{33} \cdot (1 - th^2\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right)) \cdot \left(-\frac{R}{e} \cdot \frac{\partial I}{\partial t}\right)}{1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1} + \frac{2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33}^2 \cdot E_{sat} \cdot th\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right) \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t}}{(1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1)^2} \right] \quad \text{IV.15}$$

Dans cette partie, on propose d'appliquer une précontrainte S_1 et un champ électrique E_3 sinusoïdales, exprimés respectivement par les équations IV.15 et IV.16.

$$E_3 = E_{dc} + E_0 \cdot \sin(\omega.t) \quad \text{IV.16}$$

$$S_1 = S_0 + S_M \cdot \sin(\omega.t + \varphi) \quad \text{IV.17}$$

Avec $\omega = 2\pi.f$ la fréquence angulaire, S_M désigne l'amplitude de la précontrainte, φ est le décalage de phase entre le champ électrique et la déformation.

Le courant de court-circuit peut être calculé à partir de l'expression (IV.8). L'équation IV.14 se réduit alors ainsi,

$$I = A \cdot \frac{\partial P_3}{\partial t} = A \cdot \left[\frac{2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33}^2 \cdot E_{sat} \cdot th\left(\frac{E_3}{E_{sat}}\right)}{(1 - 2 \cdot \alpha_{31} \cdot \epsilon_{33} \cdot S_1)^2} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \right] \quad \text{IV.18}$$

Il est clair d'après cette relation qu'avec l'inversion de la polarisation dans la demi-période et en appliquant un décalage de phase, l'énergie électrique récupérée augmente par rapport à un système conventionnel de polarisation

Le schéma électrique équivalent de la configuration est représenté dans le Figure IV.3.

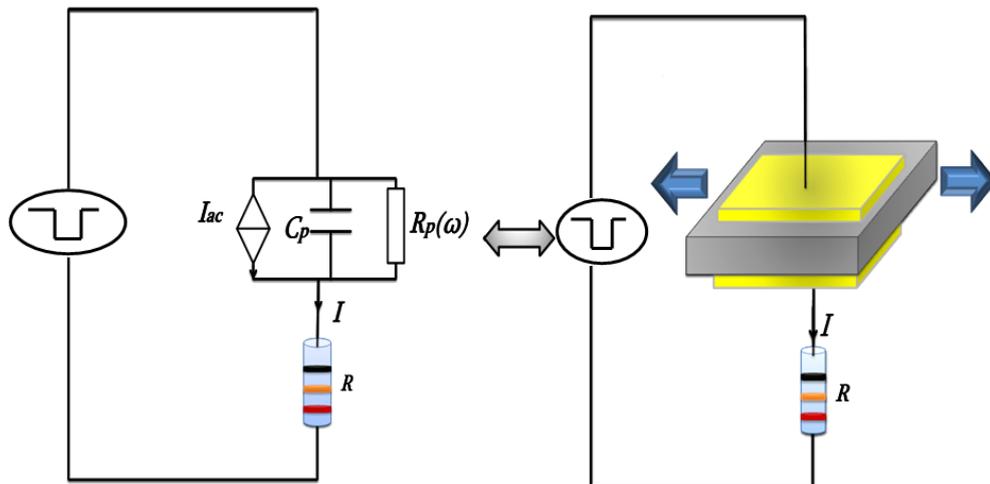


Figure IV.3 : Le schéma électrique équivalent de la configuration

La source de courant I_{ac} traduit le couplage mécano-électrique effectué par le polymère et $R_p(\omega)$ les pertes diélectriques. Conformément à la Figure IV.3 qui décrit la connexion de

l'échantillon électrostrictif, la densité d'énergie pendant une période de l'excitation sinusoïdale est donnée par :

$$W = \int_0^T E_3 \cdot I \cdot dt \quad \text{IV.19}$$

L'introduction de l'équation IV.15 dans IV.19 on trouve

$$W = 2 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \varepsilon^2 \cdot A \cdot E_{sat} \cdot th\left(\frac{E_{dc}}{E_{sat}}\right) \cdot E_0 \cdot S_M \cdot \sin(\varphi) \quad \text{IV.20}$$

D'après cette dernière équation on constate bien que le maximum d'énergie récupéré est atteint avec $\sin(\varphi) = 1$

IV.3 Essai expérimental

L'échantillon du polymère a été polarisé soumis à un champ électrique. L'échantillon utilisé de dimension $(6 \times 4.0) \text{ cm}^2$ de type PU1%C, était synthétisé pour étude comme montre la figure IV.4. Le composé de polyuréthane était commercialement reconnue (élastomère de 58887 TPU, Estane). Les mesures de constante diélectrique ont été effectuées à l'aide d'un appareil HP 4284A LCR meter,. La constante diélectrique a été calculée à partir de la capacité à la température ambiante. Les valeurs expérimentales trouvées ont montré que la constante diélectrique diminue avec une l'augmentation, de la fréquence .

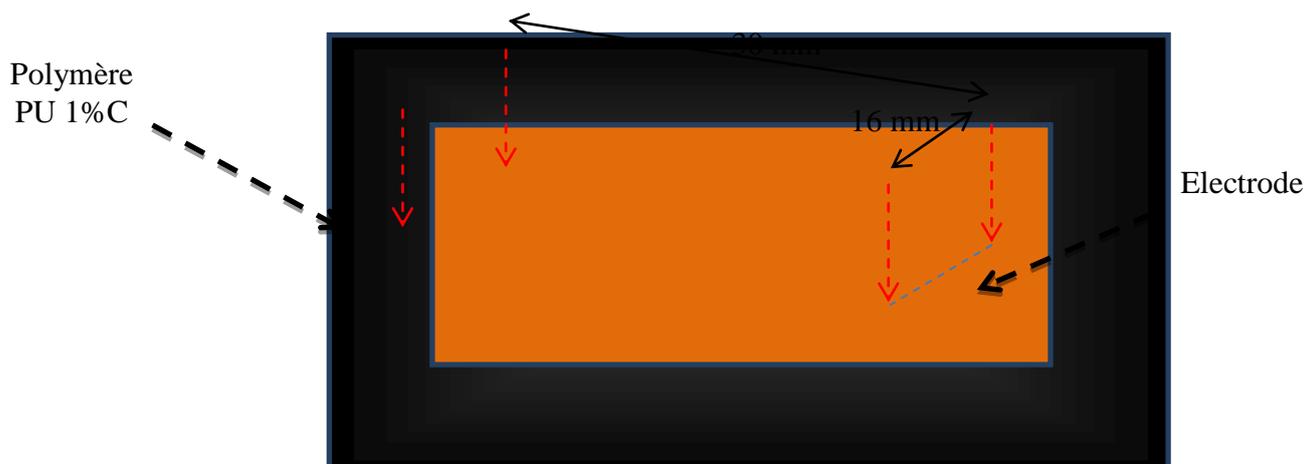


Figure IV.4: Dimension du polymère utilisé dans l'essai

La figure IV.5 montre la déformation maximale en fonction du champ électrique appliqué, pour différentes épaisseurs de l'échantillon. Celle-ci bien une augmentation de la déformation en fonction du champ appliqué, montrant la saturation à des valeurs de champ électriques

élevés. L'épaisseur sélectionnée pour l'étude était $50\ \mu\text{m}$. C'était le résultat de leur comportement hyper-elastic, dû à la déformation mécaniquement non linéaire et à la saturation de la polarisation.

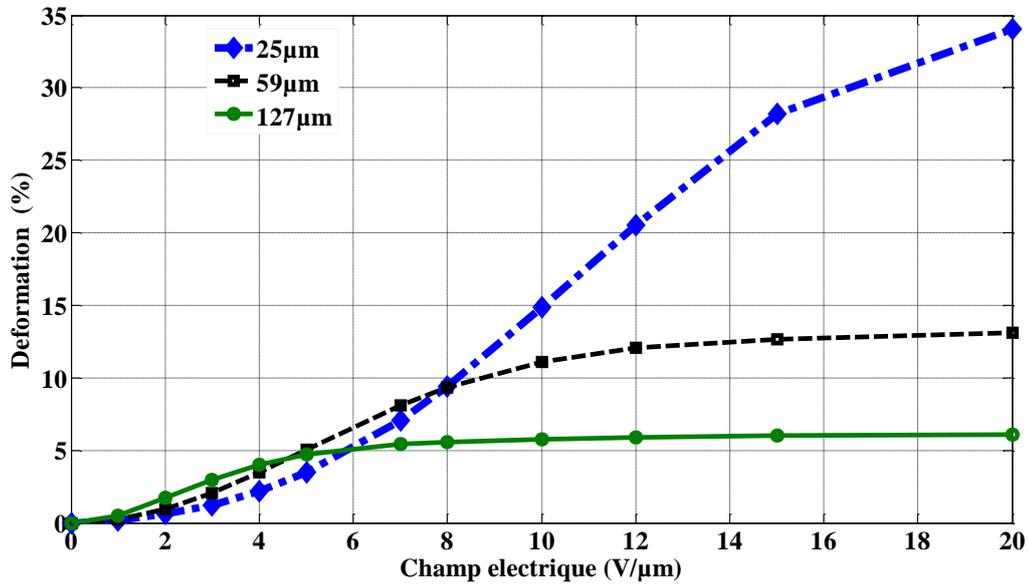


Figure IV.5: variation de la déformation en fonction du champ appliqué

Le banc d'essai permettant la caractérisation de la puissance récupérée par un film de polymère est représenté schématiquement dans la figure. IV.6.

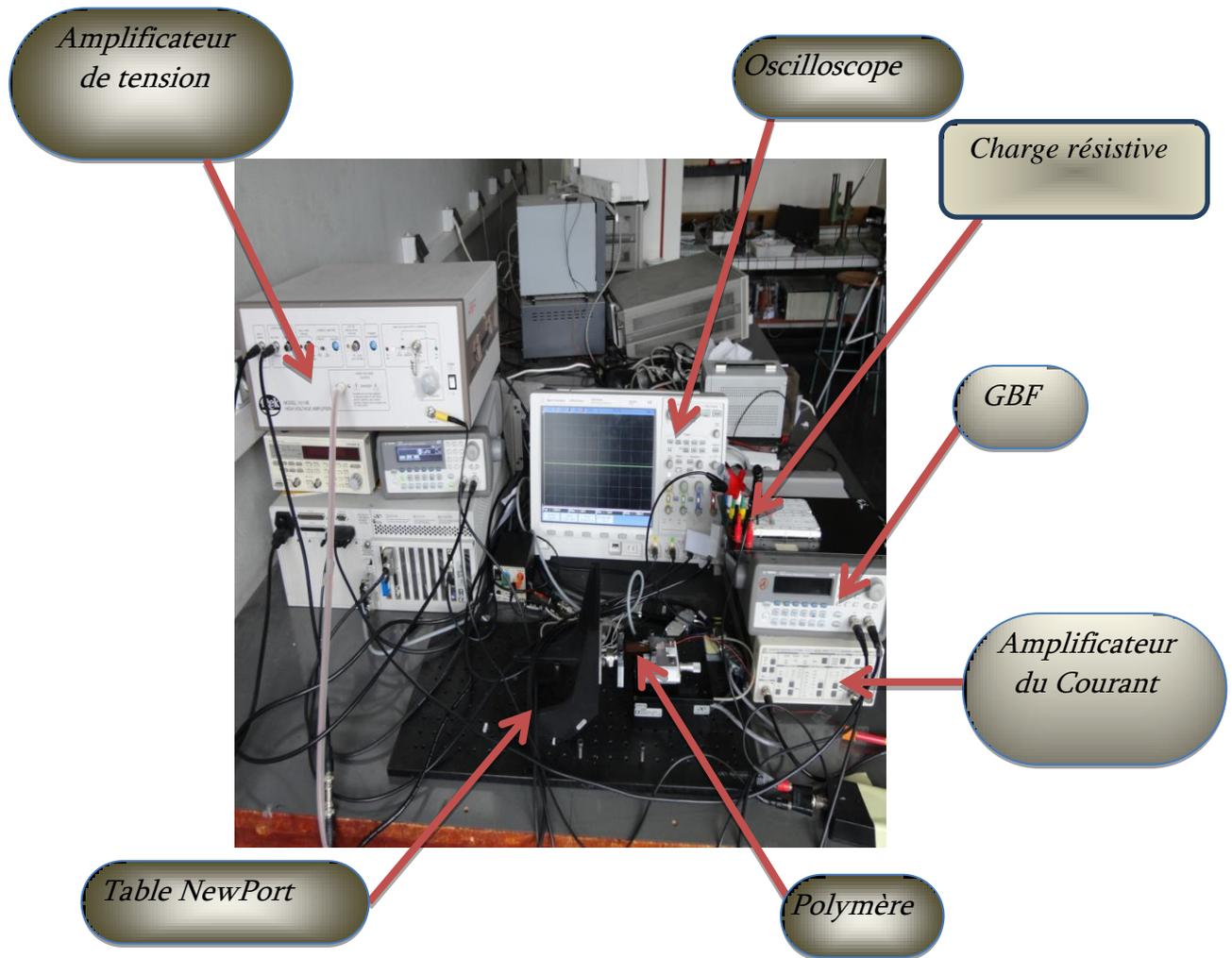


Figure IV.6: Schéma de l'installation expérimentale

Le film de polymère est monté sur un support composé de deux parties : l'un fixe et l'autre mobile et peuvent être déplacés horizontalement à l'aide d'un moteur linéaire type XM550 Ironless.

Le film est étiré avec une amplitude de déformation de 0.5% à 15 hertz. L'échantillon est tendu le long de la direction de déplacement horizontale. Différents déphasages sont considérés entre la composante alternative du champ électrique et celle du déplacement. Le générateur de fonction (Agilent 33220A) utilisé est relié à l'amplificateur à haute tension (Trek 609D-6). L'échantillon est connecté à une charge électrique résistive. Le courant généré est mesuré par un amplificateur de courant type Stanford SR570. La puissance récupérée sur la charge est calculée à partir de la relation $P = R.I^2$. Les résultats expérimentaux montrent bien d'après la figure IV.8 que le courant récupéré par le

polymère atteint une valeur maximale avec un déphasage entre la composante alternatif du champ et le déplacement de $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

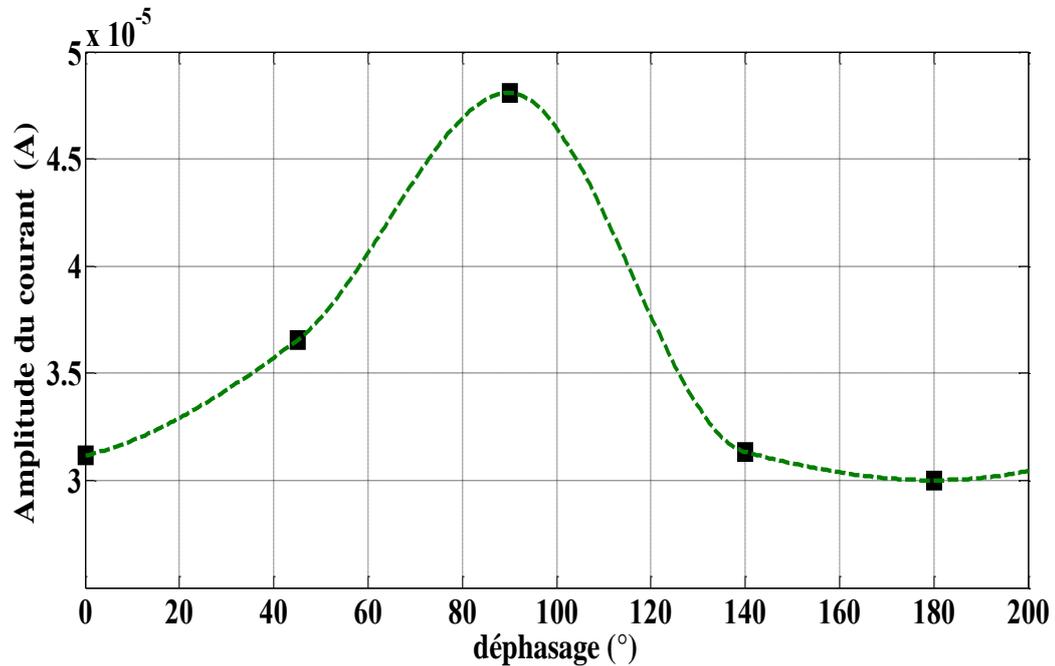


Figure IV.7 : Variation du courant récupéré en fonction du déphasage entre le champ électrique et déplacement

A partir de cette mesure, la forme (signal) du champ électrique appliqué dans cet essai est représentée sur la figure IV.8. Ce champ électrique est délivré par un GBF programmable puis amplifié par un amplificateur de tension.

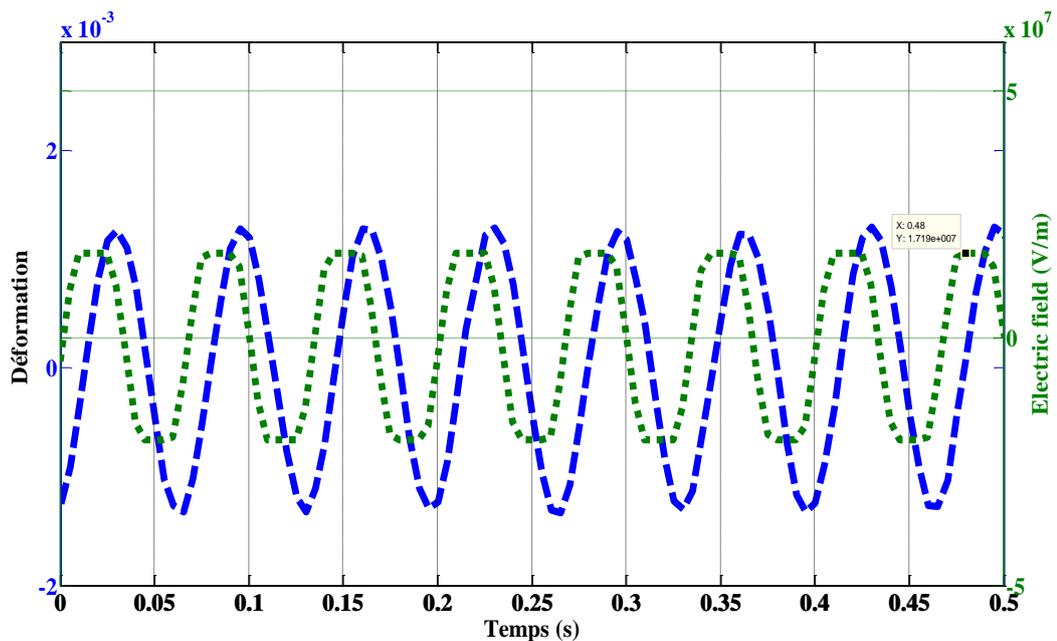


Figure IV.8: Déformation et champ électrique en fonction du temps

Comme il a été montré dans le modèle, une dépendance entre la puissance récupérée et la forme d'onde du champ électrique appliqué, dans les conditions décrites ci-dessus.

La figure .IV.9 montre les résultats expérimentaux validant le modèle théorique concernant l'évaluation de la puissance récupérée. Au-delà de la résistance optimale on remarque une petite divergence entre les mesures expérimentales et théoriques. La raison possible de cette anomalie est due aux pertes électriques dans le polymère.

Les mesures expérimentales sont prises pour valider le modèle théorique présenté. Ces données montrent bien l'existence d'une résistance optimale de charge $R = 7M\Omega$ et la puissance maximum récupérée atteint une valeur maximale de $2.7\mu w$.

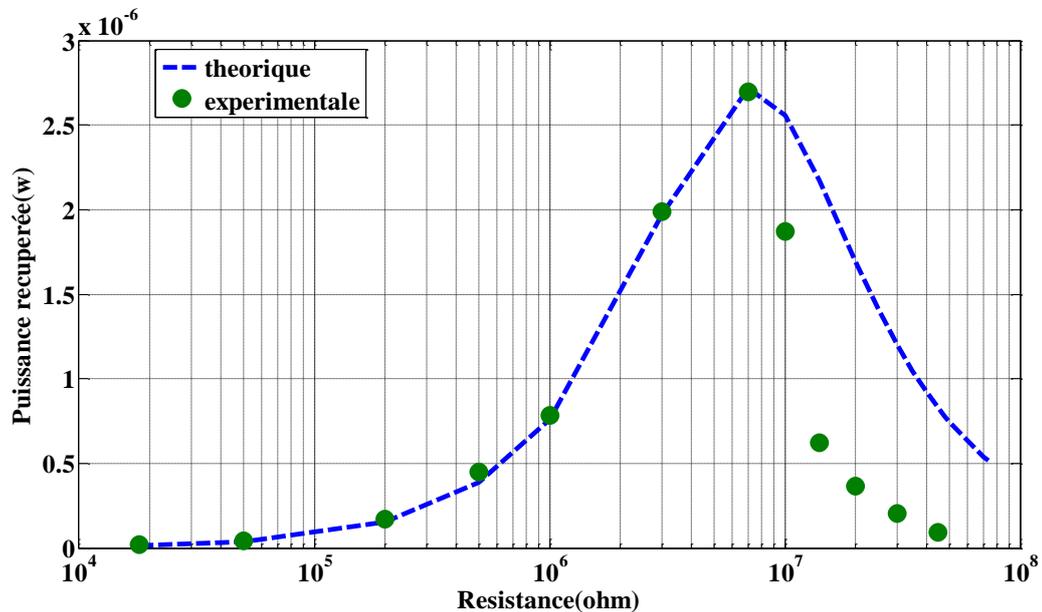


Figure IV.9 : Puissance récupérée, courbes théorique et expérimentale avec un champ électrique de $10V/\mu m$ à 15 Hz et une déformation de 0.5%

Nous montrons dans la figure IV.10. La puissance récupérée utilisant trois signaux différents de polarisation. On voit clairement sur la figure que la puissance récupérée à partir d'un champ de forme trapézoïdale est 7 fois plus grande que celle obtenue à partir des signaux alternatif et continu.

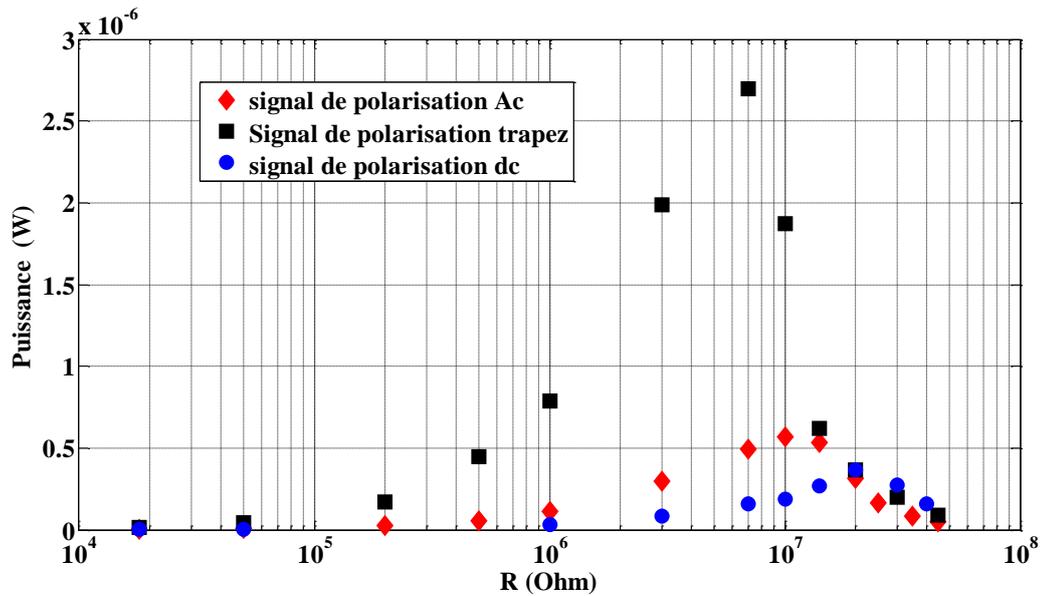


Figure IV.10 : Puissance récupérée pour trois différents signaux de polarisation $10\text{V}/\mu\text{m}$ à 15 Hz et avec déformation de 0.5%

Les capacités de conversion des matériaux d'électrostriction peuvent être obtenues à partir de la surface de la caractéristique champ-courant électrique pour une charge optimale. La figure IV.11, montre, la comparaison de l'énergie convertie dans les mêmes conditions pour les différents signaux de polarisation, alternatif, continu et la forme d'onde proposée. On remarque également que le rapport de la conversion électromécanique est plus intéressant (plus grand) quant à l'application d'une onde de forme trapézoïdale.

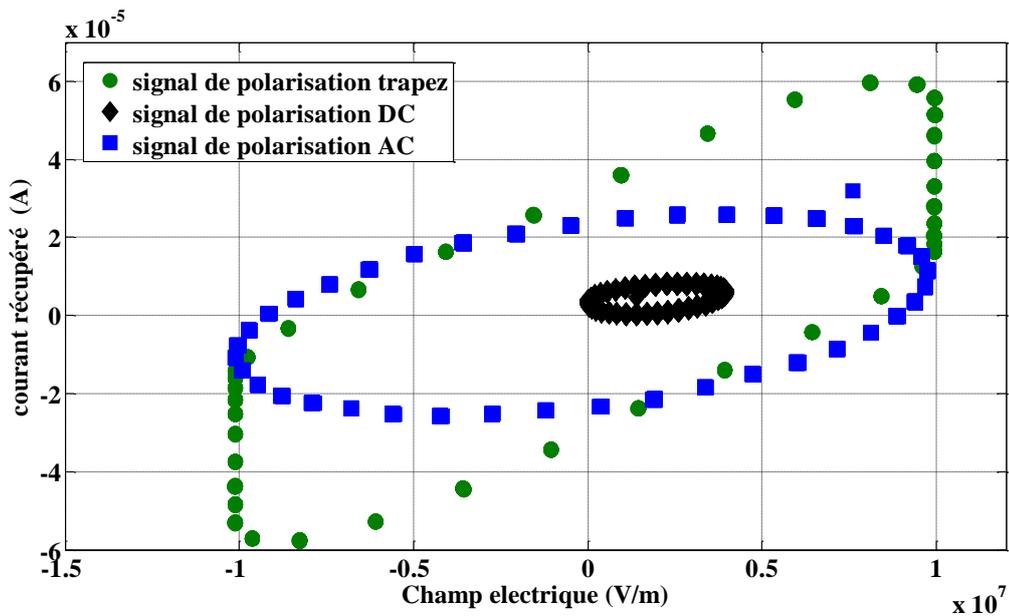


Figure IV.11: Le courant en fonction du champ électrique pour différents signaux de polarisation

Dans cette partie, une nouvelle méthode est proposée pour étudier l'effet de l'inversion de la polarisation à la demi période, et avec un déphasage de $\varphi = \frac{\pi}{2}$, sur la puissance récupérée.

Une bonne concordance a été trouvée entre le modèle théorique et les mesures expérimentales. Ces valeurs ont montré l'excellent potentiel de récupération de l'énergie, par polymères électrostrictifs.

Expérimentalement les polymères génèrent des pertes diélectriques, des pertes par conduction mais aussi des pertes viscoélastiques qui sont des sources de chaleur et contribuent à l'échauffement du matériau. Ces pertes sont difficiles à déterminer car ils varient en fonction du temps. Le but de la prochaine étape traite cette conversion car il est important que le courant induit par l'application d'une tension de polarisation, soit le plus faible possible, afin de garantir un bon rendement de conversion.

Afin de réaliser le but mentionné ci-dessus, beaucoup d'études ont été réalisées sur les polymères d'électrostriction pour prévoir la possibilité d'augmenter l'énergie récupérée par l'augmentation de la constante diélectrique ou en incorporant les nano-particules conductrices [90]- [91]- [92]. D'autres investigations, de ce type effectuées par Lieu et autres [50] et [51], se sont concentrées sur l'optimisation du procédé de transfert d'énergie en utilisant des cycles d'énergie. Guyomar et autres [93] ont proposé une méthode simple originale pour mesurer la constante diélectrique, le module de Young et le coefficient d'électrostriction d'un film de polymère basé sur des analyses de FFT du courant traversant l'échantillon une fois simultanément excitée par un champ électrique et une excitation mécanique. L'objectif de l'essai suivant était de démontrer la possibilité d'avoir des variations de la réaction du système pour augmenter le courant et la puissance récupérée utilisant l'analyse spectrale.

IV.4 Modélisation et analyse spectrales

L'électrostriction est généralement définie comme accouplement quadratique entre la contrainte et le champ électrique. Supposons qu'il y a un rapport linéaire entre la polarisation et le champ électrique, les relations constitutives d'électrostriction est donné par,

$$S_{ij} = M_{ijkl} E_k E_l + s_{ijkl}^E T_{kl}$$

$$D_i = \varepsilon_{ijkl}^T E_k + 2M_{ijkl} E_l T_{kl}$$

IV.21

Un film polymère électrostrictive isotrope se contracte le long de la direction d'épaisseur et se décontracte le long de la direction du film quand un champ électrique est appliqué à

travers l'épaisseur. Supposant que le seul effort de non nul est appliqué sur la longueur du film. La relation constitutive est alors simplifiée comme :

$$\begin{aligned} S_1 &= M_{31} E_3^2 + s_{11}^E T_1 \\ D_3 &= \varepsilon_{33}^T E_3 + 2M_{31} E_3 T_1 \end{aligned} \quad \text{IV.22}$$

Le déplacement électrique D_3 traversant le film de polymère peut être calculé à partir de l'équation IV.23

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} E_3 S_1 - 2 \frac{M_{31}^2 E_3^3}{s_{11}^E} \quad \text{IV.23}$$

Le déplacement électrique D_3 sur l'élément d'électrostriction peut être exprimé, dans le domaine fréquentiel, est exprimé par l'équation.(IV.24) [119]:

$$\square D_3 = \varepsilon_{33}^T \square E_3 + \frac{2M_{31}}{s_{11}^E} [\square E_3 * \square S_1] - 2 \frac{M_{31}^2 [\square E_3 * \square E_3 * \square E_3]}{s_{11}^E} \quad \text{IV.24}$$

Ici, * correspond au produit de convolution.

D'autre part, les expressions de E_3 et de S_1 , à partir des équations IV.16 et IV.17, dans le domaine fréquentiel sont données respectivement par :

$$\begin{aligned} \square E_3 &= E_{ac} \delta(\omega) + \frac{1}{2} E_0 [\delta(\omega + \omega_e) + \delta(\omega - \omega_e)] \\ \square S_1 &= \frac{1}{2} S_0 [\delta(\omega + \omega_m) + \delta(\omega - \omega_m)] \end{aligned} \quad \text{IV.25}$$

Avec δ représente la fonction de delta.

Puisque le courant I générée par le film de polymère peut être calculé par la dérivation de l'expression D_3 ($I = \dot{D} A$ avec A représenté la surface de l'échantillon), le courant est donné par l'équation.(IV.26) [93]

$$\begin{aligned} I &= A [B_1 \delta(\omega + \omega_e) + B_2 \delta(\omega + 2\omega_e) + B_3 \delta(\omega + 3\omega_e) + \dots + B_4 \delta(\omega + \omega_m) \\ &\quad + B_5 \delta(\omega + (\omega_m + \omega_e)) + \dots + B_6 \delta(\omega + (\omega_m - \omega_e))] \end{aligned} \quad \text{IV.26}$$

Les différentes valeurs des coefficients sont disponibles dans le tableau IV.

B_i	Amplitude
B_1	$E_0 \omega_e \left[\varepsilon_{33}^T - \frac{3M_{31}^2}{s_{11}^E} (E_{dc}^2 + \frac{1}{4} E_0^2) \right]$
B_2	$\frac{3M_{31}^2}{s_{11}^E} E_{dc} E_0^2 \omega_e$
B_3	$\frac{1}{4} \frac{M_{31}^2}{s_{11}^E} E_0^3 \omega_e$
B_4	$\frac{2M_{31}}{s_{11}^E} E_{dc} S_0 \omega_m$
B_5	$\frac{M_{31}}{s_{11}^E} E_0 S_0 (\omega_m + \omega_e)$
B_6	$\frac{M_{31}}{s_{11}^E} E_0 S_0 (\omega_m - \omega_e)$

Tableau IV.1: Valeur de B_i calculée à partir de l'équation IV.26.

La contribution des pertes électriques au courant ne peut pas être négligée pour le polymère étudié [94]. Les pertes électriques ont été ajoutées à l'expression de I par le terme $E_{dc} / (R_{dc} t)$. Ici, R_{dc} est la résistance du film de polymère. et t l'épaisseur. La valeur de R_{dc} est mesurée à l'aide d'un électromètre 6517A de Keithley. Avec les nouvelles expressions de B_i , il devient alors possible de calculer les différents paramètres du polymère électrostrictif.

$$M_{31} = \frac{1}{3} \left[\frac{B_2 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}}{B_6 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}} \right] \left(\frac{S_0 (\omega_m - \omega_e)}{E_{dc} E_0 \omega_e} \right) \quad \text{IV.27}$$

$$s_{11}^E = \left[\frac{B_2 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}}}{(B_5 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}})^2} \right] \left(\frac{S_0^2 (\omega_m + \omega_e)^2}{3 E_{dc} \omega_e} \right) \quad \text{IV.28}$$

$$\varepsilon_{33}^T = \left[\frac{\left(B_1 - \frac{E_{dc} t}{R_{dc}} \right)}{E_0 \omega_e} - \frac{3M_{31}^2}{s_{11}^E} \left(E_{dc}^2 + \frac{1}{4} E_0^2 \right) \right] \quad \text{IV.29}$$

Ces coefficients sont déterminés en mesurant B_1 , B_2 , B_5 et B_6 qui sont respectivement l'amplitude des composants des courants aux fréquences $\omega_m, \omega_e, \omega_m - \omega_e, \omega_m + \omega_e$, S_0 est l'amplitude de la déformation.

IV.5 Banc d'essai expérimental

L'échantillon de polyuréthane a été testé dans un banc d'essai électromécanique. La figure (IV.12) fournit une représentation schématique de l'installation pour caractériser le courant et la puissance récupérée.

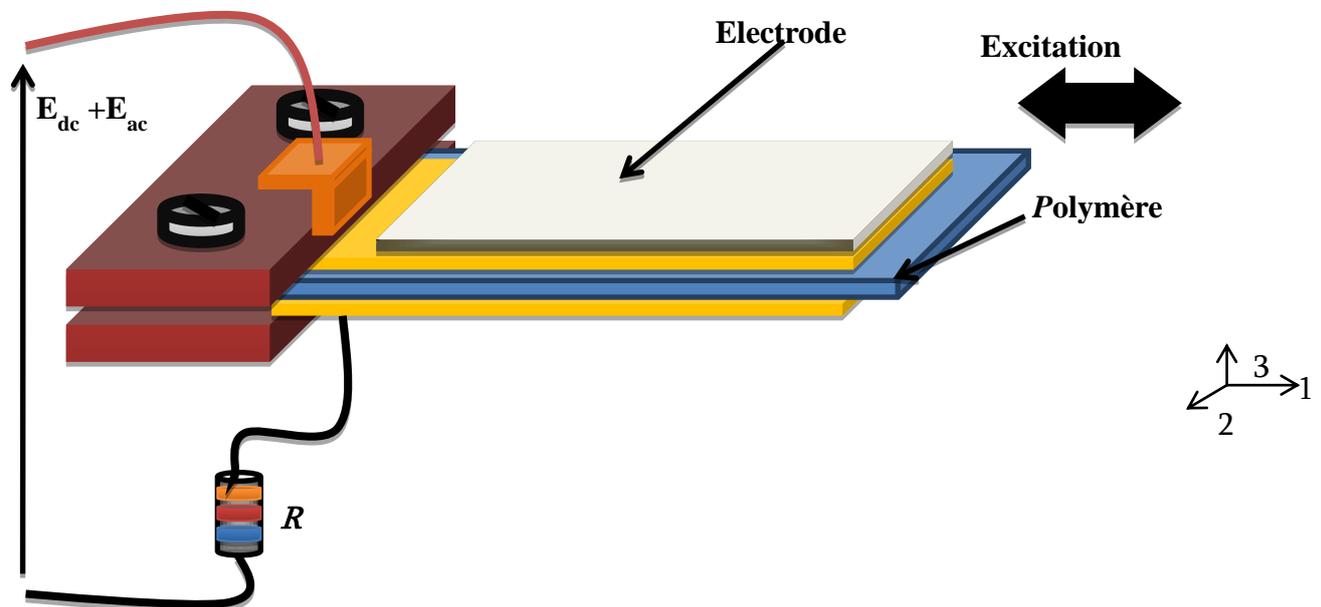


Figure IV.12 : Illustration schématique du banc expérimental pour mesurer le courant récupéré

Pour évaluer la validité du modèle, diverses mesures ont été effectuées. Les mesures du courant ont été réalisées utilisant l'analyse harmonique du courant de court-circuit. En conséquence, la puissance récupérée par le polymère a pu être exprimée par $P_{\text{recu}} \propto R \cdot I_h^2$ avec R représente la charge et I_h le courant de court-circuit. Ces mesures expérimentales du courant récupéré ont fait apparaître toutes les fréquences possibles (Figure IV.13).



Figure IV.13 : Photographie de l'installation expérimentale pour mesurer le courant récupéré par polymères électrostrictives.

La figure IV.14 représente le courant électrique mesuré et le champ de polarisation en fonction du temps. Le film de polymère a été étiré avec une amplitude maximum de déformation de 5 % à $f_m=3$ Hz. La première partie de cette essai expérimentale a été réalisé pour mesurer le courant dans des conditions de court-circuit avec l'application d'une faible composante du champ électrique AC de 1 hertz et avec un champ polarisation DC E_{dc} de 10 kV/mm.

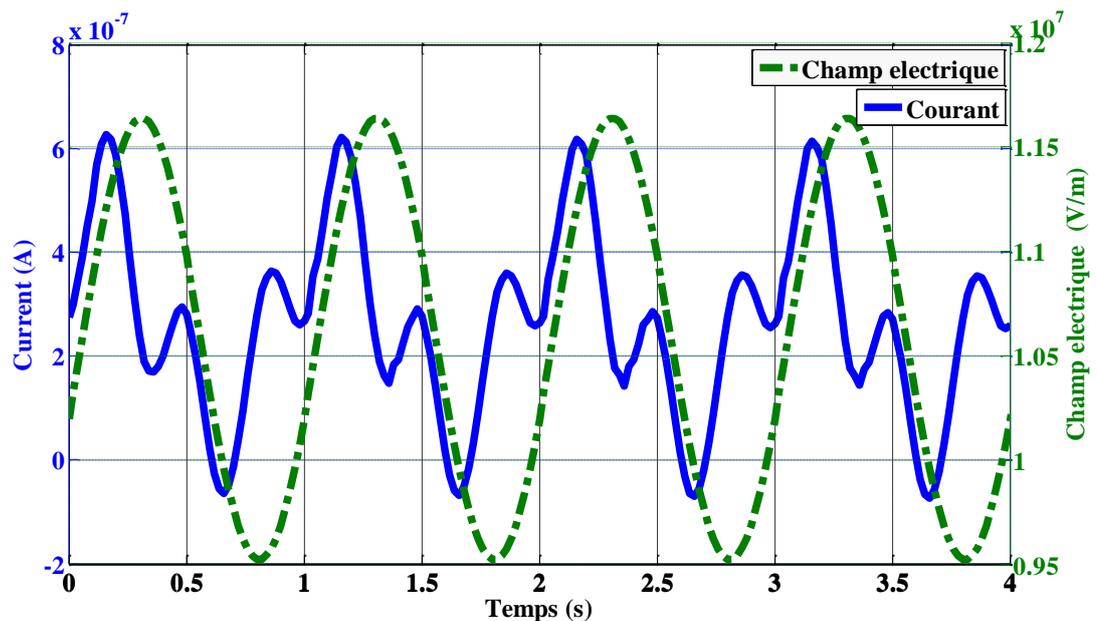


Figure IV.14: Courant électrique mesuré avec champ de polarisation en fonction du temps $f_m=3$ Hz

Il est alors aussi intéressant de connaître la variation des raies dans l'analyse spectrale du courant mesurée pour deux fréquences f_m , afin de valider le modèle théorique et pour montrer l'utilité de ces variations sur le comportement du polymère. La figure IV.15 donne les résultats obtenus en faisant varier la fréquence. On peut voir que $B_2 = 6.07 \cdot 10^{-7}$ A est plus élevé que l'amplitude $B_1 = 4.297 \cdot 10^{-7}$ A.

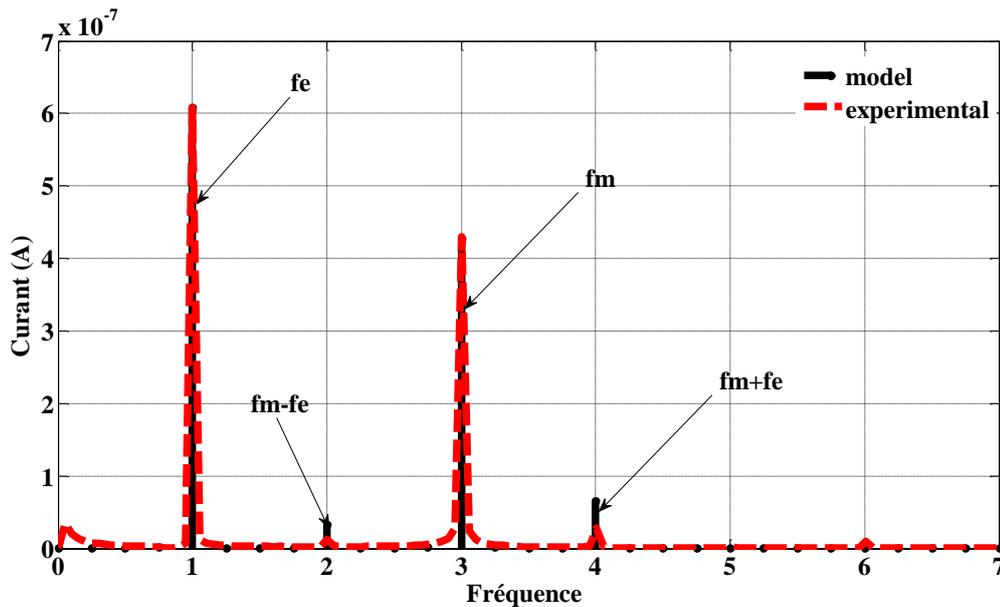


Figure IV.15: L'analyse spectrale du courant mesuré en court-circuit $f_m=3$ Hz

La figure IV.16 représente le courant électrique mesurée et le champ de polarisation en fonction du temps. Le film de polymère a été étiré avec une amplitude maximum de déformation de 5 % à $f_m=6$ Hz.

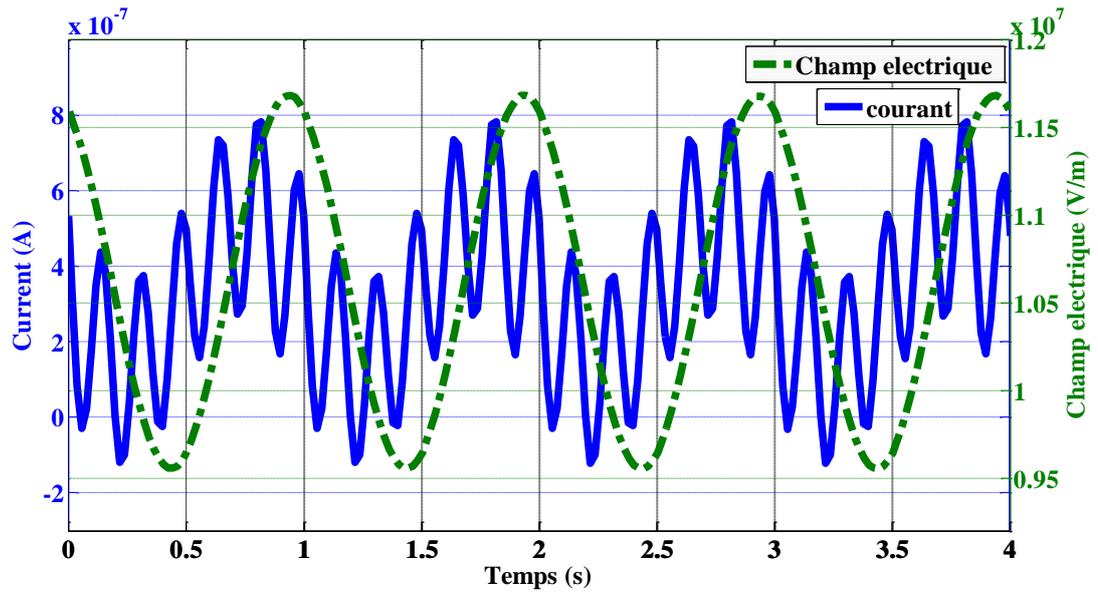


Figure IV.16: Courant électrique mesurée avec champ de polarisation en fonction du temps
 $f_m=6\text{Hz}$

Cependant, expérimentalement l'amplitude du coefficient B2 demeure constante et devient beaucoup plus petite que celle de B1 qui a atteint une valeur de $7.677 \cdot 10^{-7}$ A comme l'indique dans la figure IV.17 .

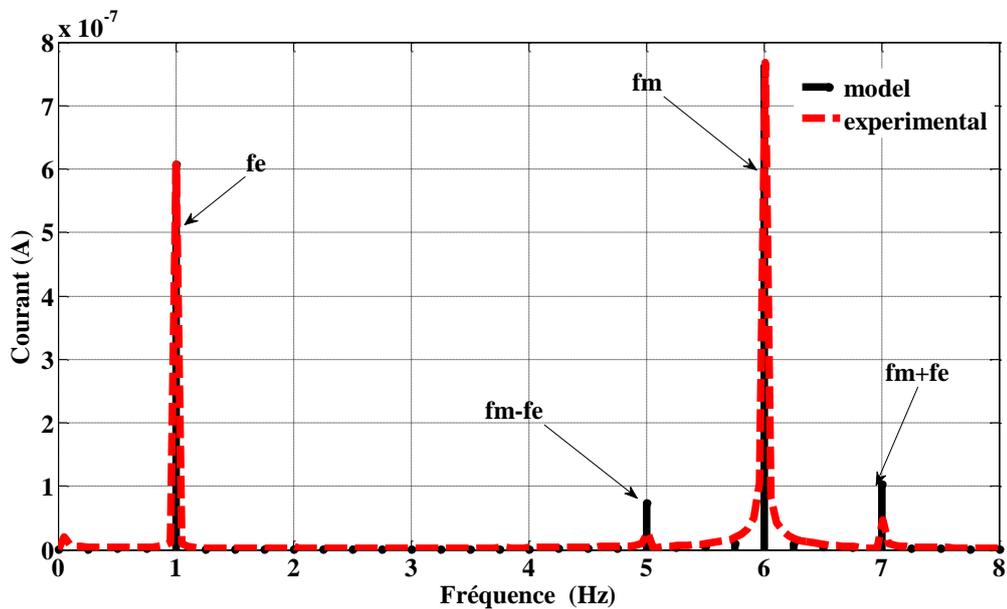


Figure IV.17: L'analyse spectrale du courant mesurée en court-circuit $f_m=6\text{Hz}$

Il a été montré dans les travaux précédents [95], [96] et [97], que la permittivité était un coefficient important dans la conversion. Il est très important de trouver un mode de

fonctionnement qui correspond à un constant diélectrique élevé et à de faibles pertes. Dans ce cas, il est clair d'après le tableau IV.1 que l'augmentation du coefficient B_1 suite à l'augmentation de la fréquence avec un rapport constant (M_{31}/s_{11}^E) entraîne une augmentation de la permittivité.

L'ensemble des mesures réalisées au cours de cette partie a permis de démontrer la validité du modèle en mode court-circuit. Dans la prochaine partie, un essai en charge sera réalisé afin d'identifier les paramètres à optimiser pour la récupération de l'énergie.

On peut voir sur la figure IV.18 que les raies du courant mesuré ont changé avec la charge et que l'amplitude des raies a diminué avec une charge croissante de 10Ω , 60Ω et 90Ω .

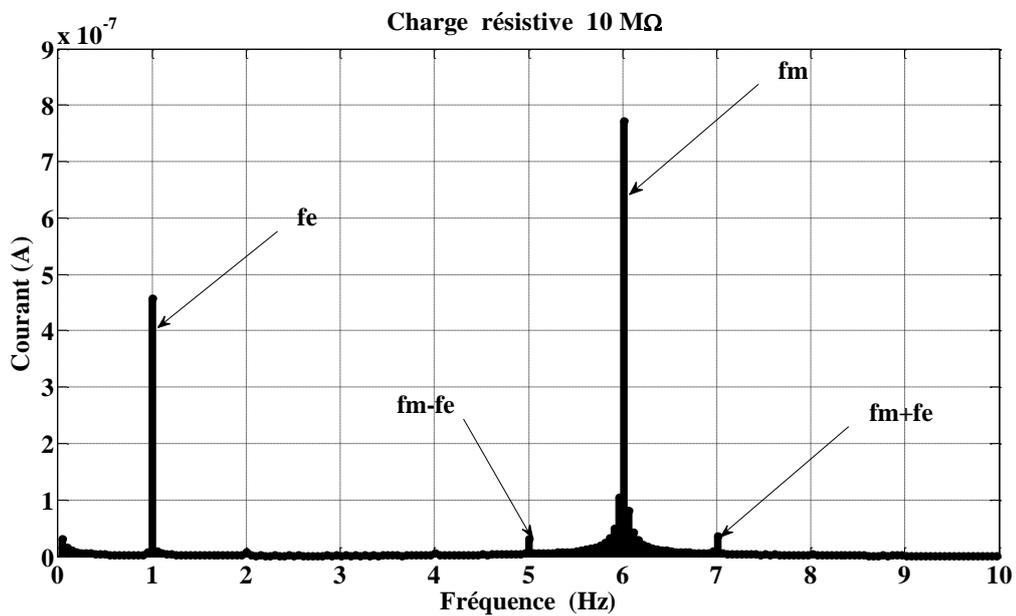


Figure IV.18: L'analyse spectrale du courant mesuré avec charge 10Ω et $f_m=6\text{Hz}$

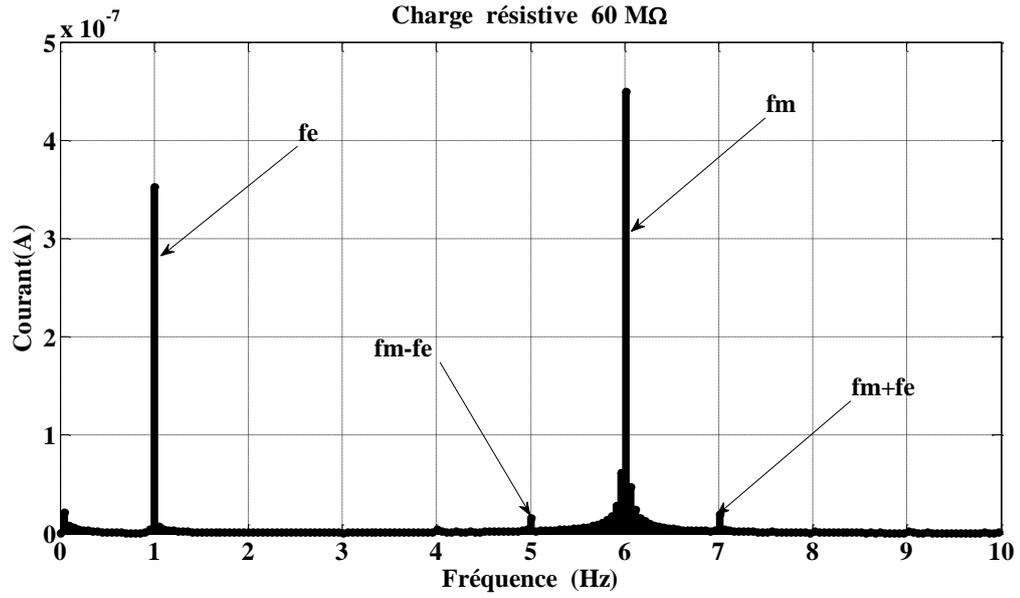


Figure IV.19: L'analyse spectrale du courant mesuré avec charge 60Ω et $f_m=6\text{Hz}$

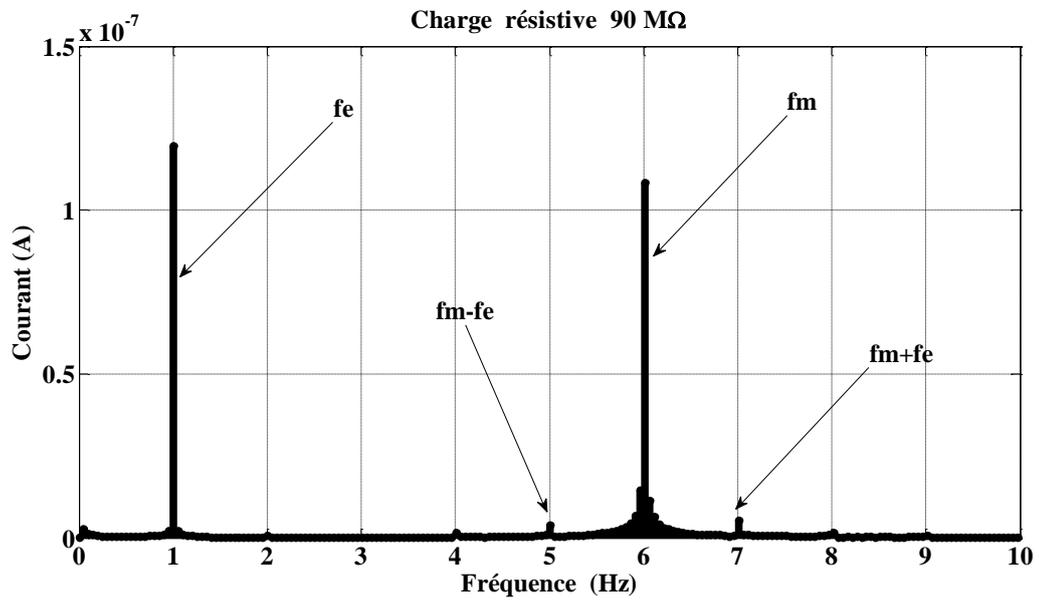


Figure IV.20 : L'analyse spectrale du courant mesurée avec charge 90Ω et $f_m=6\text{Hz}$

L'amplitude correspondante à la fréquence f_m était plus grande que celle correspondant à la fréquence f_e , indiquant que la puissance récupérée était plus élevée que celle de l'échantillon polarisé. Au-dessus de 60Ω (figure IV) représentant, la charge optimale nous voyons un effet réversible. L'amplitude correspondant à la fréquence f_m est devenue inférieure à celle correspondant à f_e . Cela signifie qu'il y avait un mode optimum de fonctionnement pour l'énergie récupérée. Les valeurs mesurées dans cette expérience sont montrées dans le tableau IV.2.

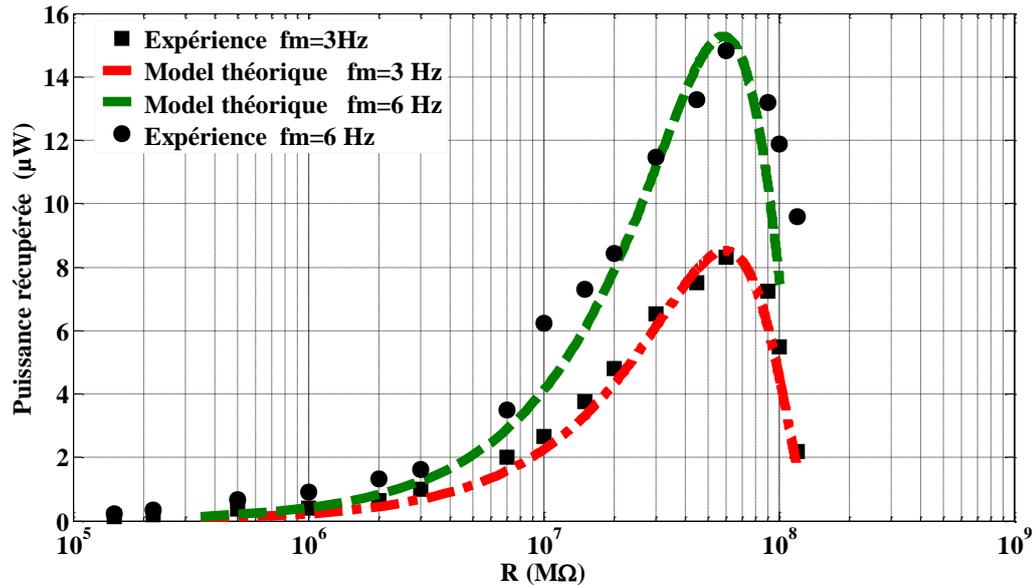
Resistance M Ω	$F_m=6\text{Hz}$	$F_e=1\text{Hz}$	$F_m-F_e=5\text{Hz}$	$F_m+F_e=7\text{Hz}$
10	$7.71 \cdot 10^{-7}$ A	$4.75 \cdot 10^{-7}$ A	$3.14 \cdot 10^{-8}$ A	$3.16 \cdot 10^{-8}$ A
60	$4.49 \cdot 10^{-7}$ A	$3.53 \cdot 10^{-7}$ A	$1.58 \cdot 10^{-8}$ A	$1.97 \cdot 10^{-8}$ A
90	$1.08 \cdot 10^{-7}$ A	$1.19 \cdot 10^{-7}$ A	$3.87 \cdot 10^{-9}$ A	$5.31 \cdot 10^{-9}$ A

Tableau IV.2 : Évaluation des amplitudes des rais de courant à différentes charges pour $f_e = 1\text{Hz}$ et $f_m = 6\text{Hz}$

Le but de la section suivante consisterait à étudier la puissance récupérée pour différentes configurations et différents régimes de fonctionnement, soient des amplitudes d'excitation mécaniques constantes, et deux fréquences (c'est-à-dire., 3 hertz et 6 hertz).

Afin d'évaluer la validité des deux états, plusieurs mesures ont été effectuées. La figure IV.21 présente la puissance en fonction de la charge électrique pour un champ électrique donné $E_3 = E_{dc} + E_0 \cos(\omega_e t)$ avec $E_{dc} = 10 \text{KV}/\mu\text{m}$, $E_0 = 2 \text{KV}/\mu\text{m}$ à $F_e = 1\text{Hz}$. La contrainte était égale à 5%.

Ces données ont montré l'existence d'une puissance maximum récupérée à une résistance optimale de charge comme prévue selon la figure. IV.19. La puissance récupérée, à une fréquence d'excitation mécanique 3 Hz était inférieure à celle utilisant une fréquence de 6Hz. D'ailleurs, le modèle et les analyses de FFT ont montré que cette puissance était proportionnelle aux fréquences d'excitation mécanique.



Figures IV.21 : La puissance récupérée avec une déformation constante 5% à $f_e=1$ hertz sous différentes valeurs de f_m (3 Hz et 6 Hz).

La figue IV.21 montre bien que la puissance récupérée était $8.498 \cdot 10^{-6}$ W pour un système fonctionnant avec une de $f_m = 3$ Hz. Cependant, une valeur de $14.83 \cdot 10^{-6}$ W a été mesurée pour $f_m = 6$ hertz. Cette différence entre les puissances électriques était due aux caractéristiques intrinsèques du matériau.

Selon le calcul des constantes B1, B2, B5 et B6 dans le tableau IV.1, nous avons constaté que le rapport M/s est demeuré presque constant pour les deux fréquences d'excitation mécanique (pour $f_m = 3$ Hz, le rapport $M_{31} / s_{11}^E = 7.257 \cdot 10^{-8}$ et pour $f_m = 6$ hertz, le rapport $M_{31} / s_{11E} = 7.284 \cdot 10^{-8}$). L'augmentation de l'amplitude de B1 en raison de l'augmentation de la fréquence a mené à une variation apparente de la constante diélectrique. Ce paramètre était essentiel afin de réaliser des valeurs élevées de la puissance récupérée.

Le point le plus important dans ce travail expérimental consistait à montrer l'efficacité de la conversion puisque la puissance récupérée était plus grande que celle consommée. Cependant, avec des charges excédant $90 \text{ M}\Omega$ la puissance de la polarisation est devenue plus grande que celle récupérée. Ceci prouve qu'il y a un régime de fonctionnement optimal pour une conversion positive, qui lie les trois paramètres l'amplitude de la contrainte, et les fréquences f_m et f_e .

Il a été montré dans les travaux précédents [97], que la densité énergétique pour un polymère électrostrictif est donnée par la relation $dW_{\text{conv}} \approx M_{31} \cdot Y \cdot E_0 \cdot E_{\text{ac}} \cdot dS$. Par conséquent, l'efficacité

de la conversion des matériaux d'électrostriction peut être obtenue à partir de la surface du cycle champ-contrainte électrique.

Une comparaison de la densité d'énergie convertie entre les deux régimes, c'est à dire..., $f_m = 3$ hertz et $f_m = 6$ hertz, est montrée dans la figure IV.22. Cette figure prouve que les deux surfaces sont différentes notamment dans ces conditions; celle correspondante à 6Hz est largement plus grande.

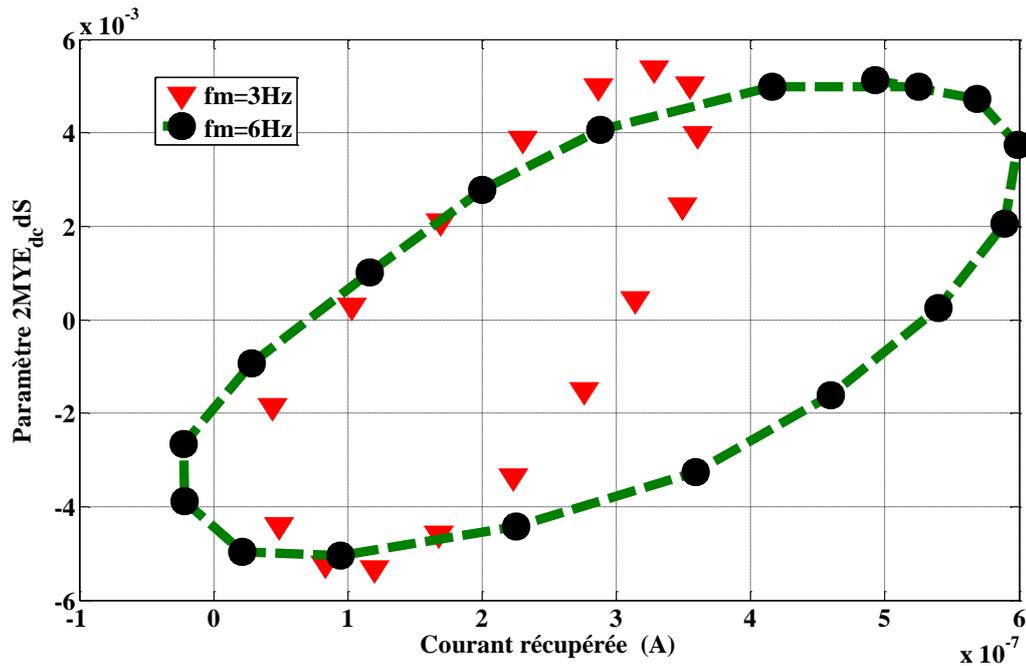


Figure IV.22 : Comparaison des deux cycles de la conversion; deux modes de fonctionnement : $f_m = 3$ Hz, 6 hertz.

Le but de la section suivante était d'étudier la puissance récupérée pour différentes configurations et différents régimes de fonctionnement, avec des amplitudes d'excitation mécaniques variable, et une fréquence constante

Ces données expérimentales ont été prises pour illustrer l'effet de la contrainte sur le coefficient de la conversion en utilisant l'analyse FFT présentée dans la section précédente pour un champ électrique de 1Hz et les différentes déformations $S=2\%$, $S=4\%$ et $S=6.5\%$ à 6Hz. La figure IV. 23 a montré qu'il existe un rapport linéaire entre la puissance récupérée et l'amplitude de déformation. Cette amplitude est le paramètre le plus important pour augmenter l'énergie récupérée. La figure IV.23 montre le pic maximum de la puissance

récupérée (22.28 μ W, 28.73 μ W, 33.94 μ W) respectivement pour chaque déformation (2%, 4%, 6.5%). Ainsi l'amplitude de la contrainte est un paramètre important pour améliorer la puissance récupérée .

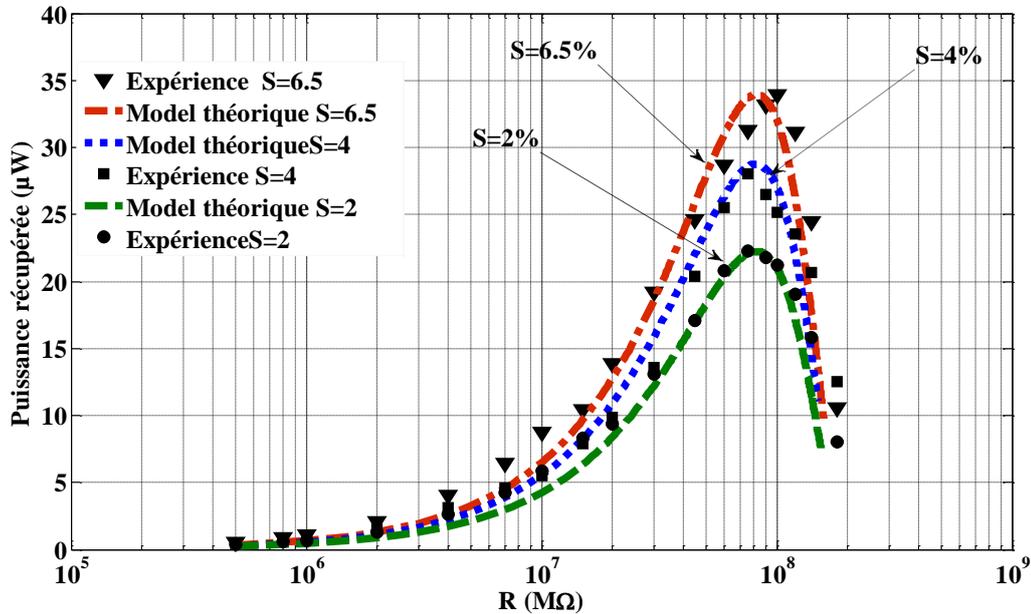


Figure IV.23: La puissance récupérée avec différentes déformations 4% , 2% , 6.5% à $f_e=1$ et $f_m=6$ Hz.

Pour l'énergie active récupérée par le système étudié dans cette partie, il y avait énergie électrique consommée par la polarisation du polymère. Aucune mesure directe sur la quantité d'énergie électrique consommée n'a été effectuée. Basé sur les résultats du R_p et le schéma électrique équivalent de l'installation, il était possible d'estimer l'efficacité de la conversion.

Le tableau IV.3 donne les valeurs de la puissance nécessaire pour la polarisation, et la puissance récupérée (à 13 MV/m et à 1 hertz). La dernière colonne du tableau montre des valeurs de l'efficacité de la conversion de l'énergie. La puissance nécessaire pour induire la polarisation est donnée par l'équation (IV.29)

$$P_{Polarization} = R_C \cdot \left(\frac{V_{dc}}{R_p(\omega) + R_C} \right)^2 \quad \text{IV.29}$$

Avec $R_p(\omega) \ll R_C$

$$P_{Polarization} = R_C \cdot \left(\frac{V_{dc}}{R_p(\omega)} \right)^2 \quad \text{IV.30}$$

Amplitude de déformation	P _{polarisation} (μW)	R _{écupérée} (μW)	L'efficacité De la conversion
S=2%	37.4	22.6	37.6
S=4%	28.3	28.5	50.1
S=6.5%	30.7	34.8	53.3

Tableau IV.3 : Comparaison entre la puissance de polarisation et celle récupérée à 1 hertz et un champ électrique de 13 MV/m

Le tableau IV.4 donne la valeur du coefficient d'électrostriction M_{13} et de s_{11} pour un champ électrique constant de 13 MV/m et pour différentes valeurs de la contrainte. Pour évaluer l'efficacité du générateur, le coefficient k_{13} d'accouplement a été employé (eq. IV.31) :

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot s_{11}}} = \frac{2 \cdot M_{31} \cdot E_{dc}}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot s_{11}}} \quad \text{IV.31}$$

Amplitude de déformation	Coefficient Electrostrictive M_{31} (V/m) ⁻² , 10 ⁻¹⁸	Souplesse S_{11} (Pa ⁻¹), 10 ⁸	coefficient Electromécanique k_{31}
S=2%	1.508	1.41	0.0209
S=4%	3.001	1.764	0.0411
S=6.5%	4.882	2.378	0.0576

Tableau IV.4 : comparaison entre les coefficients mécaniques à 1 Hz et un champ électrique de 13 MV/m

IV.6 Conclusion

Ce chapitre propose l'application des analyses de FFT pour augmenter les capacités de conversion des polymères d'électrostriction. L'étude nous a 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, une bonne concordance entre le modèle et les données expérimentales a été trouvée. Selon les résultats expérimentaux, ce modèle a rendu possible de préciser l'influence des paramètres mécaniques (fréquence mécanique, amplitude mécanique) sur la performance globale de la conversion électromécanique pour les polymères d'électrostriction. Les résultats ont montré effectivement l'excellent potentiel de cette technique pour la récupération de l'énergie récupérée.

.

CHAPITRE V :

.

**SYSTEME D'AMPLIFICATION
ET MAXIMISATION DE LA PUISSANCE
RECUPEREE**

Système d'Amplification et maximisation de la puissance récupérée

Dans ce chapitre, nous proposons deux différentes techniques permettant de récupérer l'énergie des vibrations de polymères electrostrictifs pour être une énergie utile et exploitable. Les techniques utilisées sont réalisées par des procédés à base de propylènes et un système mécanique. On montre qu'il est théoriquement et pratiquement possible de remonter la valeur de la puissance générée. Nous commencerons par une analyse de cette puissance établie, on mettra en évidence les principes de base d'amplification de la puissance électrique et on termine le chapitre par la description du dispositif mécanique d'application.

V.1 Introduction

La génération d'énergie à l'aide des polymères électrostrictifs est un domaine émergent, où aucune règle de conception n'est pour le moment définie. La majorité des activités de recherche actuelles dans le domaine de MEMS se réfère à des céramiques piézoélectriques classiques, mais les polymères électrostrictifs offrent la possibilité de récupérer l'énergie avec peu de pièces mobiles. Cette puissance peut être produite par simple étirement et contraction d'un matériau relativement peu coûteux. 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. Celui-ci est relié à un circuit électrique constituant le récepteur d'énergie. La différence de potentiel entre les électrodes terminales du film dépend essentiellement de la sollicitation mécanique et du comportement de la charge électrique. Le transfert énergétique dépend étroitement du comportement mécanique du dispositif ainsi que du coefficient de couplage électromécanique. De nombreux travaux ont été réalisées sur des polymères électrostrictifs afin de prédire leurs capacités de récupération de l'énergie en augmentant la permittivité ou en incorporant des nanoparticules conductrices [92]. D'autres études, telles que celles menées par Kailiang et al [98] et Pierre-Jean et al [99], montrent l'effet de la fréquence de déformation dans le courant généré par le polymère afin d'augmenter la puissance récupérée. Les polymères électrostrictifs sont généralement capables de supporter des déformations beaucoup plus grandes que celle des céramiques piézoélectriques. Ils ont des facteurs de forme flexible et peuvent répondre à une plus large gamme de fréquences. Cet état de l'art a permis de dégager la structure générale d'un générateur à base d'un polymère, dont les deux étages de conversion peuvent revêtir des formes extrêmement diverses. Dans ce chapitre, nous présentons la conversion obtenue à l'aide d'un dispositif mécanique et les prototypes de générateurs que nous avons réalisés. Nous soulignons et nous justifions les choix technologiques effectués à chaque étape de la conception.

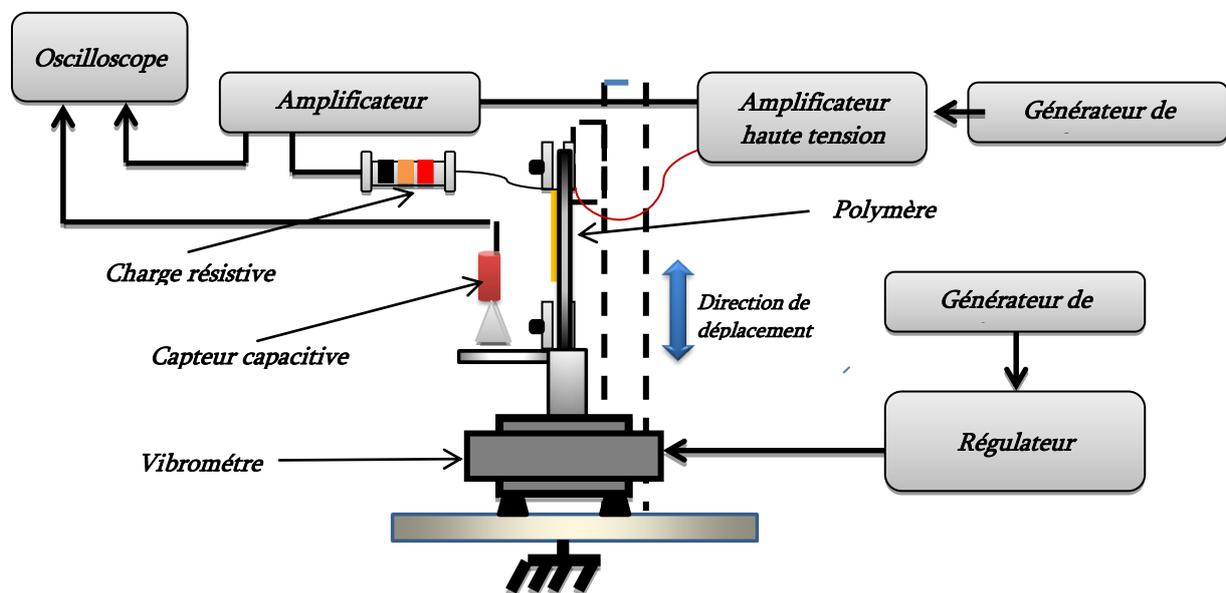
V.2 Principe

V.2.1 Modélisation de la puissance récupérée en mode pseudo-piézoélectrique

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. Deux configurations du système mécanique, sont illustrées à la Figure .V.1. La configuration V.1(a), représente en fait la configuration classique dans lequel l'excitation mécanique et l'étirement du polymère vibrent à la même fréquence f_m . Par conséquent, lorsque le polymère est excité électriquement, le courant récupéré est liée à f_m . En supposant une déformation et un champ électrique uniforme sur l'échantillon, on peut exprimer l'équation macroscopique du courant $I = A \cdot \dot{P}$ (où A correspond à la surface de l'électrode). La relation entre le champ et la polarisation électrique est linéaire quand le champ électrique E est faible, ($P = \epsilon \cdot E$). La puissance récupérée sur la charge a été calculée en utilisant $P = 2 \cdot R I^2$ où R est la charge électrique.

Pour la deuxième configuration (b), la partie principale est une structure métallique sur lequel le film polymère a été attaché. Par conséquent, l'excitation mécanique suite à un cycle donne lieu à deux cycles de déformation du polymère avec une fréquence de $2f_m$. L'avantage principale de cette configuration est la simplicité d'augmenter les capacités de conversion des matériaux électrostrictifs.



(a)

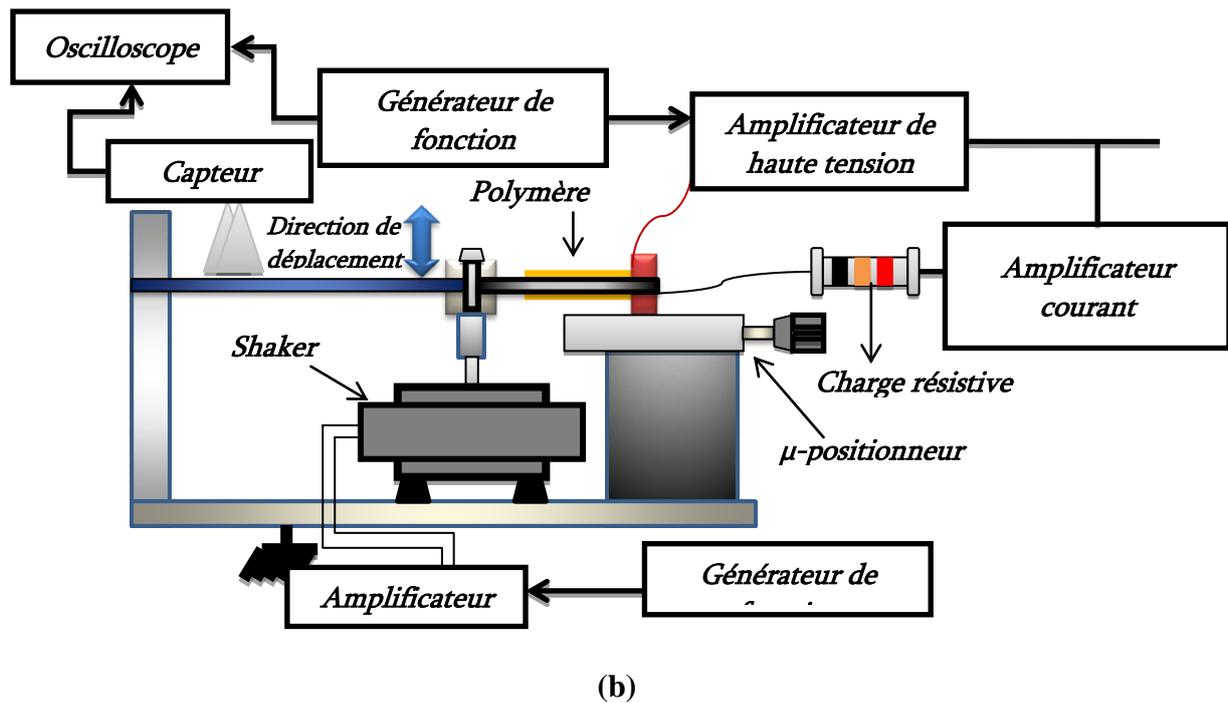


Figure V.1 : Schéma du circuit prototype: (a) l'approche classique, (b) l'approche proposée

Cette partie vise à exposer une dérivation théorique de la puissance de sortie maximale qui peut être obtenue en utilisant des matériaux électrostrictifs. Dans les systèmes de conversion électromécanique deux cas d'excitation mécanique vibratoire de la structure peuvent être considérés.

- a- Le système à couplage direct où les éléments actifs sont couplés à la structure vibrante. Ils convertissent alors directement les ondes mécaniques présentes dans la structure en énergie électrique. Ce type de générateur est particulièrement adapté aux structures se déformant en flexion. L'énergie récupérée dépend dans ce cas directement du champ de contrainte et de la déformation imposé par la structure sur l'élément actif (figure IV.(a)).
- b- 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 (figure IV.(b)).

Dans ces deux configurations, le courant généré par le polymère est utilisé pour mesurer la puissance récupérée. L'approche à la modélisation du courant peut être décrite par l'équation constitutive d'un matériau électrostrictif (y compris l'équation élastique V.1).

$$S_1 = M_{31}E_3^2 + s_{11}^E T_1 \quad \text{V.1}$$

$$D_3 = \varepsilon_{33}^T E_3 + 2M_{31}E_3 T_1$$

Les propriétés électromécaniques et la capacité de récupérer l'énergie des polymères électrostrictifs sont importantes, du point de vue application et compréhension. Cette nouvelle configuration proposée est simple, facile à utiliser et capable d'augmenter la puissance récupérée. Le système mécanique est représenté à la Figure V.2,. Le film de polymère 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.

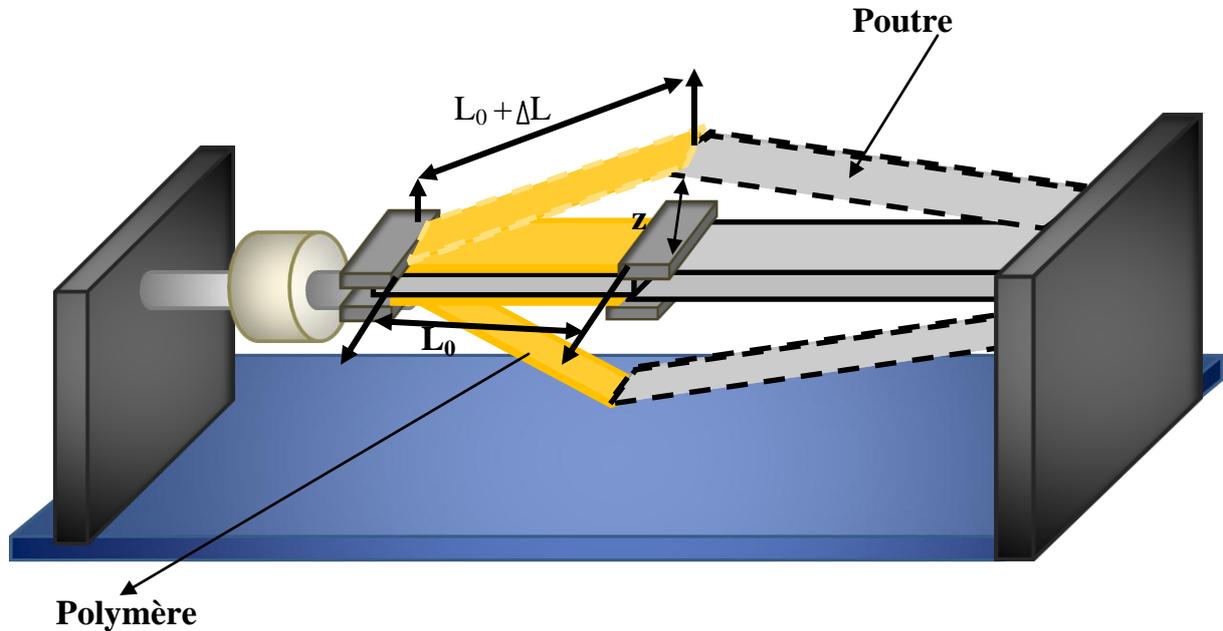


Figure V.2 : Diagramme de la configuration du système mécanique proposé

Le courant induit par la vibration de la poutre est mesuré par la relation suivante :

$$I = \int_A \frac{\partial D_3}{\partial t} dA \quad \text{V.2}$$

D'où :

$$I = \int_A \left[\frac{\partial E_3}{\partial t} \left(\varepsilon_{33}^T + \frac{2.M_{31}.S_1 - 6.M_{31}^2.E_3^2}{s_{11}^E} \right) + \frac{2.M_{31} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} \cdot E_3}{s_{11}^E} \right] dA. \quad \text{V.3}$$

Avec A correspond à la surface de l'échantillon du polymère et D_3 l'induction électrique. Ici $\frac{\partial E_3}{\partial t}$, et $\frac{\partial S_1}{\partial t}$ sont les dérivées temporelles du champ électrique et de la déformation. Comme un champ électrique à courant continu (E_{DC}) est appliqué à l'échantillon de telle sorte que $\frac{\partial E_3}{\partial t} = 0$, l'expression simplifiée du courant généré est donné par :

$$I_{cc} = 2.M_{31}.Y.E_{dc} \cdot \int_A \frac{\partial S_1}{\partial t} dA \quad V.4$$

$$\text{Avec } \frac{1}{s_{11}^E} = Y$$

Ici, Y représente le module de Young. Par conséquent, la puissance récupérée par les polymères peuvent être exprimées par:

$$P_{\text{récupérée}} \propto R_c . I_{cc}^2 \quad V.5$$

En supposant une déformation uniforme appliquée sur le polymère, la relation entre le déplacement et la déformation S_1 peut être écrite comme suit:

$$S_1 = \frac{\Delta L}{L_0} \quad V.6$$

Pour la deuxième configuration, S_1 peut être déterminée indirectement contrairement à la première configuration à partir des paramètres de l'échantillon, la longueur de couche L_0 et z qui représente le déplacement vertical de la poutre au point de raccordement.

De l'équation V.4, on voit bien que le courant généré dans la première configuration dépend de la fréquence f_m , 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 $2f_m$ suite aux deux étirements.

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

$$P_{\text{max}} = \frac{(\alpha^2 . E_{dc}^2 . S_m^2)}{4.C_p} . f \quad V.7$$

Pour la deuxième configuration proposée, la puissance récupérée est déterminée par l'équation (8):

$$P_{\text{récupérée}} \propto R_c \cdot 4 \cdot M_{31}^2 \cdot Y^2 \cdot E_{dc} \cdot \left[\int_A \frac{\partial S_1}{\partial t} dA \right] \propto R_c \cdot 4 \cdot M_{31}^2 \cdot Y^2 \cdot E_{dc} \cdot 2f_m \quad \text{V.8}$$

Il est clair à partir des équations V.7 et V.8 que la puissance récupérée dans la seconde configuration a été deux fois plus grande que celle de la première configuration. Le schéma électrique équivalent est représenté sur la figure V.3 [18], dans lequel R_c est la charge électrique

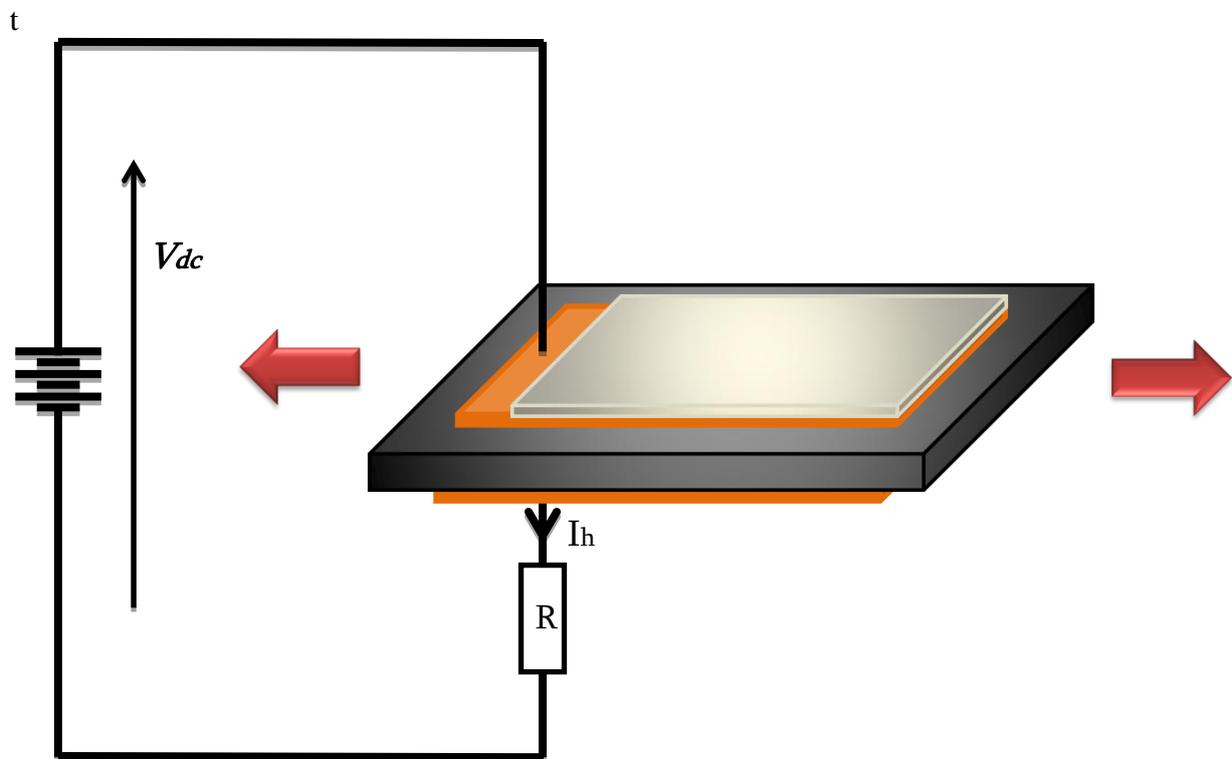


Figure. V.3. Schéma électrique équivalent simplifié

Une charge purement résistive directement reliée à l'élément électrostrictif. Les travaux de la référence [91] démontrent que, lorsque le mode de fonctionnement d'un polymère est pseudo-piézo-électrique, la composante alternative du champ induit par la charge de la résistance peut être négligée par rapport au champ électrique de polarisation à courant

$$\text{continu: } I = \alpha \cdot E_{dc} \cdot \frac{\partial S_1}{\partial t} - C_p \cdot \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{V.9}$$

Avec $\alpha = 2 \cdot M_{31} \cdot Y \cdot A$

La tension dynamique sur l'élément électrostrictif peut être exprimée ainsi dans le domaine fréquentiel

$$\tilde{V} = \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot R_c}{1 + jR_c \cdot C_p \cdot 2\pi f} \cdot j2\pi f \cdot \tilde{S}_1 \quad \text{V.10}$$

Où j est l'indice de la partie imaginaire, et f est la fréquence de vibration. La puissance récupérée peut être écrite en fonction de l'amplitude de déformation.

$$P = \frac{\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 \cdot R_c \cdot (2\pi f)^2 S_m^2}{1 + (R_c + C_p 2\pi f)^2} \quad \text{V.11}$$

A partir de cette équation, on voit clairement qu'il ya une forte relation entre la puissance récupérée et la fréquence de fonctionnement.

Ainsi, pour la charge adaptée, la puissance maximale récupérée est égale à:

$$P_{\max} = \frac{(\alpha^2 \cdot E_{dc}^2 \cdot S_m^2)}{4 \cdot C_p} \cdot f \quad \text{V.12}$$

Il peut être démontré facilement d'après l'équation V.12 que la puissance maximale ne dépend pas seulement des propriétés des matériaux, mais aussi de l'état extérieur et les dimensions géométriques de notre polymère (surface, longueur des électrodes, E_{dc} , S_M et f). Les résultats expérimentaux dans la section suivante, montreront que la permittivité relative est presque constante dans une large plage de fréquence. En outre, dans les deux configurations mentionnées ci-dessus, il est clair que la fréquence f de fonctionnement est le seul paramètre qui intervient dans la variation de la puissance récupérée.

V.3 Dispositif expérimentale

La préparation expérimentale de l'échantillon a été décrite en détail dans le chapitre précédent. Ces composés de polyuréthane ont été préparés au laboratoire LGEF, en utilisant l'élastomère du type 58887 TPU (Estane) comme matrice. Figure .V.4 montre une photographie d'un échantillon d'essai avec les électrodes d'or (dimension des électrodes : 1.6 x 4.0 cm²).

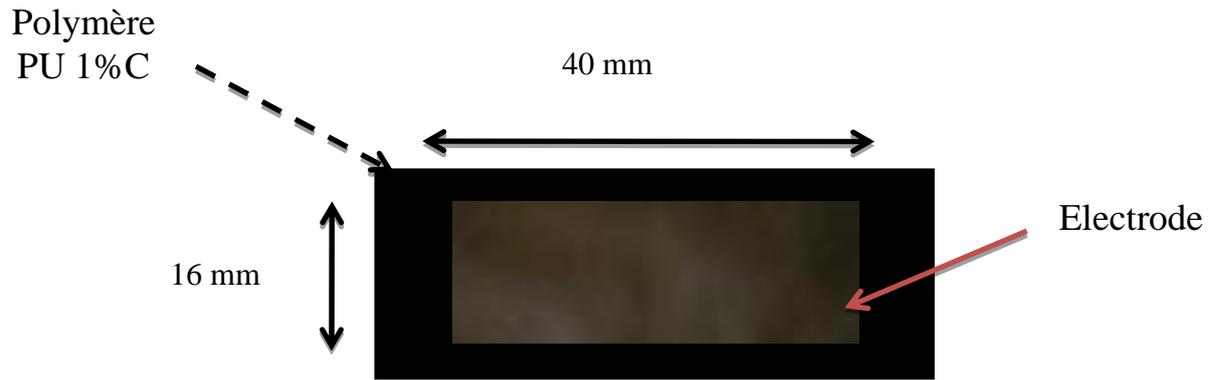


Figure. V.4. Photographie d'un échantillon de polymère d'essai de Pu 1% C avec des électrodes d'or.

Les mesures de la constante diélectrique ont été effectuées en utilisant un Solartron 1255 avec une interface 1296 (Figure .V.5). Le module de Young des films a été évalué à l'aide d'une table typr Newport.

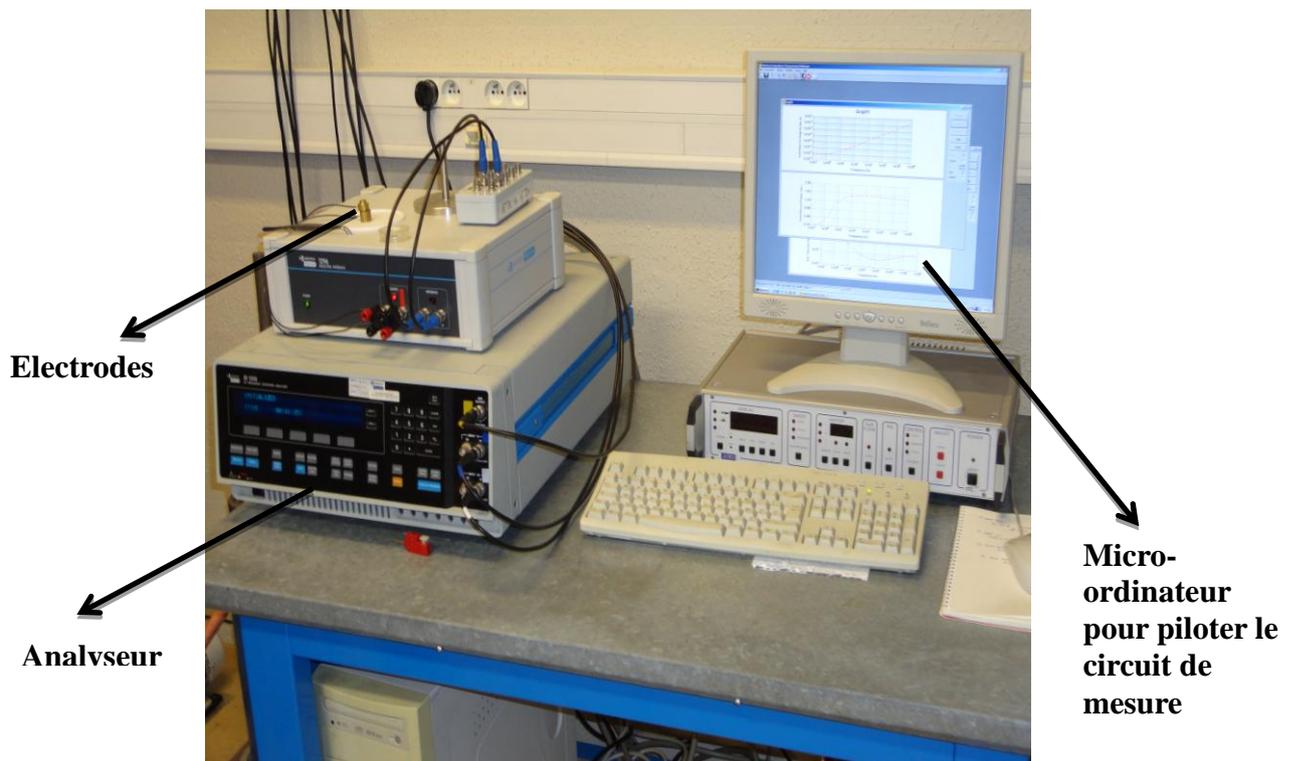


Figure V.5: Banc de mesure de la permittivité Solartron 1255.

Le constant diélectrique a été calculée à partir de la capacité à la température ambiante, et les résultats sont présentés dans la Figure V.6. Ces valeurs expérimentales montrent que le constant diélectrique diminue quand la fréquence augmente. La permittivité relative du polymère est quasi constante sur une large bande de fréquence. Cela correspond au plateau de la polarisation d'orientation. Pour les fréquences inférieures à 1Hz une augmentation significative de la permittivité est observée.

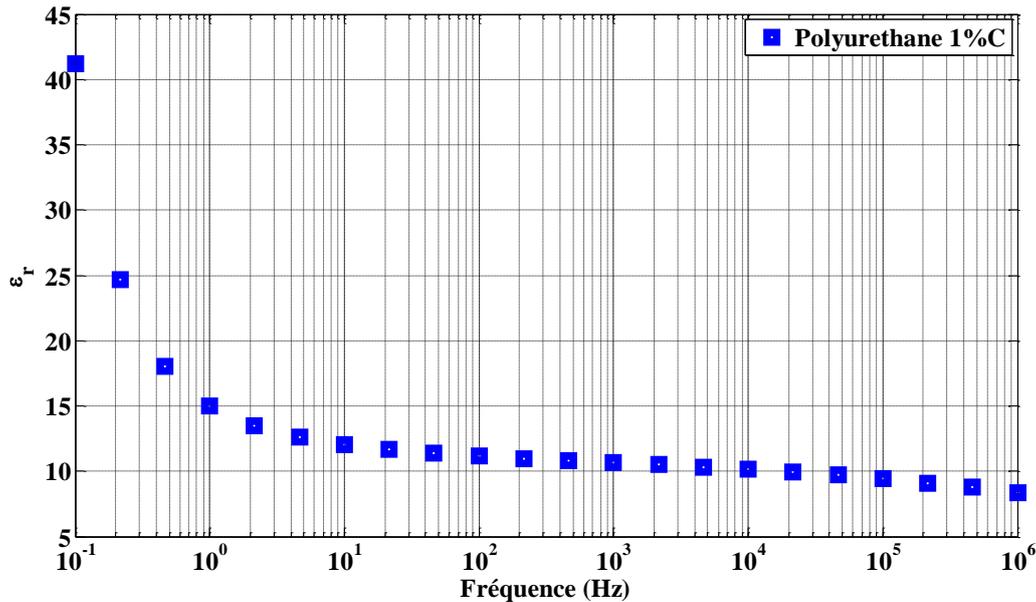


Figure V.6 : La permittivité diélectrique en fonction de la fréquence

La partie suivante présente le banc expérimentale pour les deux configurations, et ces deux expériences vont nous permettre d'évaluer la puissance récupérée des polymères d'électrostriction. Les mesures pour déterminer le courant récupérée pour les deux configurations sont présentées dans la figure V.7 et la Figure V.8. Le film est étiré avec une amplitude maximum de déformation de 0.5 % dans les deux configurations. Dans la première configuration, 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 entrainé l'échantillon à une vibration transversale. Le capteur capacitif (FOGALE MC 940) sert à mesurer le déplacement transversal de l'échantillon à partir duquel la déformation S_1 est calculée. La deuxième configuration, est représentée dans la Figures V.8, le film de polymère 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, qui est

commandé par un générateur de fonction 33120A et un amplificateur audio (Pro-Acoustique CT600). Le polymère était soumis à un champ électrique continu (DC polarisation), fournit par un générateur de fonction et amplifié avec un amplificateur à haute tension du model (TREK Model 10/10 High-voltage Power Amplifier). Le courant récupéré est mesuré à l'aide un amplificateur de courant (Keithley 617)

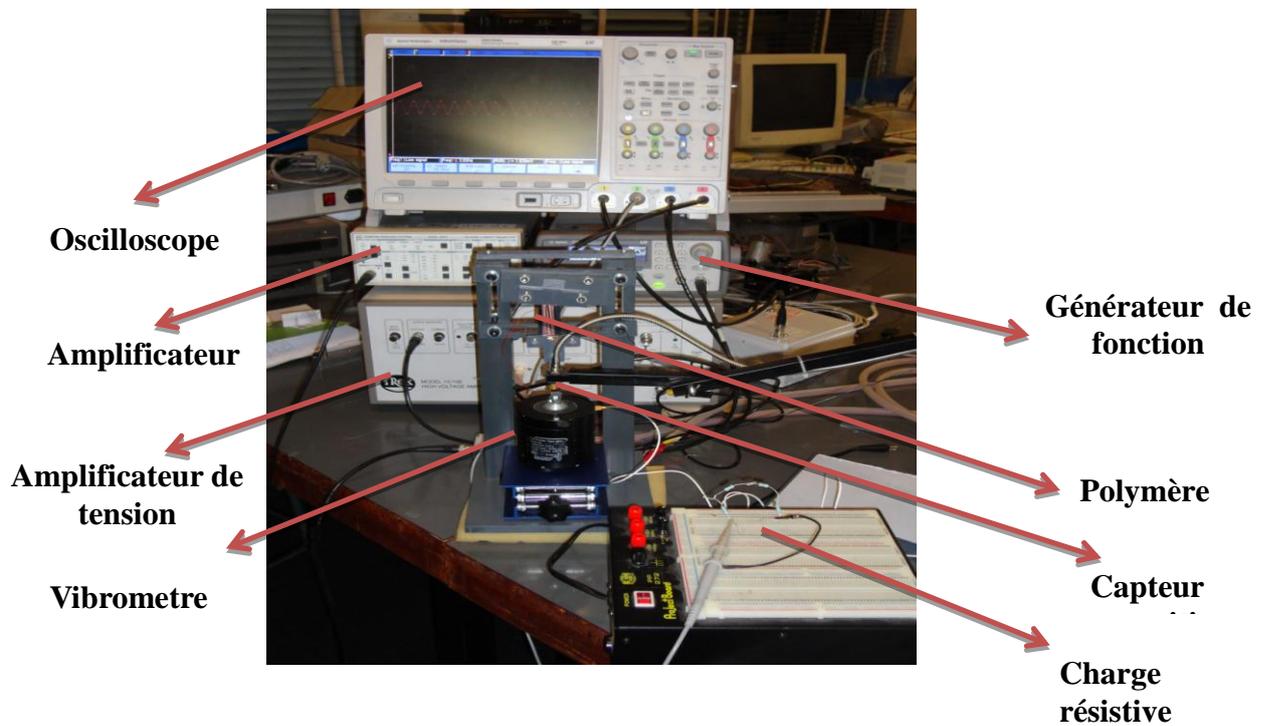


Figure V.7 : Banc expérimentale pour une Configuration classique [92].

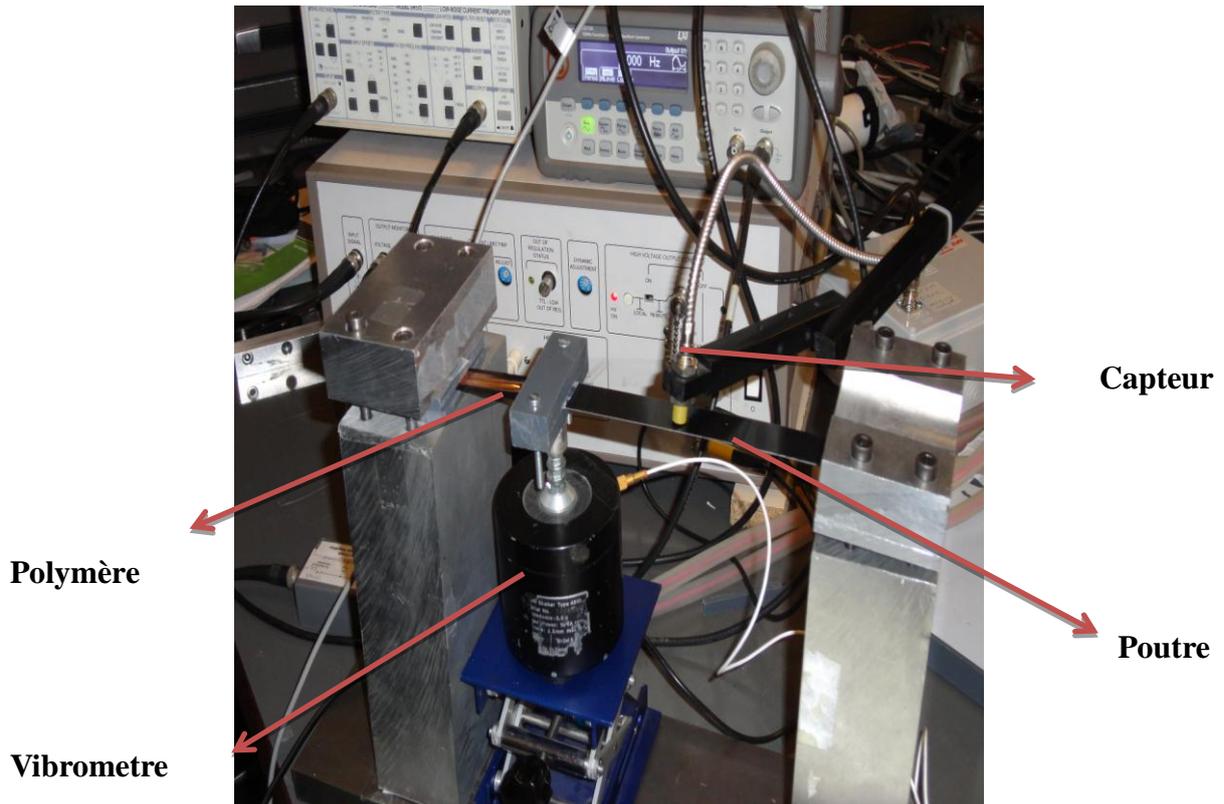


Figure V.8 : Banc expérimentale pour une Configuration proposé.

V.4 Validation du modèle

Le film a été étiré avec une amplitude maximum d'une contrainte de 0.5% à 3 hertz dans les deux configurations. Les paramètres des polymères utilisés dans cette expérience sont donnés dans le Tableau. V.1

Permittivité relative ϵ_r	Modul de Young Y (MPa)	Surface A (cm ²)	Epaisseur e (µm)
11	34	4x1.6	52

Tableau V.1 : Caractéristiques du polymère (PU 1 vt% C)

. La variation du courant récupérée et le déplacement en fonction de temps sont présentées dans la figure .V.9 (a) et Figure V.9(b). L'analyse de ce courant, montre bien que le courant est en phase avec le déplacement dans le cas de la première configuration, alors que pour la deuxième configuration il y a une augmentation du courant récupérée avec une fréquence

double par rapport à celle du déplacement.

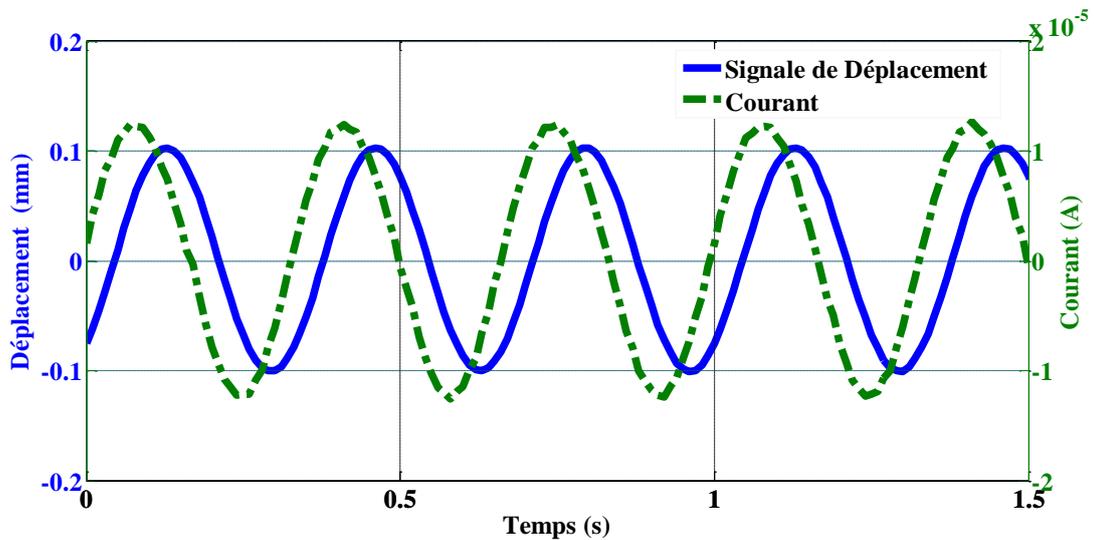


Figure V.9 (a) Courant mesuré et déplacement pour la configuration classique

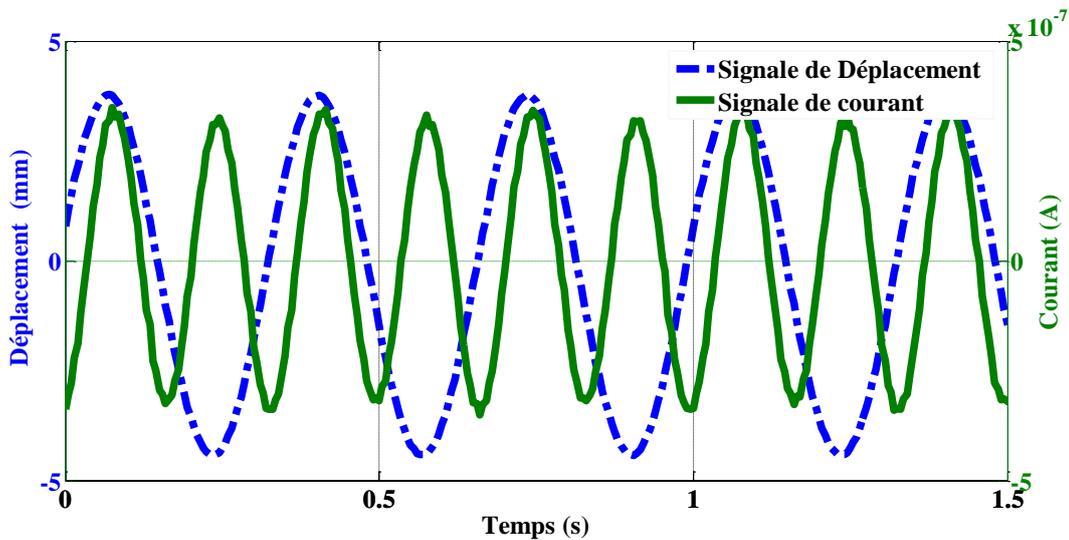


Figure V.9 (b) Courant mesurer et déplacement pour la configuration proposée

Diverses solutions existent pour améliorer l'énergie récupérée. On peut par exemple augmenter la surface de l'électrode du polymère, du champ électrique de polarisation, ou de la déformation, mais également de la fréquence. Ce dernier paramètre était un facteur important dans la conversion. On a démontré, dans équation V.4, que le courant varie en fonction de plusieurs paramètres. Ainsi, pour démontrer la dépendance de la fréquence des

deux configurations, le courant a été mesuré en fonction du champ électrique statique (Figure V.10) pour une déformation constante S_1 0.5%, et également en fonction de la déformation (Figure V.11) pour un champ électrique statique constant. L'ensemble des mesures réalisées au cours de cette partie a permis de démontrer la validité du modèle.

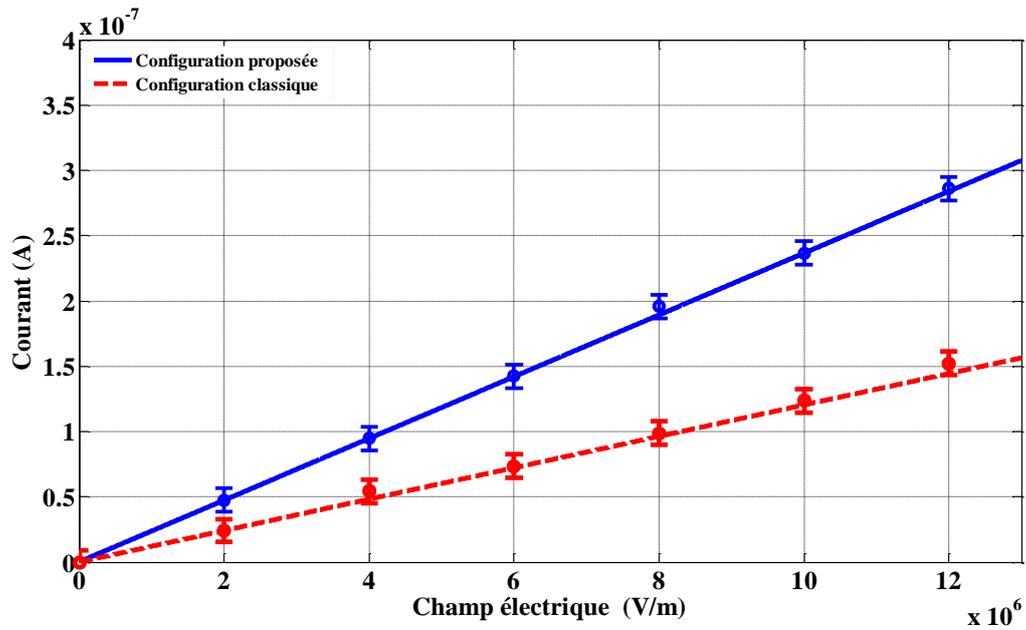


Figure V.10 : Courant récupérée en fonction du champ électrique pour les deux configurations avec une déformation constante S_1 0.5%,

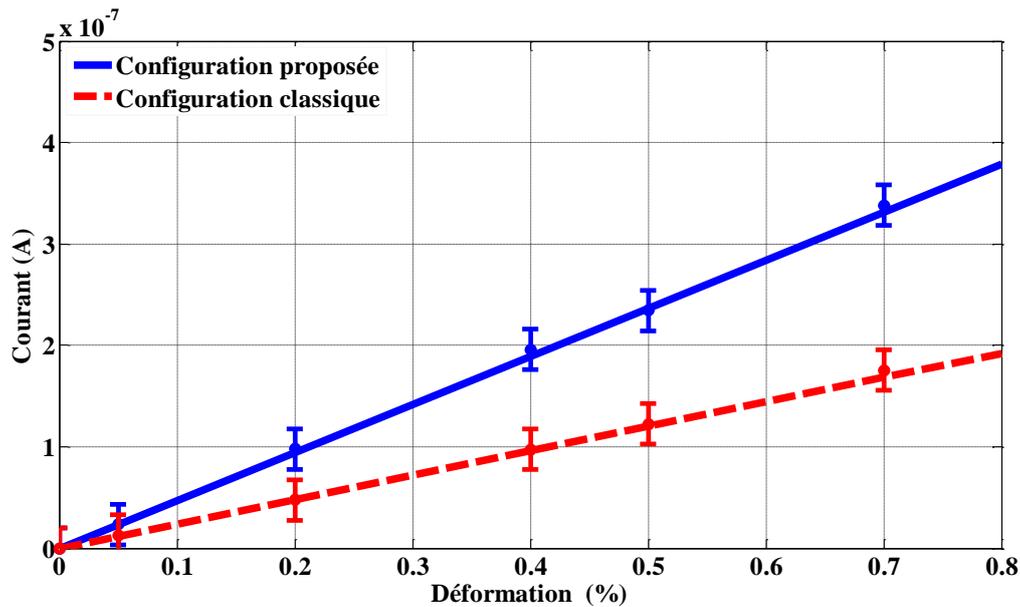


Figure V.11 : Courant récupérée en fonction de la déformation pour les deux configurations avec Champ électrique constante $10\text{V}/\mu\text{m}$,

Ce résultat montre bien une dépendance linéaire entre le courant et la fréquence comme il a été montré, Eq.(V.4), puisque le produit des deux paramètres $M_{31} \cdot Y \approx \varepsilon_r$ est maintenu constant dans l'intervalle de fonctionnement comme montré à la Figure .V.6. Il est aussi intéressant de connaître la variation de la puissance récupérée en fonction de la charge, toujours dans le but de valider le modèle développé au paragraphe V.2

La prochaine expérience permet de valider l'évaluation de la puissance récupérée. Selon la théorie présentée dans la section V.2, la différence de cette manipulation par rapport aux dernières expériences réside dans l'ajoute d'une résistance électrique supplémentaire pour mesurer la puissance récupérée en charge. Les Figures V.12 et de figue V.13 présentent la puissance en fonction de la charge pour un champ électrique donné de $10\text{V}/\mu\text{m}$ et une déformation de 0.5%. Ces figures, donnent les valeurs de la puissance théorique et pratique pour différentes charges et pour une déformation et un champ électrique constants. Un bon accord entre la théorie et la pratique est noté pour les deux cas. L'avantage de la configuration proposée a clairement démontré une augmentation de la puissance récupérée de 80% par rapport à la technique standard, sans utilisation d'un circuit électronique. Le deuxième avantage de cette structure est que la puissance récupérée augmente au fur et à

mesure avec la diminution de la résistance optimale. Ces essais semblent bien contribuer au développement d'une technologie de récupération innovatrice qui met à profit les vibrations basse fréquence de l'environnement pour les convertir en électricité à fréquence plus élevée.

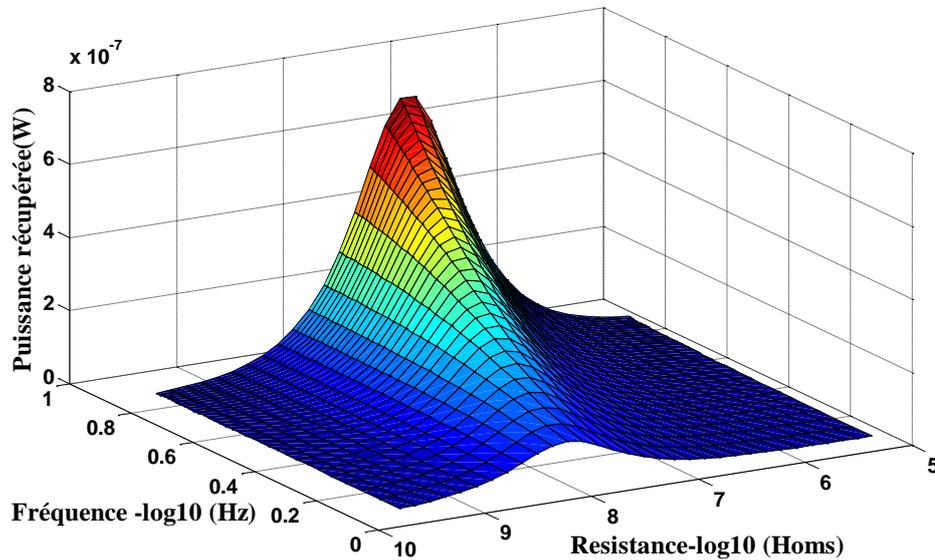


Figure V.12 : Puissance récupérée en fonction de la résistance et la fréquence

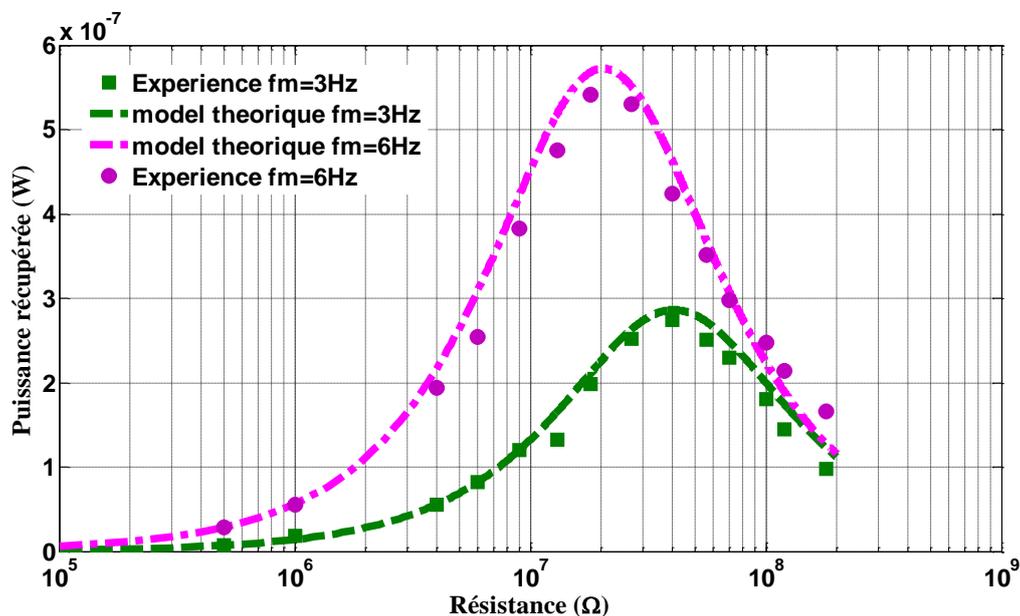


Figure V.13 : Puissance récupérée théorique et expérimentale en fonction de la résistance

Ces séries de mesures ont permis de mettre en évidence l'avantage d'utiliser des charges. La connexion d'une charge contribue à l'amélioration des propriétés de conversion électromécanique des polymères électro-actifs particulièrement en terme de l'amplification de

la fréquence. Bien qu'on note une amélioration en puissance récupérée à des fréquences élevées, l'inconvénient du faible champ électrique de polarisation est posé. Pour palier au problème lié au champ électrique maximum que peut supporter le polymère, une nouvelle structure hybride basée sur l'effet des électrets cellulaires de polypropylène est proposée dans ce manuscrit. La méthode consiste à polariser l'échantillon par effet corona sous haute tension utilisant un composé d'électrostriction de polyuréthane à 1 % de noir de charbon. Celle-ci permet d'augmenter aussi l'efficacité de la conversion électromécanique.

V.5. Banc expérimental de la méthode de décharge corona

L'effet corona, appelé aussi effet Couronne, désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à haute tension. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation de l'air elle-même due aux charges électriques de l'air (paires ions positifs - électrons libres, créés par rayonnement cosmique ou par radioactivité naturelle). Lorsque ces électrons sont soumis à un champ électrique, ils sont accélérés. Si le champ est assez intense, l'énergie qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'ils heurtent (ionisation par choc). La masse de l'électron, beaucoup plus faible que celle de l'ion, est fortement accéléré, et entre en collision avec des atomes neutres. Ce qui tend à créer de nouvelles paires électrons/ions positifs, qui suivront le même processus. On parle d'effet d'avalanche. Il se crée de nouveaux électrons libres, lesquels, soumis au même champ, vont également ioniser des molécules et ainsi de suite. Le processus prend une allure d'avalanche. Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une taille critique, et que le champ électrique ait une valeur suffisante. Dans les conditions normales de l'air cette valeur est voisine de 30 kV/cm et le phénomène évolue jusqu'au claquage de l'intervalle entre les électrodes [100]. Selon la polarité de l'électrode (figure .V.13) l'effet corona est dit positif (si la polarité est positive). L'effet corona est dit négatif si cette polarité est négative [100].

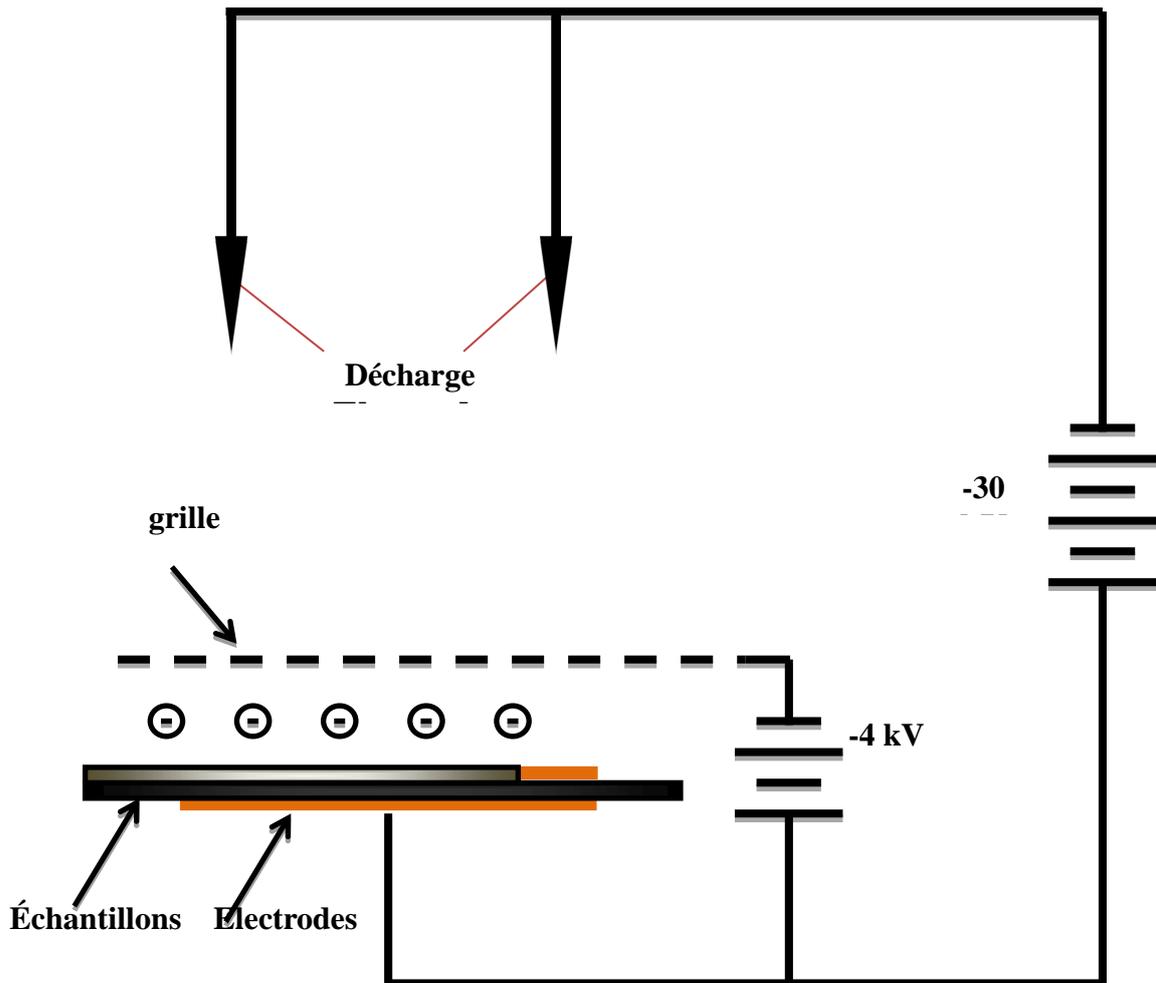


Figure V.13 : principe de polarisation avec effet corona

V.5.1 Méthode de la polarisation directe

Cette méthode est la plus simple. Elle consiste à appliquer directement entre les deux faces métallisées de l'échantillon un champ électrique continu intense (supérieur au champ coercitif du matériau) à une température entre 100 °C et 120°C pendant quelques minutes. Pour éviter le claquage de l'échantillon, il faut le mettre dans un bain d'huile de très haute résistivité. Parfois, pour obtenir des échantillons avec une très haute qualité, il est nécessaire de lisser l'échantillon sous champ et de baisser la température jusqu'à la température du milieu ambiant. Le dispositif expérimental est représenté sur la figure V.14.

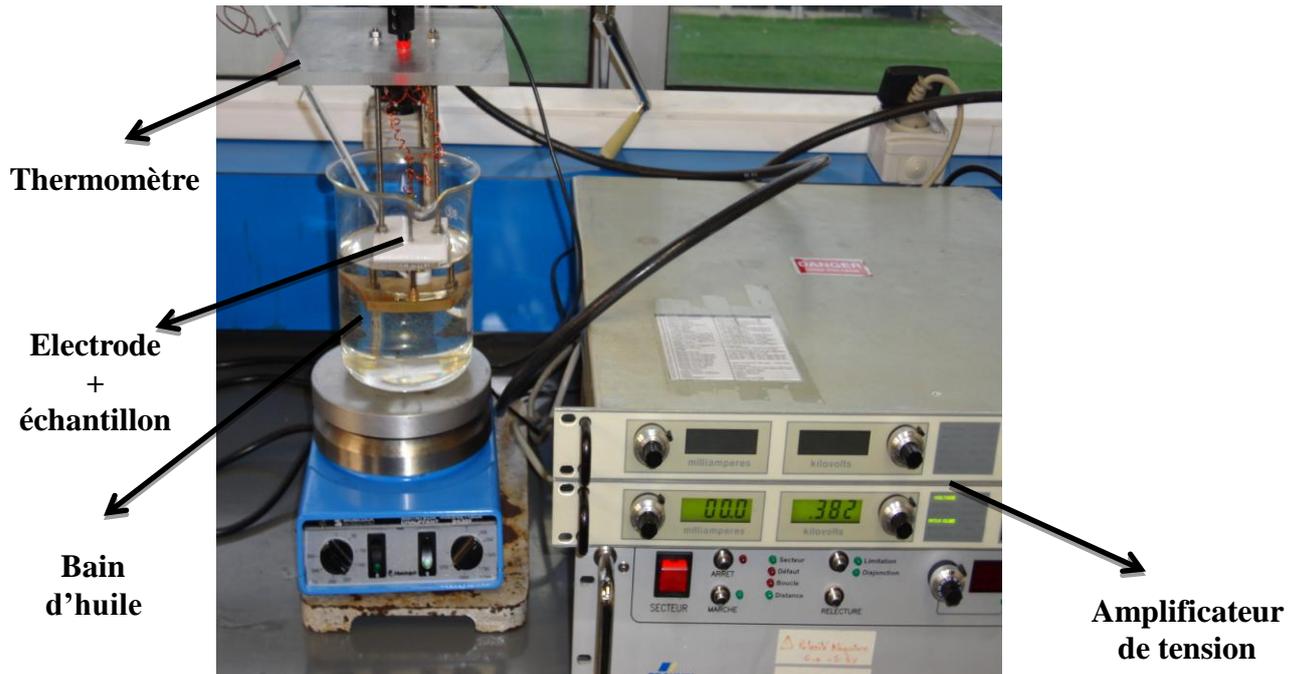


Figure V.14: Banc expérimentale pour la polarisation directe

Pour ce procédé, les charges électriques ont été injectées pour une durée de 10 minutes par la surface non-métallisée des échantillons qui ont été placés sous une grille inoxydable (la taille du tamis était de $150\ \mu\text{m}$) afin de maintenir un potentiel extérieur uniforme. Dans le but d'étudier l'influence de l'injection des charges et son influence sur les caractéristiques d'électrostriction d'un échantillon entièrement chargé, les tensions corona ont été maintenues à -30 kilovolt et une tension de grille de -4 kilovolt .

l'échantillon de polymère utilisé était sous forme rectangulaire de dimension ($55 \times 22\ \text{mm}^2$) et avec une épaisseur de $52\ \mu\text{m}$. Les dimensions de la surface de l'électrode d'or étaient de $40 \times 16\ \text{mm}^2$, L'échantillon du polypropylène cellulaire du type , PQ50 était d'une épaisseur de $50\ \mu\text{m}$ et d'une densité de $600\ \text{kg/m}^3$, respectivement. Il a été fourni par Sodinor Company (France). la Les deux films ont été attachés l'un à l'autre avec une colle conductrice afin d'obtenir un raccordement électrique entre les deux échantillons. Ceci est schématiquement illustré dans la figure. V.15

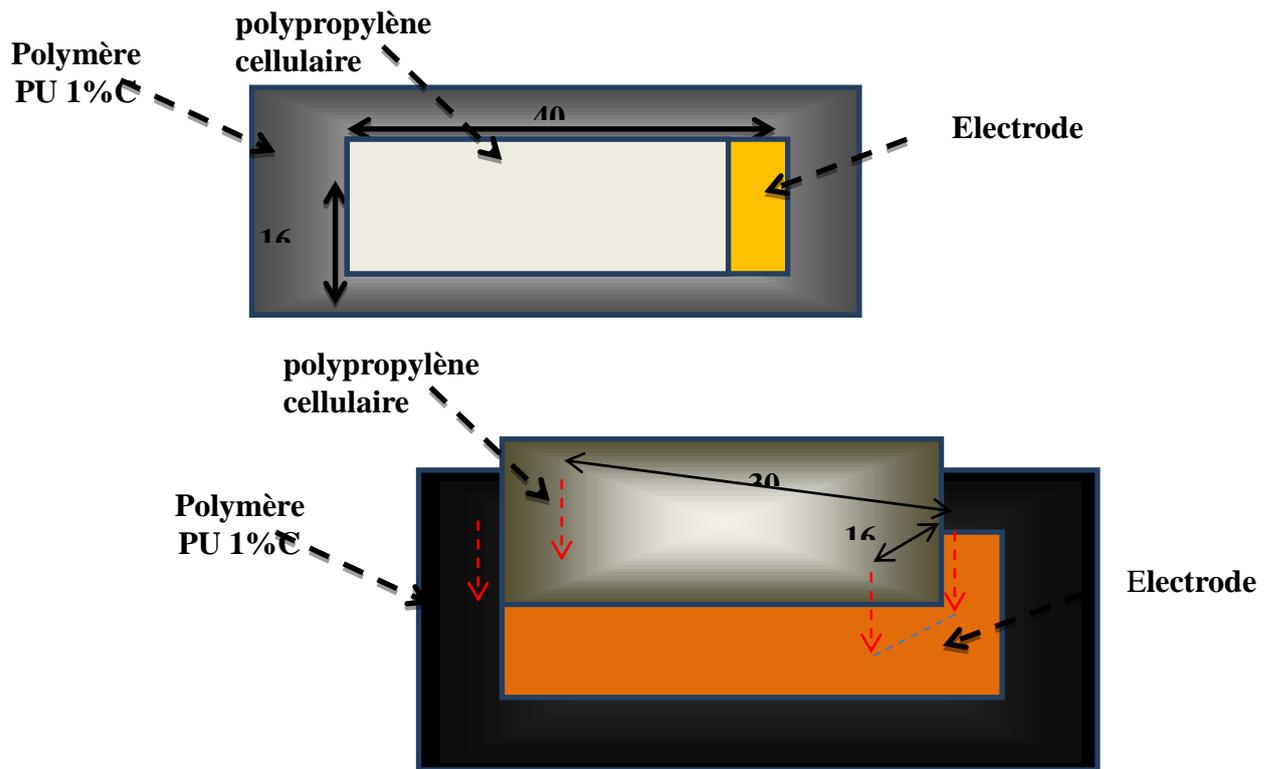


Figure V.15 : Schéma d'hybridation des deux films polypropylène et Pu1%C

Les mesures du constant diélectrique ont été effectuées en utilisant un Solartron 1255, 1296 et le module de Young des films a été évalué à l'aide d'une table de Newport. Les résultats de la mesure effectuée à 1 Hz sont récapitulés dans le tableau V.2.

Matériaux	Permittivité relative	Module de Young (MPa)	Epaisseur (μm)	Surface (cm^2)
Polyurethane (PU 1%C)	15	40	52	6.4
Polypropylene	2.1	10^3	50	4.8

Tableau V.2 : Propriétés des deux polymères Polyurethane et Polypropylene

La figure V.16 (a, b) montre la variation de la déformation et le courant récupérée en fonction du temps pour un système hybride constitué d'un film polyuréthane 1%C avec une épaisseur de 52- μm et le film de polypropylène (pp). Ayant 50- μm comme épaisseur. Le

champ de polarisation E_{dc} , la contrainte S_1 et la fréquence mécanique étaient respectivement fixés à 0.4 V/ μm , 3% et 15 Hz

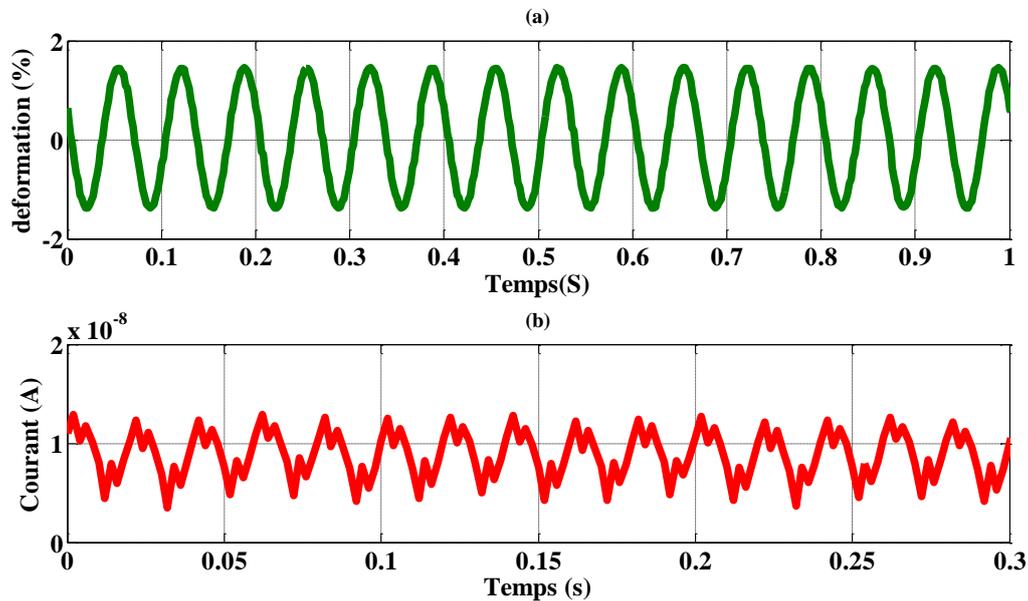


Figure V.16 (a) : La déformation (S_3) en fonction du temps ;(b) le courant de court-circuit I_{cc} en fonction du temps.

Le model analytique qu'on a traité dans les parties précédent montre bien qu'il y avait un rapport linéaire entre le champ électrique et la dérivé de la déformation. Pour montrer la performance de cette structure en ce qui concerne pour la récupération d'énergie, et pr la même valider la configuration proposée, le courant est mesuré en fonction du champ électrique et de la dérivé statique de la contrainte. Les résultats sont présentés sur les figures V.17 et V.18, respectivement. Ces courbes montrent la comparaison entre les deux structures avec et sans film de polypropylène. Nous pouvons constater bien que par cette nouvelle structure, le courant récupéré est augmenté sans variation de la polarisation du champ électrique (E_{dc}) ou la déformation (s), de ce fait il est possible d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique des polymères d'électrostriction par ce nouveau procédé..

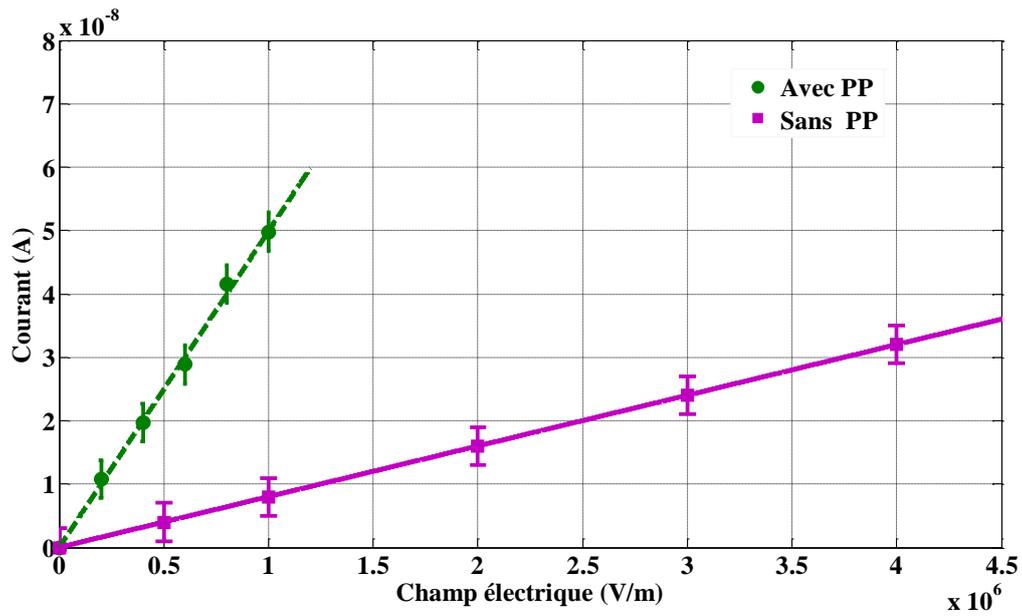


Figure V.17: Courant de court-circuit à 15Hz en fonction du champ E_{dc} à une déformation constante $S_I = 3\%$.

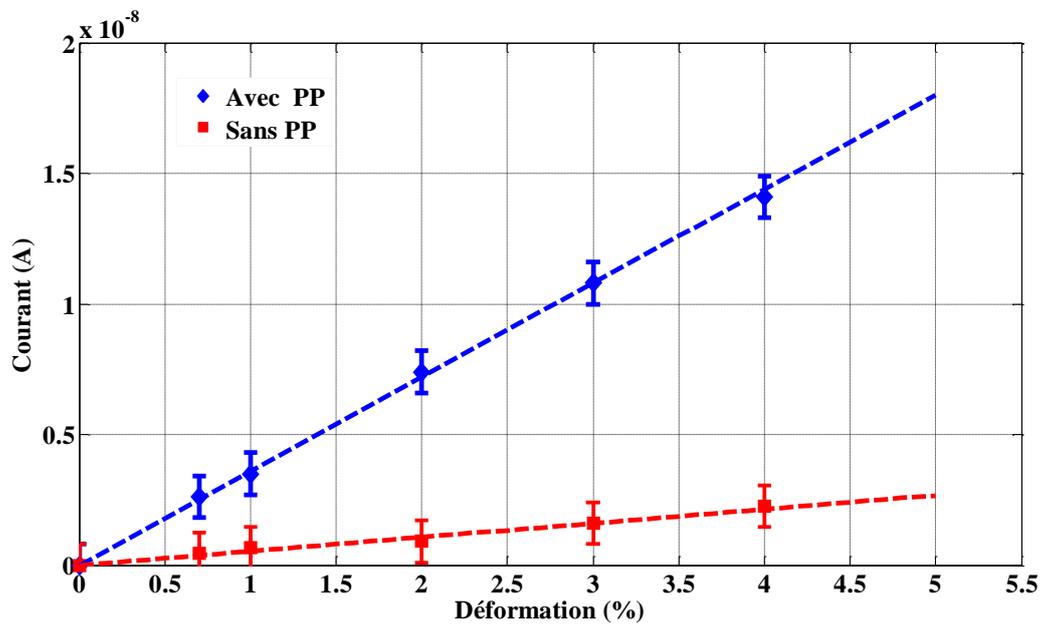


Figure V.18 : Courant de court-circuit à 15Hz en fonction de la déformation à un champ $E_{dc} = 0.4 V/\mu m$

L'analyse de ces données expérimentales montre bien par exemple, pour un champ de polarisation de $1 \text{ V}/\mu\text{m}$, le courant récupéré avec l'utilisation du système hybride avec polypropylène était environ 50 nA , en comparaison, avec celle obtenue sur un échantillon sans PP, le courant n'est que de l'ordre de 9.6 nA . Le courant récupéré avec le système hybride est 5 fois plus grand que celui obtenu avec uniquement du Pu 1% C. Le système hybride suscitera probablement un intérêt particulier au sein de la communauté des matériaux intelligents et émergents.

L'expérience suivante permettra de valider l'augmentation de la puissance en charge. La figure 19 montre la variation de cette puissance en fonction de la charge pour un champ électrique donné ($0.4 \text{ V}/\mu\text{m}$), une déformation de (3%) à 15 Hz et pour de différentes valeurs de la résistance. Les mesures précédentes ont été réalisées pour une charge adaptée de $60 \text{ M}\Omega$ correspondant au maximum de transfert de puissance. La structure hybride tel qu'on observe sur la figure V.19 contribue à l'augmentation de la puissance, du rendement et par conséquent une amélioration de la conversion électromécanique des polymères d'électrostriction.

Dans le cas actuel, l'efficacité de la conversion est de l'ordre de (78.14%). La puissance récupérée est plus élevée que celle consommée par la polarisation en travaillant en mode pseudo-piézoélectrique.

Cependant, en l'absence des électrets cellulaires de polypropylène et pour les mêmes valeurs du champ électrique statique ($0.4 \text{ V}/\mu\text{m}$), et déformation de (3%) et la fréquence mécanique (15 Hz), la puissance consommée serait plus grande que la puissance récupérée, ce qui rend l'efficacité de la conversion négative.

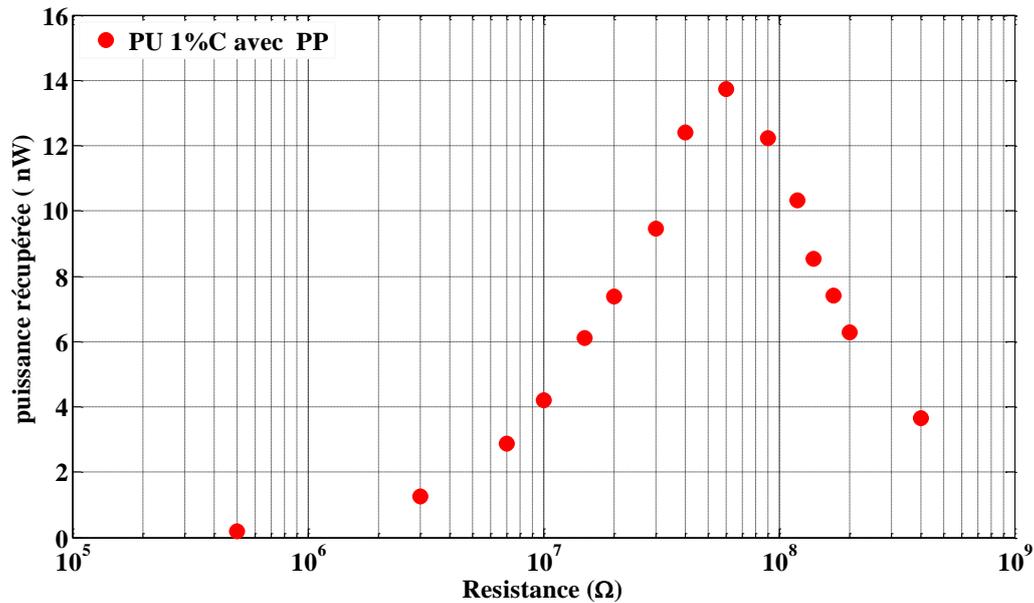


Figure 19 : La puissance récupérée expérimentale à 15 hertz en fonction de la charge pour un champ électrique statique $E_{dc} = 0.4 \text{ V}/\mu\text{m}$ et une déformation transversale $SI = 3\%$.

Le tableau V.3 donne la puissance nécessaire pour la polarisation, ainsi la puissance récupérée (à 0.4 MV/m et à 15 Hz). La dernière colonne du tableau montre les valeurs de l'efficacité de la conversion d'énergie.

Matériaux	$P_{\text{polarisation}}$ (nW)	$P_{\text{récupérée}}$ (nW)	Efficacité de la conversion (%)
PU 1%C+PP	3.84	13.93	78.14

Tableau V.3 : Bilan des puissances pour la structure hybride

V.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, la maximisation de la puissance récupérée par les polymères et composites électrostrictifs a été réalisée. La première étape a consisté l'application d'une nouvelle approche pour augmenter les capacités de conversion des polymères sans utilisation

d'un circuit électronique. Basé sur un mécanisme de doublure de la fréquence à travers une structure mécanique proposée, nous avons mesuré également un courant dynamique plus élevé. Une bonne concordance entre le modèle mathématique et les données expérimentales a été trouvée. Selon les résultats expérimentaux, il a été constaté que la puissance résistive maximale pourrait atteindre $0.5 \mu\text{w}$, ce qui représente 80% de plus que celle des techniques classiques.

La deuxième partie de ce chapitre présente une nouvelle méthode pour augmenter l'efficacité de la conversion dans les polymères électro-actifs et les composés, en exploitant l'effet du polypropylène cellulaire sur les polymères pour augmenter la conversion électromécanique. Il est également possible d'obtenir un courant dynamique plus élevé avec l'utilisation de polypropylène cellulaire chargé par un champ électrique statique plus faible. La valeur mesurée a montré l'excellent potentiel de cette technique pour la récupération de l'énergie.

Les deux structures proposées dans ce chapitre représentent 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.

CHAPITRE VI :

SYSTEME DE GESTION ET DE TRANSFERT DE L'ENERGIE GENEREE

Système de gestion et de transfert de l'énergie générée

Jusqu'a présent nous avons montré les potentialités des micro générateurs à base de polymères électro-actifs, en utilisant une charge purement résistive pour évaluer l'énergie disponible. Dans ce chapitre nous présentons la thématique de transfert de l'énergie produite entre le générateur. Une unité de stockage est dédiée aux techniques permettant d'exploiter l'énergie récupérée. Nous étudions les techniques permettant de transformer l'énergie récupérée par le convertisseur électrostatique en une énergie utile, exploitable par un circuit électronique de mesure, un microprocesseur...et nous montrons que cette étape peut être réalisée par des procédés et des circuits électroniques simples. Nous détaillons ici la problématique de couplage du système mécano-électrique qu'on a traité dans le chapitre précédent avec le circuit électronique de conditionnement de l'énergie électrique.

VI.1 Introduction

De manière générale, un micro générateur à base de polymère électro-strictif est constitué d'un dispositif mécanique capable de transmettre une sollicitation mécanique à un élément du polymère, lui-même relié à un circuit électrique constituant le récepteur d'énergie. La différence de potentiel entre les électrodes terminales de l'élément de polymères dépend essentiellement de la sollicitation mécanique et du comportement de la charge électrique.

Comme on a mentionné au chapitre précédent on peut distinguer deux régimes de fonctionnement

- 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.
- 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 est particulièrement adapté aux structures se déformant en flexion. L'énergie récupérée dépend dans ce cas directement du champ de contrainte et de la déformation imposée par la structure sur l'élément actif.

Ces micros générateurs piézoélectriques ont généralement pour vocation d'alimenter des circuits électroniques à très faible consommation moyenne tels que capteurs, télécommandes ou des dispositifs pouvant accumuler de l'énergie pour une utilisation intermittente [101].

La tension de sortie du système de récupération d'énergie est alternative et peut atteindre plusieurs volts. Cependant, pour rendre cette tension compatible avec les besoins d'un circuit électronique d'un capteur autonome, ces circuits requièrent généralement une tension d'alimentation continue, obtenue par redressement et filtrage de la tension alternative délivrée par des couches céramiques piézoélectriques. Un convertisseur continu/continu est parfois disposé entre le condensateur de filtrage et le circuit à alimenter.

Les tensions d'alimentation de la plupart des composants sont aujourd'hui de l'ordre de 1,8 V. La tendance est d'utiliser à l'avenir des tensions de 1,1 V pour les processeurs. Le plus gros consommateur est l'amplificateur de puissance. Il faut pour ce composant une tension de 3,6 V et il est directement alimenté par la batterie. Il semble peu probable que la tension d'alimentation de ce composant diminue. Un intérêt supplémentaire est à noter pour les batteries à Lithium.

L'évolution des capacités moyennes a peu évolué dans le temps. Il y a quelques années, il était nécessaire d'avoir une capacité moyenne de 900 mAh maintenant on est plutôt à 800

mAh. Les nouvelles applications dans les téléphones avec par exemple les services multimédias ne vont pas faire diminuer les besoins en capacité des batteries. Les constructeurs sont toujours confrontés à trouver le compromis entre le coût, le poids et le volume et l'autonomie.

VI.2 transfert de l'énergie électrique à partir d'une source de polymère électro-strictif

Dans les chapitres précédents, il a été montré que les polymères électro-strictifs peuvent produire l'énergie électrique lorsqu'ils subissent une force mécanique. Cependant, l'énergie produite par l'effet de ces polymères, est dans la plupart des cas non suffisantes pour actionner directement les dispositifs électroniques. Donc, une méthode d'accumulation et de stockage de l'énergie générée, pour qu'il puisse être employé dans l'avenir, est un aspect important.

Le système de récupération associé au système de stockage de l'énergie joue un rôle important car l'énergie générée n'est en général pas directement utilisable par le dispositif portable ciblé.

La conversion de l'énergie électrique délivrée par un générateur piézo-électrique par exemple est un problème qui a été soulevé dans de nombreux articles [102]. La conversion électrique la plus souvent est la simple décharge du système polymère dans une capacité, via un pont redresseur. Ce circuit simple est peu performant en termes de rendement énergétique: le générateur à base de polymères électro-actifs ayant une impédance interne essentiellement capacitive, le transfert de son énergie dans une autre capacité est toujours partiel. Ceci entraîne une diminution de l'énergie jusqu'à 25% de l'énergie maximum délivrée par un générateur piézoélectrique. Cela peut être montré utilisant l'exemple de la figure (VI.1). Supposons, un condensateur de capacité C_0 , dont l'énergie initiale est W_0 , et un condensateur de capacité C_1 initialement déchargé. Les deux condensateurs sont connectés ensemble par l'intermédiaire d'un circuit de résistance R .

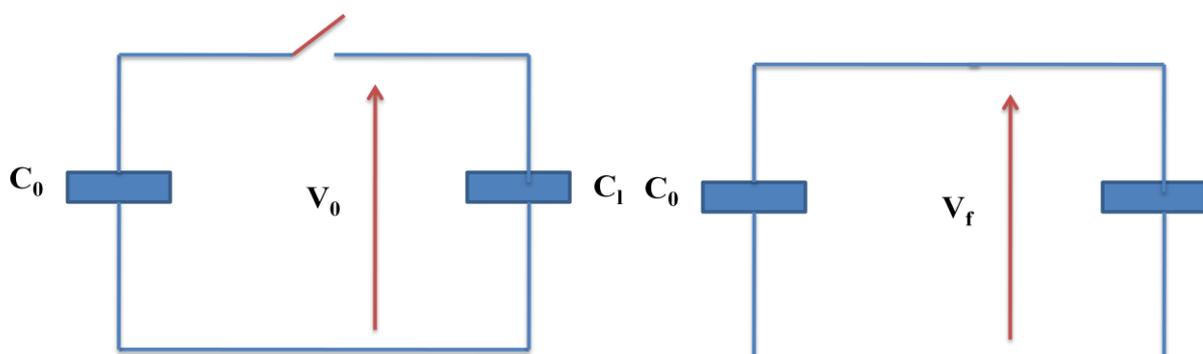


Figure VI.1- Transfert d'énergie entre deux condensateurs

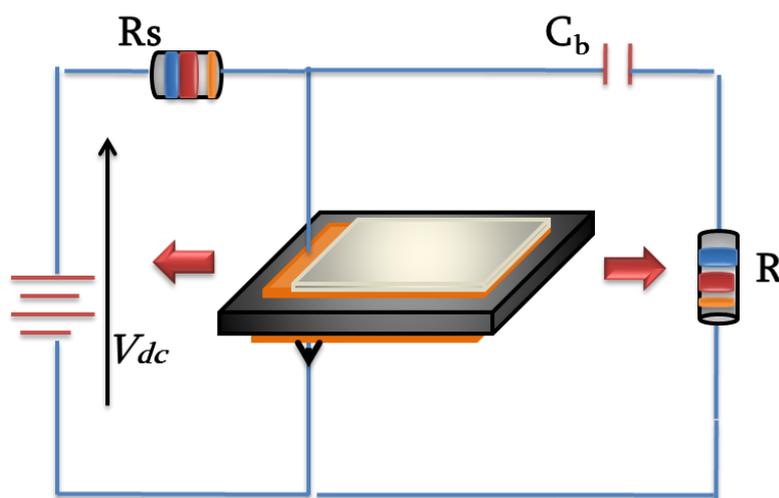
A l'état initial, avec un circuit ouvert, la puissance initiale est $W_0 = \frac{1}{2.C_0}.V_0^2$ avec $C_0 = C_l$

après le chargement $V_f = \frac{q_0}{2.C_0}$ alors $V_f = \frac{V_0}{2}$ d'où l'énergie au condensateur C_l vaut

$W_l = \frac{1}{8.C_0}.V_0^2 = \frac{W_0}{4}$. Pendant le transfert de l'énergie, $\frac{W_0}{2}$ a été dissipé par effet Joule dans le

circuit. Ce calcul simple montre l'inefficacité du transfert direct d'énergie entre condensateurs C_i . Pour cette raison plusieurs circuits ont été conçus [103], afin d'accroître la proportion d'énergie transférée par rapport à l'énergie disponible, sans chercher à augmenter celle-ci. Or les polymères électro-actifs sont avant tout un système électromécanique, qui offre quatre degrés de liberté, deux grandeurs électriques et deux grandeurs mécaniques, liées entre elles. De ce fait, en agissant sur la tension et le courant, il est possible de modifier la contrainte et la déformation, pour augmenter la puissance convertie.

A la différence des cas classiques de la piézoélectricité par exemple, où le pont redresseur est directement connecté en parallèle avec l'élément piézoélectrique, il est nécessaire dans le cas des matériaux électro-actifs fonctionnant en régime pseudo-piézoélectrique, d'adapter l'architecture du montage figure VI.2 [104]. Il faut rajouter deux composants. 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. La capacité C_b permet de supprimer la composante haute tension aux bornes du convertisseur AC-DC suivi d'une capacité de filtrage C_f .



(a)

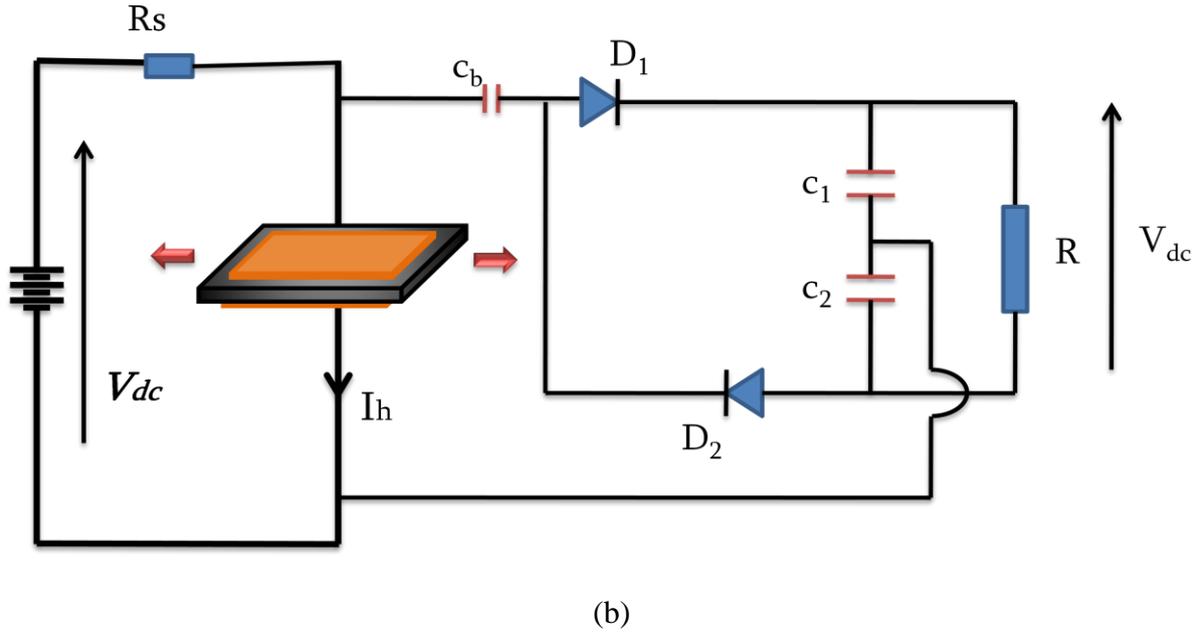


Figure VI.2 : (a) Schéma électrique utilisée avec conversion AC, (b) pour le redressement de la tension générée DC

Cette première partie est détaillée dans la référence [104]. Le circuit a été développé au laboratoire LGEF. Nous appliquons cette méthode à la structure proposée au chapitre précédent afin d'améliorer notre système de récupération.

L'expression de la tension aux bornes de la résistance d'après VI.2.(a) s'exprime sous la forme :

$$\tilde{V} = \frac{c_b}{c_b + c_p} \frac{\alpha \cdot E_{dc} \cdot R}{1 + \frac{jR \cdot c_b \cdot c_p \cdot \omega}{c_b + c_p}} j\omega \tilde{S}_1 \quad \text{VI.1}$$

La puissance dans la résistance R est égale à :

$$P_{recuAC} = \frac{\tilde{V} \cdot \tilde{V}^*}{2 \cdot R} = \left(\frac{c_b}{c_b + c_p} \right)^2 \frac{\alpha^2 \cdot R}{1 + \left(\frac{R \cdot c_b \cdot c_p \cdot \omega}{c_b + c_p} \right)^2} \frac{\omega^2 E_{dc}^2 S^2}{2} \quad \text{VI.2}$$

Le tableau VI.1 donne les valeurs de des paramètres du polymère utilisé pour une fréquence de 6Hz

Type polymère	Permittivité relative	Module de Young(MPa)	Surface A (cm ²)	Epaisseur e (µm)	Capacité bloquée (µF)	Champ E _{dc} Kv/mm
Pu 1%C	11	34	4X1.6	52	0.4	5

Tableau VI.1 paramètres du polymère PU1%C

On choisit une capacité de blocage C_b très grande devant la capacité bloquée du polymère C_p, pour avoir un meilleur filtrage. L'expression de la puissance dans la résistance de charge s'écrit alors :

$$P_{recuDC} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_{DC} \cdot I \cdot dt = \frac{2}{T} \int_{S_1}^{S_m} \alpha \cdot E_{dc} \cdot V_{DC} \cdot dS \quad \text{IV.3}$$

Avec S_m l'amplitude des déplacements et S₁ la valeur du déplacement lorsque le transfert de l'énergie commence,

$$S_1 = \frac{c_p}{\alpha} (V_{DC} + V_D) + K \text{ Avec}$$

Où V_D est le seuil de conductivité des diodes et K est un constant $K = \frac{c_p}{\alpha} (V_{DC} + V_D) - S_m$

A partir des expressions (VI.2) et (VI.3), la puissance en DC consommée par la charge R s'exprime sous la forme :

$$P_{recuDC} = \frac{R \cdot 16 \cdot f^2 \cdot (\alpha \cdot E_{dc} \cdot S - c_p V_D)^2}{1 + (4 \cdot f \cdot c_p)^2} \quad \text{IV.4}$$

On voit clairement que la puissance dépend du seuil de conduction des diodes, d'où la nécessité d'avoir les valeurs les plus faibles possibles, afin de garantir un bon rendement de conversion.

La figure VI.3 donne la valeur de la puissance théorique en AC puis après conversion, pour différentes charges et pour une déformation et un champ électrique constant de 0.5% à 3Hz et 7V/µm respectivement.

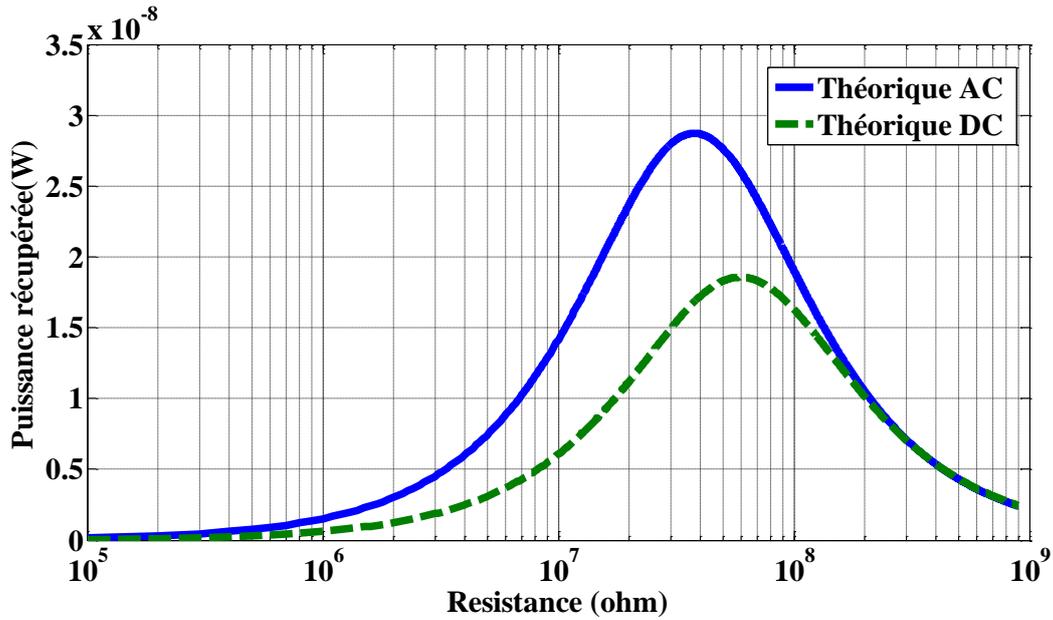
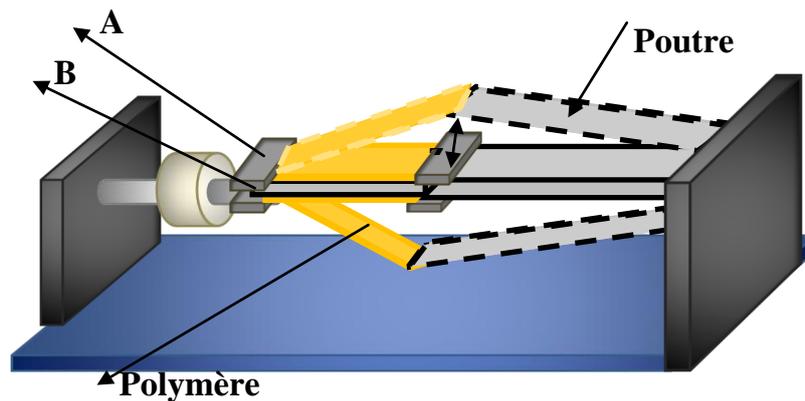


Figure VI.3 : Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 0.5% et un champ électrique de 7V/ μ m.

Pour palier au problème lié au défaut de la structure classique, une solution a été proposée qui consiste à utiliser un système mécanique doubleur de fréquence (figure IV.4.) détaillé au chapitre précédent. En effet ce type d'architecture ne présente que deux alternances de déformation pour une seule alternance d'excitation mécanique. D'un point de vue théorique la puissance maximale est obtenue pour une résistance plus grande :



(a)

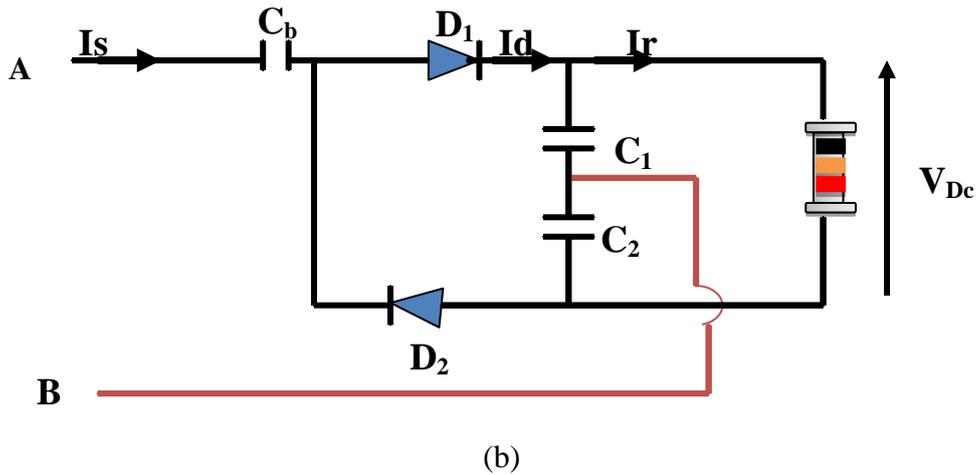


Figure VI.4 (a) Schéma mécanique proposée (b) schéma électrique du doubleur de fréquence correspond

La figure VI.5, donne dans le cas du doubleur de fréquence, la puissance récupérée en fonction de la résistance tracée dans les conditions et configuration que la figure VI.3. On obtient finalement une puissance récupérée redressée meilleure par apport au système classique

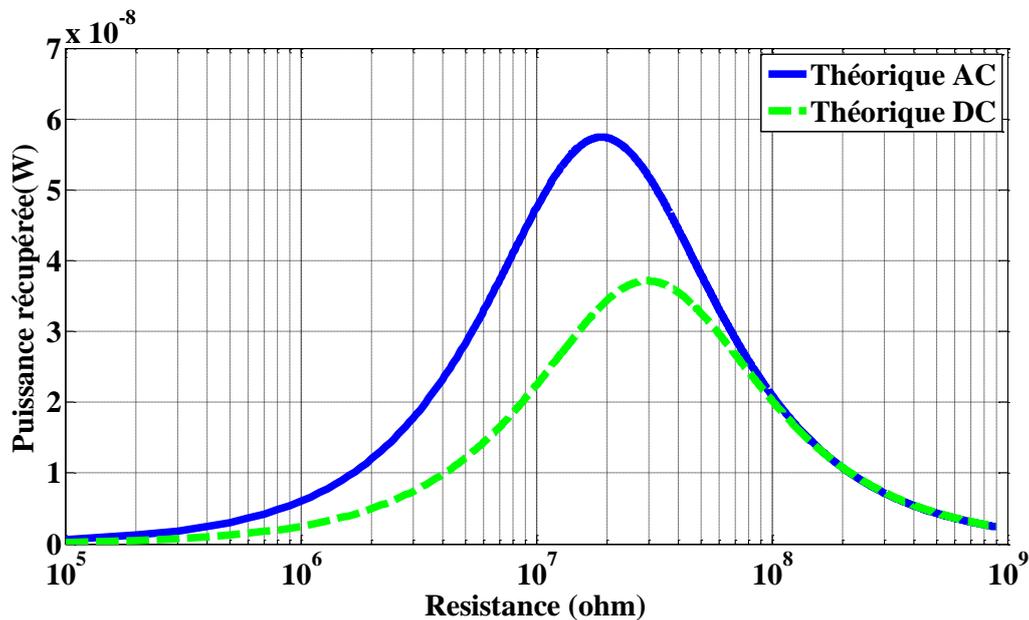


Figure VI.5 puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en mode AC et DC, pour une déformation de 0.5% et un champ électrique de $7V/\mu m$ utilisant la structure proposée.

VI.3 Optimisation en fonction de la capacité de stockage

Le choix de la capacité de stockage est un paramètre important dans la conception et les performances d'un micro-générateur piézoélectrique. La figure VI.6 montre un schéma simplifié d'un circuit de stockage avec un pont redresseur.

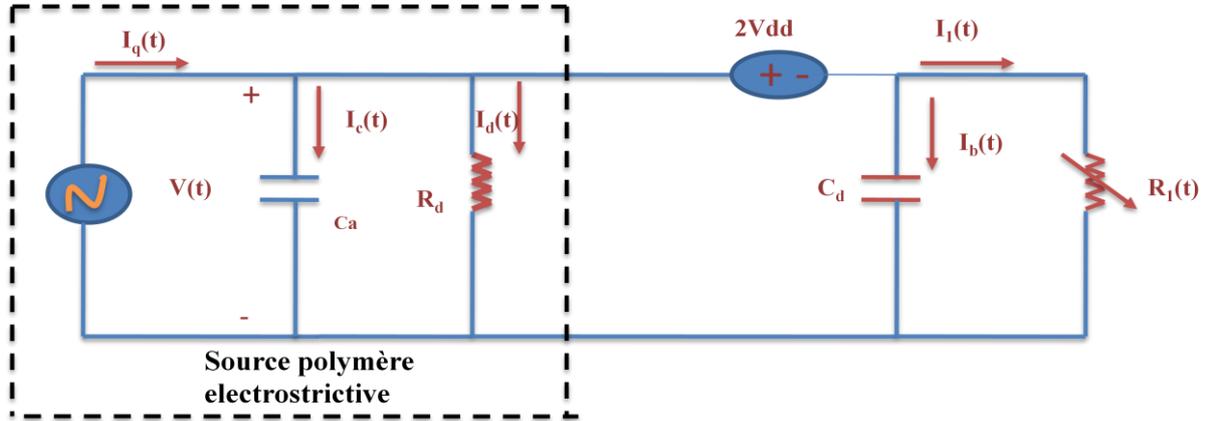


Figure VI.6 Circuit équivalent pour le chargement d'un condensateur

A partir de ce circuit :

$$\left\{ \begin{array}{l} V(t) = I_q \cdot R_d \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{R_d \cdot C_a}\right)} \right) \\ V_1(t) = \langle V_1 \rangle \end{array} \right. \quad 0 \leq t < t_d \quad \text{VI.5}$$

$\langle V_1 \rangle$: représente la valeur moyenne de la tension à accumuler aux bornes du condensateur

t_d : représente le temps de conduction pour les deux diodes.

R_d : représente les pertes diélectriques

Le transfert d'énergie s'effectue entre la capacité bloquée et la capacité d'accumulation seulement lorsque $V(t) = V_1(t) + 2V_{dd}$

Donc l'équation (VI.5) peut être écrite sur la forme :

$$2V_{dd} + \langle V_1 \rangle = I_q \cdot R_d \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{R_d \cdot C_a}\right)} \right) \quad \text{VI.6}$$

A partir de la figure VI.6 on peut écrire :

$$I_q = C_a \cdot \frac{dV_s(t)}{dt} + \frac{1}{R_d} \cdot V_s(t) + C_d \cdot \frac{dV_1(t)}{dt} + \frac{1}{R_1} V_1 \quad \text{VI.7}$$

$$I_q = C_a \frac{d(V_1 + 2V_{dd})}{dt} + \frac{1}{R_d} \cdot (V_1 + 2V_{dd}) + C_d \cdot \frac{dV_1}{dt} + \frac{1}{R_1} \cdot V_1 \quad \text{VI.8}$$

Dans le domaine de Laplace la relation (VI.8) devient :

$$\frac{I_q}{p} = (C_a + C_d) \cdot (p \cdot V_1 - \langle V_1 \rangle) + \left(\frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_1} \right) \cdot V_1 + \frac{2V_{dd}}{p \cdot R_d} \quad \text{VI.9}$$

$$\text{Si on pose } C_e = C_a + C_d = \frac{c_b \cdot c_p}{c_b + c_p} + c_d \quad \text{et} \quad R_e = \frac{R_d}{R_1}$$

$$\text{Alors } V_1 = \frac{\frac{I_q}{C_e} - \frac{2V_{dd}}{R_d \cdot C_e} + p \langle V_1 \rangle}{p \cdot \left(p + \frac{1}{R_e \cdot C_e} \right)} \quad \text{VI.10}$$

Cette relation devient dans le domaine temporel :

$$V_1(t) = \left(I_q \cdot R_e - 2V_{dd} \cdot \frac{R_e}{R_d} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_d}{R_e \cdot C_e}} \right) + \langle V_1 \rangle \cdot e^{-\frac{t-t_d}{R_e \cdot C_e}} \quad t_d \leq t < a \quad \text{VI.11}$$

Après l'instant $t=a$ la capacité d'accumulation commence le déchargement vers la charge avec :

$$V_1(t) = V_1(a) \cdot e^{-\frac{t-a}{R_1 \cdot C_d}} \quad a \leq t < b \quad \text{VI.12}$$

$$\text{avec } V_1(a) = \left(I_q \cdot R_e - 2V_{dd} \cdot \frac{R_e}{R_d} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{a-t_d}{R_e \cdot C_e}} \right) + \langle V_1 \rangle \cdot e^{-\frac{a-t_d}{R_e \cdot C_e}}$$

Maintenant on calcule l'énergie transférée à la charge :

$$W_1 = \frac{1}{R_1} \int_0^T V_1(t)^2 dt \quad \text{VI.13}$$

$$W_1 = \frac{1}{R_1} \cdot \left[\int_{t_d}^a \left(\left(I_q \cdot R_e - 2V_{dd} \cdot \frac{R_e}{R_d} \right) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_d}{R_e \cdot C_e}} \right) + \langle V_1 \rangle \cdot e^{-\frac{t-t_d}{R_e \cdot C_e}} \right)^2 dt + \int_a^T \left(V_1(a) \cdot e^{-\frac{t-a}{R_1 \cdot C_d}} \right)^2 dt \right] \quad \text{VI.14}$$

L'intégration de l'équation (V.14) donne :

$$W_1 = \frac{1}{R_1} \cdot \left(I_q \cdot R_e - 2 \cdot V_{dd} \cdot \frac{R_e}{R_d} \right)^2 \cdot \left((a - t_d) - 2 \cdot R_e C_e \cdot \left(1 - e^{-\frac{(a-t_d)}{R_e C_e}} \right) + \frac{R_e \cdot C_e}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-2(a-t_d)}{R_e C_e}} \right) \right) + \quad \text{VI.15}$$

$$\frac{2}{R_1} \cdot \langle V_1 \rangle \cdot \left(I_q \cdot R_e - 2 \cdot V_{dd} \cdot \frac{R_e}{R_d} \right) \cdot \left(R_e \cdot C_e \cdot \left(1 - e^{-\frac{(a-t_d)}{R_e C_e}} \right) - \frac{R_e \cdot C_e}{2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{-2(a-t_d)}{R_e C_e}} \right) \right)$$

A partir des relations précédentes et avec $R_d = \rho \frac{e}{L \cdot I}$ avec R_d représente les pertes diélectrique

ρ représente la résistivité volumique, du polymère de longueur L , de largeur l et d'épaisseur e .

Avec $a=0.075\text{sec}$, $T=0.55\text{sec}$, nous représentons les résultats de simulation de la puissance générée en fonction de la charge et de la capacité d'accumulation représentés à la figure VI.6.

La représentation graphique de la puissance générée et la capacité d'accumulation en fonction de la résistance de charge nous a permis de suivre, dès à présent, l'incidence du paramètre $C1$ (capacité d'accumulation) sur la puissance générée. Il est à remarquer que les caractéristiques du transfert d'énergie au démarrage sont presque les mêmes pour différentes charges qui supportent des tensions relativement faibles.

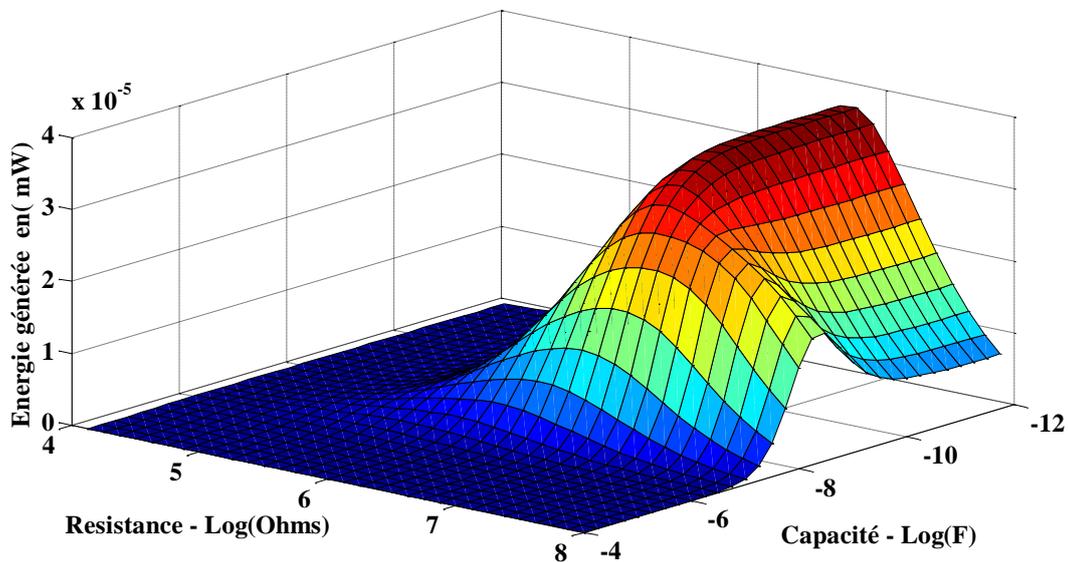


Figure VI.7 Energie générée en fonction de la charge et de la capacité d'accumulation

La variation de l'énergie générée en fonction de la capacité d'accumulation est représentée sur la figure VI.8.

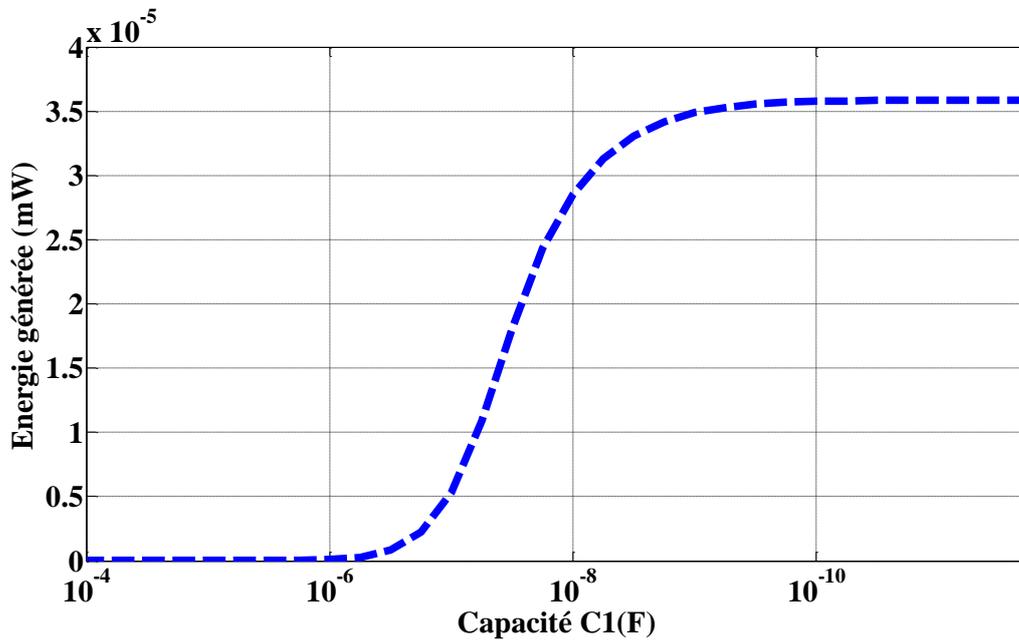


Figure VI.8.Énergie générée en fonction de la capacité d'accumulation

Dans tous les cas l'énergie maximale dans la charge atteint son maximum quand la capacité C_1 est inférieure à quelque pF. Au delà de cette valeur de la capacité d'accumulation la puissance est toujours constante. Cependant, une petite capacité d'accumulation C_1 ne stocke pas beaucoup d'énergie et aura peu d'effet au niveau de la constante du temps, par contre pour les grandes valeurs de C_1 le rendement diminue et la puissance délivrée à la charge est minimum.

Avec une valeur moyenne de la capacité d'accumulation de l'ordre de quelques nF correspond un de fonctionnement optimal et en accord avec les résultats mentionnés à la figure VI.6.

VI.4 Optimisation de la puissance transférée à l'aide d'un convertisseur DC-DC

Cette méthode est utilisée pour optimiser la puissance maximale transférée vers la batterie en utilisant un convertisseur abaisseur DC-DC et une carte de contrôle pour générer un signal PWM à la gâchette d'un transistor [105]. L'élément du polymère électro-strictif ainsi que le circuit de contrôle sont représentés sur la figure VI.9:

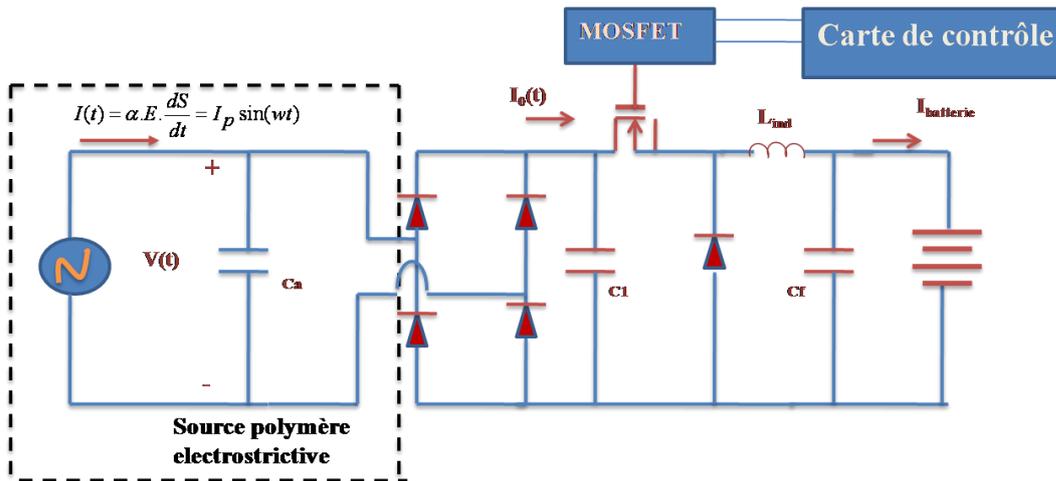


Figure VI.9 Circuit électronique permettant l'optimisation de la puissance transférée vers la batterie

L'amplitude du courant de polarisation produit par le générateur à base de polymère et de la tension redressée, ne peut pas être constante car il dépend de l'excitation mécanique et le champ de polarisation comme indiqué dans les chapitres précédents. Pour atteindre facilement la tension optimale à la sortie du redresseur, un convertisseur DC-DC est placé entre la sortie du redresseur et la batterie comme indiqué dans la figure VI.9. Typiquement le contrôleur d'un tel convertisseur joue le rôle de régulateur de tension de sortie. Cependant, dans ce circuit le convertisseur permet de délivrer le maximum de puissance à la batterie, à travers l'optimisation du rapport cyclique et du courant générée à la batterie.

Le courant délivré par la source piézoélectrique peut être écrit sous la forme :

$$I(t) = \alpha \cdot E \cdot \frac{dS}{dt} = I_p \sin(\omega t) \quad \text{VI.16}$$

Intégrant les deux membres de l'égalité dans l'intervalle de temps $0 < \omega t < \omega t_d$ ou t_d le temps de chargement de la capacité C_a

$$\text{En pratique } C_1 \gg C_a \text{ alors } I_0(t) = I_p(t) \quad \text{VI.17}$$

$$\langle I_0(t) \rangle = \frac{1}{\pi} \left(0 + \int_{t_d}^T I_p \sin(\omega t) \delta(\omega t) \right) \quad \text{VI.18}$$

$$\langle I_0(t) \rangle = \frac{I_p}{\pi} (1 + \cos(t_d))$$

Remplacent VI.16 dans VI.18 la valeur moyenne du courant sortant du pont redresseur s'écrit alors :

$$\langle I_0(t) \rangle = \frac{2.I_p}{\pi} - \frac{2.V_1.w.C_a}{\pi} \quad \text{VI.19}$$

$$\text{avec } \langle v_0(t) \rangle = V_1 \quad \text{VI.20}$$

D'où la puissance à la sortie du redresseur est:

$$\langle P(t) \rangle = \frac{2.V_1}{\pi} \cdot (I_p - V_1.w.C_a) \quad \text{VI.21}$$

D'après l'équation VI.21 on remarque que le maximum de puissance est atteint lorsque

$$V_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{I_p}{w.C_a} \quad \text{VI.22}$$

La puissance maximale est égale à la moitié de la puissance dans le cas du circuit ouvert. Ce résultat constitue un facteur très important pour la méthode d'optimisation par convertisseur. La figure.V.10 montre la variation de la puissance générée en fonction de la tension de sortie du redresseur.

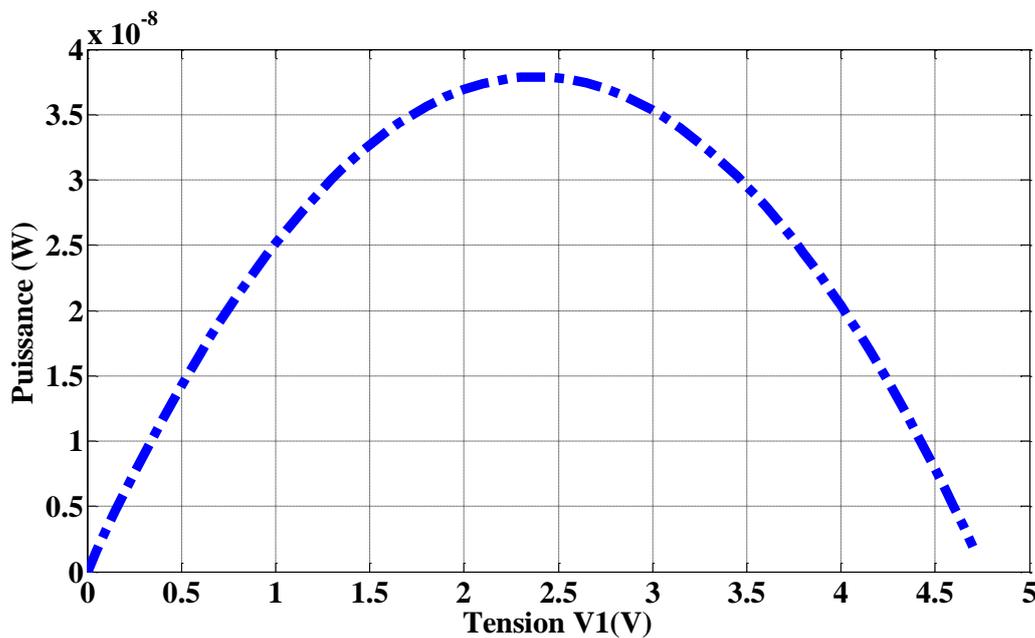


Figure V.10 Puissance générée en fonction de la tension de sortie du redresseur

La régulation de cette tension ainsi que l'écoulement optimale de la puissance vers la batterie d'accumulation peuvent être effectués par l'ajustement du rapport cyclique optimal [105].

Pour un convertisseur abaisseur les tensions d'entrée, de sortie ainsi que le courant de sortie sont données par les relations suivantes

$$V_{ent} = \frac{D}{D + \Delta_1} \cdot V_{sort} \quad \text{VI.23}$$

$$I_{sort} = \frac{V_{sort} \cdot T_s}{2 \cdot L} (D + \Delta_1) \cdot \Delta_1 \quad \text{VI.24}$$

Δ_1 : Représente le temps de conduction du transistor

D : le rapport cyclique

$$\text{De (V.23) } \Delta_1 = D \left(\frac{V_{ent}}{V_{sort}} - 1 \right) \quad \text{VI.25}$$

$$\text{Donc } I_{sort} = \frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} \cdot \frac{V_{ent}}{V_{sort}} \cdot (V_{ent} - V_{sort}) \quad \text{VI.26}$$

Avec le minimum de pertes pendant le transfert on peut écrire :

$$I_{sort} = \frac{V_{ent} \cdot I_{ent}}{V_{sort}} \quad \text{VI.27}$$

$$I_{ent} = \frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} \cdot (V_{ent} - V_{sort}) \quad \text{VI.28}$$

f_s : Fréquence de commutation du transistor

Si on pose I_{ent} le courant d'entrée du convertisseur et on remplace (VI.28) dans (VI.19)

$$\frac{2 \cdot I_p}{\pi} - \frac{2 \cdot V_1 \cdot w \cdot C_a}{\pi} = \frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} \cdot (V_1 - V_{sort}) \quad \text{VI.29}$$

La résolution de (V.29) par rapport à V_1 devient :

$$V_1 = \frac{\frac{2 \cdot I_p}{\pi} + \frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} \cdot V_{sort}}{\frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} + \frac{2 \cdot w \cdot C_a}{\pi}} \quad \text{VI.30}$$

Remplaçant (VI.30) dans (VI.19)

$$I_{ent} = \frac{2 \cdot I_p}{\pi} - \frac{2 \cdot w \cdot C_a}{\pi} \left[\frac{\frac{2 \cdot I_p}{\pi} + \frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} \cdot V_{sort}}{\frac{D^2}{2 \cdot L \cdot f_s} + \frac{2 \cdot w \cdot C_a}{\pi}} \right] \quad \text{VI.31}$$

La puissance produite par l'élément piézoélectrique en fonction du rapport cyclique devient :

$$P_{ent} = \frac{D^2}{2.L.f_s} \cdot \frac{\left(\frac{2.I_p}{\pi} - \frac{2.w.C_a}{\pi} V_{sort}\right) \cdot \left(\frac{2.I_p}{\pi} + \frac{D^2}{2.L.f_s} V_{sort}\right)}{\left(\frac{D^2}{2.L.f_s} + \frac{2.w.C_a}{\pi}\right)^2} \quad \text{VI.32}$$

La solution de l'équation (VI.29) par rapport au rapport cyclique est:

$$D = \sqrt{\frac{2.L.f_s}{V_1 - V_{sort}} \cdot \frac{2.I_p - 2.V_1.w.C_a}{\pi}} \quad \text{VI.33}$$

Avec la relation (VI.21) le rapport cyclique qui correspond au maximum de puissance générée peut être calculé en utilisant (VI.21) :

$$D_{opt} = \sqrt{\frac{4.V_1.L.C_a.f_s}{\pi.(V_1 - V_{batterie})}} \quad \text{(VI.34)}$$

Avec une tension de la batterie de 3V et une inductance $L=0.5H$, les résultats de simulation de la puissance en fonction de la fréquence et du rapport cyclique sont donnés dans la figure suivante (Fig. VI.11)

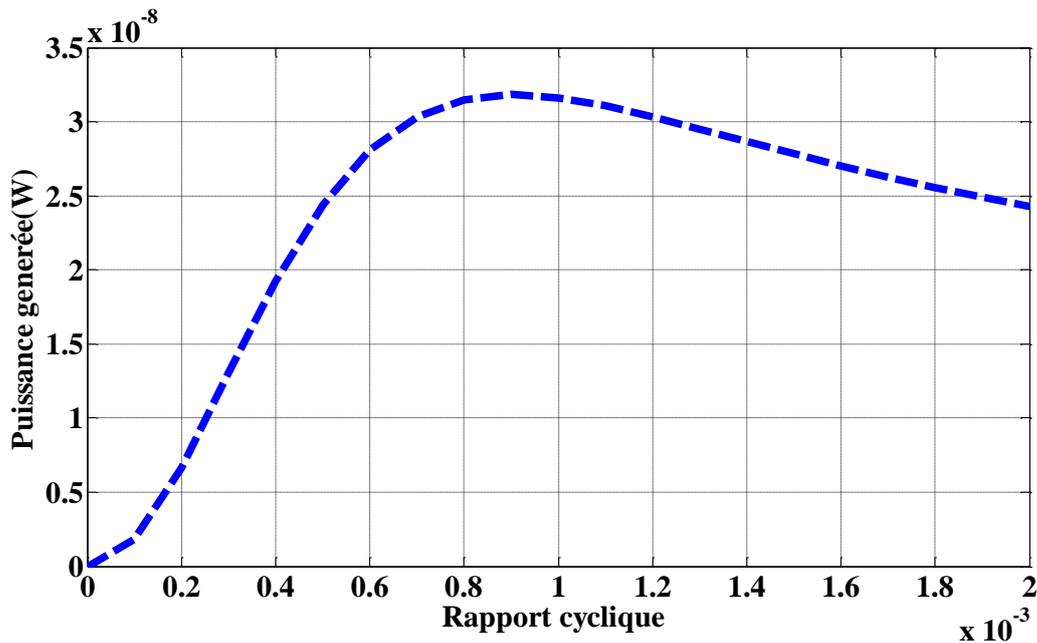


Figure VI.11. Puissance générée en fonction du rapport cyclique

La courbe de la Figure VI.11 (montre bien que le transfert d'une puissance optimale vers la batterie d'accumulation peut être effectué avec un rapport cyclique de 0.1%.

VI.5 Application aux techniques SSHI (Synchronized Switch Harvesting)

Les techniques non-linéaires utilisées dans les applications de récupération de l'énergie sont dérivées de la technique semi passive d'amortissement structurel SSDI1 développée au laboratoire LGEF . Sa variante utilisée pour la récupération d'énergie est appelée SSHI2, qui n'a plus pour but d'amortir des vibrations mais plutôt d'augmenter la quantité d'énergie fournie dans un réservoir [106]. Ces techniques s'avèrent très efficaces dans les structures où une déformation est imposée et le couplage est relativement faible. Les techniques non-linéaires SSHI, ont démontré leur potentiel pour la récupération d'énergie à l'aide d'inserts piézoélectriques. Le but ici consiste à appliquer ces techniques au cas des polymères pour accroître ainsi l'énergie récupérée. sur la structure proposée dans le chapitre précédent. Cette technique consiste à ajouter un dispositif de commutation en parallèle avec les éléments du polymère (Figure.VI.12.). Ce dispositif est équivalent à un interrupteur en série avec une inductance L_l . L'interrupteur est quasiment toujours ouvert, sauf quand apparaît un extremum de déplacement. A cet instant, on ferme l'interrupteur. La capacité bloquée C_0 des éléments polymères et l'inductance L_l forment alors un circuit oscillant. L'interrupteur est maintenu fermé jusqu'à ce que la tension sur les éléments polymères soit inversée c'est-à-dire au bout d'un temps t_i correspondant à une demi pseudo période du circuit oscillant. Lorsque l'interrupteur est ouvert et en l'absence de charge R , le courant sortant des éléments polymères est nul, ainsi tension et déplacement varient proportionnellement. La technique SSHI parallèle dans le cas des polymères électro-actifs a été décrite par Gyuomar [104].

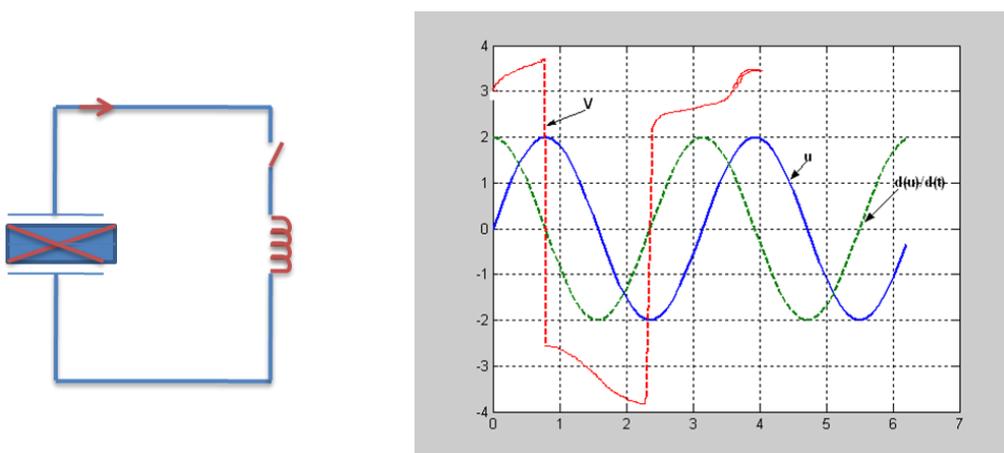


Figure VI.12- Dispositif de commutation SSHI et allure des signaux en l'absence d'une charge

Par rapport à la technique redressée classique décrite précédemment dans cette configuration, on a choisi le dispositif de commutation en parallèle avec l'élément électro-strictif (Fig. VI.13).

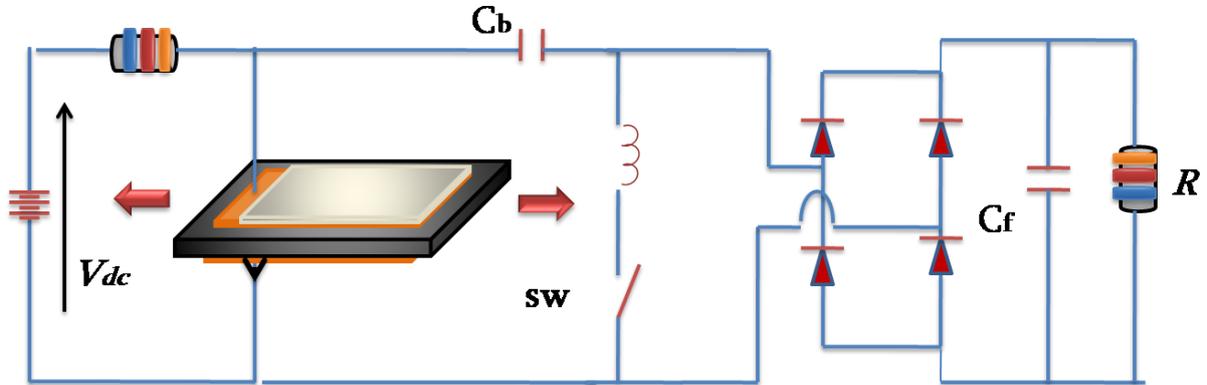


Figure VI.13 : SSHI parallèle schéma de principe

Avec une tension V inférieure en valeur absolue à la tension redressée V_{DC} , le courant traversant le pont redresseur est nul, et la tension varie proportionnellement à la déformation. Lorsque la valeur absolue de V atteint V_{DC} , le pont redresseur est passant, et l'évolution de V est stoppée. Le pont redresseur cesse d'être passant lorsque la déformation diminue en valeur absolue, c'est-à-dire lorsqu'un extremum de déformation est atteint

$$\int_{t_1}^{t_2} It + \int_{t_1}^{t_2} i_s dt = \frac{V_{cc}}{R} \cdot \frac{T}{2} \quad \text{VI.35}$$

$$\int_{t_1}^{t_2} i_s dt = C_p \cdot \int_{t_1}^{t_2} dV = C_p \cdot V_{cc} \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_l}}\right) \quad \text{VI.36}$$

A partir de ces équations et en considérant l'équation constitutive électrique il est possible d'exprimer la tension redressée V_{DC} en fonction de l'amplitude de la déformation, de la résistance de charge et des paramètres α et C_p . Cette expression est donnée par (VI.37).

$$V_{cc} = \frac{2 \cdot R \cdot \alpha}{R \cdot C_0 \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q_l}}\right) \cdot \omega + \pi} (\omega \cdot u_m) \quad \text{VI.37}$$

Le bilan énergétique de la structure sur cette demi-période est le suivant. L'énergie apportée

est égale à la somme de l'énergie dissipée sous forme mécanique dans la structure, de l'énergie récupérée sur la charge et de l'énergie perdue lors de l'inversion

$$\int_0^{T/2} F \cdot u dt = C \cdot \int_0^{T/2} u^2 \cdot dt + \frac{1}{2} C_p \cdot V_{cc}^2 (1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_l}}) + \frac{V_{cc}^2}{R} \cdot \frac{T}{2} \quad \text{VI.38}$$

$$\text{Avec } P_e = \frac{V_{cc}^2}{R} \quad \text{VI.39}$$

$$P_e = \frac{4 \cdot R \cdot \alpha^2}{(R \cdot C_p (1 - e^{-\frac{\pi}{2Q_l}}) \cdot \omega + \pi)^2} \cdot (\omega^2 \cdot S^2) \quad \text{VI.40}$$

L'équation (IV.25) permet de calculer la puissance récupérée en fonction de la charge. La figure (VI.14) montre la variation de la puissance récupérée avec et sans technique de contrôle SSHI. On voit très clairement l'importance de cette technique par rapport à la technique classique, le gain étant de plus de 400% pour des structures dont le déplacement est imposé.

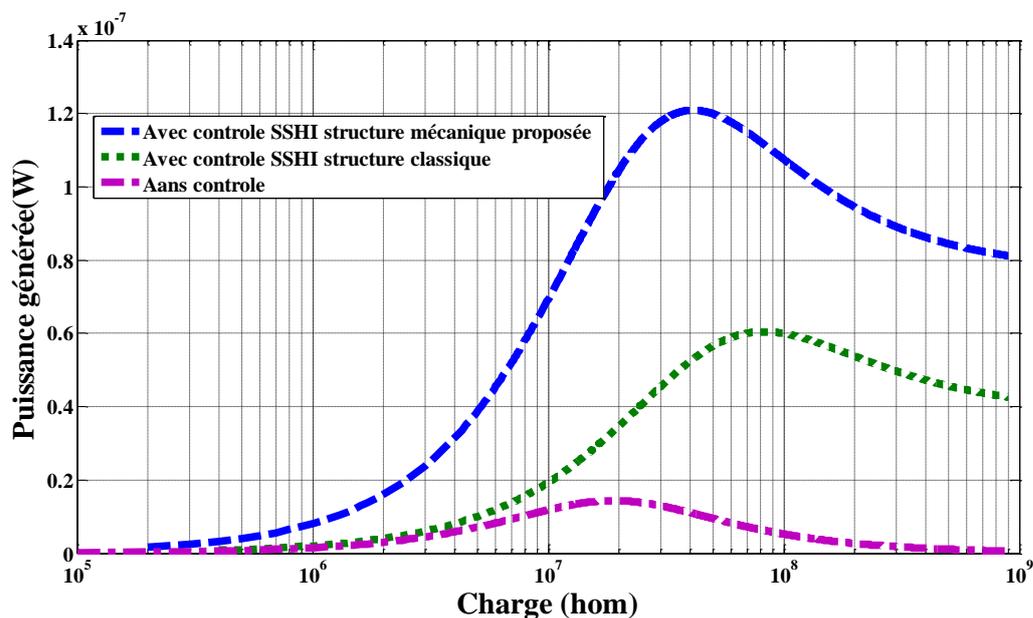


Figure VI.14 Puissance générée en fonction de la charge sur les deux structures classique et proposée avec et sans technique SSHI

VI.7 Conclusion

L'optimisation de l'énergie générée par le système électro-strictif vers la batterie d'accumulation a été étudiée dans ce chapitre. Deux méthodes ont été présentées et simulées. L'une est basée sur l'optimisation de la capacité de stockage de l'énergie. L'étude menée en fonction des différents paramètres, la capacité, la charge et la tension de charge. Cependant, en tenant compte des pertes dues à la capacité de blocage et la capacité d'accumulation et les résultats rencontrés dans la littérature, la puissance optimale générée, effectivement utilisable correspond à une capacité de stockage de quelque nF.

La deuxième méthode utilisant un hacheur série avec contrôleur de suivi du maximum de puissance a été étudiée en fonction du rapport cyclique. Le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale générée a été trouvé avec un rapport cyclique de 0.1 %. L'étude théorique de la technique SSHI a mis en évidence sa capacité à amplifier l'énergie générée par le système électro-strictif en régime dynamique pour les deux structures mécaniques présentée dans le chapitre précédent. L'efficacité de la technique a été démontrée dans le cas d'une charge résistive avec laquelle l'énergie est amplifiée de 400 % pour une structure ou l'amplitude de vibration reste constante.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la génération de l'énergie électrique en vue d'alimenter l'électronique nomade (portable) basée sur la récupération de l'énergie mécanique humaine. Les polymères électro-actifs étaient étudiés comme transducteur de conversion de l'énergie mécanique, fournie par les mouvements humains, en énergie électrique. Quatre thématiques différentes complémentaires et nécessaires ont été traitées. Après un état de l'art sur les matériaux utilisés et leur performance, deux objectifs distincts ont été définis.

Dans un premier temps, l'étude a été focalisée sur le processus de synthèse des matériaux et les types de charge à ajouter aux polymères pour améliorer les propriétés en actionnement et en récupération d'énergie.

Ces propriétés ont été analysées dans le deuxième chapitre. Une analyse électrique a été menée sur les différents composites. Dans ce cadre, il a été montré que la permittivité dépend étroitement de la fréquence de fonctionnement. L'influence du noir de carbone sur l'amélioration des paramètres diélectriques a été montrée notamment l'augmentation de la permittivité diélectrique et la réduction du module de Young. Le résultat obtenu sur ces deux paramètres promet ces polymères comme candidat potentiel aux récupérateurs d'énergie de petite taille fonctionnant à basses fréquences dont la gamme s'adapte avec la fréquence de résonance des micro-générateurs. Trois échantillons de polymères PU 0.5%C. PU 1%C. et P(VDF-TrFE-CFE) 1%C ont été donc élaborés et caractérisés. Un banc de test avec les protocoles de mesures a été mis en place caractériser ces trois types polymères. Les résultats obtenus étaient satisfaisant: augmentation de la permittivité lors de l'ajout des nanoparticules et faibles pertes en basse fréquence dans la bande de fréquence (10Hz à 100kHz). L'ensemble de ces caractéristiques laisse pressentir un intérêt particulier pour ces polymères dans ce domaine particulièrement le PU 1%C.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les propriétés mécaniques des films de polymères électro-actifs synthétisés. Ainsi l'influence du champ électrique, de la fréquence, et des différentes déformations statiques et actionnement ont été étudiés. Les résultats

obtenus sur les polymères dopés au carbone révèlent un module de Young faible, en conséquence un coefficient d'électrostriction plus élevé. La raideur du polymère soumis à un pré-étirement et à un champ électrique modéré a été évaluée. La confrontation des résultats expérimentaux avec le modèle théorique était satisfaisante.

Dans le quatrième chapitre, un modèle mathématique a été établi pour la maximisation de l'énergie. Utilisant l'inversion de la polarisation à la demi-période du déplacement, pour sa simplicité, la puissance récupérée a été multiplié par un facteur de 4. La caractérisation par analyse spectrale FFT et la polarisation par effet corona nous ont permis de palier le faible champ électrique admissible et d'analyser l'effet de la charge.

Ensuite l'amélioration de l'efficacité de la conversion électromagnétique, exploitant l'effet du polypropylène cellulaire sur les polymères électro-actifs a été traité dans le chapitre V. 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, développés au laboratoire LGEF et d'autres circuits, nous avons pu tester un système complet de génération d'énergie dans le chapitre VI. .

En conclusion les polymères électro-actifs, 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.

En perspective il sera étudié:

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

- Faire fonctionner les dispositifs à des fréquences plus élevées,
- Amélioration du système mécanique afin d'augmenter l'amplitude de la force permettant de récupérer plus d'énergie.
- Automatisation et commande de la polarisation utilisant les électrets.
- Utilisation de la technique SSHI-max comme système de récupération

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] M. Marzencki, S. Basrour, B. Charlot, « Conception de micro générateurs piézoélectriques intégrés pour systèmes sur puce autonomes », Laboratoire TIMA projet VIBES (vibration Energy Scavenging).
- [2] <http://www.yole.fr/>
- [3] www.isuppli.com
- [4] A .Lal, J. Blanchard, “Nuclear microbatteries could power tomorrow’s microelectromechanical marvels” IEEE Spectrum ,September 2004 pp 36-41
- [5] T. E. Starner, Powerful Change Part 1: Batteries and Possible Alternatives for the Mobile Market, Pervasive Computing, Vol. 4(1), 2005
- [6] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," Pervasive Computing, IEEE, vol. 4, pp. 18-27, 2005.
- [7] Volgyesi, P., Balogh, G., Nadas, A., Nash, C.B. et Ledeczi, A., «Shooter ocalization and weapon classification with soldier-wearable networked sensors», MobiSys `07 Proceedings of the 5th international conference on Mobile systems, applications and services, p. 113–126, ACM, New York, NY, USA, 06 2007, ISBN 978-1-59593-614-1.
- [8] P. Wang, Z. Sun, M. C. Vuran, M. A. Al-Rodhaan, A. M. Al-Dhelaan, and I. F. Akyildiz, “On network connectivity of wireless sensor networks for sandstorm monitoring,” Computer Networks, vol. 55, no. 5, pp. 1150 – 1157, 2011.
- [9] Applied Innovative Technologies, Inc., www.appliedinnotech.com
- [10] Seiko, www.seiko.fr
- [11] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, Computer Communications, Vol. (26) : 1131-1144, 2003

- [12] R. Amirtharajah, A.P. Chandrakasan, Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 33(5) : 687-695, Mai 1998
- [13] W. J. Li, T. C. H. Ho, G. M. H. Chan, P. H. W. Leong, and H. Y. Wong, "Infrared signal transmission by a laser-micromachined, vibration-induced power generator," presented at *Circuits and Systems*, 2000. Proceedings of the 43rd IEEE Midwest Symposium on, 2000.
- [14] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, and J. Lang. Vibration-to-Electric Energy Conversion. *Very Large Scale Integration Systems*, *IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 64-76, 2001.
- [15] J. O. Mur-Miranda, Electrostatic Vibration-to-Electric Energy Conversion, These de doctorat de MIT, 2004
- [16] G. Despesse, Etude des phenomenes physiques utilisables pour alimenter en energie electrique des microsystemes communicants, Thèse de doctorat de l'INPG, 2005
- [17] G. Poulin, Contribution au developpement d'un generateur piezoelectrique pour applications nomades, Thèse de doctorat de l'Université Paris XI Orsay, 2004
- [18] 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.
- [19] S. Kim, W. W. Clark, and Q. M. Wang, —Piezoelectric energy harvesting with a clamped circular plate: analysis, *Journal of intelligent material systems and structures*, vol. 16, no. 10, p. 847, 2005.
- [20] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, —Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, *Smart Materials and Structures*, vol. 17, p. 043001, 2008.
- [21] M. Marzencki, —Conception de microgénérateur intégrés pour systèmes sur puce autonomes, thèse université joseph Fourier, 2007.
- [22] A. Crisan, Typing power, Brevet américain US 5 911 529, Compaq Computer Corporation, Houston, 15 juin 1999.

- [23] N. S. Shenck et J. A. Paradiso, Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics, IEEE Micro, 21 (2001) pp. 30-42.
- [24] J. A. Paradiso et M. Feldmeier, A compact, wireless, self-powered pushbutton controller, ,Internat. Conf. on Ubiquitous Computing (UbiComp 2001), Atlanta GA, sept. 2001, pp. 299-304.
- [25] Morgan Electro Ceramics, Piezoelectric high voltage generators, Technical Publication TP-219, Morgan Electro Ceramics, www.morganelectroceramics.com/pdfs/tp219.pdf
- [26] <http://fr.wikipedia.org/wiki/magnetostriction>
- [27] A. O'Halloran and F. O'Malley, "Materials and technologies for artificial muscle: a review for the mechatronic muscle project," Topics in Bio-Mechanical Engineering, vol. 1, pp. 184-215, 2004.
- [28] Airoidi and B. Rivolta, "Thermal cycling and intermediate R-phase in NiTi system," Physica Scripta, vol. 37, pp. 891-894, 1988.
- [29] Q. M. Zhang, V. Bharti, X. Zhao. Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) copolymer. Science vol. 280, 1998.
- [30] C. Jean-Mistral. Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystèmes autonomes communicants. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble,CEA, 2008
- [31] 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.
- [32] Y. OSADA and J. GONG, "Stimuli-responsive polymer gels and their application to chemomechanical systems," Progress in polymer science, vol. 18, pp. 187-226, 1993.
- [33] <http://gsc11.cemif.univ-evry.fr>
- [34] 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.

[35] 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.

[36] E. Smela, "Microfabrication of PPy microactuators and other conjugated polymer devices," *Journal of Micromechanical Microengineering*, vol. 9, pp. 1-18, 1999.

[37] 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.

[38] H. Frayssignes, *Etude des effets non linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores*, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 9 novembre 2001, pp. 18-20.

[39] Y. Bar-Cohen. *Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles : reality, potential, and challenges*. SPIE Press, 2001.

[40] S. G. Wax, R. R. Sands. *Electroactive polymer actuators and devices*. In *Conference on Electroactive polymer actuators and devices*. SPIE, vol. 3669, 1999

[41] G. Kofod, "The static actuation of dielectric elastomer actuators: how does pre-stretch improve actuation?," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, pp. 215405, 2008.

[42] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, "High-Speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%," *Science*, vol. 287, pp. 836-839, 2000.

[43] R. Pelrine, R. Kornbluh, J. Eckerle, P. Jeuck, S. OH, Q. Pei, S. Stanford "Dielectric elastomer : generator mode fundamentals and applications" *SRI International, USA Conference on Electroactive polymer actuators and devices*, 2001 SPIE vol 4329

- [44] P. Dubois, S. Rosset, S. Koster, J. Stauffer, S. Mikhaïlov, M. Dadras, N.-F. de Rooij, and H. Shea, "Microactuators based on ion implanted dielectric electroactive polymer (EAP) membranes," *Sensors and Actuators*, vol. 130, pp. 147-157, 2006.
- [45] A. Pimpin and Y. Suzuki, "Microelectrostrictive actuator with large out-of-plane deformation for flow-control application," *Journal of micromechanical systems*, vol. 16, pp. 753-763, 2007.
- [46] J.-S. Plante and S. Dubowsky, "On the performance mechanisms of Dielectric Elastomer Actuators," *Sensors and Actuators*, vol. 137, pp. 96-109, 2007.
- [47] F. Carpi, A. Mannini, G. Frediani, and D. De Rossi, "Contractile and buckling actuators based on dielectric elastomers: devices and applications," *Advances in Science and Technology Vol. (2008) pp 186-191*, vol. 61, pp. 186-191, 2008.
- [48] M.-T. Wissler, "Modeling dielectric elastomer actuators," *SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY in ZURICH*, 2007.
- [72] T. Mirfakhrai, J.-D.-W. Madden, and R.-H. Baughman, "Polymer artificial muscles," *materials today*, vol. 10, pp. 30-38, 2007.
- [49] F. Carpi, A. Mannini, G. Frediani, and D. De Rossi, "Contractile and buckling actuators based on dielectric elastomers: devices and applications," *Advances in Science and Technology Vol. (2008) pp 186-191*, vol. 61, pp. 186-191, 2008.
- [50] Y. Lui, K. L. Pen, H. F. Hofmann and Q. Zhang. Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting. In conference on electroactive polymer actuators and devices, 2004 SPIE, vol5385 , 2004.
- [51] Y. Lui, K. L. Ren, H. F. Hofmann and Q. Zhang. Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting. *IEEE Transaction on Ultrasonics, ferroelectrics, and Frequency Control*, vol.52, n.12, 2005.
- [52] J.-Y. Li and N. Rao, "Micromechanics of ferroelectric polymer-based electrostrictive composites," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 52, pp. 591 – 615, 2004.
- [53] Z. Y. Cheng, V. Bharti, T.-B. Xu, T. Mai, Q.M. Zhang "Electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers" *Materials Research Institute- Pennsylvania State University, USA Sensors and actuators*, 2001

- [54] X. Z. Zhao, V. Bharti, Q. M. Zhang. Electromechanical properties of electrostrictive poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer. *Applied Physics Letters*, vol.73, n.14, 1998.
- [55] Y. Tang, X. Z. Zhao, H. L. W. Chan, C. L. Choy. Effect of electron irradiation on poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymers. *Applied Physics Letters*, vol. 77, n.11, 2000.
- [56] V. Bharti, G. Shanthi, H. Xu, Q. M. Zhang, K. Liang. Evolution of transitional behavior and structure of electron-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) copolymer films. *Materials Letters* 47, 2001
- [57] S. S. Guo, S. T. Lau, H. L. W. Chan, X. Z. Zhao, C. L. Choy. Structural evolution and dielectric relaxation behavior of electron-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) 80/20mol% copolymers. *Journal of Applied Physics*, vol. 94, n. 9, 2003.
- [58] S. Guo, X. Z. Zhao, Q. Zhou, H. L. W. Chan, C. L. Choy. High electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in proton-irradiated poly(vinylidene fluoridetrifluoroethylene) copolymer. *Applied Physics Letters*, vol. 84, n.17, 2004.
- [59] M. I. Frecker, W. M. Aguilare. Analytical modeling of a segmented unimorph actuator using electrostrictive P(VDF-TrFE) copolymer. *Smart Materials and Structures*, vol. 13, 2004.
- [60] F. Bauer, E. Fousson, Q. M. Zhang, L. M. Lee. Ferroelectric copolymers and terpolymers for electrostrictors : synthesis and properties. In 11th International Symposium on Electrets, 2002.
- [61] G.S. Buckley, C. M. Roland, R. Casalini, A. Petchsuk, T. C. Chung. Electrostrictive properties of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene). *Chem. mat.*, vol. 14,p. 2590-2593, 2002.
- [62] Z. Yu, C. Ang, L. E. Cross; A. Petchsuk, T.C. Chung. Dielectric and electroactive strain properties of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylenechlorotrifluoroethylene) terpolymers. *AppliedPhysics Letters*, vol. 84, n. 10, 2004.

- [63] T.-B. Xua and J. Su, "Development, characterization, and theoretical evaluation of electroactive polymer-based micropump diaphragm," *Sensors and Actuators*, vol. 121, pp. 267-274, 2005.
- [64] Eury, R. Yimnirun, V. Sundar, P.J. Moses, S.-J. Jang, R.E. Newnham. Converse electrostriction in polymers and composites. *Materials chemistry and physics*. vol. 61, no1, pp. 18-23,1999.
- [65] F. M. Guillot and E. Balizer. Electrostrictive effect in polyurethanes. *Journal of Applied Polymer Science*. Volume 89 issue 2, pp 399-404, 2002
- [66] G. Gallone, F; Carpi, D. De Rossi, Dielectric constant enhancement in a silicone elastomer filed with lead magnesium niobate-lead titanate. *Material Science Engineering C*, pp 110-116, 2007.
- [67] F. Carmona, F. Barreau, P. Delhaes. An experimental model for studying the effect of anisotropy on percolative conduction. *J. Phys. Lett.*, 41, pp. 531-534, 1980.
- [68] Bret P. Neese, *The multifunctional properties of PVDF-based Polymers*, PhD Thesis, The Pennsylvania State University .2009
- [69] Klein R.J., Xia F., Zhang Q. M., Bauer F. Influence of composition on relaxor ferroelectric and electromechanical properties of poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene). *Journal of Applied Physics*, 2005, 97, 0941105-1-4.
- [70] S.H. Foulger. Electrical properties of composite in the vicinity of the percolation thershold. *J.Appl. Polym. Sci.*, 72, 1573, 1999.
- [71] J-C Dubois. "Propriétés diélectriques des polymères". *Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique*. E 1850.
- [72] C Kittel. "introduction à la Physique de l'état solide". 5 ème édition. Dunod université
- [73] J-C Dubois. "Propriétés diélectriques des plastiques". *Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique*. AM 3140.
- [74] 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.

- [75] R.E. Pelrine, R.D. Kornbluh, J.P. Joseph "Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation" SRI International, USA Sensors and Actuators A, vol. 64, p.77-85, 1998
- [76] Bell TJ, Field JS, Swain MV. Elastic-plastic characterization of thin films with spherical indentation. *Thin Solid Films* 1992;220:289–94.
- [77] Herbert EG, Pharr GM, Oliver WC, Lucas BN, Hay JL. On the measurement of stress-strain curves. *Thin Solid Films* 2001;398- 399:331–5.
- [78] [web COM-BAT] <http://www.inhabitat.com/2008/10/31/com-bat-solar-powered-spy-plane/>
- [79] Su, J., Harrison J.S., and St Clair T., "Novel Polymeric Elastomers for Actuation," Proc. of 12th ISAF, vol. 2, pp. 811-814 (2000)
- [80] T. Mirfakhrai, J. D.W.Madden and R.H. Baughman, "Polymer artificial muscles," *Materialstoday*, vol.10, num.4, pp.30-38(2007)
- [81] M. Gad-el-Hak, The fluid mechanics of microdevices: the Freeman Scholar Lecture, *J. Fluids Eng.* 121 (1997) 5–33.
- [82] MM. Attard, GW. Hunt. *International Journal of Solids and Structures.* 41, 5327–50 (2004).
- [83] EM. Arruda, MC. Boyce, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids.* 41, 389–412 (1993).
- [84] Wikipedia, the free encyclopedia. (Page consultée le 22/03/07). Énergie, [En ligne]. http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_fatale
- [85] Final Report, May 2007, prepared for the Carbon Trust and available at <http://www.carbontrust.co.uk/NR/rdonlyres/5F9FF8DF-A22F-4A0C-90393521638B7CD3/0/KeyComponentTechnologiesforCostReduction.pdf>.
- [86] R. Kornbluh, R. Pelrine, Q. Pei, M. Rosenthal, S. Stanford, N. Bonwit, R. Heydt, H. Prahlad, and S. Shastri, "Application of Dielectric Elastomer EAP Actuators," Chapter 16 in *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and*

Challenges, Y. Bar-Cohen, ed. 2nd edition, SPIE Press, Bellingham, Washington, pp. 529–589, 2004.

[87] Seiki Chiba, Mikio Wakib, Roy Kornbluha, Ron Pelrine, ‘Innovative Power Generators for Energy Harvesting Using Electroactive Polymer Artificial Muscles’ Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, SPIE Vol. 6927, 692715, (2008)

[88]. J.M. Floc’h, D. Cyne, T. Breget, « Problématique et solution en téléphonie mobile» Journées Electrotechniques du Club EEA, 21-22 mars 2002 – Cachan France pp 91-96

[89] Chatchai Putson. Energy conversion from electroactive materials and Modeling of behaviour on these materials. PhD thesis, INSA-Lyon 18 November 2010

[90] L. Lebrun, D. Guyomar, B. Guiffard, P.-J. Cottinet, C. Putson, The characterisation of the harvesting capabilities of an electrostrictive polymer composite Sens. Act. A Phys. 153 (2) (2009) 251-257

[91] P.-J. Cottinet, D. Guyomar, B. Guiffard, L. Lebrun and C. Putson Electrostrictive polymer composite for energy harvesters J. Polym. Eng. 31 (2011).

[92] M. Lallart, P.-J. Cottinet, L. Lebrun, B. Guiffard, D. Guyomar Evaluation of energy harvesting performance of electrostrictive polymer and carbon-filled terpolymer composite Journal of applied physics 108, 034901 (2010).

[93] D. Guyomar, P.-J. Cottinet, L. Lebrun, and G. Sebald “ Characterization of an electroactive polymer simultaneously driven by an electrical field and a mechanical excitation: An easy means of measuring the dielectric constant, the Young modulus and the electrostrictive coefficients” Physics Letters A 375 (2011) 1699–1702

[94] S. Fujisaki, H. Ishiwara and Y. Fujisaki. Low-voltage operation of ferroelectric polyvinylidene fluoridetrifluoroethylene copolymer capacitors and metal-ferroelectricinsulator- semiconductor diodes, Appl. Phys. Lett. 90, 162902 (2007).

[95] S. Eury, R. Yimnirun, V. Sundar, P.-J. Moses, S.-J. Jang, and R. E. Newnhan Converse electrostriction in polymers and composites Mater. Chem. Phys., vol. 61, no. 1, pp 18-23, (sep. 1999).

- [96] G.Gallone,F.Carpi,D.De Rossi , G.Levita , and A.Marchetti Dielectric constant enhancement in a silicon elastomer filled with lead magnesium niobate-lead titanate Mater. Sci .Eng .C , vol.27 ,no.1, pp110-116 , Jan.2007
- [97] Daniel Guyomar, Mickael Lallart, Pierre-Jean Cottinet “ Electrostrictive conversion enhancement of polymer composites using a nonlinear Approach” Physics Letters A Volume 375, Issue 3, 17 January 2011
- [98] Kaillang Ren , Yiming.liu ,H.Hofmann , and Q.M.Zhang “An active energy harvesting scheme with an electroactive polymer .” Applied physics letters 91(2007) 132910
- [99] P-J.Cottinet , D.Guyomar, M.Lallart , B .Guiffard, , L.Seveyrat “ Investigation of electrostrictive polymer efficiency for mechanical energy harvesting” ,IEEE Transaction ,Ultrasonics, Ferroelectrics ,and Frequency 58 . 1842 (2011)
- [100] C. GARY. "Effet couronne sur les réseaux électriques aériens". Techniques de l'Ingénieur D 4440
- [101] Shenck and J. A. Paradiso, “Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics”, IEEE Micro, vol 21., pp. 30-42, May-June 2001.
- [102] D. Guyomar, E. Lefeuvre, C. Richard et A. Badel, Piezoelectric energy harvesting circuit using a synchronized switch technique, SMEBA'03, Suzhou, Chine, mai 2004.
- [103] J. R. Burns, G. W. Taylor et T. R. Welsh, Sensors for power conversion systems, Brevet américain US 6 522 048, 18 fev. 2003.
- [104] P-J.Cottinet, Michail Lallart, Daniel Guyomar, Benoit Guiffard,Laurent Lebrun,Gael sebold Analysis of ac-dc conversion for energy harvesting using electrostrictive polymer P(VDF-TrFE-CFE), IEEE Transaction ,Ultrasonic, Ferroelectrics ,and Frequency 58 . 1842 (2011)
- [105] G. K. Ottman ,, H. F. Hofmannn , A. C. Bhatt, G. A. Lesieutre, “ Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply” IEEE transactions on power electronics Vol.17 . N0 40 pp 669-676 September 2002
- [106] E. Lefeuvre et al., A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems, Sensors and Actuators A, Vol. (126) : 405-416, 2006

- [107] K. Finkenzerler. RFID-Handbook, Radio-Frequency Identification: Fundamentals and Applications. Number 0-471-98851-0. Wiley 1 Sons LTD, Munich, Germany, 1999.
- [108] H. Guo et al., Nanopower Betavoltaic Microbatteries, In Proc. of Transducers 2003, Boston, Etats-Unis, Juin 8-12, 2003
- [109] G. Despesse, Etude des phenomenes physiques utilisables pour alimenter en energie electrique des microsystemes communicants, Thèse de doctorat de l'INPG, 2005
- [110] C. Watkins B. Shen, and R. Venkatasubramanian. Low-grade-heat energy harvesting using superlattice thermoelectrics for applications in implantable medical devices and sensors. In IEEE 2005 International conferences on Thermoelectrics, 2005
- [111] H.A. Sodano, G.E. Simmers, R. Dereux, and D.J. Inman. Recharging batteries using energy harvested from thermal gradient. Journal Of Intelligent Material Systems and Structures, 18:4-10,2006
- [113] G. Sebald, E. Lefeuvre and D. Guyomar. Pyroelectric energy conversion: Optimization Principles. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and frequency control, vol. 55, no. 3, March 2008.
- [114] G. Sebald, S. Pruvost and D. Guyomar. Energy harvesting based on Ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic. SMART MATERIALS AND STRUCTURES, 17, 015012 (6pp), 2007.
- [115] G. Sebald, D. Guyomar and A. Agbossou. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting. Smart materials and structures , 18 (2009) 125006 (7pp), 2009.
- [116] A. Cuadras, M. Gasulla, A. Ghisla, V. Ferrari, Energy Harvesting from PZT Pyroelectric Cells, Proc. IMTC, pp.1668- 1672, 2006.
- [117] R. Duggirala et al., Radioisotope micropower generator for CMOS self-powered sensor microsystems, Proc. Power MEMS, pp.133-136, 2004
- [118] T. Toriyama, M. Yajima, and S. Sugiyama, "Thermoelectric micro power generator utilizing self-standing polysilicon-metal thermopile," presented at Micro Electro Mechanical Systems, 2001. MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on, 2001.

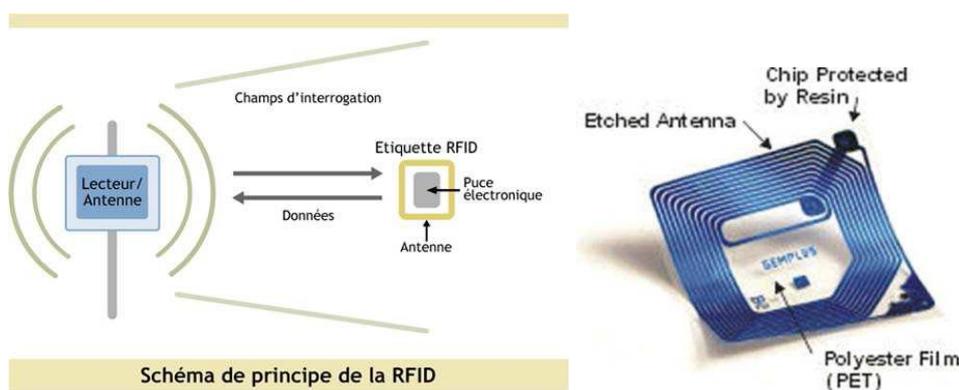
[119] T. Douseki, Y. Yoshida, F. Utsunomiya, N. Itoh, and N. Hama, "A batteryless wireless system uses ambient heat with a reversible-power-source compatible CMOS/SOI DCDC converter," presented at Solid-State Circuits Conference, 2003. Digest of Technical Papers. ISSCC. 2003 IEEE International, 2003.

ANNEXES

Annexe 1

Source Radiofréquence

Avec la prolifération des émetteurs radio (téléphonie, télévision, radio...) notamment dans le milieu urbain, les émissions RF peuvent ainsi être considérées comme des sources d'énergies ambiantes. Le principe de l'utilisation de l'énergie RF est déjà largement répandu dans le milieu industriel, avec la généralisation des étiquettes RFID (figure A.1). Le principe de ces puces est de récupérer l'énergie de sources électromagnétiques placées à proximité afin de pouvoir envoyer leur code d'identification, ainsi que décrit dans [107].



(a) Schéma de principe de la technologie RFID

(b) Exemple de puce

RFID

(<http://www.trevice-consulting.com>)

(SOLUCOM GROUP)

Figure A1.1: Utilisation de l'énergie radiofréquence pour la RFID

Les ondes hertziennes (en d'autres termes radio) peuvent fournir une quantité d'énergie importante, à condition de se trouver près de l'émetteur. En effet, l'énergie disponible décroît avec le carré de la distance séparant la source du générateur. Pour un réseau à la superficie étendue, il faut donc soit des sources extrêmement puissantes (se pose alors la question de la nocivité du bombardement électromagnétique), soit quadriller le réseau avec plusieurs sources.

A. Rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge peut être collecté à l'aide de panneaux solaires adaptés à cette longueur d'onde. Il est généralement émis par des corps très chauds (supérieurs à 800 K). Cela limite donc les possibilités d'utilisation à quelques cas très particuliers. Il est alors nécessaire de placer de telles cellules à côté de sources très chaudes ($T > 900^{\circ}\text{C}$) pour que ces systèmes de récupération d'énergie soient rentables. Il existe également des déclinaisons similaires pour l'ultraviolet ou les rayons X.

B. Rayonnement solaire

C'est le type de rayonnement le plus souvent employé jusqu'à aujourd'hui. Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Puisque la gamme de puissances disponibles est très intéressante, ce domaine est en développement constant depuis plusieurs années (piles solaires dans des calculatrices, des montres etc.) .De plus, il est nécessaire qu'un dispositif ainsi alimenté soit bien exposé au rayonnement ce qui est possible uniquement dans une gamme spécifique d'applications. Il est par exemple impossible d'utiliser cette méthode pour fournir de l'énergie aux systèmes implantés ou déposés dans des endroits sombres. La récupération d'énergie issue du rayonnement solaire est possible grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques fabriquées à partir de wafers de silicium dans la majorité des cas. Lorsqu'un photon arrive au niveau du semi-conducteur avec une énergie suffisante, il arrache un électron et crée un trou électronique Figure A1. 2.

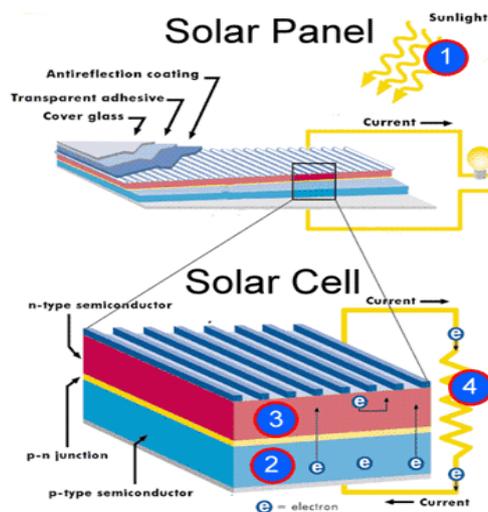


Figure A1. 2 . Cellule photovoltaïque

Ainsi, si le rayonnement lumineux est de l'ordre de 10 à 100mW/cm² pour un éclairage solaire direct, il n'est que de 10 à 100μW/cm² pour une lumière artificielle standard. Les applications des cellules photovoltaïques couvrent une très large échelle de puissance, allant de quelques microwatts pour des applications miniatures tels que les calculatrices solaires à plusieurs kilowatts dans le cas des centrales électriques solaires. Si le rendement des cellules photovoltaïques reste généralement en dessous de 20% pour les produits commerciaux courants, des modèles encore au stade de la recherche atteignent d'ors et déjà près de 35% d'efficacité. La principale limitation des systèmes de récupération de l'énergie lumineuse est bien entendue relative à la très forte sensibilité de ce type de dispositif aux conditions d'éclairement.

C. Rayonnement nucléaire

Le rayonnement nucléaire a également des applications plutôt assez restreintes. Les sources naturelles sont généralement trop faibles pour espérer alimenter quoi que ce soit (de l'ordre du fW.m⁻²). Par contre, les sources artificielles peuvent parfois être employées (ce fût par exemple le cas dans certaines générations de pacemakers) avec néanmoins les risques dûs à la radioactivité que l'on connaît. 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 .Un autre principe plus souvent utilisé est l'effet beta-voltaïque, analogue aux piles solaires [108]. Ces dispositifs sont de très basse efficacité de l'ordre de 0,5%. De plus il y a un compromis entre la durée de vie et la puissance, parce que la radiation incidente détruit progressivement le convertisseur.

Annexe 2

A.2.1. Thermoélectricité

La différence de température entre deux points peut être utilisée pour récupérer de l'énergie par transfert de chaleur. Théoriquement, il suffit d'introduire un convertisseur entre deux points avec des températures différentes pour récolter de l'énergie. Mais en général, il est très difficile d'obtenir des différences de température élevées pour des dispositifs de taille millimétrique. De plus, malgré une forte activité de recherche, les performances des matériaux thermoélectriques sont encore très faibles. Il suffit de constater que la figure de mérite caractérisant les performances intrinsèques de matériaux thermoélectriques valait un peu depuis la découverte du Tellure de Bismuth en 1957 jusqu'en 1999 quand les premiers matériaux nano-structurés sont apparus. Actuellement les meilleurs matériaux ne dépassent pas la figure de mérite de trois [109]. Deux phénomènes peuvent être utilisés pour la récupération d'énergie thermique. Le premier constituant par exemple la récupération d'énergie géothermique, consiste à exploiter le gradient spatial de température entre deux zones ([110, 111, 112]). Le second [113, 114, 115], consiste à récupérer de l'énergie thermique à partir de variations temporelles de température.

A.2.1.1. Pyroélectricité

Ce principe repose sur l'utilisation de matériaux pyroélectriques, c'est-à-dire de matériaux sur lesquels une variation (temporelle) de température provoque un changement de la polarisation électrique et l'apparition d'un courant. Pour produire de l'énergie électrique, le matériau doit subir des variations rapides et continues de température. Il a été démontré que ce système avait une puissance de sortie faible [116].

A.2.1.2. Thermoélectricité classique

Les systèmes thermoélectriques se servent d'un gradient de température pour produire de l'énergie électrique, ce que l'on nomme « effet Seebeck ». Ces systèmes de récupération d'énergie sont basés sur l'utilisation de thermocouples : des jonctions p-n jointes par un matériau conducteur (figure A.2.1).

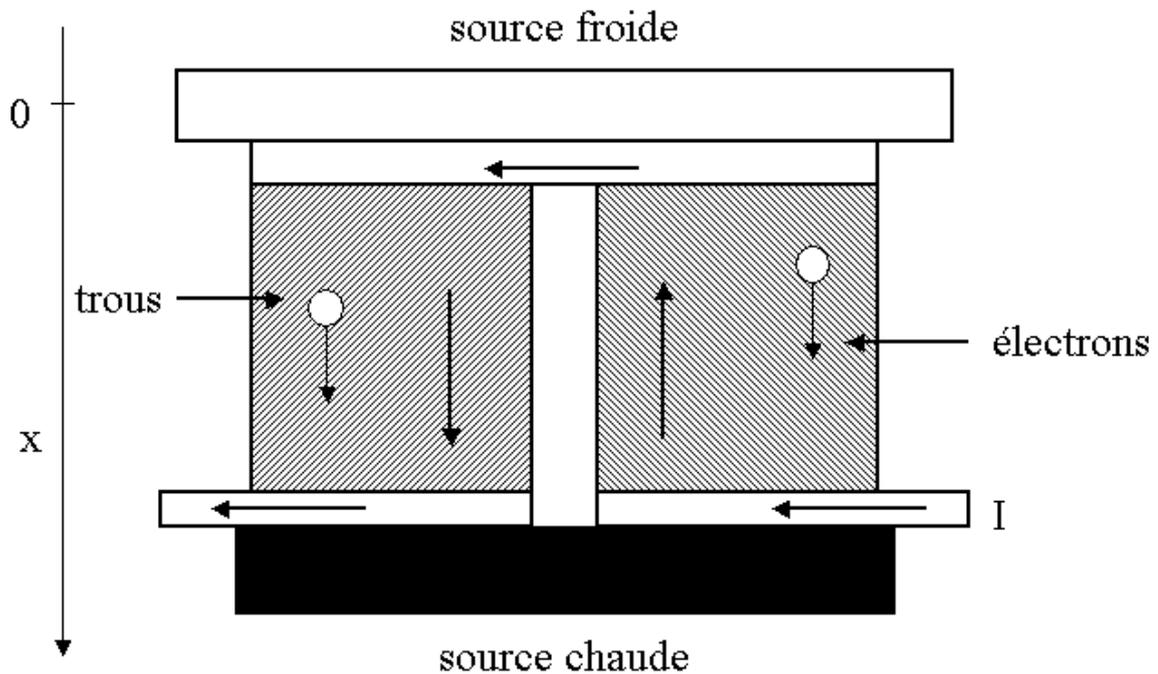


Figure A.2.1. Thermocouple [117]

La différence de température entre deux points peut être utilisée pour récupérer de l'énergie par transfert de chaleur. Le cycle de Carnot permet de calculer le rendement théorique maximal d'un tel dispositif. Ce rendement est donné par (A2.1), où T_H est la température haute et T_B la température basse. Cette expression montre bien que le rendement est très faible dans le cas de faibles écarts de température (en degré Kelvin). Par exemple, entre un corps humain à 37°C et une pièce à 20°C , on ne peut pas espérer obtenir un rendement supérieur à 5.5%.

$$\eta = \frac{T_H - T_B}{T_H} \quad (\text{A2.1})$$

De nombreux systèmes utilisant ce procédé ont été commercialisés, notamment par les sociétés Thermolife, Micropelt, Thermoelectrics.com.... Ces systèmes sont compatibles avec la miniaturisation, mais il est généralement nécessaire d'avoir de forts gradients de températures et un flux thermique important pour que ces systèmes soient rentables. Pour

cela, il est nécessaire de placer des radiateurs de taille importante par rapport au convertisseur pour canaliser le flux thermique.

Des micro-générateurs ont néanmoins été développés, leur rendement est généralement inférieur à 10% pour des transferts de chaleur de 200°C à 20°C et inférieur à 1% pour des transferts de chaleur de 40°C à 20°C. La figure A.2.2 représente ainsi une micro-pile réalisée par Toriyama et al [118] capable de délivrer quelques μW . Des applications plus coûteuses en énergie ont même

été alimentées avec succès par un générateur thermoélectrique. Ainsi, Douseki et al [119] ont développé un système de communication sans fil autonome tirant son énergie de la différence de température entre l'environnement ambiant et le corps humain ou de l'eau froide. Pour cette application, la puissance de sortie du générateur thermoélectrique était de 1.6mW. Quelques applications industrielles utilisent des générateurs thermoélectriques. Parmi elles la montre bracelet Seiko Thermic représenté sur la figure A.2.3. Celle-ci utilise 10 modules thermoélectriques qui génèrent suffisamment de microwatts pour entretenir le mouvement mécanique de la montre à partir du gradient thermique entre l'air ambiant et le corps humain.

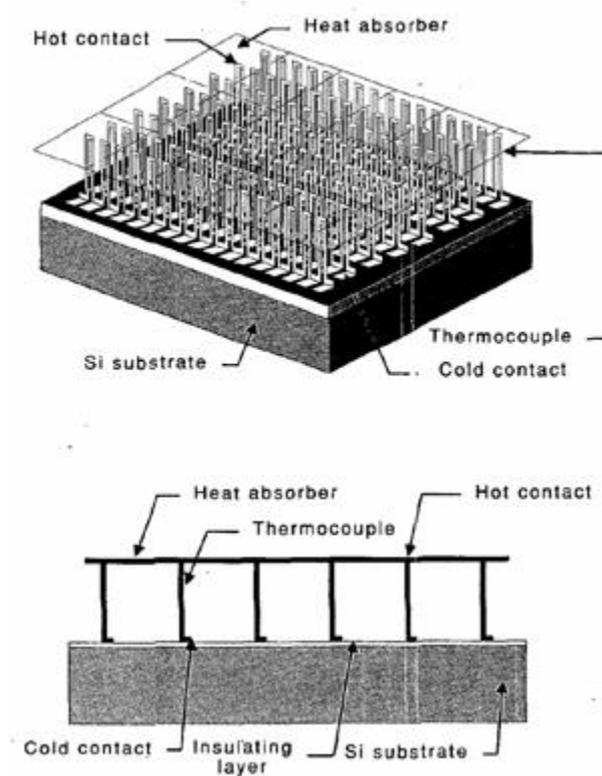


figure A.2.2. Thermopile développée par Toriyama et al [118]

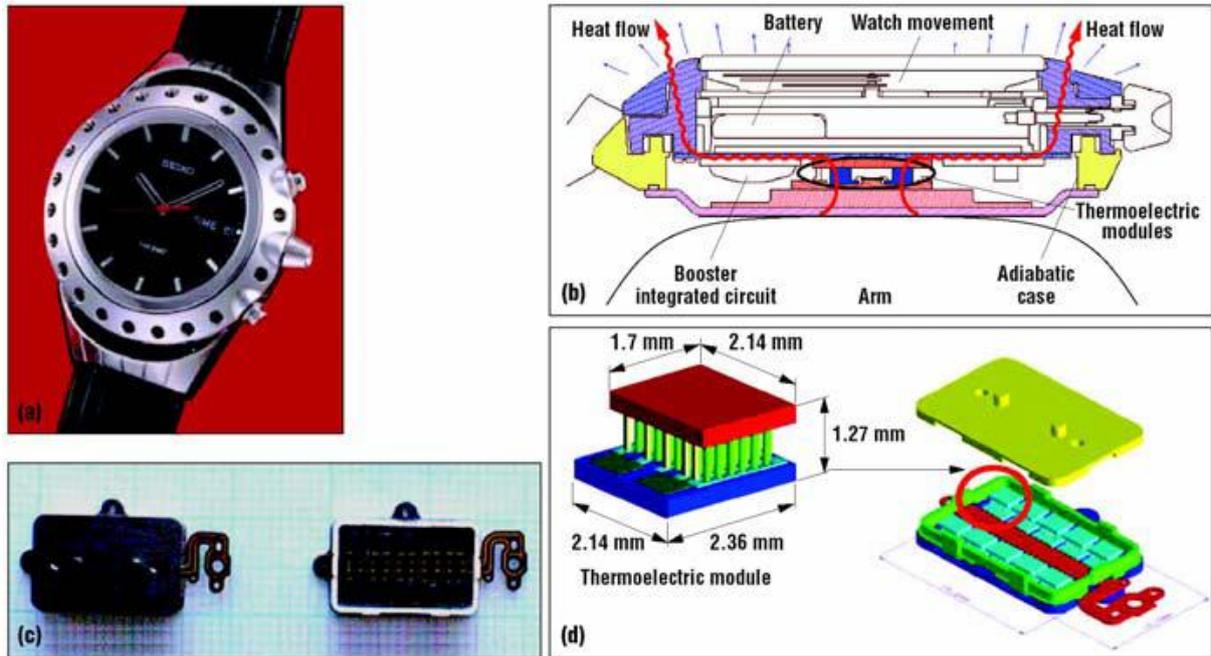


figure A.2.1 Montre Thermique Seiko : (a) le produit ; (b) coupe transversale ; (c) modules thermoélectriques ; (d) schéma d'un module thermoélectrique. Copyright Seiko Instruments [119]

A.2.1.3. Conversion thermoïonique

Lorsqu'un métal ou un oxyde métallique est porté à hautes températures, des électrons parviennent à s'échapper du matériau. Les électrons sont récupérés par une surface de plus basse température placée en regard de l'électrode chauffée. Il y a apparition d'un courant électrique entre les deux surfaces et donc récupération d'énergie. Pour faire fonctionner ces systèmes, il faut au moins chauffer l'électrode à 800K, ce qui n'est pas compatible avec la récupération d'énergie ambiante.

A.2.1.4. Effet thermotunnel

L'effet thermotunnel se base sur le même principe que la conversion thermoïonique. La différence se situe au niveau de la largeur du gap entre les deux électrodes. En effet, si l'on diminue la largeur du gap jusqu'à quelques centaines de picomètres, les électrons peuvent passer d'une surface à l'autre sans forcément avoir besoin d'une forte température, permettant de ce fait, de rendre le système compatible avec la récupération d'énergie ambiante. Ce type de système présente un bon rendement pour le refroidissement de surface (refroidissement

thermoïonique) mais n'est pas particulièrement performant pour la récupération d'énergie au regard des défis technologiques associés [120].