N° d'ordre 2016LYSEI030
Année 2016

Thèse

Nouvelles structures à polymères électroactifs

Présentée devant
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

École doctorale
École doctorale EEA (spécialité : Génie Électrique)

Par
Alexandru CORNOGOLUB
Ingénieur INSA de Lyon
Soutenue le 8 avril 2016 devant la Commission d'examen

Jury MM.

Directeur	L. Petit	Professeur des Universités (LGEF, INSA de Lyon)
Co-directeur	P.J. Cottinet	Maître de Conférences (LGEF, INSA de Lyon)
Rapporteur	B. Guiffard	Professeur des Universités (IETR)
Rapporteur	J.F. Rouchon	Professeur des Universités (INP-ENSEEIHT)
Examinateur	K. Rabenorosoa	Maître de Conférences (FEMTO-ST)
Président	J. C. Carmona	Professeur des Universités (ENSAM-AIX en Provence)

Laboratoire de recherche : **L**aboratoire de **G**énie **É**lectrique et **F**erroélectricité

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** **http://www.edchimie-lyon.fr** Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3e etage secretariat@edchimie-lyon.fr Insa : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	**ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **http://edeea.ec-lyon.fr** Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	**EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Sec : Safia AIT CHALAL Bat Darwin - UCB Lyon 1 04.72.43.28.91 Insa : H. CHARLES Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@ univ-lyon1.fr
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE** **http://www.ediss-lyon.fr** Sec : Safia AIT CHALAL Hôpital Louis Pradel - Bron 04 72 68 49 09 Insa : M. LAGARDE Safia.ait-chalal@univ-lyon1.fr	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES** **http://infomaths.univ-lyon1.fr** Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3e etage infomaths@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie CALABRETTO LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr
Matériaux	**MATERIAUX DE LYON** **http://ed34.universite-lyon.fr** Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedexo Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 Ed.materiaux@insa-lyon.fr
MEGA	**MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE** **http://mega.universite-lyon.fr** Sec : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	**ScSo** **http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/** Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr	Mme Isabelle VON BUELTZINGLOEWEN Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

NOUVELLES STRUCTURES A POLYMERES ELECTROACTIFS.

Alexandru CORNOGOLUB
Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF), INSA de Lyon
Ecole doctorale EEA.
Directeur de thèse : Lionel PETIT, Professeur à l'INSA de Lyon
Co-encadrant : Pierre-Jean COTTINET, Maitre de conférences à l'INSA de Lyon

Résumé

Les polymères diélectriques voient leur importance croitre dans le domaine des matériaux électroactifs car ils présentent d'indéniables avantages, notamment pour de potentielles applications telles que la récupération d'énergie, l'actionnement ou encore les capteurs.

Ces travaux de thèse se veulent exploratoires et visent principalement à proposer d'une part une nouvelle approche hybride piézoélectrique-polymère pour le développement de récupérateur d'énergie et d'autre part à développer des méthodes d'actionnement destinée au contrôle de forme structurelle.

L'utilisation de polymères diélectriques dans les dispositifs de récupération d'énergie permet de concilier une densité énergétique élevée avec une faible rigidité et une simplicité de mise en œuvre. Mais le principe de tels dispositifs nécessitent obligatoirement l'utilisation d'une source externe de tension de polarisation, de surcroit très élevée (>1kV), pour atteindre des densités énergétiques importantes.

L'approche hybride proposée dans le cadre de ces travaux permet de s'affranchir de cette source de polarisation externe en la substituant par un dispositif piézoélectrique apte à générer, sous l'action d'une contrainte mécanique, le champ électrique nécessaire au fonctionnement du dispositif. L'optimisation du transfert d'énergie entre deux systèmes supposé quelconque a d'abord été généralisée.

Les travaux ont ensuite été orientés vers l'investigation de la faisabilité de l'approche hybride piezo-polymère. Différentes configurations ont été proposées et évaluées afin d'en déduire leurs critères d'optimisation. Les performances des dispositifs hybrides ont été évaluées expérimentalement et comparées à celles obtenues avec des récupérateurs piézoélectriques simples et avec des récupérateurs polymères à polarisation externe.

Il est montré que l'utilisation d'un dispositif hybride permet de concilier les qualités des deux approches simples, à savoir la faculté d'initier le processus de conversion d'énergie grâce au champ électrique généré par l'élément piézoélectrique et d'exploiter la haute densité d'énergie des polymères.

La deuxième partie de ces travaux portent sur l'utilisation de matériaux électroactifs comme dispositif d'actionnement destinés au contrôle de forme de structures minces. L'application finale visée ici est le développement de matériau de type *peau active* permettant la reconfiguration en orbite d'antennes satellites.

Différents types de polymères ont d'abord été testés et leur performances ont été comparées avec des modèles théoriques spécifiquement développés dans ce cadre. Des structures originales ont été proposées pour solutionner certains problèmes liés à l'actionnement par polymères diélectriques. Des prototypes simples ont permis de valider le principe du contrôle de forme de structure à l'aide de polymères diélectriques.

Si leur utilisation amène d'indéniables avantages par rapport aux techniques classiques d'actionnement, il n'en demeure pas moins que certaines caractéristiques spécifiques des polymères électroactifs limitent leurs performances. Par exemple, la loi quadratique de commande typique au polymère électroactif nécessite l'utilisation de géométries particulières afin d'obtenir un

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

déplacement bidirectionnel symétrique. Cela complexifie de fait la commande de tels actionneurs mais permet au final d'ajouter de nouvelles fonctionnalités.

Ainsi l'utilisation d'un réseau sectorisé d'actionneur polymère est nécessaire pour obtenir un déplacement symétrique sur une simple structure de type poutre bloquée-bloquée, mais permet d'envisager différents profils de déformation.

D'autres problèmes similaires ont été aussi adressés en proposant des structures originales.

Mots clés : matériau électroactif, polymère diélectrique, matériau piézoélectrique, contrôle de forme, récupération d'énergie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

Dielectric polymers have seen their importance grow in the field of electroactive materials because of their undeniable advantages, particularly for potential applications such as energy harvesting, actuation or sensors.

The work done in this thesis is exploratory and aims primarily to provide on one hand a new piezoelectric-polymer hybrid approach for the development of energy harvesting systems and secondly to develop operating methods shape control of structures using electroactive polymers.

The use of dielectric polymers in energy harvesting devices reconciles a high energy density with low rigidity and simplicity of integration. The main problem which is characteristic of such devices is that they necessarily require the use of an external bias high voltage supply (> 1kV) to achieve significant energy densities.

The hybrid approach proposed in the context of this work eliminates this source of external energy by using a piezoelectric device capable of generating, under the action of a mechanical stress, the electric field required to operate the device. The problem of optimization of energy transfer between any two systems was also studied.

The work was then directed towards the investigation of the feasibility of the piezo-polymer hybrid approach. Various configurations have been proposed and evaluated in order to deduce their optimal parameters. The performance of hybrid devices was experimentally evaluated and compared with that obtained with simple piezoelectric or electrostatic (using polymers) systems.

It is shown that the use of a hybrid system allows to combine the qualities of both simple approaches, namely the energy autonomy through the electric field generated by the piezoelectric element and the high energy density of the polymers.

The second part of this work focuses on the use of electroactive materials as actuators for shape control of thin structures. The final application aimed here is the development of an active skin type material allowing reconfiguration of orbiting satellite antennas.

Different types of polymers were first tested and their performance has been compared with the theoretical models developed specifically in this context. Original structures have been proposed to solve some problems related to the actuation using dielectric polymers. Simple prototypes have validated the principle of the structural shape control.

If their use brings undeniable advantages over conventional operating techniques, the fact remains that certain specific characteristics of electroactive polymers limit their performance. For example, the square law characteristic of the electroactive polymer control requires the use of particular geometries in order to obtain a symmetrical two-way displacement. This fact complicates the control of such actuators but allows in the end to add new features.

Thus the use of a sectored network of polymer actuator is required to obtain a symmetrical movement on a single type of structure blocked blocked-beam, but allows to consider different deformation profiles.

Other similar problems have been addressed using different original structures.

Keywords: electroactive material, dielectric polymer, piezoelectric material, shape control, energy harvesting.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Remerciements

Je voudrais remercier tout d'abord les encadrants de cette thèse : Lionel Petit et Pierre-Jean Cottinet pour leur aide et conseils. Je tiens à remercier aussi les directeurs du laboratoire : Daniel Guyomar et Laurent Lebrun pour leur accueil et soutien.

Ensuite, je voudrais dire merci au personnel technique pour leur aide avec les manips et les matériaux (merci beaucoup à Frédérique pour la réalisation des pièces) et à Evelyne Dorieux pour sa disponibilité et efficacité dans les tâches administratives.

Je voudrais aussi remercier les autres étudiants en thèse et les personnes qui ont corrigé ce manuscrit.

Merci beaucoup.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

Remerciements 8
Introduction générale 12
Chapitre 1. État de l'art et généralités sur les matériaux électroactifs et leurs applications 14
1.1 Les matériaux piézoélectriques 14
1.1.1 Fonctionnement et historique 14
1.1.2 Equations caractéristiques 19
1.2 Les matériaux électrostrictifs 20
1.2.1 Fonctionnement et historique 20
1.2.2 Différents types de polymères électrostrictifs 22
1.2.3 Equations caractéristiques 24
1.3 Autres matériaux électroactifs 24
1.4 Génération d'énergie électrique utilisant des matériaux électroactifs 25
1.4.1 Introduction 25
1.4.2 Historique et évolution 28
1.4.3 Projets actuels des systèmes de récupération d'énergie sur le mouvement du corps humain 30
1.4.4 Récupération d'énergie avec des matériaux piézoélectriques et polymères électrostrictifs 32
1.5 Etat de l'art des actionneurs utilisant des matériaux électroactifs pour le contrôle de forme 34
1.5.1 Systèmes optiques actifs 34
1.5.2 Antennes flexibles et déployables, voiles solaires 37
1.6 Conclusion 39
Chapitre 2. Optimisation du transfert d'énergie 40
2.1 Considérations physiques sur le transfert d'énergie et son optimisation 40
2.2 Méthodes mathématiques d'optimisation des transferts d'énergie 47
..... 47
2.2.1 Exemple de problèmes visés 47
..... 50
2.2.2 Méthodes fréquentielles 50
2.2.3 Méthodes temporelles 52
2.3 Application aux systèmes de récupération d'énergie 53
2.3.1 Systèmes piézoélectriques 53
2.3.2 Systèmes électrostatiques 61
2.4 Conclusion 64
Chapitre 3. Considérations théoriques sur la récupération d'énergie avec des systèmes utilisant des matériaux piézoélectriques et des polymères diélectriques 65

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.1 Introduction 65
3.2 Récupération d'énergie avec des polymères diélectriques 66
3.2.1 Généralités 66
3.2.2 Injection et extraction d'énergie électrique 66
3.2.3 Excitation mécanique 73
3.3 Récupération d'énergie avec des matériaux piézoélectriques 76
3.3.1 Généralités 76
3.3.2 Transferts d'énergie électrique 76
3.3.3 Injection d'énergie mécanique 77
3.4 Structures de récupération d'énergie hybrides 79
3.4.1 Introduction 79
3.4.2 Configurations électriques possibles 81
3.4.3 Configurations hybrides avec recyclage des charges électrique 85
3.5 Conclusion 88
Chapitre 4. Travail expérimental sur la récupération d'énergie avec des matériaux électroactifs 89
4.1 Caractérisation des matériaux 89
4.1.1 Polymères diélectriques 89
4.1.2 Electrodes 96
4.1.3 Caractérisation des céramiques piézoélectriques 100
4.2 Systèmes simples de récupération d'énergie 103
4.2.1 Récupération d'énergie avec des éléments piézoélectriques excités en compression 103
4.2.2 Sortie redressée 107
4.2.3 Dalle piézoélectrique 109
4.2.4 Récupération d'énergie avec des polymères 111
4.2.5 Systèmes de récupération d'énergie utilisant des polymères diélectriques déformés en compression 116
4.3 Systèmes hybrides 120
4.3.6 Transfert unidirectionnel des charges 120
4.3.7 Préservation des charges électriques 122
4.4 Conclusion 124
Chapitre 5. Étude et modélisation des films électroactifs 125
5.1 Considérations générales sur la modélisation des films électroactifs 125
5.1.1 Cinématique 125
5.1.2 Contraintes et forces 126
5.1.3 Régime de faibles et grandes déformations, déplacements et rotations 127
5.1.4 Contraintes électriques 131
5.1.5 Remarques supplémentaires 133
5.2 Modélisation des films électroactifs présentant un comportement bidimensionnel 133

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

5.2.1 Comportement élastique 134
5.2.2 Contraintes électriques 134
5.2.3 Comportement et hypothèses simplificatrices 134
5.2.4 Film électroactif en régime de faibles déplacements 137
5.2.5 Optimisation de différentes couches 145
5.3 Conclusion 151
Chapitre 6. Travail expérimental sur l'actionnement et le changement de forme des structures minces utilisant des matériaux électroactifs 152
6.1 Méthodes de caractérisation des films électroactifs 152
6.2 Structures unimorphes simples 156
6.2.1 Films bloqué-libres 156
6.2.2 Films segmentés avec les bords bloqués 163
6.3 Films électroactifs couplés 173
6.3.1 Mode flexion 173
6.3.2 Mode membrane 175
6.3.3 Validation expérimentale 177
6.4 Conclusion 179
Conclusion générale et perspectives 180
A.1. Montage pour la caractérisation et l'excitation mécanique des éléments piézoélectriques 195
A.2. Montage pour la caractérisation et l'excitation mécanique des films diélectriques 195
A.3. Montage utilisé pour l'excitation mécanique axiale en compression des polymères 196
A.4. Montages pour le positionnement précis d'un film et son déformation axiale et axisymétrique 197
Annexe B : Méthodes et techniques de fabrication des polymères et électrodes 198
B.1. Préparation des films de polyuréthane 198
Liste des figures 199
Liste des tableaux 206

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Introduction générale

Le développement des systèmes dits *intelligents* s'inscrit désormais comme une tendance émergeante dans la plupart des domaines, qu'ils soient industriels ou directement liés à la recherche.

Ce sont des systèmes capables d'interagir sur leur environnement interne et/ou externe qui intègrent dans ce but une multitude de fonctions électroniques, mécaniques ou couplées principalement dédiées à la mesure, à l'analyse, à la prise de décision ou encore à l'actionnement.

Les matériaux électroactifs apparaissent comme des éléments incontournables de ces dispositifs intelligents car ils permettent de réaliser, voire cumuler, diverse fonctions de type capteurs, actionneurs ou récupérateur d'énergie sur sources ambiantes. Les matériaux piézoélectriques et les polymères diélectriques ou ioniques sont ainsi d'excellents candidats pour ce type d'applications.

S'ils ont en commun le fait d'exploiter un couplage entre grandeurs électriques et grandeurs mécaniques, ils présentent généralement des propriétés physiques générales très variées justifiant le fort intérêt porté par la communauté scientifique sur leur développement et leur optimisation. Effectivement, le fait de disposer d'un large panel de matériaux permet d'envisager une multitude d'applications et de répondre aux mieux aux contraintes mécaniques, thermiques et électriques imposées.

Mais ces matériaux ne sont pas tous au même degré de maturité et certains sont encore largement à l'état de développement. C'est notamment le cas des polymères électroactifs qui voient pourtant leur importance croitre dans le domaine des matériaux électroactifs car ils présentent d'indéniables avantages, notamment en terme de facilité de production et d'intégration.

Ces travaux de thèse se veulent exploratoires et visent principalement à proposer d'une part une nouvelle approche de récupération d'énergie sur gisement vibratoire utilisant des techniques hybrides piézoélectrique-polymère et d'autre part à développer des méthodes d'actionnement à base de matériau polymère destinées au contrôle de forme structurelle.

Le premier chapitre porte sur un état de l'art et introduit certains éléments génériques sur les matériaux piézoélectriques et les matériaux polymères électroactifs

Le deuxième chapitre introduit dans un premier temps quelques notions fondamentales permettant d'appréhender au mieux le transfert d'énergie entre deux systèmes quelconque et tend à mettre en place une approche mathématique permettant l'optimisation de ce transfert.

Cette approche est alors appliquée au cas particulier de la récupération d'énergie à l'aide de systèmes piézoélectriques et de systèmes électrostatiques et permet d'en dégager certains critères d'optimisation.

Le troisième chapitre propose une approche théorique d'une nouvelle méthode de récupération d'énergie hybride. Si l'utilisation de polymères diélectriques permet de concilier une faible rigidité et une grande simplicité de mise en œuvre, l'utilisation d'une source externe de polarisation reste obligatoire pour atteindre des densités énergétiques importantes.

L'approche hybride proposée dans le cadre de ces travaux permet de s'affranchir de cette source de polarisation externe en la substituant par un dispositif piézoélectrique apte à générer, sous l'action d'une contrainte mécanique, le champ électrique nécessaire au fonctionnement du dispositif.

Plusieurs configurations ont été proposées et évaluées afin d'en déduire les critères d'optimisation. Il est montré que l'utilisation d'un dispositif hybride permet de concilier les qualités des deux approches simples, à savoir la faculté d'initier le processus de conversion d'énergie grâce au champ

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

électrique généré par l'élément piézoélectrique et d'exploiter la haute densité d'énergie des polymères.

Le quatrième chapitre présente la validation expérimentale des méthodes introduites dans le chapitre précédent.

Une phase initiale de caractérisation des matériaux polymères et piézoélectriques s'est d'abord révélée nécessaire afin de maitriser au mieux leurs critères de sélection et d'intégration.

Il a été ensuite présenté des résultats expérimentaux sur la récupération d'énergie avec élément piézoélectrique seul, puis avec élément polymère seul afin de discerner les potentialités, les avantages et les limites de chacun d'eux. Le cas de la récupération d'énergie sur une sollicitation mécanique en compression a notamment été traité car il présente une source potentielle d'applications intégrant les systèmes de récupération sur passage de piétons et / ou de véhicules.

Enfin la possibilité de combiner les deux approches a été évaluée afin de d'établir les avantages potentiels d'une approche hybride.

Le cinquième chapitre s'inscrit dans la deuxième partie de ces travaux portant sur les applications des polymères électroactifs dans des dispositifs d'actionnement.

Il se focalise sur l'étude et la modélisation de films minces électroactifs qui demeurent la structure élémentaire d'actionneur, notamment pour générer des modes de déformations en flexion, qui seront exploités par la suite dans les dispositifs de contrôle de forme.

Le dernier chapitre porte sur l'utilisation de matériaux électroactifs comme dispositifs d'actionnement destinés au contrôle de forme de structures minces. L'application finale visée ici est le développement de matériau de type *peau active* permettant la reconfiguration en orbite d'antennes satellites car cette fonctionnalité est une attente forte dans le secteur de l'aérospatiale. Les contraintes imposées en termes de faible masse rapportée, de simplicité d'intégration et de faible rigidité désigne de fait le polymère électroactif comme un excellent candidat à ce type d'applicatifs.

Différents types de polymères ont d'abord été testés et leur performances ont été comparées avec des modèles théoriques spécifiquement développés dans ce cadre. Des structures originales ont été proposées pour solutionner certains problèmes liés à l'actionnement par polymères diélectriques. Des prototypes simples ont permis de valider le principe du contrôle de forme de structure à l'aide de polymères diélectriques.

Si leur utilisation amène d'indéniables avantages par rapport aux techniques classiques d'actionnement, il n'en demeure pas moins que certaines caractéristiques spécifiques des polymères électroactifs limitent leurs performances. Par exemple, la loi quadratique de commande typique au polymère électroactifs nécessite l'utilisation de géométries particulières afin d'obtenir un déplacement bidirectionnel symétrique. Cela complexifie de fait la commande de tels actionneurs mais permet au final d'ajouter de nouvelles fonctionnalités.

Ainsi l'utilisation d'un réseau sectorisé d'actionneur polymère est nécessaire pour obtenir un déplacement symétrique sur une simple structure de type poutre bloquée-bloquée, mais permet d'envisager différents profils de déformation.

D'autres problèmes similaires ont été solutionnés en proposant des structures originales.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 1. État de l'art et généralités sur les matériaux électroactifs et leurs applications

On pourrait définir les matériaux électroactifs comme des matériaux qui présentent un couplage électro-mécanique. En même temps, il semblerait que cette notion ait évoluée dans le temps et qu'elle soit utilisée auparavant avec une signification différente. Par exemple, avant les années deux milles on retrouve ce qualificatif surtout dans le domaine des matériaux électrolytes utilisés pour la conception des batteries, ainsi que dans le domaine des matériaux photo-actifs et des polymères conducteurs [1,2]. Vers la fin des années '90 différents publications suggèrent une utilisation du même terme pour des matériaux présentant un couplage électro-mécanique, appliqués à la récupération d'énergie mécanique ou à l'actionnement [1–3]. Dans ce travail on s'intéresse à cette catégorie des matériaux électroactifs.

Dans ce chapitre on se propose de faire une description succincte de ce type de matériaux en mettant l'accent sur les matériaux piézoélectriques et les polymères diélectriques. On veut aussi examiner l'état de l'art de l'utilisation des matériaux électroactifs dans des applications d'actionnement et récupération d'énergie pour identifier les perspectives possible et justifier l'intérêt de leur utilisation.

1.1 Les matériaux piézoélectriques

1.1.1 Fonctionnement et historique

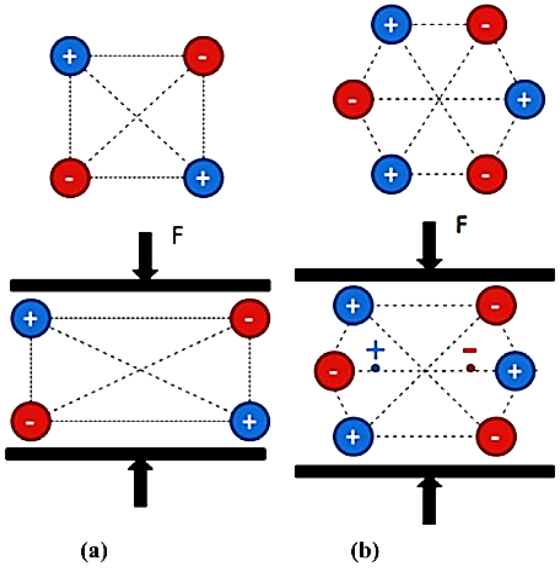


Figure 1 : Illustration du phénomène de piézoélectricité dans des cristaux hypothétiques à deux dimensions [51]
a) réseau carré non piézoélectrique b) réseau hexagonal piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux qui se polarisent ou voient leur polarisation électrique modifiée lorsque des contraintes mécaniques externes sont appliquées et inversement, qui subissent des déformations lorsqu'un champ électrique est appliqué (Figure 1). Les deux phénomènes sont appelés effet piézoélectrique direct et inverse. Pour qu'un matériau cristallin soit piézoélectrique il est nécessaire qu'il présente une certaine asymétrie dans sa structure (par exemple parmi les 32 classes de cristaux il y a seulement 20 qui peuvent être piézoélectriques). L'effet piézoélectrique a été observé expérimentalement pour la première fois en 1880 par les frères Pierre

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

et Jacques Curies [4], en étudiant différentes substances cristallines comme la tourmaline, le quartz, la topaze, le sucre de Canne et le sel de Rochelle.

En 1881 l'effet piézoélectrique inverse prédit par Gabriel Lippmann (prix Nobel pour l'invention de la photographie en couleur vers 1890) a été aussi confirmé par des mesures (toujours par les frères Curie). Pendant les 30 années suivantes le phénomène de la piézoélectricité a fait l'objet de différentes études, qui ont révélé de nouveaux matériaux cristallins piézoélectriques. Pourtant la première application pratique, le sonar n'a été conçu que vers la fin de la première guerre mondiale, conçu initialement pour la détection des sous-marins. Ce retard pourrait être expliqué probablement par la concurrence des matériaux piézoélectriques avec les technologies existantes à l'époque (comme les dispositifs électromagnétiques par exemple) et aussi par leur comportement assez complexe (équations tensorielles etc.). Et pourtant après l'invention du sonar très vite ensuite d'autres applications importantes ont été proposées. Ainsi vers 1921 Walter Cady découvre la possibilité d'utiliser la résonnance mécanique d'un cristal piézoélectrique pour générer des vibrations électriques. Il invente ainsi les premiers oscillateurs utilisant des cristaux piézoélectriques [5]. Ceux-ci ont permis de générer des signaux périodiques très stables pouvant être utilisés en tant que référence de temps pour des mesures de précision, en contrôle, filtration ou encore génération des ondes radio. Le même effet pourrait être obtenu en utilisant des oscillateurs composés des éléments inductifs et capacitifs mais l'avantage d'un cristal piézoélectrique est sa robustesse par rapport aux phénomènes externes comme par exemple la variation de la température, de plus la structure cristalline amène à de faibles pertes dynamiques et donc il devient possible de concevoir des circuits oscillants présentant un facteur de qualité particulièrement élevé (jusqu'à 10^6[6]) en comparaison avec les oscillateurs inductifs-capacitifs (moins de 100)[1]. Seulement trois ans après leurs inventions les oscillateurs piézoélectriques ont commencé à être utilisés dans des émetteurs radio (1924). La technique a prouvé être si efficace que même actuellement elle est largement utilisée, la génération des signaux périodiques avec des cristaux piézoélectrique reste une de plus précises. Autre application originale suggérée par le même auteur était d'utiliser des transducteurs piézoélectriques comme capteurs pour mesurer les vibrations mécaniques générées dans des structures [7] ce qui semble être un de premiers exemples d'application de type surveillance structurale.

En 1924 on a le premier brevet sur un haut-parleur piézoélectrique utilisé dans un appareil téléphonique [8].

En 1927 les premières applications pratiques des ultrasons de grande puissance générés par des éléments piézoélectriques sont mises en place par Wood et Loomis dans le laboratoire de Tuxedo Park (États Unis). En utilisant des transducteurs de type Langevin submergés dans l'eau, de nouveaux phénomènes ont été observés comme le phénomène de cavitation ou la production du brouillard. L'influence des ultrasons sur les tissus biologiques et animaux a été aussi étudiée et il a été montré qu'ils peuvent avoir une influence négative sur le corps humain [9].

Une autre application importante des transducteurs à quartz après la première guerre mondiale a été la conception des bancs expérimentaux pour mesurer avec précision la vitesse des sons et leur atténuation dans différents gazes. Pour cela un système émetteur réflecteur à distance variable était utilisé pour générer des ondes mécaniques stationnaires [10].

[1] http://www.coilcraft.com/ha4031.cfm, 05/05/2015

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

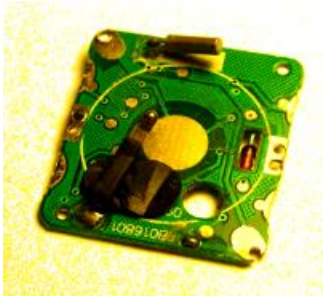


Figure 4 : Circuit intégré d'une montre électronique moderne utilisant un cristal de quartz



Figure 3 : Céramiques piézoélectriques de différentes dimensions et formes

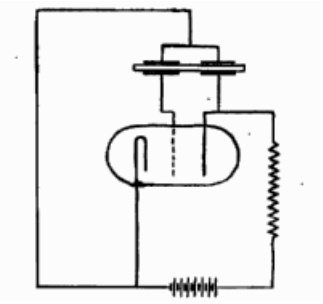


Figure 2 : Un de premiers modèles des oscillateurs à quartz

Pourtant, l'utilisation des cristaux piézoélectriques est compliquée par leur procédé de fabrication qui peut être assez complexe. En effet, l'accroissement des cristaux peut être assez laborieux [11] (la pureté des matériaux doit être prise en considération). De plus, l'élément piézoélectrique doit être coupé selon des surfaces bien choisies pour obtenir les effets piézoélectriques désirés.

Les matériaux ferroélectriques ont apporté un certain avantage dans ce sens. Le mécanisme de la ferroélectricité a été découvert en 1921 dans les sels de Rochelle [12]. Dans ces matériaux les mailles cristallines peuvent acquérir une polarisation électrique de manière spontanée même en absence de toute excitation extérieure (mais qui peut être inversée sous l'action d'un champ électrique externe). En même temps, le plus souvent (mais pas de manière obligatoire) ces matériaux gardent une structure cristalline ordonnée et une polarisation alignée dans le même sens, seulement sur des régions limitées d'espace. On a ce qu'on appelle une structure polycristalline. Des monocristaux ferroélectriques existent toutefois (10 classes cristallins sur le 32), comme par exemple le $LiNbO_3$ (souvent utilisé dans des transducteurs générateurs des ondes ultrasonores de surface (SAW) [13]) ou le sel de Rochelle, utilisé même dans les expériences des frères Curie. La polarisation permanente présente dans les cristaux peut s'expliquer par la position stable d'un atome ou plusieurs à l'intérieur de la maille cristalline malgré la dissymétrie engendrée.



Figure 5 : Quelques applications courantes des céramiques piézoélectriques (de gauche à droite : briquet, buzzer piézo, sonotrode ultrasonore chirurgicale, buse d'imprimante à jet d'encre)

La première céramique ferroélectrique de ce type, utilisée en pratique a été le $BaTiO_3$ découvert indépendamment aux États Unis, l'Union Soviétique et au Japon dans les années 1940, pendant la deuxième guerre mondiale, remarqué pour sa permittivité diélectrique extrêmement élevée [6]. L'objectif visé au départ était de trouver des céramiques présentant des permittivités élevées pour être utilisées dans des condensateurs. Mais, dû à ses propriétés ferroélectriques remarquables (les coefficients piézoélectriques étaient aussi très élevés en comparaison avec ceux des matériaux connus à l'époque) très vite il a commencé à être utilisé dans des transducteurs. L'avantage de céramiques piézoélectriques est la simplicité de fabrication des éléments de différentes formes et avec différentes orientations de la polarisation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

En effet, comme la structure n'est pas obligée d'avoir une structure cristalline bien ordonnée la fabrication est relativement simple consistant à chauffer un mélange des oxydes métalliques (utilisés sous forme de poudres), cela pouvant se faire dans des moules de formes variées. La polarisation macroscopique peut être réalisée en appliquant un champ électrique externe suivant des directions différentes ce qui permet de fabriquer des éléments piézoélectriques ayant des polarisations adaptées à des applications spécifiques (Figure 3). Jusqu'à présents plusieurs céramiques ferroélectriques ont été découvertes. Parmi celles-ci on peut mentionner les $LiNbO_3$ et $LiTaO_3$ (1949) et le PZT (1952) [14]. Le PZT reste jusqu'à aujourd'hui une de céramiques piézoélectriques les plus populaires mais en raison du fait qu'elle contient du plomb dans sa composition, différents règlements ont tendance à limiter son utilisation. Des efforts ont été alors déposés pour créer des céramiques présentant des performances similaires, mais sans utiliser du plomb [15–17]. A présent les céramiques piézoélectriques sont toujours utilisées dans beaucoup d'applications comme des capteurs de force ou de chocs [18–20] ; dans la surveillance de la santé structurale [21–24] ; pour la récupération d'énergie et l'atténuation des vibrations [25–27] etc.

Une découverte importante dans le domaine de la piézoélectricité ont été les polymères piézoélectriques. Ceux-ci ont apporté les avantages caractéristiques aux polymères, comme par exemple leur souplesse, simplicité de synthèse, résistance mécanique, meilleur couplage mécanique avec d'autres structures etc. Un de plus connus polymères piézoélectriques actuellement, le PVDF, a été découvert en tant que tel en 1969 par Kawai [28]. Mais même avant on peut trouver des études, menées sur les propriétés piézoélectriques des substances organiques comme l'os, le bois, la laine etc. [29–31]. Peu de temps après, les premières applications pratiques ont été réalisées : le premier transducteur à base de PVDF étant conçu en 1972, des écouteurs et des hauts parleurs ont été commercialisés dès 1975. Parmi les applications récentes et futures envisagées on peut compter les mémoires non-volatiles à base de matériaux plastiques [32,33], les textiles et les peaux intelligents utilisés pour la récupération d'énergie ou la détection [34–37] ou encore les éléments actifs dans des micro-pompes et valves [38–42].

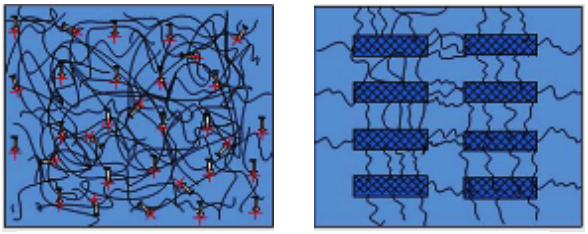


Figure 6 : Structure des polymères piézoélectriques amorphes (gauche) et semi-cristallins (droite) [51]

Les polymères piézoélectriques peuvent être amorphes ou semi-cristallins [43] mais dans les deux cas pour qu'un comportement piézoélectrique soit possible il faut que certaines conditions soient respectées. Tout d'abord il est nécessaire que le polymère contienne des dipôles permanents capables de pouvoir changer d'orientation sous l'influence d'un champ électrique externe. Ensuite il faut que les dipôles déjà orientés puissent garder cette direction même si des déformations relativement importantes sont appliquées (le polymère ne doit pas se dépolariser facilement de manière permanente à cause des contraintes appliquées).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La différence entre les polymères amorphes et semi-cristallins réside dans le fait que les premiers présentent une structure fortement non-régulière alors que dans les deuxièmes on peut distinguer deux phases une cristalline (plus rigide) et une autre amorphe (plus souple). Les mécanismes de la piézoélectricité dans les deux familles de polymères diffèrent un peu. Pour qu'un polymère semi-cristallin soit piézoélectrique il est nécessaire que les cristaux présentent une polarisation permanente et donc qu'ils soient ferroélectriques [43].

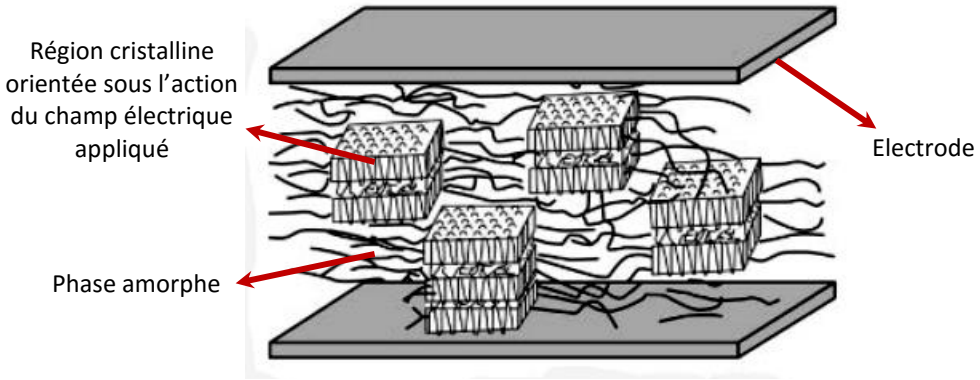


Figure 7 : Alignement des domaines cristallins dans un polymère piézoélectrique sous l'action d'un champ électrique externe

Le PVDF est par exemple un polymère semi-cristallin (la phase cristalline présente 50%–60% du volume), la phase cristalline pouvant se manifester sous plusieurs formes. Normalement ce polymère n'est pas polaire après la synthèse par la voie fondue (phase α non-polaire) mais il a été observé qu'un étirage du matériau dans une ou deux directions (4–5 fois en longueur) était suffisante pour que la phase cristalline devienne ferroélectrique (phase β) [44]. Pour polariser macroscopiquement le polymère on utilise ensuite un procédé similaire à celui de polarisation des céramiques, en appliquant un champ électrique (qui peut être assez élevé pour les polymères, autour de 50 V/µm [45]) à haute température et en laissant le polymère se refroidir toujours dans sa présence. D'autres polymères ferroélectriques ont été obtenus en ajoutant au PVDF d'autres substances comme les VDF ou TrFE [44], ceux-ci (appelés copolymères) pouvant manifester des propriétés améliorées pour certains compositions spécifiques. Ainsi, par exemple le copolymère P(VDF-TrFE) ne nécessite pas des pré-étirements et il peut être dissout ce qui permet de fabriquer des films par la méthode de la voie solvante [46](ce polymère est par contre plus rigide que le PVDF ce qui peut être vu comme un désavantage dans certains cas).

A part les polymères semi-cristallins des polymères piézoélectriques amorphes existent aussi [46] (ils doivent contenir quand même des dipôles permanents dans leur composition). Mais en pratiques ils sont normalement moins performants en termes de couplage électromécanique et donc ils ont attiré moins d'attention dans la communauté scientifique. Pourtant, dans certaines conditions ces matériaux peuvent apporter des avantages. Par exemple, la plupart de polymères amorphes peuvent être polarisés sans qu'aucun pré-étirement soit nécessaire, autre avantage possible par rapport aux polymères semi-cristallins étant le fait qu'ils se dépolarisent généralement à des températures plus élevées (pour certaines applications comme celles spatiales la température de fonctionnement d'un matériau peut être un paramètre clé [47]). Pour rendre les polymères amorphes piézoélectriques, le matériau est tout d'abord préchauffé à une température plus grande que celle de la transition vitreuse (ce qui permet d'améliorer la mobilité des dipôles) et ensuite un champ électrique élevé est appliqué pendant le temps de refroidissement. La polarisation rémanente est due ainsi seulement à la réduction de la mobilité des dipôles à cause de la baisse de température. Des copolymères piézoélectriques amorphes existent [48] et dans certains cas cela amène à une polarisation

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

rémanente plus importante dû à un phénomène qui n'est pas encore complètement compris, qui fait que plusieurs dipôles deviennent ''couplés'' ce qui amène à un alignement plus efficace dans un champ électrique externe [49]. On peut donner comme exemple de polymères piézoélectriques amorphes le Poly-acrylonitrile (PAN), le Poly(vinylidecyanide vinylacetate) (PVDCN/VAc) ou encore le Poly-phenyle-thernitrile (PPEN) mais il semble que cette catégorie de polymères fait encore l'objet de beaucoup d'études [50].

Les matériaux piézoélectriques peuvent être combinés avec d'autres qui ne le sont pas [51] ce qui peut permettre d'obtenir des matériaux piézoélectriques avec des propriétés spécifiques (composites piézoélectriques). Comme on l'a dit plus haut il existe des céramiques qui contiennent différents additifs ou des copolymères piézoélectriques mais ceux-ci sont constitués par des mélanges des différents composants (il s'agit d'un mélange au niveau moléculaire). Dans un composite, par contre, les matériaux qui sont combinés gardent leur composition chimique. Par exemple, souvent même si les céramiques piézoélectriques présentent un très bon couplage électromécanique ils sont trop rigides pour la plupart des applications. Une solution c'est de fabriquer des structures constituées par des particules ou fibres céramiques insérées dans une matrice flexible [52]. De plus en plus de telles structures ont commencé à être fabriquées à partir de la fin des années 70 [50].

Parameter	Ceramic	Polymer	Composite
Acoustic impedance	High (−)	Low (+)	Low (+)
Coupling factor	High (+)	Low (−)	High (+)
Spurious modes	Many (−)	Few (+)	Few (+)
Dielectric constant	High (+)	Low (−)	Medium (+)
Flexibility	Stiff (−)	Flexible (+)	Flexible (+)
Cost	Cheap (+)	Expensive (−)	Medium (+)

Figure 8 : Comparaison des performances des composites et des matériaux purs [237]

Les composites contenants des insertions céramiques incluses dans un polymère souple gardent les avantages des deux (Figure 8), le polymère offrant sa souplesse et la céramique sa piézoélectricité.

Une autre solution possible pour améliorer le fonctionnement d'un matériau piézoélectrique, au lieu d'ajouter des matériaux supplémentaires c'est d'enlever du matériau, pour réaliser des structures poreuses ou creuses. Comme dans le cas des composites la rigidité macroscopique peut être ainsi diminuée tout en gardant un comportement piézoélectrique [53].

1.1.2 Equations caractéristiques

Les équations linéaires de la piézoélectricité (valables lorsque les champs électriques et les déformations restent faibles) sont données par les quatre systèmes qu'on peut obtenir en choisissant arbitrairement deux grandeurs indépendantes [54] :

$$(1)\begin{cases} S = s^{E}T + d^{T}E \\ D = dT + \varepsilon^{T}E \end{cases} \diamondsuit \begin{cases} T = c^{E}S - e^{T}E \\ D = eS + \varepsilon^{S}E \end{cases} \diamondsuit \begin{cases} S = s^{D}T + g^{T}D \\ E = -gT + \beta^{T}D \end{cases} \diamondsuit \begin{cases} T = c^{D}S - h^{T}D \\ E = -hS + \beta^{S}D \end{cases}$$

Avec E,D : les champs électriques ; T,S : les tenseurs des contraintes et déformations exprimés sous forme vectorielle; d,e,g,h : coefficients piézoélectriques ; s^{X}, c^{X} : suppléance et rigidité à X constant (X = D ou E) ; ε^{X}, β^{X} : permittivité et imperméabilité à X constant (X = D ou E).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Presque tous les matériaux piézoélectriques utilisés actuellement ne subissent jamais des déformations importantes. L'ordre de grandeur est d'environ 0.1% ce qui veut dire qu'une relation linéaire entre contraintes et déformations semble justifiée. Au contraire des non-linéarités peuvent se manifester lorsque le champ électrique appliqué est assez élevé [55].

On peut finir cette partie sur les matériaux piézoélectriques en faisant une comparaison entre les paramètres caractéristiques de différentes classes (Tableau 1).

Matériau	Exemple	Permittivité	Souplesse ($10^{-12}Pa^{-1}$)	Couplage	d ($10^{-12}m/V$)
Monocristallin non-ferroélectrique	Quartz	5	10	0.1	2.3
Monocristallin ferroélectrique	$LiNbO_3$	30–80	6	0.3	20
Céramiques ferroélectriques	PZT	200–5000	10–20	0.3–0.8	100–1000
Polymères piézoélectriques	PVDF	10	400	0.15	20

Tableau 1 : Comparaison des paramètres de différents matériaux piézoélectriques

1.2 Les matériaux électrostrictifs

1.2.1 Fonctionnement et historique

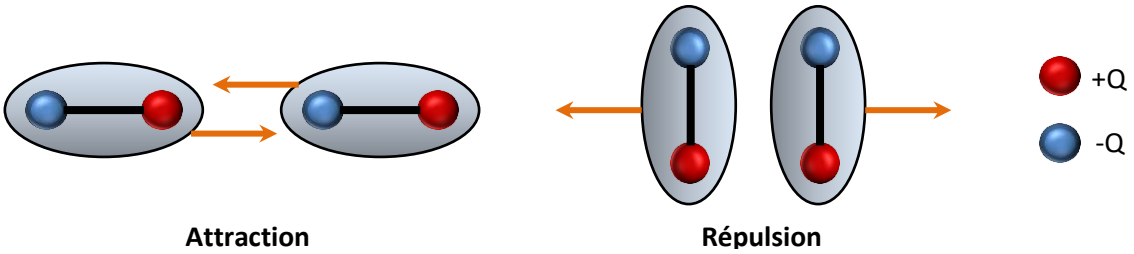


Figure 9 : Illustration d'un mécanisme possible du phénomène d'électrostriction

Dans un matériau diélectrique un champ électrique externe génère des dipôles. Ceux-ci de manière similaire à des petits aimants peuvent interagir entre eux (Figure 9) donnant naissance à des déformations macroscopiques. Il s'agit du phénomène d'électrostriction. Contrairement à la piézoélectricité une déformation d'un diélectrique (matériau électrostrictif) en général ne donne pas naissance à une polarisation électrique macroscopique.

Même si le terme de matériau électrostrictif prête à confusions (comme on va le voir par la suite) il est préférable à celui de matériau diélectrique. En effet, même si un couplage électro-mécanique est présent dans n'importe quel diélectrique le terme de matériau diélectrique est utilisé normalement pour mettre en évidence seulement le couplage entre la polarisation et le champ électrique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Normalement tous les matériaux diélectriques sont, d'une manière ou d'une autre, sujet à des contraintes d'origine électriques lorsqu'ils sont électriquement polarisés. Ces forces sont d'autant plus importantes que la permittivité du matériau est élevée [56]. Les forces électriques étaient connues depuis longtemps mais leur expression sous la forme des contraintes dans des milieux continus a été déduite pour la première fois par Maxwell, d'où le nom de contraintes de Maxwell, habituellement utilisé.

Le phénomène a été donc observé il y a longtemps avec les premières mentions documentées dans une lettre d'Alessandro Volta (aux débuts du XIXème siècle). En 1880 on retrouve aussi un article de Röntgen sur la déformation d'une bande de caoutchouc sous l'action des charges déposées sur ses deux faces [57]. En 1881 Boltzmann publie un article sur la déformation d'un solide élastique de forme sphérique ou cylindrique creux sous l'action d'un champ électrique (étude théorique) [58]. Plusieurs scientifiques s'intéressent aussi à cette période au phénomène et à son influence sur des condensateurs utilisant différents types de diélectriques. Dans [59] par exemple les auteurs étudient le phénomène de l'électrostriction dans les liquides et on parle aussi des travaux similaires sur des gazes. Pourtant, l'étude expérimentale de l'électrostriction dans les matériaux solides a posé plusieurs problèmes liés à la précision de mesure des déformations avec les équipements utilisés à l'époque. Les déformations obtenues étant très faibles certains auteurs mettaient même en question certains aspects comme par exemple l'électrostriction latérale dans la direction perpendiculaire au champ électrique [60]. Mais, des méthodes optiques plus précises ont permis de confirmer les résultats théoriques, de plus, il a été observé qu'à part les déformations engendrées par un champ électrique un effet inverse se manifeste aussi qui fait que la permittivité d'un diélectrique (et son indice de réfraction) varie si des contraintes externes sont appliquée [61]. Actuellement, souvent dans la littérature scientifique le terme d'électrostriction est spécialement réservé à cet aspect d'où la confusion sur l'utilisation du terme. Mais il faut remarquer qu'initialement celui-ci était utilisé pour décrire le phénomène en général.

L'étude théorique et la modélisation du phénomène d'électrostriction a été faite en suivant deux voies possibles. La première est celle de la modélisation phénoménologique qui utilise les principes de conservation de l'énergie et suppose un certain comportement prédéfini d'un système. Celle-ci a été utilisée par exemple par G. Lippmann qui à l'aide des lois de la thermodynamique a modélisé le comportement des matériaux électrostrictifs, (il s'agit du même article dans lequel on prédit l'effet piézoélectrique inverse, 1881 [62]). La seconde possibilité c'est de créer un modèle physique en prenant en compte les interactions entre les charges électriques et les dipôles présents. Un tel exemple peut être vu dans [63] où on en déduit les contraintes de Maxwell en fonction des paramètres du réseau cristallin du matériau.

Comme on vient de le dire le phénomène de l'électrostriction est présent dans tous les matériaux diélectriques inclusif les cristaux et les céramiques piézoélectriques. Mais pour que le phénomène soit observable il est nécessaire soit que les contraintes générées soient élevées (c'est le cas lorsque la permittivité du matériau est élevée) soit que le matériau soit très flexible (comme par exemple dans certains polymères). Les cristaux piézoélectriques ne présentent pas une permittivité élevée (Tableau 1) et l'électrostriction peut être négligée devant le phénomène de piézoélectricité, mais les céramiques piézoélectriques peuvent présenter des permittivités relatives de plus de 2000. Il n'est pas alors surprenant que le phénomène d'électrostriction est souvent mentionné dans ces matériaux [64]. L'électrostriction dans les céramiques ferroélectriques peut devenir importante surtout à des températures plus élevées que la température de Curie [14]. Dans certaines céramiques une certaine polarisation permanente peut être gardée même si des forts champs électriques sont appliqués ce qui amène à un comportement piézoélectrique-électrostrictif mixte. Ces matériaux présentent l'avantage de manifester des phénomènes d'hystérésis négligeables contrairement aux céramiques ferroélectriques [65].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les céramiques électrostrictives ont trouvé une large gamme d'applications dans le domaine de l'actionnement à partir de la deuxième moitié du XXème siècle. Mais en même temps comme on l'a dit l'électrostriction ne se manifeste pas seulement dans le cas où des contraintes élevées sont générées mais aussi lorsque on a des matériaux très souples. Dans ce sens les polymères diélectriques présentent un intérêt majeur, parmi les matériaux électroactifs, car ceux-ci ont démontré des déformations engendrées par des champs électriques très importantes (plus de 100%). Pourtant, dès les premières expériences en 1880 jusqu'aux années 1990–2000 ceux-ci ont trouvé peu d'applications pratiques (en tant que matériaux électroactifs). Une de raisons possibles c'est le fait que normalement, pour obtenir des effets importants il faut appliquer des champs électriques très élevés, une autre, c'est peut être juste parce qu'avant il n'y avait pas beaucoup d'applications nécessitant des matériaux actifs flexibles. De toute façon après les années 90 on peut constater une explosion dans l'intérêt de la communauté scientifique envers ce sujet [66]. La demande des dispositifs portables, compacts et flexibles est actuellement de plus en plus élevée, comme il sera vu par la suite.

1.2.2 Différents types de polymères électrostrictifs

Tous les polymères diélectriques n'ont pas les mêmes propriétés et les mêmes performances. Mais normalement la plupart d'entre eux peuvent être considérés isotropes et incompressibles ce qui permet par rapport aux matériaux piézoélectriques de réduire un peu le nombre de paramètres caractéristiques. Au cours du temps il semblerait que deux classes de polymères électrostrictifs on émergés avec des propriétés un peu différentes.

Dans la première catégorie on pourrait inclure des polymères très souples présentant un comportement diélectrique presqu'idéal (linéarité de la polarisation en fonction du champ électrique, permittivité presque constante). Une caractéristique spécifique de ce groupe de polymères est leur permittivité diélectrique assez faible (2 – 5) ce qui veut dire que les contraintes de Maxwell restent faibles aussi. Souvent pour cette raison on essaie d'augmenter les contraintes en appliquant des champs électriques élevés (jusqu'à 200 MV/m). La raison pour laquelle ils présentent des propriétés élastiques remarquables est due à leur structure réticulée, avec des chaînes intermoléculaires relativement longues. On appelle usuellement ces polymères des élastomères diélectriques [67].

Le latex, le silicone et l'acrylique (un de plus connus et étudiés) sont de très bons représentants de cette classe de polymères (Figure 10, Tableau 2). Mais beaucoup d'autres ont été étudiés et caractérisés récemment (p. e. les Fluoro-élastomers, le Polybutadiène, l'Isoprène etc.) [68].

Polymère	Permittivité (relative)	Module d'Young (MPa)	Champ de claquage (V/µm)	Déformation axiale max.
Latex[69]	1.6–2.4	1–3	30–200	750%
Silicone[70–72]	2–3	0.1–1.5	50-150	200%–300%
Acrylique[73,74]	3.5–5	0.075–0.3	60–500	600%

Tableau 2 : Paramètres caractéristiques indicatifs de quelques élastomères diélectriques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure 10 : Elastomères diélectriques souvent utilisés. De gauche à droite : Silicone, Latex, Acrylique

L'acrylique est à la base un scotch transparent utilisé pour coller diverses pièces métalliques ou en plastique, produit par la compagnie 3M[2]. Mais il a été très vite remarqué par les chercheurs qui étudiaient les élastomères diélectriques [75]. Parmi tous les polymères avec lesquels on travaille actuellement l'acrylique est le plus souple (≈ 75 kPa en régime quasi-statique) et présente une permittivité aussi relativement élevée (≈ 4) ce qui veut dire que pour un champ électrique donné on peut observer des déformations importantes (plus de 100% en actionnement [76]). De la même manière on peut s'attendre à un meilleur fonctionnement en mode générateur car l'énergie qu'on peut récupérer avec les polymères diélectriques est directement dépendante de l'énergie électrique et mécanique injectées sur un cycle de conversion. Les structures souples sont normalement plus adaptées à des excitations mécaniques ordinaires ce qui se traduit par une quantité d'énergie mécanique injectée plus grande. Une chose similaire se passe avec l'énergie électrique, un polymère ayant une grande permittivité reçoit une plus grande quantité d'énergie électrique pour un champ électrique donné.

Les silicones aussi ont commencé à être étudiés dès le début de ces études, surtout pour l'actionnement [77]. Il est possible de synthétiser des silicones ayants des rigidités différentes mais normalement la déformation maximale que ce polymère peut supporter est plus petite que celle d'un polymère acrylique (Tableau 2).

Le latex semble être moins populaire parmi les élastomères diélectriques. Mais récemment une certaine revigoration dans son intérêt semble se produire, surtout pour la récupération d'énergie [78,79]. Le latex, tout comme le silicone, par rapport à l'acrylique est moins visqueux et donc plus adapté à des excitations rapides.

Une autre catégorie des polymères électrostrictifs est formée par des polymères qui présentent un certain degré de cristallinité plus avancé. Ceux-ci sont normalement plus rigides mais aussi présentent des permittivités plus importantes. On pourrait donner comme exemples les différents copolymères et terpolymères de PVDF et les polyuréthanes. Ces polymères génèrent des contraintes plus élevées que les élastomères diélectriques pour un même champ électrique.

Polymère	Permittivité (relative)	Module d'Young (MPa)	Champ de claquage (V/µm)	Déformation axiale max.
Polyuréthane	4–7	12–80	160	500%
P(VDF-TrFE)	40–60	400	150	5%
P(VDF-TrFE-CFE)	50	200	150	5%

Tableau 3 : Paramètres caractéristiques indicatifs de quelques polymères semi-cristallins

[2] http://www.3m.com/, 16/12/2015

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette catégorie des polymères est intéressante par le fait que ceux-ci présentent des propriétés intermédiaires entre les élastomères diélectriques et les céramiques électroactives. Ils occupent donc une niche technologique intermédiaire où les matériaux actifs restent suffisamment souples mais en même temps génèrent des contraintes élevées.

1.2.3 Equations caractéristiques

La modélisation des matériaux électrostrictifs peut s'avérer plus compliquée que celle des matériaux piézoélectriques car souvent on utilise des champs électriques très forts et on peut avoir des déformations importantes, beaucoup de non-linéarités peuvent se manifester alors. Mais souvent, lorsqu'on a affaire à des matériaux assez rigides et/ou lorsque les déformations restent faibles des équations matricielles, comme dans le cas des matériaux piézoélectriques, peuvent être encore utilisées:

$$(2)\begin{cases} S = s^{E}T + E^{t}ME \\ D = \varepsilon^{T}E + 2T^{t}ME \end{cases}$$

Avec S,T : les tenseurs de déformations et contraintes exprimés sous forme vectorielle ; E,D : les champs électriques ; M : matrice d'électrostriction ; s^{E} : souplesse à champ nul ; ε^{T} : permittivité à contrainte nulle. On peut, entre autres, remarquer que le système (2) prend en compte la dépendance de la permittivité diélectrique du matériau de la contrainte appliquée.

Les élastomères diélectriques sont souvent supposés se comporter de point de vue électrique comme des diélectriques parfaits, la polarisation desquels ne dépend que du champ électrique appliqué mais pas directement de son état de déformation. La capacité électrique d'un film peut quant à elle varier à cause d'un changement de distance entre les électrodes ou de la surface des électrodes, à cause des déformations. Dans un diélectrique idéal les contraintes dues aux interactions électrostatiques peuvent être exprimées d'une manière plus simple [56] étant fonction que du champ électrique appliqué et la permittivité du matériau.

Un polymère électrostrictif hyperélastique dans le cas général peut présenter un comportement un peu plus complexe car la polarisation électrique peut être influencée directement par l'état local de déformation [80]. Il faut donc prendre en compte cette hypothèse supplémentaire qui complique bien évidemment les équations.

1.3 Autres matériaux électroactifs

Dans le cas général il est très difficile de faire un classement exact de tous les matériaux électroactifs existants. En effet, souvent on se retrouve dans la situation dans laquelle il n'est pas claire la vraie cause de la manifestation du tel ou tel phénomène. Les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs sont les deux catégories les plus connues et les plus simple à identifier mais il faut mentionner que d'autres matériaux électroactifs existent. En effet, à part les matériaux diélectriques (qui sont normalement des isolants) on peut mentionner par exemple les gels et les polymères ioniques [81–84]. Dans ces matériaux en plus d'une polarisation, on peut observer des migrations d'ions sous l'action d'un champ électrique externe. L'agglomération des ions à certains endroits engendre des contraintes internes qui peuvent se traduire par des déformations importantes dans le matériau. Toutefois, la réponse est d'habitude assez lente à cause de l'inertie des ions, de plus le matériau doit être assez conducteur pour que les ions puissent se déplacer. Pour cela souvent, l'eau est présente dans le matériau et il existe le risque qu'elle se vaporise avec le temps. D'une autre part l'avantage principal de ces matériaux c'est la faible tension (de quelques volts) nécessaire pour que le couplage électromécanique puisse se manifester.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

1.4 Génération d'énergie électrique utilisant des matériaux électroactifs



1.4.1 Introduction

Les dispositifs électroniques sont devenus de plus en plus présents dans notre quotidien. Il ne s'agit pas seulement des systèmes portables comme les smartphones, les montres ou les implants électroniques mais aussi des systèmes intégrés dans des structures comme les bâtiments, les routes, stations de tramway ou métro etc. Leur fonction peut être extrêmement variée : transmission de données, affichage des informations, surveillance, analyse de la santé des structures etc. et leur nombre est toujours croissant. Dans le domaine médical on pourrait mentionner les implants auditifs, les pacemakers, les montres cardio-fréquencemètres. Les personnes impliquées dans des opérations militaires ou interventions de sauvetage sont aussi souvent équipées de nombreux systèmes comme des lunettes de vision de nuit, des dispositifs de localisation, des radios. Les capteurs sont aussi des systèmes de plus en plus présents. Dans beaucoup de structures qu'on utilise comme par exemple les véhicules on peut compter actuellement en moyenne 50–100 capteurs [85], alors que dans les avions jusqu'à 10 milles capteurs juste pour une seule aille [86]. Mais, dans le futur on peut s'attendre à une utilisation encore plus intensive des systèmes embarqués, vus les besoins technologiques actuels. Pourtant, l'utilisation des systèmes embarqués est compliquée par le fait qu'ils nécessitent de l'énergie.

N'importe quel système a besoin d'énergie pour fonctionner, d'autant plus que la complexité et la rapidité des tâches qu'il effectue sont importantes. Il n'est pas surprenant alors de voir que l'élément le plus massif d'un système électronique autonome est d'habitude l'élément de stockage d'énergie. Et cela en dépit du fait que les batteries et les piles ont vu un progrès important au cours du temps. De plus, le problème ne réside pas seulement dans l'encombrement mais aussi dans le fait qu'elles se déchargent au fur et à mesure qu'elles sont utilisées. Leur recharge ou remplacement peut compromettre énormément l'autonomie du dispositif qui les utilise. On pourrait donner comme exemple les réseaux de capteurs intégrés dans les bâtiments, d'une part ils sont nombreux, donc c'est compliqué de prendre soins de chacun, d'une autre, souvent on préfère qu'ils soient intégrés dans la structure de manière permanente car on désire qu'ils soient le moins possible invasifs. Dans d'autres cas on n'a pas accès aux systèmes car ils fonctionnent dans des endroits dangereux comme par exemple les centrales nucléaires. Finalement, il y a aussi des systèmes intégrées le fonctionnement desquels est vital et ne doit pas être interrompu, la décharge accidentelle de la batterie pouvant être catastrophique (comme des capteurs dans un avion par exemple). Le problème de l'énergie est aussi présent dans plusieurs pays sous-développés où la plupart des gens n'ont pas du tout accès à un réseau électrique. Dans les derniers temps on voit de plus en plus de projets s'occupant de la promotion des technologies modernes dans de telles régions. Mais sans électricité l'utilisation de n'importe quel dispositif électronique (même rechargeable) devient impossible (ordinateur, téléphones etc.) alors qu'ils pourraient considérablement contribuer à l'amélioration et le développement des conditions de vie de ces communautés.

Il est intéressant de voir déjà quelle est la quantité d'énergie qui est consommée habituellement par différents dispositifs portables (Tableau 5).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Technologie	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité de puissance (W/kg)	Temps de décharge	Durée de stockage	Auto-décharge (%/ mois)	Durée de vie (nb. Cycles)	Coût (€/kWh)
Plomb (Pb)	25–45	80–150	15mn –100h	>1 mois	40	300–1500	50–200
Lithium-ion (Li-ion)	80–150	500–2000	45min–100h	qq. mois	20	>1500	700–1000
Nickel-Cadmium (Ni-Cd)	20–60	100–800	15min–100h	<1 mois	25	300–1500	200–600
Super-condensateur	0.0001–0.005	100–10000	1s–10s	qq. minutes	50	10000–50000	1000–5000

Tableau 4 : Comparaison entre différentes technologies utilisées pour le stockage d'énergie électrique

Système/Technologie	Puissance
Montre électronique [87]	1 µW
Calculatrice [88]	10 µW
Implant auditif [89]	100 µW
Baladeur MP3 [90]	50 mW
Télécommande [91]	100 mW
Envoi d'un SMS par téléphone [92]	300 mW
Lampe frontale (Varta 17731)	1 W
Smartphone [93]	1.5 W



Tableau 5 : Nécessités énergétiques de certains dispositifs couramment utilisés

Comme on peut le voir beaucoup de systèmes ne nécessitent pas beaucoup d'énergie pendant un fonctionnement normal. Il existe des dispositifs qui fonctionnent seulement avec quelques µW. Actuellement tous ces dispositifs utilisent normalement une batterie rechargeable. Un tel système ne peut avoir alors qu'une durée limitée de fonctionnement sans que la batterie soit rechargée (Tableau 6).

Dispositif	Durée de fonctionnement sans recharge
Smartphone	5 h
Lecteur MP3	15 h
Implant auditif	5 jours
Pacemaker	7 années
Montre	5 années

Tableau 6 : Autonomie de certain dispositifs [94]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés



Figure 11 : Différentes sources possibles naturelles et artificielles d'énergie mécanique

Pour contourner les problèmes énumérés une solution possible serait de rendre les systèmes capables de récupérer de l'énergie de leur milieu ambiant et la transformer en énergie électrique. En effet, on pourrait ne pas se rendre compte mais l'énergie est présente presque partout, il existe une multitude de sources d'énergie qui pourraient être utilisées (Figure 11). Parmi ces sources on pourrait énumérer le rayonnement solaire, les sources de chaleur, les vibrations, le courant d'eau dans les rivières, l'océan et les mers, le vent qui sont des sources naturelles d'énergie. Il existe aussi des sources artificielles créées par l'homme comme les vibrations générées par différents équipements, la pression générée par les véhicules, le rayonnement électromagnétique des antennes etc. Même le mouvement du corps humain pourrait être utilisé pour récupérer de l'énergie, la chaleur qu'il génère et même les composés chimiques produits dans le corps. Mais le plus important c'est de trouver une source d'énergie qui est bien adaptée et surtout abondante dans le milieu où le système embarqué est intégré (permanente dans le cas idéal).

Dans ce sens une source d'énergie particulièrement intéressante c'est l'énergie mécanique des vibrations, chocs, etc. Celle-ci est attirante par le fait que souvent elle ne dépend pas des caprices naturels, contrairement au rayonnement solaire (absent pendant la nuit ou par temps nuageux). Dans certains endroits celle-ci pourrait même être considérée comme permanente (zones agglomérées, passage des piétons, route).

Pour transformer cette énergie en énergie électrique plusieurs techniques pourraient être utilisées. Deux parmi les plus utilisées actuellement sont la génération d'un champ électrique par induction magnétique (technique la plus avancée et utilisée à l'heure actuelle pour la production de l'énergie électrique aux grandes échelles) et le phénomène d'induction électrostatique (plus utilisée pour des systèmes de petite taille). Un simple moyen d'exploiter ces deux techniques c'est d'utiliser un matériau qui présente un couplage électro-magnéto-mécanique. Les matériaux piézoélectriques constituent un bon exemple d'un tel matériau. L'avantage des matériaux piézoélectrique réside dans le fait que leur couplage est direct, c'est à dire une déformation mécanique génère un champ électrique et vice versa. D'autres matériaux présentent un comportement similaire mais un peu différent comme par exemple les matériaux électrostrictifs. Mais dans le cas général en pratique n'importe quel matériau électroactif pourrait être utilisé pour la récupération d'énergie tant qu'un couplage électromécanique existe.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

1.4.2 Historique et évolution

Même si les gens ont utilisé depuis longtemps des systèmes comme des moulins à vent et à eau, ou des animaux pour la traction qui en essence ne font que transformer une forme d'énergie en une autre, les vrais débuts de l'histoire de la récupération d'énergie coïncident avec l'apparition des systèmes électriques. Les premiers générateurs électriques utilisaient deux principes soit l'induction magnétique découverte par Faraday soit la séparation des charges électriques due à des phénomènes triboélectriques observés depuis l'antiquité. Vers la fin du XIX siècle l'utilisation des générateurs magnétiques s'impose surtout pour la production d'énergie électrique à grande échelle. A cette époque obtenir de petites quantités d'énergie n'avait pas d'intérêt car il n'y avait pas de systèmes portables. Mais avec l'invention de l'ampoule à incandescence (Edison, 1880) la situation change. Des dispositifs portables apparaissent, comme des lampes torches, des appareilles photographiques, des radios etc. On trouve par exemple en 1894 un brevet sur un dynamo utilisé sur des vélos [95]. On remarque donc une tendance générale de développer et utiliser des systèmes portables.

On trouve aussi à cette époque des dispositifs comme des lampes torche de poche alimentés manuellement par des dynamos [96].

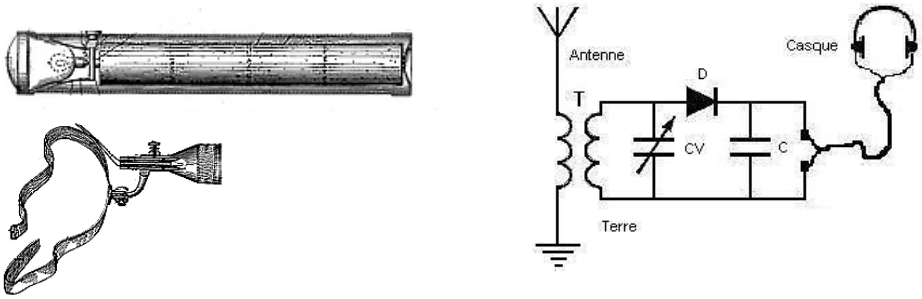


Figure 12 : Gauche : modèle d'une lampe à torche [238] **et une lampe frontale** [239] **de 1898**
Droite : récepteur radio autoalimenté à cristal

Un exemple intéressant de systèmes autoalimentés sont les récepteurs radio à cristal (Figure 12). Connus depuis les débuts du XXème siècle ceux-ci ne nécessitent pas d'alimentation, ils utilisent l'énergie des ondes électromagnétiques diffusées par le poste émetteur. Souvent ces dispositifs étaient conçus par des amateurs utilisant des composants grand public comme par exemple la mine d'un crayon comme diode, un simple fil comme antenne etc. On pourrait considérer ce dispositif comme un de premiers exemples de systèmes récupérant de l'énergie du rayonnement électromagnétique artificiel.

Pourtant, comme il n'y avait pas toujours une utilisation permanente de différents dispositifs électriques, dans le passé le plus souvent leur alimentation était faite seulement avec des piles galvaniques (sauf ceux installés sur des voitures et d'autres systèmes en mouvement) qui étaient alimentés directement pendant le fonctionnement.

La situation change avec l'avancement des dispositifs à base de semi-conducteurs et l'apparition des circuits intégrés (1950–1960). On remarque par exemple une utilisation de plus en plus fréquente des cellules photovoltaïques dans de petits dispositifs électroniques comme des montres ou calculatrices. Les premières cellules étaient fabriquées avec du silicium cristallin [97] et présentaient des rendement très faibles (moins de 5%). Mais celles-ci ont évolué beaucoup dans le temps (Figure 13) et actuellement on peut trouver des panneaux solaires ayant des rendements de presque 40% [98].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

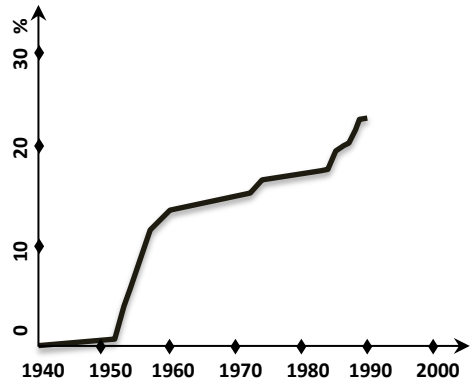


Figure 13 : Evolution du rendement des cellules solaires dans le temps (d'après [240]**)**





En fait, il semblerait que les cellules photovoltaïques seraient particulièrement adaptées pour ce genre de dispositifs (faible consommation, utilisation dans des endroits illuminés) parce que même actuellement la plupart d'entre eux les utilisent encore.

Les technologies de type MEMS (systèmes micro-électro-mécatroniques) deviennent populaires dans les années 90 [99]. L'idée générale étant d'intégrer non seulement les composants électriques mais aussi différentes composants mécaniques dans des dispositifs très compacts. La notion de système autoalimenté reprend tout son intérêt dans ce cas car il est très difficile de miniaturiser les batteries et même s'il serait possible leur recharge serait aussi très délicate vue les dimensions [100]. On a aussi ce qu'on appelle les capteurs actifs qui émergent qui contrairement à des capteurs passifs, peuvent utiliser l'énergie provenant de l'interaction avec leur milieu pour stocker ou même transmettre les résultats de mesure.

Avec le développement des MEMS les méthodes de génération d'énergie de type électrostatiques sont redevenues populaires. En effet il est beaucoup plus simple de fabriquer des éléments capacitifs de petite taille que des bobines, transformateurs etc. [101]. L'approche souvent utilisée pour cela consiste à fabriquer des condensateurs, dont une armature est mobile. Des mouvements vibratoires amènent alors à un déplacement relatif entre les deux électrodes et donc on obtient un condensateur de capacité variable qu'on peut utiliser dans un cycle électro-mécanique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

1.4.3 Projets actuels des systèmes de récupération d'énergie sur le mouvement du corps humain



Figure 14 : Système de récupération d'énergie sur la marche (Power Walk)

Parmi les projets récents de récupération d'énergie sur le mouvement du corps humain on pourrait mentionner le système Power Walk créé par la compagnie canadienne Bionic Power (2008). Il s'agit d'un exosquelette (Figure 14) fixé au niveau des jambes qui peut fournir pendant la marche normale autour de 12 watts (le mouvement au niveau des genoux est particulièrement intéressant car on a des grand déplacements combinés à des forces élevées et donc des énergies mécaniques générées importantes). Pour le moment l'application est utilisé plutôt par l'armée, par exemple normalement un soldat pourrait être amené à transporter avec lui jusqu'à 12 kg de batteries pour alimenter tous les dispositifs électroniques qu'il utilise, le système de récupération peut avantageusement les remplacer car lui il ne pèse que 1.7 kg. Le système utilise un simple générateur dc magnétique [102,103] plus un système à roues pour amplifier sa vitesse de rotation et limiter les forces lorsque les jambes sont dans certaines positions. Malgré sa performance le générateur semble être peu adapté pour une utilisation large public étant plutôt réservé pour une catégorie restreinte de personnes qui utilisent déjà des uniformes et beaucoup d'équipement.

Autre projet qui exploite la marche pour la récupération d'énergie mais avec un système intégré dans des chaussures c'est le projet d'Instep Nanopower (2010). Ceux-ci utilisent une méthode originale qui combine l'électrostatique et le phénomène d'électro-mouillage inverse [104]. L'explication simple de la méthode est la suivante : lorsqu'on exerce de la pression sur une goutte de liquide qui se trouve sur une surface à laquelle elle n'adhère pas (comme de l'eau sur une surface hydrophobe) alors la surface de contact peut varier. Ce phénomène peut être utilisé pour fabriquer des capacités variables et utiliser celles-ci pour récupérer de l'énergie électrique avec des cycles de charge et décharges dont on a déjà parlé. Pour cela on utilise des gouttes d'un liquide conducteur (mercure ou galinstane par exemple) qui sont placées entre une couche conductrice solide et un film mince diélectrique qui contient aussi une électrode normale. En déplaçant les deux parties solides, la surface de l'électrode en contact avec le polymère varie et donc la capacité aussi. Plusieurs configurations restent possibles. On peut par exemple effectuer des mouvements dans différentes directions ou même utiliser des gouttes conductrices associées avec un liquide diélectrique dans un tube en polymère, avec des électrodes segmentées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

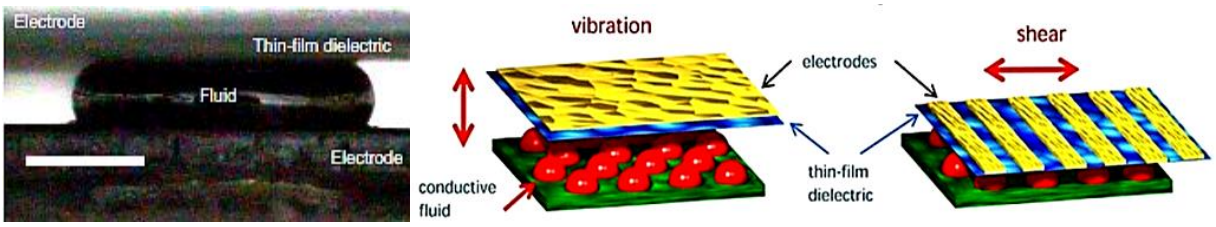


Figure 15: Principe de récupération d'énergie en utilisant le phénomène d'électro-mouillage inverse [104]

La quantité d'énergie récupérée n'est pas surprenante puisque comme dans le cas de la récupération d'énergie avec des polymères diélectrique utilisant leur déformation, celle-ci dépend de la charge électrique qu'on arrive à injecter dans le matériau (400 nJ/mm² pour une tension de polarisation de 70 V ce qui voudrait dire 4 mJ pour une surface de 100 cm²). Mais la technique reste intéressante car contrairement aux autres on n'a pas de la fatigue dans les matériaux, la seule partie déformable étant un liquide.



Figure 16 : Panneaux de récupération d'énergie sur la marche des piétons PaveGen et exemple de leur utilisation dans le siège de la compagnie SNCF (France)

La récupération d'énergie sur la marche peut aussi se faire sur les trottoirs, les routes ou les sorties des centres commerciaux, l'énergie obtenue pouvant être utilisée pour l'illumination du milieu ou pour alimenter des panneaux et automates du coin. Un projet récent dans ce sens est celui de la compagnie anglaise PaveGen (fondée en 2009) qui fabrique des dalles qui sont capables de générer jusqu'à 7 J par pas (mais des données officielles claires sur cet aspect ne sont pas fournies). D'après le brevet déposée par l'inventeur et l'actuel PDG de l'entreprise, Laurence Kemball-Cook [105], la technologie utilisée est électromagnétique utilisant un système mécanique spécial pour transformer le mouvement imposé externe qui est linéaire en mouvement de rotation, même si la possibilité d'utiliser des éléments piézoélectriques est stipulée. Une particularité intéressante de ces panneaux c'est le fait qu'il incorpore une LED qui s'allume lorsque quelqu'un passe (en utilisant seulement 5% de l'énergie récupérée) ce qui fournit un retour interactif et permet donc aux gens de se sentir plus impliqués.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

On pourrait mentionner aussi ici les systèmes qui récupèrent de l'énergie sur le mouvement du corps mais en utilisant une approche de type sismique. C'est le cas de la startup américaine AMPY (2014). Avec un dispositif assez compact ayant la masse et la taille d'un petit téléphone mobile on promet de pouvoir récupérer pendant une heure d'activité physique assez d'énergie pour prolonger d'une heure l'autonomie d'un smartphone en fonctionnement normal et jusqu'à cinq heures en veille. Malheureusement il n'y a aucune mention quant à la technologie utilisée, on ne fournit non plus des caractéristiques exactes sur les performances du système mais d'après certaines sources il s'agirait encore d'une technologie électromagnétique.



Figure 17 : Système de récupération d'énergie cinétique sur les mouvements du corps (AMPY)

Comme on peut le voir la plupart des projets actuels qui affirment avoir créé des dispositifs capables de générer des quantités intéressantes d'énergie pour des dispositifs portables grand public sont basés sur des technologies électromagnétiques. De plus, même si on a mentionné seulement certains projets parmi beaucoup d'autres dans la plupart de cas on peut voir qu'il ne s'agit pas des innovations technologiques importantes mais seulement d'une reprise des techniques existantes adaptées à des nécessités modernes. En même temps, on peut remarquer qu'il s'agit d'un domaine très populaire qui est en train de se développer très rapidement, la plupart de ces projets étant en cours de déroulement.

1.4.4 Récupération d'énergie avec des matériaux piézoélectriques et polymères électrostrictifs

La récupération d'énergie électrique avec des matériaux piézoélectriques a été envisagée il y a longtemps. Mais la perspective est devenue plus réaliste seulement lorsque des matériaux présentant un bon couplage électromécanique ont été conçus (comme par exemple les céramiques ferroélectriques). En effet, c'est à cette période qu'on retrouve de nombreux brevets sur le sujet [106–108]. L'utilisation des polymères diélectriques est par contre une idée plus récente et on trouve les premiers travaux à partir des années deux milles.

N'importe quel système de récupération d'énergie mécanique qui utilise un matériau électroactif pourrait être placé d'une manière fortement simplifié dans une de trois catégories en fonction de l'excitation mécanique utilisée. On pourrait distinguer ceux qui sont excité par des forces appliquées directement sur le système, souvent à faible fréquence (fonctionnement quasi-statique), après on pourrait aussi avoir des systèmes qui fonctionnent grâce à leur inertie et fonctionnent avec des vibrations, et au final on pourrait aussi avoir des excitations très rapides et puissantes (des chocs). Lorsqu'on utilise des matériaux piézoélectriques on peut concevoir des systèmes fonctionnant dans tous ces trois modes. D'un point de vue morphologique encore on peut utiliser le matériau actif sous plusieurs formes : éléments volumiques, couches minces ou encore sous forme des fibres etc.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

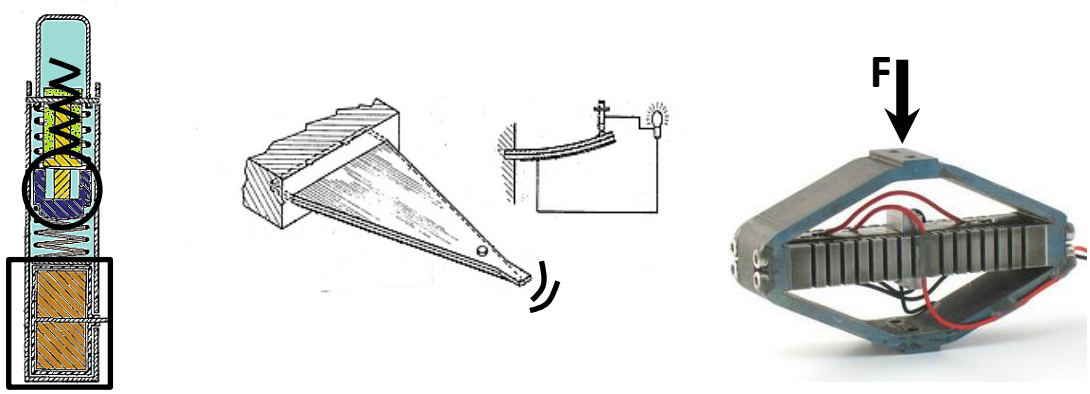


Figure 18 : Exemples de systèmes pouvant être utilisés pour la récupération d'énergie utilisant un matériau électroactif (excitation par chocs, vibrations, fonctionnement quasi-statique)

Les premiers générateurs piézoélectriques réalisés étaient directement inspirés de leurs homologues électromagnétiques. Soit on actionnait directement sur un élément piézoélectrique soit on utilisait un système mécanique d'amplification de la force (leviers, roues dentées) [109–111]. Un système mécanique d'amplification peut améliorer sensiblement la quantité d'énergie récupérée. En effet, les céramiques piézoélectriques sont normalement assez rigides (50–150 GPa) ce qui veut dire que des contraintes élevées sont nécessaires pour produire des déformations suffisamment élevées. De plus, comme elles sont normalement plus résistantes en compression qu'en extension souvent on applique une contrainte permanente en les serrant (avec un système vis-écrou par exemple) [112,113]. La récupération d'énergie électrique avec des polymères flexibles nécessite des déformations et déplacements importants, dans les cas les plus simples on applique directement une force sur un film ou plusieurs associés sous forme de stacks ou rouleaux à une vitesse relativement faible. Dans ce cas aussi normalement on peut considérer qu'on est dans un régime quasi-statique.

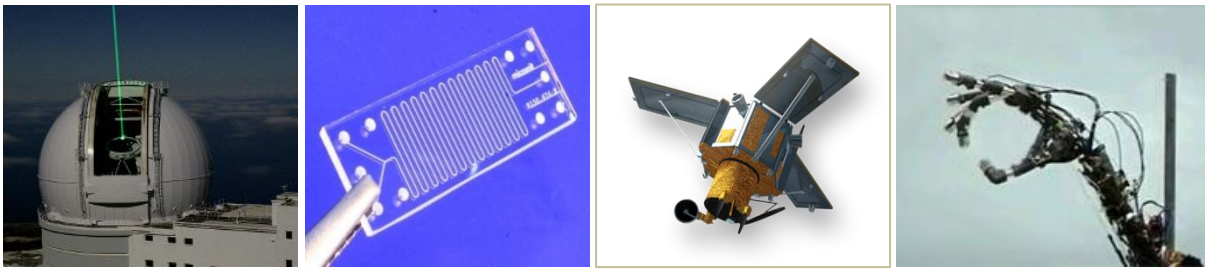
L'excitation mécanique des structures sismiques présente l'avantage d'être plus simple. En effet, on peut obtenir des déformations ''importantes'' même avec des faibles forces lorsqu'on se place à une résonnance et d'habitude le couplage entre la structures et le système est réalisé d'une manière très simple (il faut juste fixer les deux). Pourtant, le désavantage de ce genre de dispositifs c'est que le transfert d'énergie mécanique est très mauvais lorsqu'on se place en dehors d'une résonance, il faut donc bien dimensionner tous les composants. Les structures les plus utilisées dans ce cas sont des structures minces comme des plaques unimorphes et bimorphes avec des masses ajoutées. Celles-ci peuvent être utilisées et avec des céramiques piézoélectriques et avec des polymères mais les déformations générées restent faible (≈ 1%) ce qui veut dire que on ne peut pas utiliser cette approche avec des élastomères diélectriques si des déformations importantes sont nécessaires.

Autre possibilité c'est d'exciter les éléments actifs par des impacts et des chocs. Cela peut se faire par exemple en injectant initialement de l'énergie mécanique dans un ressort. Celle-ci étant transmise en suite par l'intermédiaire d'une masse qui est accélérée avant d'impacter l'élément actif. Les chocs mécaniques exercés par exemple sur un élément piézoélectrique peuvent amener à la génération des champs électriques élevés. Cela peut être exploité dans des systèmes d'ignition comme des briquets [114] ou des missiles [115] (détonation au moment de l'impact). Ce type d'excitation semble être mieux adapté aux céramiques piézoélectriques en raison de leur rigidité élevée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

1.5 Etat de l'art des actionneurs utilisant des matériaux électroactifs pour le contrôle de forme

Bien évidemment on ne peut pas faire une classification exacte de tous les actionneurs qui existent mais à l'heure actuelle il semblerait que quelques domaines d'applications semblent être particulièrement prometteurs en ce qui concerne l'utilisation des matériaux électroactifs. Parmi ceux-ci on pourrait mentionner l'optique active, la micro-fluidique, les muscles artificiels ou encore les antennes déformables et les structures flexibles/déployables. La thématique de cette thèse centré sur le changement et le contrôle de forme des structures se rapproche plus des domaines des miroirs et antennes flexibles. L'état de l'art fait dans ce chapitre sera donc centré plus sur les structures flexibles en général.



1.5.1 Systèmes optiques actifs

L'optique active c'est le domaine qui utilise des miroirs et des lentilles déformables, la géométrie desquels peut être contrôlée. La nécessité de tels systèmes optiques est apparue pour la première fois lorsque des télescopes avec de grands diamètres d'ouverture ont commencé à être fabriqués. En effet, il est connu le fait que plus l'ouverture d'un télescope est grande plus sa résolution devrait être élevée car il y a plus d'énergie qui est récupérée (cela est vrai tant que les phénomènes liés à la diffraction restent négligeables). Pourtant, en pratique on a pu remarquer qu'à partir d'un certain diamètre la résolution n'est pas améliorée du tout [116]. Ce phénomène est principalement dû à l'impact de différentes perturbations atmosphériques (gradient de température, courants d'air etc.) sur le faisceau de lumière incident (les déphasages entre différentes parties du faisceau, diminuent l'intensité totale reçue par le capteur). Isaac Newton, l'inventeur du télescope à miroirs était par exemple au courant de cette limitation [117], il s'agit donc d'un vieux problème qui a limité pendant longtemps le développement de l'astronomie.

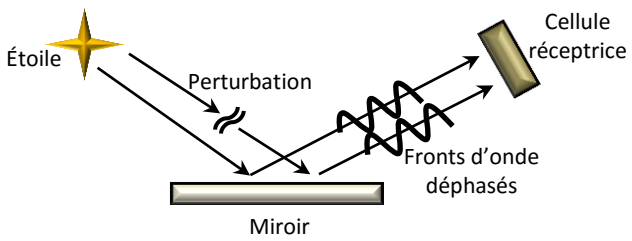


Figure 19 : Impact des aberrations optiques dues à des perturbations atmosphériques sur l'image finale d'un télescope : la partie du faisceau perturbé est déphasée ce qui peut diminuer l'intensité totale reçue par le capteur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

L'idée d'utiliser des miroirs déformables pour remédier à ce problème a été développée dès 1953 par l'astronome Horace Babcock, en mettant ainsi les bases de ce qu'on appelle aujourd'hui l'optique active, mais à l'époque la technologie nécessaire pour l'implémenter en pratique n'existait pas [118]. La seule possibilité était d'utiliser des éléments solides l'orientation desquels pouvait être modifiée (simple rotation dans la plupart de cas) ce qui n'était pas du tout suffisant.

Autre motivation possible pour concevoir de composants optiques adaptables, pourrait être l'utilisation du LASER [119]. En effet, une fois découvert vers la fin des années 1950, étant en permanente progression, les composants optiques utilisés se montraient de plus en plus imprécis ce qui nécessitait des corrections fréquentes (surtout pour des puissances élevées lorsque les lentilles et les miroirs chauffaient).

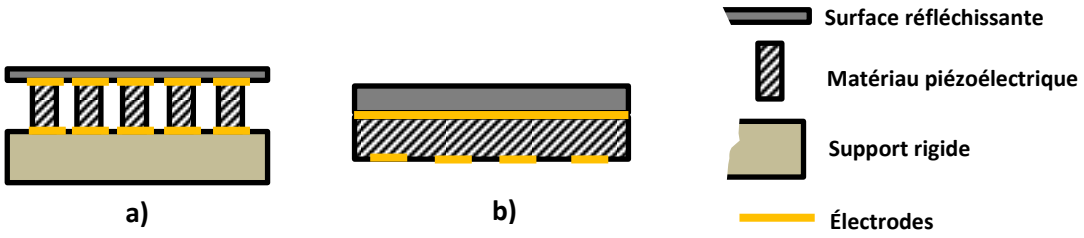


Figure 20 : Deux configurations possibles de miroirs déformables utilisant des matériaux piézoélectriques (d'après [118] **et** [241]**)**

Toutefois, il faut attendre jusqu'à 1972 pour que le premier miroir, vraiment déformable, utilisant des matériaux piézoélectriques soit réalisé par la compagnie américaine ITEK, les motivations primaires étant d'après certaines sources purement militaires (en pleine guerre froide pouvoir détecter les satellites soviétiques placés en orbite).

Les premières structures réalisées étaient assez simples (Figure 20) comportant des éléments piézoélectriques massifs commandés chacun séparément, étant actionnés en mode longitudinal et fixés entre un support rigide et la couche réfléchissante [120] (mode piston). Avec ce type de miroir on obtenait des déflections de l'ordre de 0.5 µm/kV, ce qui permet de voir le désavantage de l'utilisation des éléments piézoélectriques massifs en mode longitudinal car ils nécessitent une haute tension pour être actionnés et donc des circuits électriques adaptés, souvent des systèmes très volumineux [121]. Dans les années 80 des miroirs utilisant des stacks piézoélectriques apparaissent [122] ce qui a permis d'obtenir des déflexions plus importantes de l'ordre de 10 µm/kV, mais on continue à utiliser de tensions élevées. Une autre variation de ce type de miroir ce sont les miroirs piézoélectriques monolithiques [118] dans lesquels on n'utilise pas des éléments individuels mais un seul block avec plusieurs électrodes intégrés.

Une solution possible pour remédier aux problèmes énumérés ci-dessus c'est d'utiliser des couches piézoélectriques minces dans des structures bimorphes ou unimorphes [123]. De tels miroirs sont apparus presqu'en même temps que leurs homologues mais pour un certain champ électrique elles sont sensé présenter des déplacements plus importants. En effet, on trouve dans des articles des miroirs présentant des sensibilités de l'ordre de 10 µm/kV. Mais le désavantage des structures uni-/bimorphes c'est l'effet plus délocalisé de la déflection, par rapport aux miroirs utilisant des éléments pistons et par conséquent une commande plus compliquée nécessaire. En effet, pour pouvoir utiliser une commande simple il faut qu'il existe une dépendance directe entre la tension appliquée sur l'élément actif et la forme prise par la surface réfléchissante. Cela est plus ou moins le cas pour l'utilisation des éléments pistons mais pour des structures bi ou unimorphes le film a tendance à se courber et dans ce cas sa forme finale dépend beaucoup des conditions aux limites.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

	Structure à pistons	Structure en flexion
Localisation de l'effet	Bonne	Changement
Déflection	Faible	Importante
Fixation	Nécessaire	Pas nécessaire
Légèreté	Massif	Léger
Tension électrique	Très élevée	Modérée
Zones actives	Nombreuses	Modérée

Tableau 7 : Comparaison entre les deux types de miroirs piézoélectriques

Un paramètre très important pour les miroirs déformables pour ce genre d'application c'est la précision de positionnement. En effet, pour que la correction d'un faisceau soit possible il faut que la sensibilité en déplacement soit déjà plus petite que la longueur d'onde du rayonnement (environs 500 nm pour la lumière visible). De ce point de vue les céramiques piézoélectriques semblent être très performantes. Pourtant leur utilisation ramène à des structures assez encombrantes. Une possibilité de résoudre ce problème serait d'utiliser des polymères électroactifs qui sont normalement plus légers et peuvent être fabriqués sous forme des couches très minces.

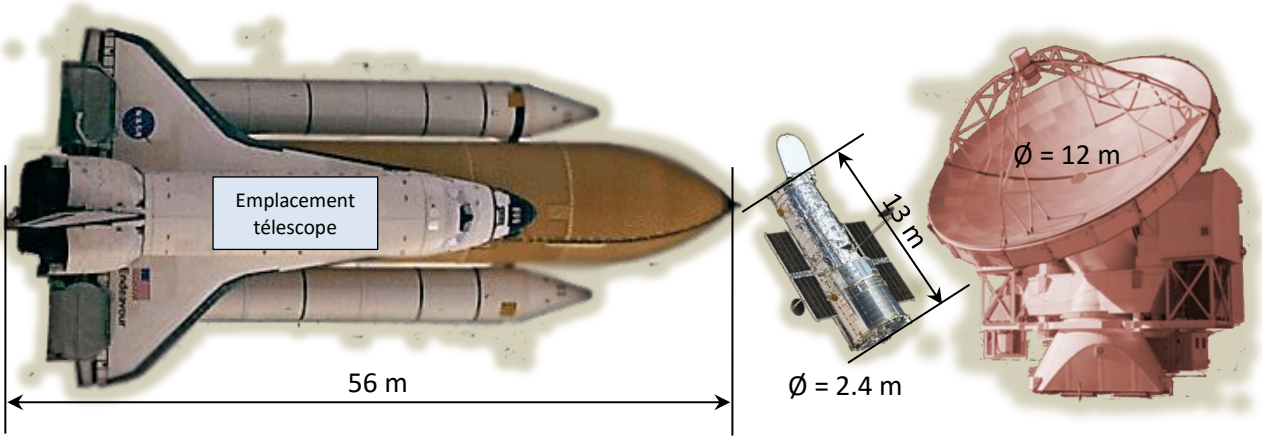


Figure 21 : De gauche à droite : la navette spatiale Discovery qui a transporté le télescope Hubble, le télescope Hubble, le télescope terrestre APEX (un de plus grands)

Ce problème est d'autant plus important lorsqu'il s'agit des télescopes spatiaux. En effet, ceux-ci sont placés en orbite avec des navettes spatiales, plus le télescope est massif plus la navette doit être puissante et donc plus la procédure est chère est compliquée. C'est pour cette raison que les télescopes spatiaux actuels présentent des diamètres relativement faibles par rapport aux télescopes terrestres. Par exemple le télescope Hubble (mis en orbite en 1990) a un diamètre de seulement 2.4 m alors que le télescope terrestre APEX (Chile) 12 m. En même temps des télescopes ayant de grandes surfaces pourraient augmenter considérablement le détail des observations. Il n'est pas étrange que la NASA exprime beaucoup d'intérêt face à de nouvelles technologies qui permettraient de déployer des télescopes ayant des grandes surfaces. Parmi les études financées par la NASA on retrouve des projets concernant des antennes avec des réflecteurs de quelques dizaines de mètres en diamètre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

A part des miroirs on pourrait imaginer aussi des lentilles déformables. En effet, il existe beaucoup de systèmes qui utilisent des lentilles à la place de miroirs tout d'abord pour des raisons pratiques car ces derniers sont plus compacts. Il serait surtout intéressant d'avoir des lentilles qui peuvent modifier leur distance focale. Les appareils photo ou les caméras vidéo par exemple utilisent un système compliqué composé de plusieurs lentilles, certaines mobiles, pour pouvoir faire varier la distance focale de l'objectif. Il serait beaucoup plus commode d'avoir une seule lentille déformable et contrôlable. L'œil est un de meilleurs exemples d'un tel système optique biologique. Une de dernières innovations dans ce domaine ce sont les lentilles accordables à base d'élastomères diélectriques [124].

1.5.2 Antennes flexibles et déployables, voiles solaires

Les applications spatiales nécessitent en général des dispositifs très compacts et légers pour pouvoir être facilement transportés. Mais en même temps, il existe souvent le besoin des structures occupant des surfaces importantes (comme par exemple les réflecteurs des antennes ou les voiles solaires) qui peuvent présenter des dimensions pouvant atteindre plus de 100 m [125]. Les polymères électroactifs pourraient être très intéressants pour de telles applications car une fois intégrés dans ces structures ils pourraient être utilisés pour leur déploiement et leur contrôle sans ajouter beaucoup de masse ou changer leur rigidité. L'utilisation des actionneurs conventionnels électromagnétiques n'est pas très réaliste dans ce cas car ils sont normalement assez lourds dû aux éléments magnétiques qu'ils incorporent.

Le concept des voiles solaires n'est pas nouveau mais en pratique elles ont commencé à être utilisées que récemment, dans les dernières années [126]. Elles peuvent être surtout intéressantes pour propulser des satellites de petite taille, en orbite, en utilisant la pression du rayonnement solaire. L'intérêt des satellites de petite taille dans ce cas est dû aux forces de pression générées par le rayonnement qui restent assez faibles (≈ 9 N/km² [127]) car plus le satellite est massif plus de temps il nécessite pour atteindre une vitesse donnée.



Figure 22 : Exemple d'un mini satellite utilisant des voiles solaires développé par « The Planetary Society » (projet LightSail™ 2014) à gauche : dimensions du satellite par rapport à une personne; à droite : vue des voiles déployées dans l'espace

On pourrait imaginer des matériaux électroactifs intégrés dans les voiles permettant de modifier par exemple leur orientation. Mais il faut mentionner que pour le moment on utilise des films de très grandes surfaces mais aussi très minces (de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres [128]) donc très flexibles ce qui veut dire que des supports rigides seront néanmoins nécessaires, les éliminer juste en utilisant des matériaux électroactifs semble peu probable, mais ceux-ci pourraient déjà réduire les dimensions des plis générés par la tension mécanique, cela

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

pouvant conduire à une amélioration importante du fonctionnement). En effet, il est important que la surface des voiles réfléchisse le rayonnement incident dans la même direction pour maximiser la force totale générée, les différentes irrégularités ayant un effet dispersif. En même temps on se rend compte que le même principe pourrait être appliqué pour faire varier l'accélération du satellite. Actuellement l'utilisation des voiles solaires semble être un sujet intéressant, plusieurs projets étant en cours de développement ou ont été récemment finalisés. Parmi ceux-ci on pourrait mentionner le satellite IKAROS développé par l'Agence d'Exploration Aérospatiale Japonaise (JAXA) en 2010 [129]. La particularité intéressante de ce dispositif c'est qu'il ne nécessite pas des parties rigides pour maintenir les voiles sous tension mécanique. Pour cela il est entraîné dans un mouvement de rotation ce qui permet aux voiles de rester tendues grâce aux forces centrifuges imposés et à des masses placées aux extrémités. A ce jour il est toujours en état de fonctionnement. Le principe d'une structure tournante a été repris aussi par la NASA avec le projet HELIOS, toujours en progression. Le concept prévoit un satellite avec des voiles sous la forme de six bandes en polymère (0.75 m x 220 m x 2.74 µm) déployées et maintenues tendues grâce au mouvement de rotation à l'instar d'un hélicoptère. Autre projet en cours de déroulement est celui de la société ''The Planetary Society'' (LightSail, Figure 22), il s'agit encore d'un petit satellite qui utilise des voiles solaires mais qui sont fixées avec des supports rigides.

Autres applications qui pourraient être visées ce sont les antennes spatiales déployables. Comme les voiles solaires elles ont souvent besoin des surfaces importantes. C'est le cas des réflecteurs utilisés pour concentrer le rayonnement électromagnétique, qui peuvent atteindre des diamètres allant jusqu'à quelques dizaines de mètres [130]. Cela est surtout vrai pour des antennes de type radar fonctionnant à des fréquences relativement faibles (radio fréquences → infrarouge) actuellement utilisées pour la télémétrie, mesure de température, en radioastronomie etc. Plus la surface d'une antenne est importante plus la sensibilité en acquisition et la directivité en émission sont grandes aussi [131]. Mais contrairement aux voiles solaires dans le cas des antennes il est nécessaire aussi d'assurer un positionnement précis de la structure avec un contrôle adapté associé. Plusieurs modèles d'antennes ont été proposées dans le passé, les antennes utilisées sur des satellites ayant subi une évolution continue (celles utilisées par exemple sur le premier satellite (Spoutnik 1, 1957) étaient des simples monopôles).

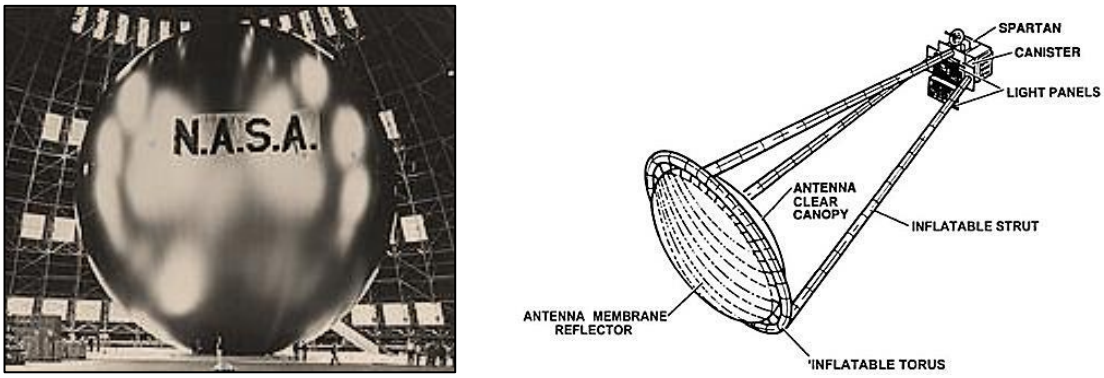


Figure 23 : Structures gonflables. Gauche : Echo le satellite ballon réflecteur; droite : exemple d'antenne gonflable d'un vrai satellite

Une autre possibilité pour fabriquer des antennes déployables c'est d'utiliser des structure gonflables [132] (Figure 23). Là encore les polymères électroactifs pourraient être utilisés pour corriger certaines irrégularités dues à la déformation non-uniforme de la membrane. En effet, sans aucun élément actif on ne peut que jouer sur la pression interne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué une brève description des matériaux piézoélectriques et polymères diélectriques, en discutant leur comportement et les paramètres caractéristiques. Cette investigation bibliographique nous a permis aussi d'identifier les tendances technologiques actuelles. Comme on a pu le voir il existe d'une part une tendance générale d'évolution vers des systèmes intégrés, compacts et en même temps multifonctionnels. D'une autre part une évolution vers des structures très larges mais très légères et flexibles. Grâce à leurs propriétés physiques remarquables (flexibilité, résistance mécanique et chimique) et à la simplicité de fabrication les matériaux électroactifs pourraient avantageusement remplacer les matériaux déjà utilisés dans beaucoup de dispositifs existants et contribuer à leur amélioration, voir permettre de concevoir des structures qui sont irréalisables avec les technologies actuelles.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 2. Optimisation du transfert d'énergie

On est souvent ramené à chercher le fonctionnement optimal d'un système. Dans certains cas l'objectif à optimiser c'est l'énergie qui est transférée entre des systèmes ou extraite d'un système. Pour trouver les paramètres et le fonctionnement optimal la méthode la plus simple c'est de simuler le comportement et de faire varier les paramètres caractéristiques du problème mais s'il existe plusieurs paramètres alors cette méthode peut s'avérer fortement non adaptée. Il faut dans ce cas traiter un tel problème avec des outils mathématiques conçus à ce propos.

2.1 Considérations physiques sur le transfert d'énergie et son optimisation

On parle de transfert d'énergie mais il est intéressant de voir ce qui se cache derrière cette notion. Bien évidement pour obtenir une explication satisfaisante il faut faire appel à la physique. Déjà, on peut mentionner le fait que lorsqu'on parle d'énergie d'un système on parle en fait de l'énergie des particules qui composent le système. Il s'agit bien évidement des deux formes possibles d'énergie : potentielle et cinétique. L'énergie potentielle est directement dépendante de la position dans l'espace et les distances qui séparent chaque particule alors que l'énergie cinétique dépend de la vitesse de celles-ci, c'est-à-dire de la manière dont les positions changent.

Dans la plupart de cas on ne s'intéresse qu'à des quantités macroscopiques dans quel cas on parle d'énergie potentielle macroscopique et d'énergie macroscopique cinétique qui peut être vue comme la superposition d'une énergie cinétique due à la vitesse moyenne des particules et une énergie due à l'écart de vitesse de chaque particule par rapport à la vitesse moyenne (la chaleur).

La notion de système peut signifier un ensemble de particules contenues dans un certain volume d'espace ou l'ensemble de particules lui-même, dans ce dernier cas le volume total occupé pouvant être variable dans le temps. Lorsqu'on dit qu'il y a un échange d'énergie entre deux systèmes cela veut dire en fait qu'il y a une interaction entre les particules des deux systèmes ou un échange des particules ce qui se traduit par la variation de l'énergie totale de chacun. Pourtant, en vertu du principe de conservation, l'énergie totale de deux système (supposés isolés du milieu externe) ne doit pas varier, d'où cette impression de transfert.

Souvent, en pratique on cherche à optimiser l'énergie transférée d'un système à l'autre voir extraire intégralement l'énergie ''stockée'' dans un système. Mais aussi on préfère que l'énergie transférées présente une forme particulière (énergie potentielle, cinétique ou de la chaleur). On voit donc qu'on peut être confronté en principe à des problèmes d'optimisation variés pour les mêmes systèmes. On pourrait imaginer par exemple qu'on veut transférer une quantité maximale de chaleur dans un système mais maintenir la même énergie potentielle etc.

Bien évidement pour pouvoir influencer l'échange d'énergie il faut qu'un mécanisme de commande existe (en pratique toujours de nature macroscopique). Il pourrait s'agir d'un circuit électrique, un interrupteur, une action de l'extérieur. Cela peut se faire par une dépense énergétique mais dans certaines situations, dans des conditions idéales, celle-ci peut ne pas être nécessaire.

Souvent, pour des systèmes de récupérations d'énergie on a intérêt à maximiser l'énergie potentielle reçue. En effet, celle-ci est plus simple à conserver car l'énergie cinétique macroscopique a tendance à se transformer en chaleur au cours du temps, qui est par contre la forme d'énergie la plus difficile à utiliser d'une manière utile.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour que l'énergie potentielle d'un système évolue comme on vient de le mentionner, il est nécessaire qu'il existe un repositionnement des particules soit à l'intérieur du système soit un influx de particules de l'extérieur. Sauf pour des transformations très lentes (régime quasi-statique, équilibre thermodynamique) cela implique forcement que les particules doivent présenter à un certain moment une vitesse et donc une certaine énergie cinétique aussi. Si on veut maximiser l'énergie potentielle finale il faut penser alors à transformer et cette énergie cinétique en énergie potentielle.

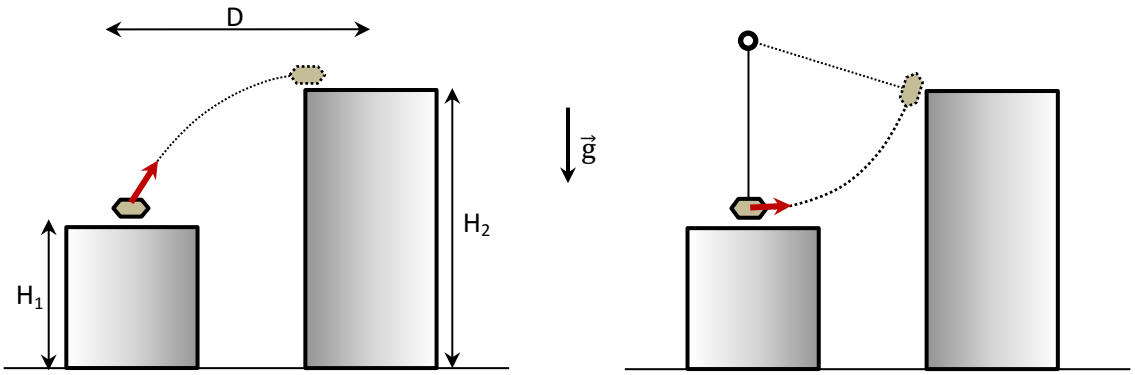


Figure 24 : Exemple simple illustrant différentes manières d'effectuer un transfert d'énergie mécanique : par projection (gauche) en utilisant une liaison pivot (droite)

Prenons un exemple simple pour illustrer ce phénomène. Imaginons qu'on ait deux plateformes ayant des hauteurs différentes, situées à une certaine distance D l'une de l'autre. Le but est de déplacer un objet d'une certaine masse, situé initialement sur la plateforme la plus basse, vers l'autre plus haute (Figure 24). Deux mécanismes différents sont proposés pour le faire. Le premier consiste juste à jeter l'objet; l'autre à utiliser une tige rigide très légère sur laquelle initialement l'objet est fixé, l'ensemble pouvant être mis dans un mouvement de rotation autour d'un point fixe tel que l'objet s'arrête au niveau de la deuxième plateforme, et à ce moment il peut être enlevé.

Si dans les deux cas on suppose qu'initialement le transfert d'énergie vers l'objet est idéal, alors on pourrait comparer l'énergie minimale nécessaire pour le déplacement de l'objet dans les deux cas. Il est immédiat pour le premier cas que la trajectoire de l'objet sera une parabole et on peut minimiser l'énergie initiale en choisissant une hauteur maximale de celle-ci égale à la hauteur H_2. Mais il est néanmoins nécessaire qu'une vitesse horizontale existe pour que l'objet se déplace de la distance qui sépare les deux plateformes. Dû au fait que la force de pesanteur ne produit pas de décélération horizontale cela veut dire que l'objet présente une énergie cinétique non-nulle au moment de l'atterrissage, qui est perdue (transformée en chaleur lors de l'impact). Le système utilisant une tige tournante (d'une longueur et un point de fixation judicieusement choisis) permet par contre dans le cas idéal (masse de la tige très faible, frottements négligeables) d'utiliser la même énergie en entrée que celle transférée (**masse objet** x **g** x (**H_2 – H_1**)). En effet, on peut fournir juste assez d'énergie à la tige reliée à l'objet pour que celle-ci s'arrête au niveau de la deuxième plateforme au quel moment l'objet peut être enlevé (idéalement sans dépense énergétique).

La question qu'on peut se poser alors c'est pourquoi dans un cas on peut avoir un transfert complet d'énergie mais pas dans l'autre. Comme on a pu remarquer dans le premier cas l'objet garde tout le temps une énergie cinétique due à la composante horizontale de la vitesse alors que dans le deuxième cas le mécanisme utilisé (tige tournante + point fixe) permet de **transformer l'énergie**

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

cinétique en énergie potentielle de manière continue. C'est donc ce mécanisme qui fait la différence mais un tel mécanisme n'est pas toujours présent chaque fois que deux systèmes interagissent et souvent un autre système supplémentaire (comme par exemple la tige dans cet exemple) est nécessaire.

Revenons à l'exemple précédent mais supposons que l'objet n'est pas enlevé lorsque la tige atteint la hauteur H_2. Ce qu'on peut observer alors c'est le fait que celle-ci commence à osciller. Les oscillations sont en effet des phénomènes liées à des transformations d'une forme d'énergie en autre (cinétique-potentielle) et peuvent être souvent présentes dans des systèmes, constituant des indicateurs des phénomènes réversibles qui peuvent être utilisés pour optimiser et réaliser des transferts énergétiques.

Pourtant, les oscillations par elles-mêmes ne peuvent pas être utilisées car on a une transformation d'une forme d'énergie en autre d'une manière périodique, accompagnée en même temps par des dissipations. Il est donc quand même nécessaire d'avoir un contrôle externe pour arrêter les oscillations dans un état où l'intégralité de l'énergie ou la quantité désirée a été transformée en énergie potentielle.

Prenons un autre exemple simple. On pose un poids sur un ressort (idéal de masse négligeable) le but étant d'injecter le plus d'énergie mécanique possible dans celui-ci.

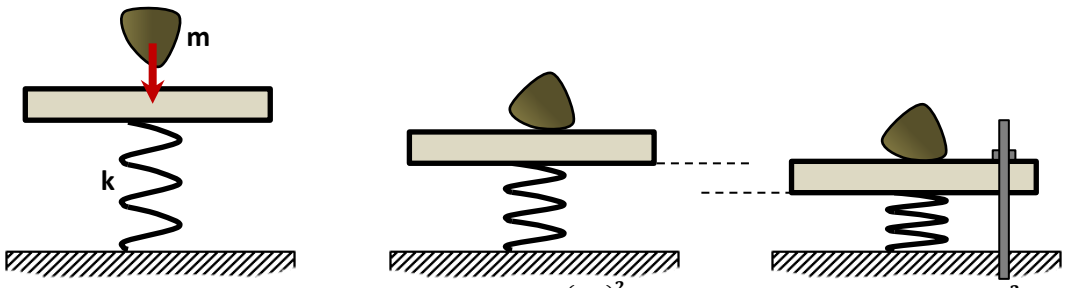


Figure 25 : Deux possibilités d'injecter de l'énergie mécanique dans un ressort en utilisant une masse :
b) en déposant la masse et en attendant l'équilibre
c) en déposant la masse et en bloquant le ressort lorsque celui-ci se trouve comprimé au maximum

On pourrait juste poser le poids et attendre qu'un équilibre mécanique soit établit (Figure 25, b) dans quel cas l'énergie stockée dans le ressort est égale à : $(\mathrm{mg})^2/(2\mathrm{k})$. Autre possibilité c'est de poser le poids qui va entrainer l'ensemble dans un mouvement oscillatoire et bloquer le ressort lorsqu'il devient comprimé au maximum (Figure 25, c). Avec la deuxième méthode l'énergie stockée est donnée par : $4\,(\mathrm{mg})^2/(2\mathrm{k})$. On a donc quatre fois plus d'énergie en utilisant la deuxième méthode, mais il faut utiliser un mécanisme supplémentaire qui bloque les oscillations au bon moment. Celui-ci ne consomme pas forcement beaucoup d'énergie par rapport à l'énergie injectée dans le ressort. Cela montre de plus qu'il n'y a pas seulement le problème de transformations d'une forme d'énergie dans une autre mais aussi le problème de synchronisation de différents phénomènes (dans l'exemple précédent le blocage du ressort à un moment particulier).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

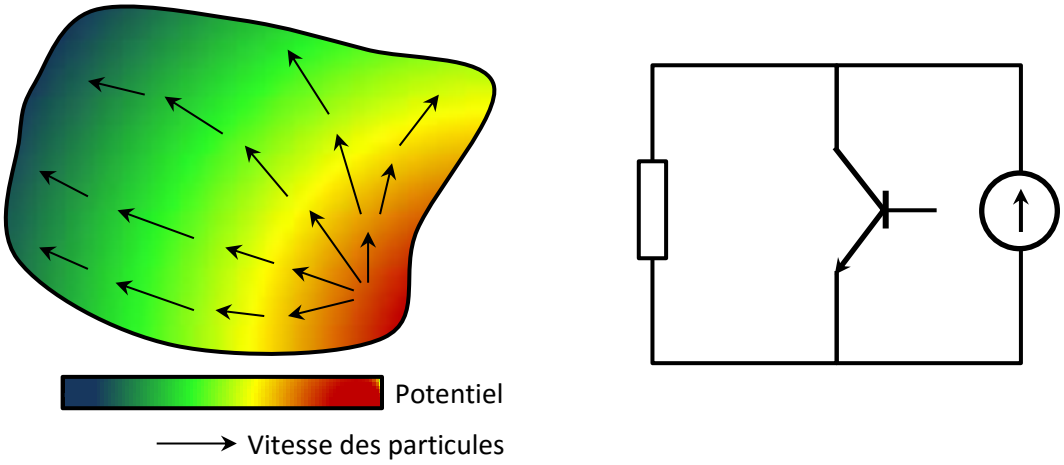


Figure 26 : Exemple d'un système réel (gauche) et un système simplifié utilisant le concept de dipôle (droite)

Mais dans le cas général ce qui se passe dans un système peut être beaucoup plus compliqué. Souvent on n'a pas ''accès'' à certaines parties et donc on ne peut pas les contrôler. Le flux d'énergie et des particules peut avoir une distribution dans l'espace compliquée aussi, mais heureusement en pratique on utilise des systèmes qui présentent souvent un comportement assez simple. En effet, la plupart de temps le concept de dipôle, quadripôle etc. est appliqué ce qui permet de supposer que sur certaines portions de l'espace on a un flux de particules ayant une vitesse uniforme et dans lesquels les potentiels des forces qui agissent sur celles-ci varient de manière linéaire (Figure 26). On néglige aussi souvent certaines dimensions comme les sections des câbles dans des circuits électriques ou celles des tuyaux pour un système hydraulique. Dans certains cas on peut avoir un système mixte dans lequel seulement certaines parties sont simplifiées. Dans ces conditions il est impossible de résoudre le problème d'optimisation du transfert d'énergie sans utiliser le système d'équations qui caractérise son comportement. Bien évidement on peut toujours traiter de tels problèmes d'un point de vue purement mathématique mais il est toujours utile de se rappeler qu'en réalité il s'agit des transferts énergétiques dus à des particules car cela permet d'expliquer plusieurs phénomènes qui pourraient sinon paraître vraiment étranges. De plus, souvent cela permet de trouver des solutions intuitives à certains problèmes de transferts énergétiques.

Prenons encore un exemple simple mais cette fois-ci d'un système électrique.

On a deux condensateurs (de même capacité) un chargé (q_0) et l'autre déchargé. En voulant transmettre de l'énergie au condensateur déchargé on les connecte tous les deux ensemble. Lorsque l'équilibre est atteint on peut constater que chaque condensateur est chargé avec la moitié de la charge électrique initiale mais l'énergie totale stockée dans les deux représente seulement la moite de l'énergie initiale.

Les équations macroscopiques du système décrit précédemment ne peuvent pas expliquer ce phénomène. Une manière un peu artificielle de le faire est d'ajouter une résistance en série et de dire que l'énergie ''perdue'' a été transformée en chaleur dans les connexions. Ainsi, même si normalement celles-ci ne présenterait qu'une résistance très faible, vu que le courant atteint une valeur très élevée elle se manifeste. Si un interrupteur est utilisé on dit souvent qu'il s'agit des pertes par commutation et de manière complètement injustifiée on pourrait en déduire que c'est à cause de celui-ci que ces pertes existent. Ce problème est en fait très connu au point même d'être élevé au rang de paradoxe par certains auteurs [133], il a été surtout analysé dans le domaine des convertisseurs dc-dc à capacité commutée [134]. Plusieurs explications possibles ont été données [135–137] soit en faisant intervenir des pertes par effet Joule, soit du rayonnement. Dans tous les cas on a affaire à un ''paradoxe'' seulement dans le cas où les équations macroscopiques sont utilisés et on oublie la structure microscopique du système. En effet, rien n'empêche que la résistance des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

connexions soit nulle (utilisation des supraconducteurs) mais dans un tel cas les charges électriques vont être soumises à un déplacement accéléré et donc par conséquent, la définition d'un courant électrique constant partout dans les connexions serait dépourvue de sens. Ils existent d'autres situations similaires à celle-ci. Dans [138] par exemple, les auteurs essayent d'expliquer un phénomène semblable rencontré dans des câbles de transmission lorsque ceux-ci, supposés parfaits, sans pertes, peuvent absorber quand même de la puissance active lorsqu'ils sont alimentés en entrée par un pulse de tension.

Cet exemple semble être un peu similaire à celui décrit précédemment (masse + ressort) mais la différence réside dans le fait que l'équivalent d'un ressort n'est pas présent. En effet, le même phénomène se produit lorsqu'un poids (qui n'est pas très élastique) est laissé tomber d'une certaine hauteur par terre. Son énergie potentielle à l'état initial c'est l'énergie due à la force de pesanteur, tant que l'objet est en train de tomber il y a transformation de l'énergie potentielle en énergie cinétique (macroscopique). Mais une fois la surface de la terre atteinte et le mouvement arrêté, toute l'énergie cinétique ne peut que se transformer en chaleur. On pourrait penser qu'une chose similaire arrive aux charges électriques qui accélérées par un champ électrique sont arrêtées par les armatures du condensateur. Mais en réalité la similarité n'est pas exacte. En effet, une charge électrique accélérée crée un champ électromagnétique (qui emmagasine une certaine quantité d'énergie) contrairement à une particule neutre. Il existe donc une différence fondamentale entre les particules chargées et neutres car les premières interagissent par l'intermédiaire des forces qui dépendent non seulement de la position mais aussi de la vitesse.

En général, lorsqu'une particule est laissée se déplacer d'une certaine position d'une d'énergie potentielle à l'autre, sous l'action de la force due à la différence de potentiel, on a toujours affaire à un tel phénomène. Dans le cas où une certaine quantité infinitésimale de charge électrique δQ transférée d'un potentiel V_1 vers un potentiel V_2 une quantité d'énergie égale à $\delta Q \cdot (V_2 - V_1)$ est transformée forcement en chaleur. Ceci montre qu'il est toujours possible de transformer de manière presque complète une certaine quantité d'énergie macroscopique en chaleur mais pas l'inverse.

Pour que cela n'arrive pas il faudrait que chaque particule interagisse avec quelque chose pour lui transférer son énergie cinétique. Si on reprend l'exemple du poids tombant il suffirait d'utiliser un ressort idéal, comme on l'a vu. Dans le cas des charges électriques l'équivalent de l'énergie élastique de l'exemple précédent c'est l'énergie magnétique stockée dans un élément inductif. En effet, une bobine ou un transformateur présentent le milieu dans lequel les charges électriques peuvent échanger de l'énergie. C'est la raison pour laquelle des éléments inductifs sont utilisé dans le transport d'énergie électrique, ce qui permet d'obtenir de très bons rendements (η> 98% [139]).

Souvent de tels phénomènes sont présents dans des systèmes mais restent cachés. Prenons l'exemple d'une poutre piézoélectrique actionnée par une force à son extrémité et bloquée à l'autre. Comme on le sait dans un tel cas on a intérêt à utiliser un patch piézoélectrique de longueur plus petite que la longueur totale de la poutre [54]. Cela arrive à cause du champ de déformations qui n'est pas uniforme à travers la longueur (près de la zone bloquée les déformations sont plus importantes). Si on pourrait regarder ce qui se passe dans l'électrode déposée sur le patch pendant que la poutre se déforme on pourrait voir qu'il existe un certain déplacement de charges électriques. Comme les charges se déplacent sans aucun mécanisme spécial de transfert d'énergie on a alors des pertes qu'on pourrait minimiser en utilisant un patch plus petit. Une meilleure solution serait d'utiliser une électrode discontinue. A l'état déformé on pourrait se convaincre alors qu'on a sur chaque segment des potentiels différents qui sont à l'origine des pertes. Des phénomènes similaires se produisent lorsque plusieurs éléments piézoélectriques excités par des forces différentes, utilisés pour la récupération d'énergie, sont connectés ensemble. Mais cela reste valable dans le cas général ce qui veut dire que chaque partie d'un tel système de récupération d'énergie doit être équipé d'un système d'extraction d'énergie séparé, qui peut constituer en soit un très gros désavantage.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La nécessité de transformation de différentes formes d'énergie justifie par exemple l'utilisation des convertisseurs dc-dc pour le transfert d'énergie entre différents systèmes électriques. Il est connu le fait qu'un condensateur chargé associé à une bobine constitue un système oscillant. On peut imaginer la situation de l'exemple précédent (exemple de deux condensateurs) dans laquelle on connecte le condensateur chargé à une bobine, on a alors un courant sinusoïdal qui s'établit. À un certain moment on peut déconnecter la bobine et la connecter au deuxième condensateur, l'énergie cinétique des charges dans la bobine va générer un courant dans le deuxième circuit ce qui se traduit par le chargement du deuxième condensateur (Figure 27). Si la bobine est parfaite on peut avoir un transfert complet d'énergie et même transférer des quantités bien précises.

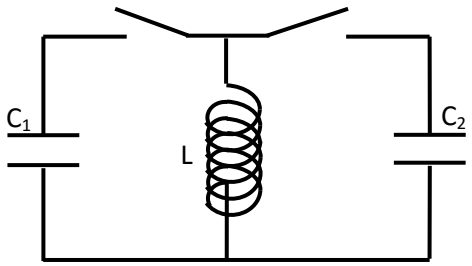


Figure 27 : Transfert d'énergie d'un condensateur à l'autre en utilisant une bobine

La structure proposée constitue en fait le squelette de base de la plupart de convertisseurs dc-dc (élément inductif + interrupteurs). Souvent ceux-ci sont utilisés pour la transformation des tensions continues, mais même pour un tel fonctionnement un raisonnement énergétique pourrait être utilisé. En effet si on veut alimenter une certaine charge électrique avec une tension constante il suffit d'utiliser un condensateur chargé dont on compense l'énergie qu'il fournit. Le transfert de cette énergie se fait grâce à une bobine qui est alternativement connectée à celui-ci et à une autre source (comme un générateur de tension ou un autre condensateur chargé etc.). On sait en pratique que ces systèmes peuvent présenter des rendements énergétiques très élevés ($\eta > 90\%$, [140–142]).

Il est intéressant de mentionner le fait qu'il existe aussi des convertisseurs dc-dc utilisant seulement des condensateurs et interrupteurs sans éléments inductifs (convertisseurs à capacité commutée). Le principe simplifié de fonctionnement est le suivant : on peut alimenter au départ deux condensateurs connectés en parallèle qui donc vont présenter la même tension; ensuite on les connecte en série et ils peuvent fournir de l'énergie dans cette configuration sous une tension plus élevée. Le fonctionnement inverse pour lequel la tension secondaire est plus basse que celle primaire est aussi possible. Bien évidement normalement on n'a pas de pertes pendant les commutations (changement de configuration parallèle-série) mais le même problème du transfert énergétique se pose lorsqu'on alimente ces condensateurs ou lorsque de l'énergie est extraite en sortie. Mais même avec ce type de convertisseurs on peut atteindre des rendements très élevés, l'astuce étant de s'arranger pour que les condensateurs ne soient que très faiblement déchargés lorsqu'ils alimentent la charge électrique. Ce qui se passe est similaire au cas où on décharge un condensateur dans l'autre mais leurs potentiels initiaux sont très proches l'un de l'autre. Dans un tel cas l'énergie cinétique des charges transférées pourrait être assez faible par rapport à l'énergie potentielle échangée grâce aux flux de charges.

Dans certains cas on pourrait avoir un système qui échange de l'énergie avec plusieurs d'autres en même temps. Là on pourrait encore formuler un problème d'optimisation mais il est nécessaire, comme dans les cas plus simples, de bien définir l'objectif d'optimisation. Dans de telles situations utiliser seulement la logique ne sert pas beaucoup. En effet le transfert d'énergie entre deux sous-parties du système peut affecter le transfert entre deux autres. On est obligé donc d'utiliser des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

équations et formuler un problème mathématique. Mais même dans ce cas il y a quelques observations générales qui peuvent être utilisées.

En revenant ainsi vers des systèmes complexes on peut comprendre pourquoi dans le cas général le transfert d'énergie n'est pas optimal mais cette fois d'un point de vue purement mathématique. Tout simplement en général il n'existe aucune raison pour qu'il en soit optimal. Si on laisse interagir deux systèmes ou plus entre eux, l'optimalité du transfert énergétique pourraient être assurée seulement par chance. En effet, pour un certain objectif à optimiser, pour un système donné, il faut assurer un certain flux d'énergie, la même chose doit être faite avec l'autre système. Le flux d'énergie optimal (variation dans le temps) d'un système n'est pas forcément le même pour l'autre. Un moyen pour améliorer un tel fonctionnement est d'ajouter d'autres systèmes intermédiaires ayant comme but de se comporter comme des systèmes d'adaptation. Il s'agit en fait de l'analogie classique d'un système intermédiaire d'adaptation d'impédance. L'utilisation de tels systèmes a été aussi motivé par le fait que différentes formes d'énergie nécessitent d'être transformées mais dans le cas général il s'agit des fonctionnements plus complexes même si cet aspect est aussi pris en compte.

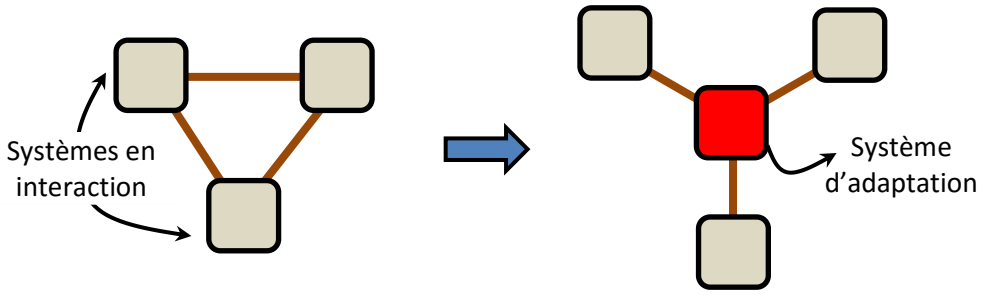


Figure 28 : Le transfert d'énergie dans le système peut être amélioré en insérant des systèmes supplémentaires intermédiaires jouant le rôle d'un routeur d'énergie

Une telle stratégie d'optimisation du transfert (et pas forcément pour l'énergie) peut être vue dans beaucoup d'autres domaines. On pourrait prendre comme exemple les routeurs des réseaux informatiques, les stocks dans le milieu industriel, les ronds-points sur les routes etc. Le fonctionnement d'un système intermédiaire pourrait être complexe mais en général quelques caractéristiques évidentes ressortent. Ce système doit déjà synchroniser l'extraction/injection de l'énergie. Cela implique tout d'abord que les systèmes initiaux doivent être isolés l'un de l'autre pour empêcher un transfert énergétique erratique. Il doit aussi comporter au moins un élément de stockage d'énergie pour conserver l'excès d'énergie qui est injectée et peut-être même incorporer un élément de stockage d'énergie actif comme une batterie pour fournir de l'énergie quand cela devient nécessaire mais il n'y a aucun apport d'énergie de l'extérieur. De plus, si on tient compte des remarques précédentes il faut aussi qu'un tel système effectuent les transferts d'énergie en faisant la conversion d'une forme d'énergie en une autre avec le moins de pertes possibles. Finalement, un tel système devrait présenter un comportement adaptable au cas où le fonctionnement des autres systèmes est variable.

Pour des systèmes électriques un exemple possible d'un tel système d'adaptation est illustré dans la Figure 29. Celui-ci est constitué des interrupteurs qui permettent d'isoler ou mettre en interaction différentes parties, des bobines utilisées pour la transformation de l'énergie potentielle en énergie magnétique et le transfert vers une capacité interne pour le stockage. Le système est symétrique. Dans le cas idéal celui-ci devrait permettre le transfert d'une quantité spécifique d'énergie d'un système capacitif vers un autre d'une manière commandée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

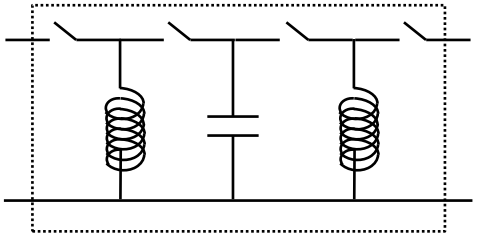


Figure 29 : Système possible d'adaptation de transfert d'énergie pour des systèmes électriques

2.2 Méthodes mathématiques d'optimisation des transferts d'énergie

Pour l'optimisation du transfert d'énergie dans le cas général la voie logique serait d'utiliser les équations caractéristiques de chaque système mais pour arriver au résultat désiré plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Lorsque les systèmes sont linéaires une méthode très commode c'est d'utiliser des méthodes fréquentielles : comme l'utilisation des transformées de Laplace ou Fourier. Une autre possibilité alternative c'est de travailler dans un système temporel. Le problème avec les méthodes fréquentielles dans le cas général c'est qu'en absence de linéarité on peut aboutir à des équations très compliquées. D'autre part, habituellement, il est plus naturel d'aborder le problème d'optimisation dans le temps où les contraintes sont définies d'une manière plus simple. Mais finalement quelle que soit la méthode utilisée, dans le cas général, souvent, le problème d'optimisation se résume à trouver une fonction (et pas la valeur d'un paramètre) et c'est cette particularité qui rend de tels problèmes très difficiles. La complexité du problème dépend aussi de l'objectif à optimiser choisi.

2.2.1 Exemple de problèmes visés

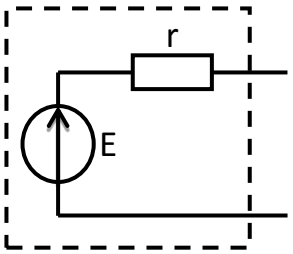


Figure 30 : Système constitué d'une source de tension et une résistance connectées en série

Pour se faire une image du problème qu'on veut résoudre on peut prendre un exemple simple souvent mentionné : une source de tension (E) connectée en série avec une résistance (r) (Figure 30). La méthode classique exposée pour optimiser l'énergie extraite est de supposer que le système est connecté à une certaine résistance qui peut varier. Ainsi, on peut exprimer la puissance extraite en fonction de sa valeur et trouver son maximum par une analyse simple. Le problème avec cette approche c'est qu'on utilise un système externe (la résistance ajoutée) or on pourrait se demander si elle est nécessaire. On peut constater que non. En vertu du principe de la conservation d'énergie, l'énergie fournie par ce système à n'importe quelle charge connectée est égale à l'énergie extraite de la source de tension moins l'énergie consommée par la résistance. Comme le système est

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

stationnaire on peut parler arbitrairement d'énergie ou puissance. Pour extraire le maximum de puissance il faut maximiser l'expression:

$$(3)\ p(I) = EI - rI^2,\ I : \text{courant sortant}$$

On voit toute de suite que pour une configuration optimale il faut que le courant extrait soit deux fois plus petit que celui en court-circuit (une dérivée de l'expression de la puissance par rapport à la variable I suffit). D'une manière similaire on peut voir que la tension optimale doit être la moitié de la tension en circuit ouvert. On n'a pas eu donc besoin de supposer que le système était connecté à un autre système particulier pour trouver son fonctionnement optimal. On peut obtenir la tension et le courant optimaux avec une résistance mais aussi avec beaucoup d'autres systèmes, comme par exemple une autre source de tension de f.e.m. égale à E/2. On pourrait donc généraliser ce résultat, c'est-à-dire conclure que pour trouver le fonctionnement optimal d'un système il suffit de connaitre son comportement interne. Dans cet exemple le problème d'optimisation de l'énergie extraite coïncide avec l'optimisation de la puissance mais dans le cas général ce n'est pas le cas, il faut alors bien préciser l'objectif à optimiser. Pour illustrer ce fait on peut prendre un autre exemple.

On a un système composé d'un condensateur connecté en série avec une résistance (Figure 31). Le condensateur est initialement déchargé et on veut injecter autant d'énergie que possible dans celui-ci entre l'instant initial et un certain τ. Cela revient en fait pour une certaine quantité d'énergie E_0 injectée dans le système de diminuer les pertes dans la résistance.

Pour minimiser les pertes il suffit de minimiser l'expression :

$$(4)\ A = \int_0^{\tau} (\dot{u})^2$$

Avec u la tension aux bornes du condensateur. Pour la résolution de ce problème on peut utiliser cette fois ci une méthode numérique. Tout d'abord on approche le signal u(t) par une fonction

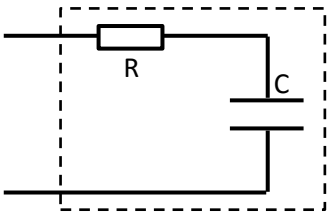


Figure 31 : Système résistance-capacité

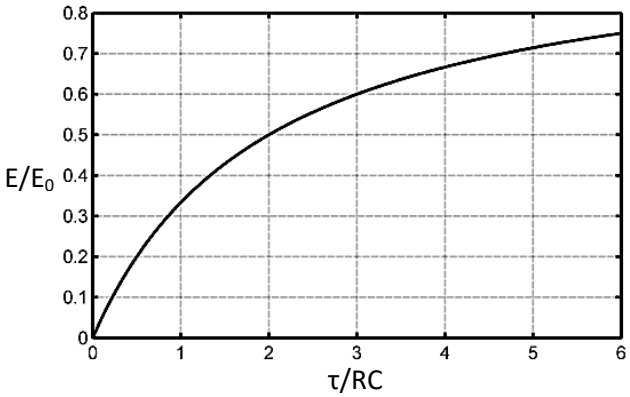


Figure 32 : Énergie maximale qui peut être transférée au condensateur sur une durée τ

linéaire par morceaux tel que : $u_i = u(t_i)$. On peut donc faire l'approximation :

$$(5)\ A \approx \sum_i (t_{i+1} - t_i) \cdot \left(\frac{u_{i+1} - u_i}{t_{i+1} - t_i}\right)^2$$

Pour des divisions de temps équidistantes on a :

$$(6)\ A = \frac{n}{\tau^2} \cdot \sum_i \left(u_i^2 + u_{i+1}^2 - 2u_i u_{i+1}\right)$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Vues les conditions initiales on a : $u_0 = 0$ alors que les autre valeurs pouvant varier librement. Si A est minimal alors il atteint un extremum pour un signal optimal u(t), ce qui implique:

$$(7)\ \frac{\partial A}{\partial u_i} = 0$$

On a en même temps :

$$(8)\ \frac{\partial A}{\partial u_i} = 2 \cdot \frac{n}{\tau^2} \cdot (2u_i - u_{i-1} - u_{i+1}) \text{ pour } i < n$$

Ce qui amène à: $u_{i+1} - u_i = Cte$ pour $i < n$ ce qui implique lorsque $n \to \infty$ que $\dot{u}(t) = Cte$ et donc $I = Cte$ (le courant rentrant dans le système). Avec les conditions finales on obtient :

$$(9)\ I = \sqrt{\frac{2CE_0}{2RC\tau+\tau^2}}$$

La quantité maximale d'énergie donc qu'on peut transférer à la capacité (E_c), en injectant en entrée du système une énergie égale à E_0, est égale à :

$$(10)\ E_C = \frac{\tau}{2RC+\tau} \cdot E_0$$

Ce qui veut dire qu'on pourrait transférer une quantité d'énergie vers le condensateur avec un bon rendement seulement si le transfert est effectué sur une période de temps beaucoup plus grande que la constante de temps du système.

Le résultat obtenu n'est pas évident (Figure 32) mais logique car plus l'intervalle de temps est grand, une même quantité de charges électriques peut être injectée sous un courant plus faible et donc les pertes ohmiques peuvent être minimisées. Cet exemple très simple illustre très bien ce qui se passe dans le cas général où on essaie d'optimiser un transfert d'énergie. On ne peut plus parler d'impédance ou résistance optimale (pour un système électrique, mais bien évidement les mêmes techniques sont utilisées dans d'autres domaines aussi) mais on peut encore définir le courant et la tension en tant que fonctions temporelles et chercher les fonctions qui assurent une quantité d'énergie maximale. Le résultat ne dépend que de l'état interne initial du système (capacité déchargée à l'état initial) et de ses caractéristiques (R, C) et cela reste quelque chose de général. Etant donné un système capable d'échanger de l'énergie avec son milieu **les conditions de transfert optimal peuvent être établies en fonction des paramètres intrinsèques du système**.

Comme on peut le voir le problème d'optimisation du transfert d'énergie dans un système est facile à formuler dans des cas particuliers simples comme par exemple des régimes continus ou harmoniques. Ces théories ont été généralisées pour des cas plus complexes mais toujours pour des systèmes présentant un comportement simple (système linéaires par exemple). Cela amène à la conclusion que dans le cas général le problème du transfert d'énergie n'est pas un problème simple, ni bien compris. On peut trouver par exemple souvent dans la littérature scientifique des termes comme impédance, ou adaptation d'impédance, impédance optimale etc. appliqués à des régimes non-harmoniques ce qui n'est pas du tout précis. Cela montre la tendance générale d'essayer de simplifier certaines problèmes. Mais si on veut être rigoureux on comprend qu'il faut toujours commencer par se placer dans un cas général. Le problème du transfert d'énergie est un problème d'optimisation et donc il doit être bien formulé. Pourtant, il est évident qu'il peut y avoir plusieurs façons de le faire. Le moyen le plus simple serait d'essayer d'optimiser l'énergie transférée entre deux systèmes et deux instants de temps (t_1, t_2) (11).

$$(11)\ E_{t_1 \to t_2} = \int_{t_1}^{t_2} p(t) \cdot dt, \text{ avec p(t) la puissance instantanée transférée}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans certains cas on pourrait aussi ajouter des contraintes supplémentaires. Par exemple, pour des systèmes électriques souvent on a intérêt à limiter le courant ou la tension en entrée/sortie. Dans ce cas l'optimisation de l'objectif en présence des contraintes peut être très compliquée. Pire encore, il peut arriver qu'aucune solution ne puisse satisfaire à toutes les contraintes imposées.

2.2.2 Méthodes fréquentielles

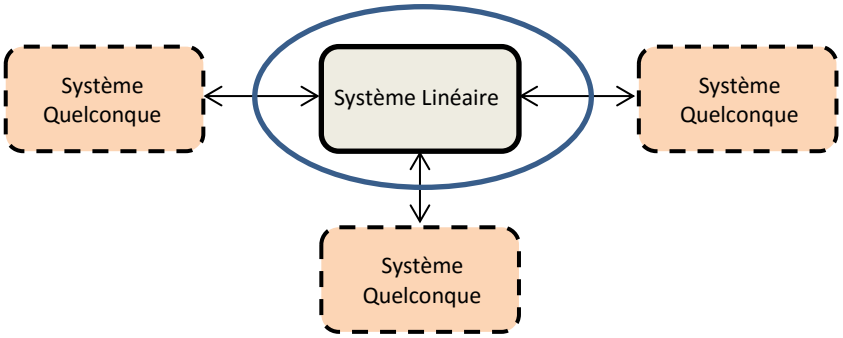


Figure 33 : Système linéaire échangeant de l'énergie avec l'extérieur

Les méthodes fréquentielles sont bien adaptées aux systèmes linéaires présentant un fonctionnement périodique dans le temps et l'objectif à optimiser c'est une grandeur moyenne par rapport à une période de temps. Mais dans certains cas elles peuvent être appliquées même dans le cas où le système n'est que partiellement linéaire. C'est le cas lorsqu'on a un système linéaire qui peut échanger de l'énergie avec des systèmes quelconques (Figure 33). Dans certaines situations le problème d'optimisation global peut se réduire à un problème d'optimisation par rapport à chaque harmonique. C'est le cas lorsqu'on a un système linéaire caractérisé par des équations linéaires faisant intervenir que des facteurs constants.

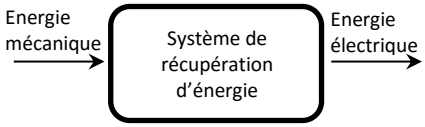


Figure 34 : Schéma simplifié d'un système de récupération d'énergie

En effet, on pourrait prendre comme exemple un système de récupération d'énergie mécanique. Celui-ci pourrait être considéré comme un système de transfert recevant de l'énergie mécanique et fournissant en sortie de l'énergie électrique (Figure 34). On pourrait avoir une injection d'énergie mécanique périodique le problème étant de déterminer la quantité maximale qui peut être extraite en sortie (dans un régime de fonctionnement périodique). Si le système est linéaire (et si les équations différentielles caractéristiques présentent que des facteurs constants) l'optimisation de la puissance en sortie peut être faite en utilisant une décomposition en séries de Fourier et en appliquant le principe de superposition. Pour chaque harmonique (k) la linéarité du système implique l'existence d'une matrice de transfert tel que[3] :

(12) $\begin{pmatrix} V_k \\ v_k \end{pmatrix} = H_k \cdot \begin{pmatrix} F_k \\ I_k \end{pmatrix}$, avec V_k, I_k, F_k, v_k : harmoniques de la tension, courant, force et la vitesse

Imaginons par exemple que la force en entrée est imposée. D'après (12) on a :

$$V_k = H_{11}^k I_k + H_{12}^k F_k$$

[3] On imagine ici un système vraiment simple avec un flux d'énergie mécanique et un flux d'énergie électrique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans ce cas la puissance en sortie pour un harmonique k est donnée par :

$$(13)\ P_k = \mathrm{Re}(V_k \bar{I}_k) = \mathrm{Re}\left(H_{11}^k\right) \cdot |I_k|^2 + \left[\mathrm{Re}\left(H_{12}^k\right) \cdot \mathrm{Re}(I_k) + \mathrm{Im}\left(H_{12}^k\right) \cdot \mathrm{Im}(I_k)\right] \cdot F_k$$

Pour que la puissance soit extrémale il est nécessaire que :

$$(14)\ \frac{\partial P_k}{\partial \mathrm{Re}(I_k)} = 0 \text{ et } \frac{\partial P_k}{\partial \mathrm{Im}(I_k)} = 0 \Rightarrow I_k = -\frac{H_{12}^k}{2\mathrm{Re}\left(H_{11}^k\right)} F_k$$

Ce qui amène à :

$$(15)\ P_k = \frac{\left|H_{12}^k\right|^2}{4\mathrm{Re}\left(H_{11}^k\right)} (F_k)^2$$

La puissance totale optimale étant donnée par la somme de la puissance optimale de chaque harmonique :

$$(16)\ P_{opt} = \sum_k P_k$$

On pourrait procéder de la même façon pour un système présentant plusieurs entrées-sorties et pour des conditions différentes (par exemple en supposant connue la puissance mécanique et pas la force comme dans l'exemple précédent). La seule contrainte obligatoire c'est la linéarité du système pour pouvoir appliquer le principe de la superposition et être capable de rendre le problème d'optimisation global équivalent à un ensemble de problèmes d'optimisations plus simples (pour une certaine fréquence). Une autre façon de voir cette technique d'optimisation c'est d'utiliser le théorème de Thévenin pour chaque composante fréquentielle. Ainsi le système peut être vu en sortie (quel que soit la charge connectée) comme une source de tension sinusoïdale connectée en série avec une impédance complexe. Comme on le sait la puissance maximale en sortie est obtenue pour une impédance conjuguée de l'impédance interne. On peut ensuite utiliser (16) pour trouver le fonctionnement optimal du système dans le cas général.

Il y a quelques propriétés intéressantes de tels systèmes qu'on pourrait mettre en évidence. Tout d'abord on pourrait remarquer que la puissance maximale en sortie ne dépend pas du déphasage entre différents harmoniques. On peut aussi remarquer que pour un système linéaire donné il existe toujours un autre système linéaire qui est capable d'extraire une puissance maximale (adaptation d'impédance).

On peut en fait montrer dans le cas général que pour un tel système on peut mettre la puissance moyenne fournie en sortie pour un harmonique k sous la forme :

(17) $P_k = A_k(X^2 + Y^2) + B_k X + C_k Y + D_k$, avec $A, B, C, D \in \mathbb{R}$ et X,Y n'importe quelles expressions obtenues après une combinaison linéaire des composantes réelles et imaginaires des grandeurs F_k, v_k.

On peut voir toute de suite que cette expression admet un maximum si $A_k < 0$ (polynôme de deuxième ordre avec deux variables) et que la valeur maximale est donnée par :

(18) $P_k^{max} = D_k - \frac{B_k^2 + C_k^2}{4}$, ne dépendant pas de V_k, I_k.

Dans le cas général la puissance P_k d'après (12) peut être mise sous la forme d'un polynôme d'ordre deux ayant comme variables indépendantes les composantes réelles et imaginaires des grandeurs F_k, v_k. Si on impose des conditions sur deux paramètres parmi les quatre alors en effet on arrive à une expression de la forme (17) qui ne dépend pas des grandeurs électriques et seulement des grandeurs en entrée et les paramètres intrinsèques du système. Cela montre qu'en principe on peut

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

avoir des systèmes qui pour des conditions données ne peuvent fournir (transférer) qu'une quantité limité d'énergie quel que soit le circuit électrique connecté en sortie.

2.2.3 Méthodes temporelles

À part les méthodes fréquentielles d'autres techniques d'optimisation souvent plus simples et élégantes existent. Une de ces techniques c'est le calcul variationnel. Cette méthode a commencé à être développée au XVII siècle, étant appliquée pour la première fois pour résoudre le célèbre problème de la courbe brachistochrone [143] posé par Jean Bernoulli (l'objectif étant de trouver une trajectoire à temps minimal d'un objet se déplaçant sous l'action de son poids). La technique a été ensuite développée par des mathématiciens de premier rang comme Leonard Euler, Joseph Lagrange et plus récemment par Lev Pontriaguine (application en automatique, aux commandes optimales) et Richard Bellman (application en économie).



Figure 35 : Algorithme général de la méthode du calcul variationnel

La méthode du calcul variationnel est basée sur la propriété (condition d'Euler) d'une fonctionnelle de présenter une différentielle nulle au voisinage d'un extremum [144]. Il s'agit d'une propriété évidente pour des fonctions simple mais contrairement à celles-ci, une fonctionnelle reçoit des fonctions comme arguments et souvent leurs dérivés, ce qui rend le problème un peu plus compliqué. La technique (Figure 35) consiste à définir tout d'abord l'objectif à optimiser qui est fonction de différents paramètres et signaux du problème. Si ceux-ci subissent des perturbations infinitésimales autour de leur valeurs optimales, l'objectif ne peut que diminuer (ou augmenter). Si certaines conditions de continuité et dérivabilité sont satisfaites alors on peut en déduire que la différentielle de l'objectif par rapport à ses paramètres doit s'annuler au point optimal (condition d'Euler).

Par exemple pour des problèmes d'optimisation dont la fonctionnelle à optimiser est de la forme $s = \int_{t_1}^{t_2} \mathrm{F}(\mathrm{x}(\mathrm{t}), \dot{\mathrm{x}}(\mathrm{t}), \mathrm{t})$ l'équation d'Euler devient :

$$(19)\ \frac{\partial \mathrm{F}}{\partial \mathrm{x}} = \left(\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial \dot{\mathrm{x}}}\right)'$$

Par exemple si on cherche une fonction x(t) qui maximise l'expression $\int_0^1 \{1 - (\dot{x})^2 + x\}$ alors la condition d'optimalité implique :

$$(20)\ 2\ddot{x} = -1 \ \Rightarrow x = -\frac{t^2}{4} + \mathrm{c}_1\mathrm{t} + \mathrm{c}_2$$

On obtient ainsi une famille des fonctions candidates, pour choisir une seule il est nécessaire d'utiliser des conditions supplémentaires comme par exemple le fait que la fonction doit s'annuler aux limites de l'intervalle sur lequel l'intégrale est définie. Dans ce cas on obtient $\mathrm{c}_2 = 0$ et $\mathrm{c}_1 = 1/4$ et $\mathrm{s}_{\max} = 1/24$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans le cas général l'équation (19) n'est pas suffisante car celle-ci n'est valable que pour le cas particulier pour lequel elle a été obtenue. Mais pour trouver des équations similaires à celle-ci il faut dans le cas général retourner vers la méthode générale qui consiste à introduire des perturbations dépendantes des paramètres réels et obtenir des équations différentielles à partir des dérivées par rapport à ceux-ci.

On peut reprendre l'exemple du système constitué d'un condensateur connecté en série avec une résistance. On pourrait reformuler le problème tel que pour une certaine quantité d'énergie fournie au condensateur à l'instant τ on cherche à minimiser l'énergie totale injectée dans le système.

La fonctionnelle à minimiser c'est l'énergie injectée dans le système qui dépend de la tension aux bornes du condensateur $u(t)$:

$$(21)\ E(u) = \int_0^\tau (RC^2\dot{u}^2 + C\dot{u}u)$$

Supposons que $u^*(t)$ c'est le signal qui maximise l'énergie E. On considère des fonctions proche de $u^*(t)$ de la forme:

$$(22)\ u(t) = u^*(t) + a \cdot \varepsilon(t)$$ dans ce cas l'optimalité implique $\frac{\partial E}{\partial a}(a = 0) = 0$

En même temps d'après (21) : $E(a) = \int_0^\tau \left(C^2R \cdot 2 \cdot a \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \dot{u}^* + C^2R \cdot (\dot{u}^*)^2 + C^2R \cdot a^2 \cdot (\dot{\varepsilon})^2 + C \cdot (u^* + a \cdot \varepsilon)(\dot{u}^* + a \cdot \dot{\varepsilon})\right)$ et donc d'après (22) on obtient :

$$(23)\ \int_0^\tau (\varepsilon \cdot \ddot{u}^*) = 0,\ \forall \varepsilon \Rightarrow \ddot{u}^* = 0 \Rightarrow u^*(t) = K \cdot t,$$ avec K = constante.

On trouve que le courant rentrant dans le système doit être constant dans le temps. Ce qui coïncide avec la réponse trouvée avec la méthode numérique.

La méthode du calcul variationnel est un outil très puissant permettant dans certains cas de résoudre même des problèmes d'optimisation qui contiennent différentes contraintes (équations algébriques, inégalités etc.) [143,144].

2.3 Application aux systèmes de récupération d'énergie

2.3.1 Systèmes piézoélectriques

Prenons l'exemple d'une structure piézoélectrique (une poutre) bloquée à une extrémité et actionnée par une certaine force à l'autre. Pour une telle structure les équations les plus simples qui pourraient être utilisés (modèle à constantes localisées, Figure 36) sont :

$$(24)\begin{cases} I = \alpha\dot{u} - C_0\dot{V} \\ F = M\ddot{u} + C\dot{u} + K_e u + \alpha V \end{cases}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

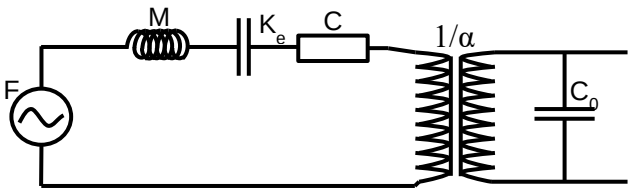


Figure 36 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre bloquée-libre actionnée par une force

Ce système en lui–même est linéaire mais la charge électrique connectée en sortie pourrait présenter un comportement non-linéaire. Si on imagine un comportement périodique on pourrait effectuer une décomposition en séries de Fourier. Si la force appliquée est sinusoïdale alors la source de tension équivalente fournit de l'énergie que sur la composante fondamentale, les autres ne génèrent que des pertes dans la résistance (C). On est bien dans le cas analysé précédemment (équations linéaires à coefficients constants). Le transformateur idéal tout comme le condensateur en sortie ne consomme aucune puissance. Par conséquent, optimiser la puissance en sortie revient à optimiser la puissance en entrée du transformateur. Cela constitue un problème classique d'adaptation d'impédance, l'entrée du transformateur doit donc se comporter comme une impédance de la forme :

$$(25)\ Z_{trans} = C - jM\omega - \frac{1}{jK_e\omega}$$

Pour un tel comportement la 'force' en entrée du transformateur est égale à la moitié de la force imposée en entrée. La tension et le courant optimaux en sortie devraient alors être égaux à :

$$(26)\ V = \frac{F}{2\alpha} \text{ ❖ } I = \left(\frac{\alpha F}{2C} - \frac{j\omega F C_0}{2\alpha}\right)$$

Par conséquent la puissance maximale qui peut être extraite est donnée par :

$$(27)\ P_{max} = \frac{F^2}{4C}$$

Lorsqu'une poutre est excitée au niveau de sa base avec des vibrations (structure sismique) les équations deviennent :

$$(28)\begin{cases} I = \alpha(\dot{u} - \dot{u}_0) - C_0\dot{V} \\ 0 = M\ddot{u} + C(\dot{u} - \dot{u}_0) + K_e(u - u_0) + \alpha V \end{cases}$$, avec u_0 le déplacement de la base

Le modèle à constantes localisées n'est pas très différent de celui précédent (Figure 36). Le fonctionnement optimal est donc caractérisé par :

$$(29)\ P_{max} = \frac{\left(\omega^2 M u_0\right)^2}{4C} = \frac{M^2 a_0^2}{4C}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

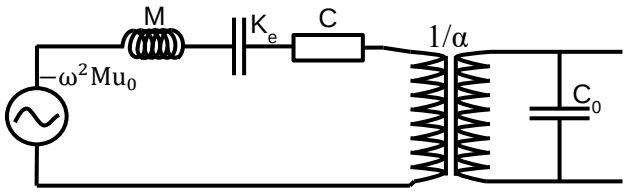


Figure 37 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre sismique

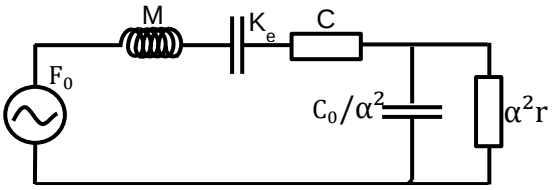


Figure 38 : Modèle à constantes localisées simplifié d'une poutre piézoélectrique

Dans un régime optimal l'amplitude du déplacement en bout de la poutre pourrait être plus grande que lorsque l'élément piézoélectrique est maintenu en circuit ouvert. Cela montre la différence fondamentale entre une application destinée à la récupération d'énergie et le contrôle de vibrations, en effet il existe des situations pour lesquelles l'extraction optimale d'énergie électrique d'une structure ne se traduit pas par une annulation des vibrations.

Pour optimiser la puissance récupérée avec un système piézoélectrique, différentes techniques ont été proposées. Comme on l'a déjà vu on est dans un régime optimal lorsque la fréquence d'excitation du système est égale à sa fréquence de résonnance. Imaginons qu'on connecte en sortie du système une simple résistance (r), les schémas précédents peuvent être simplifiés sous la forme suivante (Figure 38). Dans ce cas la fréquence de résonnance du système est dépendante de r. En effet, l'impédance équivalente vue par la source de tension en entrée a la forme suivante :

$$(30)\ Z = jM\omega + \frac{1}{jK_e\omega} + C + \alpha^2 r \cdot \frac{(1-jC_0 r\omega)}{1+(C_0 r\omega)^2}$$

On a résonnance quand la partie imaginaire de cette expression s'annule. La fréquence de résonnance peut être déterminée, elle est donnée par l'expression suivante :

$$(31)\ \omega_r = \frac{\sqrt{2}}{2}\frac{\sqrt{K_e M\left(C_0 K_e \alpha^2 r^2 + C_0^2 r^2 - K_e M + \sqrt{\left(C_0 K_e \alpha^2 r^2 + 2C_0^2 r^2 + K_e M\right)^2 - 4C_0 K_e^2 M \alpha^2 r^2}\right)}}{C_0 K_e M r}$$

Pour avoir un transfert maximal de puissance il faut que la fréquence de résonnance soit égale à celle d'excitation. De plus il faut que :

$$(32)\ \mathrm{Re}(Z) = C + \frac{\alpha^2 r}{1+(C_0 r\omega)^2} = 2C$$

On a donc deux équations mais une seule variable : la résistance connectée en sortie. Il semble peu probable dans le cas général qu'il existe une valeur de cette résistance vérifiant les deux équations à la fois, sauf pour certains paramètres particuliers.

Pour trouver les configurations pour lesquelles une simple résistance peut extraire la puissance maximale on peut procéder de la manière suivante. On considère la fréquence d'excitation ainsi que les paramètres mécaniques, imposés et on cherche C_0 et r pour lesquels on a un fonctionnement optimal. On obtient :

$$(33)\ r = C\alpha^2\left[\left(\frac{M\omega - \frac{1}{K_e\omega}}{C}\right)^2 + 1\right] \Leftrightarrow C_0 = \frac{M\omega - \frac{1}{K_e\omega}}{\omega C^2\alpha^2\left[\left(\frac{M\omega - \frac{1}{K_e\omega}}{C}\right)^2 + 1\right]}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour une récupération optimale il faut donc un système qui se comporte comme une impédance adaptée et qui dépend de la fréquence d'excitation mais pas de l'amplitude de l'excitation mécanique (grâce à la linéarité du système). Lorsque l'excitation mécanique présente des harmoniques la charge doit se comporter comme une impédance adaptée sur chaque fréquence. Le problème c'est que l'excitation mécanique peut varier dans le temps et donc la charge doit être capable de s'adapter aussi. Pour cela il faut concevoir un système de transfert d'énergie spécial.

Une technique possible (réputée par sa simplicité) est la commande non-linéaire (SSHI etc.). Il est intéressant de rappeler le principe de fonctionnement et de trouver une interprétation simple. Celle-ci consiste à inverser la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique lorsque celle-ci atteint un extremum. Cela crée l'effet d'une inductance connectée en sortie qui associée avec une résistance peut améliorer la quantité d'énergie extraite. Pour l'inversion de la tension les deux méthodes les plus utilisées sont un circuit composé d'une bobine et un interrupteur connectés en séries les deux connectés en parallèle à la sortie de l'élément piézoélectrique (SSHI parallèle) ou en série (SSHI série).

Lorsque le fonctionnement d'un système piézoélectrique peut être considéré quasi-statique (comme par exemple des éléments actionnés en compression) alors on peut supposer M = 0 et C = 0. Dans un tel cas le système équivalent peut être encore simplifié sous la forme d'une source de courant connectée en parallèle avec un condensateur.

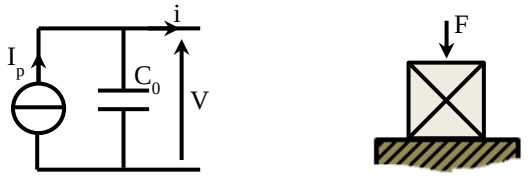


Figure 39 : Schéma équivalent d'un système piézoélectrique en régime quasi-statique

Avec cette simplification on peut montrer pour une charge passive (qui ne peut pas retourner l'énergie comme par exemple une résistance) qu'on a intérêt à maintenir la plupart du temps l'élément piézoélectrique en circuit ouvert et extraire l'énergie toute d'un seul coup lorsque la charge accumulée sur l'élément piézoélectrique atteint un extremum. En effet, la quantité maximale qui peut être transférée vers la charge est constante et fournie par la source de courant équivalente, on a alors intérêt que cette charge soit extraite sous une tension aussi élevée que possible et une manière de réaliser ceci c'est de laisser les charges s'accumuler pour les extraire ensuite. Il faut toutefois faire le transfert lorsque le courant de la source change de sens car sinon la quantité de charges commence à diminuer. On ne peut pas changer le signe du courant par contre il est possible d'inverser la charge sur un condensateur avec un circuit oscillant. En effet lorsque le courant devient négatif on peut inverser la charge en connectant le piézo à une bobine et en le déconnectant après une demi-période du système oscillant formé. Ceci peut se faire plusieurs fois de suite et s'il n'y a pas de contrainte sur la tension maximale ou les pertes alors on pourrait faire cela sur chaque extremum de la force et ne transférer l'énergie vers la charge qu'à la fin. C'est cette idée qui est exploitée dans les techniques de types SSHI.

Bien évidement on pourrait obtenir le même effet en injectant des charges de l'extérieur et dans des quantités contrôlées mais pour cela un système de transfert est nécessaire (comme par exemple des convertisseurs dc-dc [145,146]).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Lorsque les pertes de l'inversion sont prises en compte la décision d'inverser la charge, de l'extraire ou de ne rien faire n'est pas immédiate.

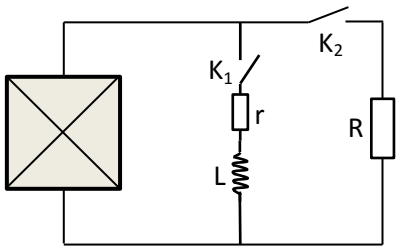


Figure 40 : Élément piézoélectrique avec commande SSHI parallèle et extraction synchronisée de l'énergie

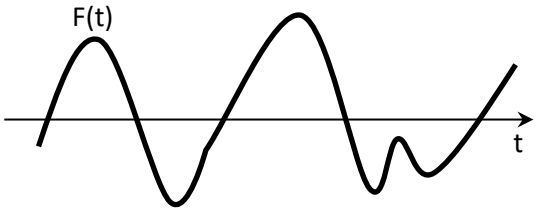


Figure 41 : Variation temporelle possible de la force appliquée sur l'élément piézoélectrique

Pour illustrer ce cas on peut prendre comme exemple le système suivant (Figure 40). On a un élément piézoélectrique actionné en compression. Ce qu'on veut c'est optimiser l'énergie fournie à la charge (R) sur l'intervalle de temps (t_1, t_2). La résistance R est supposée assez faible pour considérer que la constante de temps caractéristique de la capacité de l'élément piézoélectrique et la résistance R est beaucoup plus faible que la vitesse de variation de la force appliquée. Dans une telle configuration on peut négliger les pertes dues à l'élément piézoélectrique et comme on le sait pour l'optimisation de l'énergie celle-ci doit être extraite/ou gardée avec inversion de charges que sur les points correspondant à des extremums de la polarisation diélectrique (ce qui correspond aussi pour cette configuration à des extremums de la force). On imagine donc un système d'inversion de charge (inductance + interrupteur K_1) mais qui présente des pertes tel que l'inversion n'est pas parfaite (la charge après inversion est égale à α fois la charge initiale, avec α le coefficient d'inversion). De la même manière l'énergie est transférée à la charge par l'intermédiaire d'un interrupteur K_2. On sait donc que le fonctionnement optimal du système doit se faire de la manière suivante : en mode normal les deux interrupteurs doivent être maintenus ouverts mais à chaque extremum une décision doit être faite : soit les deux sont laissés ouverts, soit un des deux est fermé (il n'y a aucun intérêt à fermer les deux en même temps mais il serait possible d'imaginer que seulement une fraction de l'énergie emmagasinée dans l'élément piézoélectrique est extraite, mais dans ce cas un circuit différent devrait être utilisé). Le problème étant un discret, la théorie des graphs pourrait être utilisée. Tout d'abord il est utile de faire la remarque suivante. Si on ne fait pas d'inversion de charge alors on a intérêt de transférer toute l'énergie électrique stockée dans l'élément piézoélectrique vers R à chaque extremum de la force appliquée. Dans ce cas l'énergie récupérée est égale à :

$$(34)\ \mathrm{E} = \sum_{\mathrm{i}} \left(\frac{\mathrm{q_i^2}}{2\mathrm{C}}\right)$$

S'il n'y a pas de pertes d'inversion (r = 0) alors on a intérêt à inverser la charge électrique sur chaque maximum/minimum et transférer l'énergie vers la charge à la fin de l'intervalle de temps. Dans ce cas l'énergie totale est donnée par :

$$(35)\ \mathrm{E} = \frac{\left(\sum_i \mathrm{q_i}\right)^2}{2\mathrm{C}}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Il s'agit bien évidement de la quantité vraiment maximale d'énergie qui puisse être récupérée dans un cas idéal. Lorsque des pertes d'inversion existent on voudrait d'une part inverser les charges pour augmenter l'énergie récupérée pour une certaine variation de force mais en même temps en le faisant plusieurs fois on risque d'avoir plus de pertes que de gain. Il faut trouver donc un compromis entre les deux.

Pour simplifier le problème on pourrait supposer par exemple que la force varie de manière périodique. Ce qui se traduit par une même quantité de charge électrique qui est transférée ($q_i = -q_{i+1}$) sur chaque variation de la force. Dans ce cas on se ramène alors à un problème mathématique assez simple. Étant donné un nombre réel situé entre 0 et 1 il faut trouver l'expression qui contient un certain nombre de termes qui maximise une expression de la forme :

$$(36)\ \mathcal{E} = \frac{(1+\alpha+\cdots+\alpha^n)^2}{n+1}$$

Pour chaque valeur du coefficient d'inversion on pourrait trouver le nombre de fois successives que les charges devraient être inversées sans extraction. On peut montrer en fait que l'expression (36) admet un maximum pour :

$$(37)\ n \approx -\frac{1.256}{\ln(\alpha)}$$, qui est un nombre réel dans le cas général

Mais on peut calculer de manière numérique le nombre d'inversions optimal (entier) pour un coefficient d'inversion donné (Figure 42).

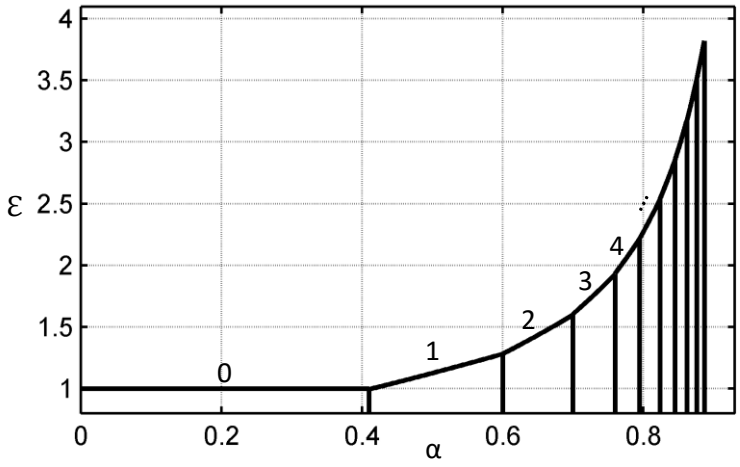


Figure 42 : Valeur maximale de $\mathcal{E}$ en fonction du coefficient d'inversion et le nombre d'inversions le mieux adapté

Comme on peut le voir il faut que le coefficient d'inversion soit très proche de 1 si on veut obtenir une quantité d'énergie assez importante ($\mathcal{E} \sim$ Énergie extraite). Même pour un coefficient de 90%, 10 inversions consécutives amènent à une amplification de seulement environ 4.3 par rapport à une extraction sur chaque extremum de la force. Cela semble ne pas être très impressionnant. On pourrait par exemple injecter des charges externes, si cela est fait aussi avec un rendement de 90% (par rapport à la quantité de la charge électrique), alors pour une quantité de charge externe trois fois plus grande que celle due à la polarisation on peut récupérer une énergie nette 4.7 fois l'énergie récupérée par commutation sur chaque extremum, ce qui n'est pas énorme non plus. Cela montre qu'en pratique même si une amélioration de l'énergie est possible en utilisant l'inversion des charges électriques ou une injection d'énergie de l'extérieur celle-ci n'est pas beaucoup plus élevée que celle extraite juste par décharge sur chaque extrémum. En effet, soit le coefficient doit être vraiment

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

proche de 1 (inversion parfaite) soit la quantité d'énergie externe injectée doit être grande par rapport à l'énergie que l'élément piézoélectrique peut fournir.

En pratique, la force peut souvent ne pas être périodique (Figure 41) mais même dans ce cas pour un intervalle de temps donné on peut essayer de trouver une technique qui maximise l'énergie extraite. Bien évidement en absence des partes par décharges le fait que les points extrémaux sont situés dans le temps à des intervalles différentes ne doit avoir aucune importance, ce qui est plus important ce sont les amplitudes. En effet, pour une telle configuration on récupère de l'énergie sur des variations de la force.

Même si peut être on pourrait trouver un algorithme plus simple on pourrait en pratique pour une variation de force donnée essayer toutes les combinaisons possibles dans un programme et trouver celle qui donne une énergie maximale.

On peut se rendre compte d'une manière intuitive que lorsque la quantité de charge accumulée sur l'élément piézoélectrique est assez importante en comparaison avec celle fournie par une variation de la force alors il n'y a aucun intérêt de faire une inversion. Dans un tel cas soit les charges électriques pourraient être complètement extraites, soit on pourrait ne rien faire.

Pour se convaincre on pourrait imaginer la situation pour laquelle la force appliquée subit trois transitions (transfert des quantités de charges électriques : q_1, q_2, q_3 comme indiqué dans la Figure 47).

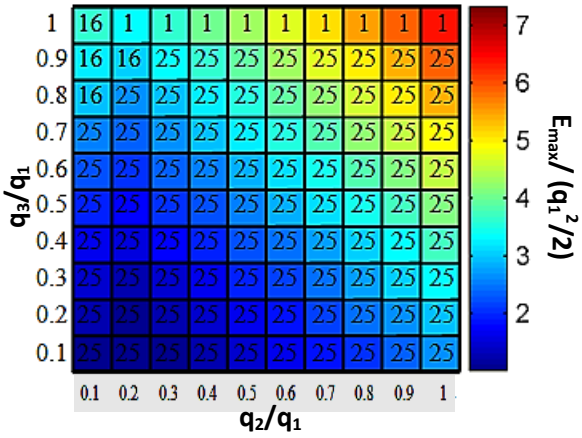


Figure 44 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.875)

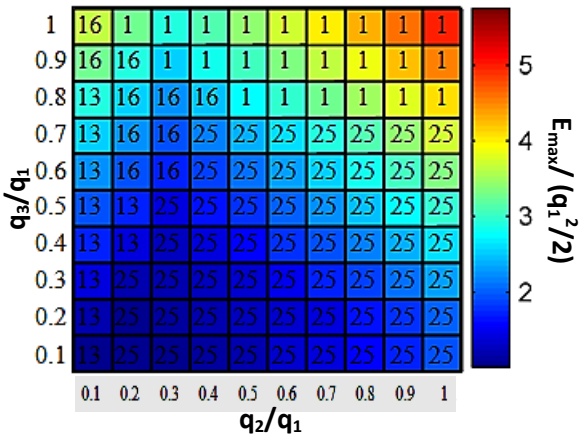


Figure 43 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.75)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

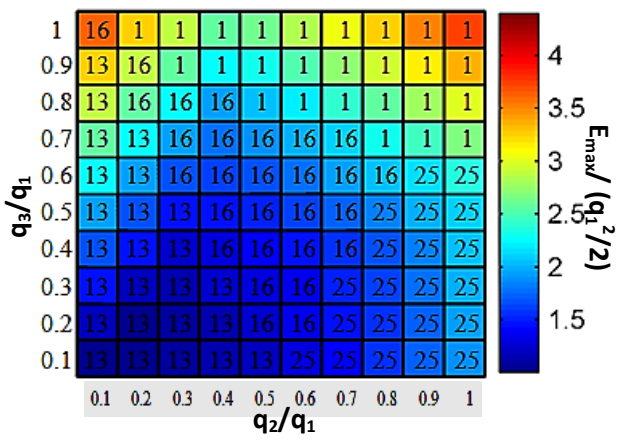


Figure 45 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.625)

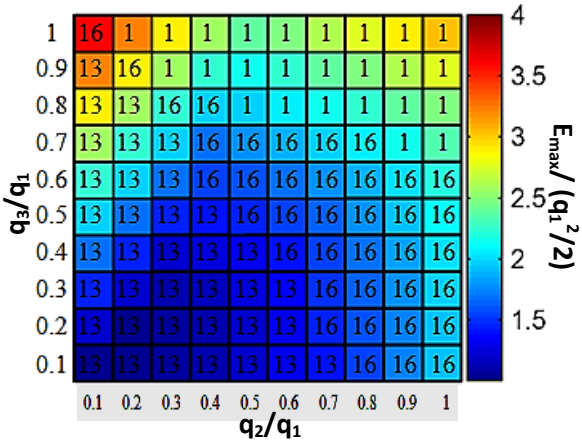
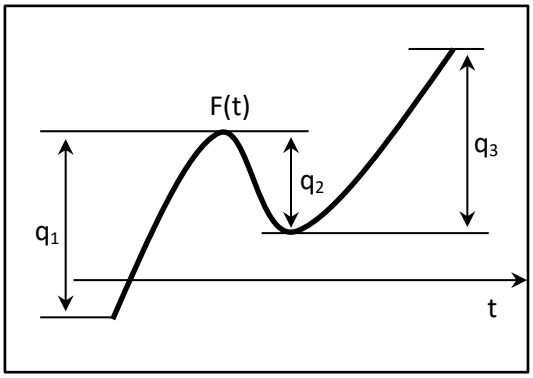


Figure 46 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.5)



$$N = (\overline{a_1 a_2 .. a_n})_3$$

- $a_i = 0$: ne rien faire
- $a_i = 1$: extraire l'énergie
- $a_i = 2$: inverser les charges

Figure 47 : Evolution de la force présentant trois intervalles de variations; Notation par un nombre en base 3 de la séquence de la commande du transfert d'énergie en sortie

La séquence de décisions peut être représentée par un nombre exprimé dans la base 3 (qui est simple à utiliser dans un programme). Dans les Figure 44-Figure 46 on donne l'énergie maximale et la séquence optimale (nombre décimal dans les cellules correspondant à la séquence exprimée dans une base 3) pour différentes quantités de charges électriques injectées sur chaque transition et différents coefficients d'inversion. Comme on peut le voir lorsque on a une faible variation de la force on a intérêt à l'ignorer alors que si le coefficient d'inversion est élevé on devrait inverser les charges (ce qui est toute à fait logique).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

2.3.2 Systèmes électrostatiques

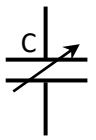


Figure 48 : Capacité variable

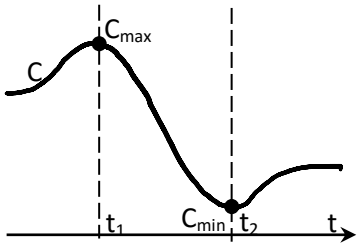


Figure 49 : Variation de la capacité d'un système électrostatique

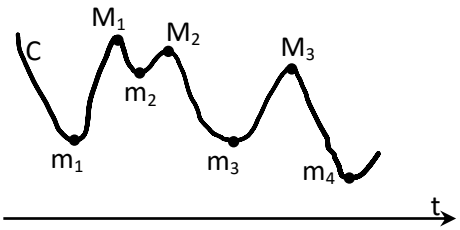


Figure 50 : Variation complexe de la capacité d'un système électrostatique

Ceux-ci représentent des systèmes capacitifs variables qui doivent être obligatoirement chargés par l'intermédiaire d'une source d'énergie externe. Même pour un système simple comme celui constitué d'un condensateur connecté en série avec une résistance comme on l'a vu (Figure 31) il existait une technique pour maximiser le rendement. La même chose peut être faite pour des systèmes de récupération d'énergie électrostatiques.

Normalement si on peut négliger les pertes dans le système, le champ de claquage, l'instabilité électro-mécanique etc. alors comme dans le cas d'un système piézoélectrique optimiser l'énergie récupérée revient à synchroniser l'injection et l'extraction de l'énergie et on a aussi intérêt souvent à réinjecter une partie de l'énergie récupérée. En effet, dans un tel cas il faut injecter toute l'énergie lorsque la capacité (équivalente) est maximale et l'extraire lorsqu'elle est minimale et la quantité d'énergie récupérée est proportionnelle à l'énergie injectée initialement. Pourtant dans le cas général le problème se complique. Tout d'abord le système présente toujours des pertes : la résistance électrique des connexions et les courants de décharge dans la capacité. Cela veut dire que le courant devrait être limité et que c'est possible que l'injection/extraction de l'énergie soit faite avant ou après les instants des extrémums de la capacité. La quantité d'énergie qui peut être injectée est aussi limitée par le champ de claquage du matériau qui lui dépend de l'état du système (par exemple la déformation pour un film diélectrique).

Pour un système sans pertes, si on cherche à optimiser l'énergie récupérée sur un tel intervalle de temps pour une quantité d'énergie injectée donnée, on observe que pour cela il faut injecter toute l'énergie électrique disponible dans le système électrostatique lorsque la capacité est maximale (C_{max}) d'un seul coup et extraire toute l'énergie disponible lorsque la capacité est minimale (C_{min}). En effet, pour une énergie donnée une quantité de charges électriques plus grande peut être introduite dans un condensateur lorsque sa capacité est grande. On peut montrer que lorsque la capacité est initialement déchargée et complétement déchargée lorsque l'énergie est extraite alors le gain net d'énergie est donné par :

(38) $\mathrm{G} = \mathrm{E_{int}} \cdot \left(\frac{\mathrm{C_{max}}}{\mathrm{C_{min}}} - 1\right)$, avec $\mathrm{G} = \mathrm{E_{ext}} - \mathrm{E_{int}}$ le gain en énergie où E_{ext},E_{int} : énergies extraite et injectée

On pourrait se demander si ce gain pourrait être amélioré si le condensateur serait initialement pré-chargé c'est à dire s'il y aurait une charge électrique résiduelle. Mais on peut montrer qu'une telle situation ne change pas l'équation (38), une charge résiduelle ne modifie pas le gain d'énergie.

On pourrait imaginer une variation de la capacité du système, encore plus complexe comme dans la Figure 50. On commence par une quantité donnée d'énergie qui peut être injectée. D'après le raisonnement précédent on doit injecter ou extraire l'énergie seulement sur les minimas ou maximas de la capacité. Même si ce n'est pas évident il faut injecter/extraire de l'énergie à chaque fois qu'un extremum est rencontré. Pour montrer cela il suffit d'imaginer qu'on injecte de l'énergie au moment

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

où la capacité atteint un maximum M_i mais on l'extrait sur le minimum m_{i+k}. Dans ce cas le gain en énergie (sous forme de rapport) est donné par :

$$(39)\ \frac{E_{ext}}{E_{inj}} = \frac{C_{M_i}}{C_{m_{i+k}}},\ E_{ext}\text{ : énergie extraite, }E_{inj}\text{ : énergie injectée}$$

Par contre si on passe par chaque extremum le gain est donné par :

$$(40)\ \frac{E_{ext}}{E_{int}} = \frac{C_{M_i}}{C_{m_i}}\frac{C_{M_{i+1}}}{C_{m_{i+1}}}\cdot\cdot\frac{C_{M_{i+k}}}{C_{m_{i+k}}} > \frac{C_{M_i}}{C_{m_{i+k}}}$$

On voit en fait que pour un système électrostatique idéal on a toujours intérêt à accumuler l'énergie et la réinjecter chaque fois que la capacité attient un maximum. Dans la réalité il peut y avoir certaines pertes dans quel cas la technique précédente risque de ne plus fonctionner. De plus, habituellement le système récupérateur doit alimenter en permanence une charge électrique. Dans un tel cas on pourrait utiliser une méthode similaire à celle utilisée pour le système piézoélectrique (20–22).

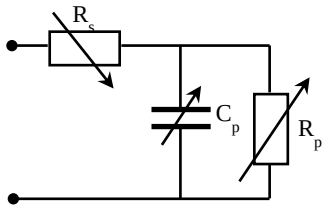


Figure 51 : Circuit électrique équivalent d'un polymère diélectrique

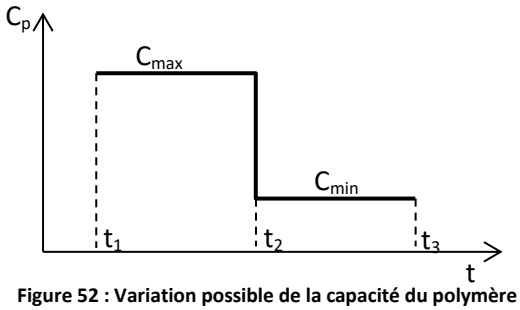


Figure 52 : Variation possible de la capacité du polymère

Surtout dans le cas des polymères diélectriques, souvent il devient nécessaire de prendre en compte le comportement imparfait des électrodes et les fuites à travers le matériau. On considère comme dans le cas précédent que la variation de la capacité est imposée. Supposons par exemple que le système est imparfait et que le condensateur modélisant un système idéal présente une résistance connectée en parallèle (R_p) et une autre (R_s) connectée en série (Figure 51).

Plaçons-nous dans un cas simplifié. On suppose que la variation de la capacité est très rapide (Figure 52) et qu'à l'instant t_1 la capacité C_p est déjà chargée avec une charge électrique Q_0 et donc une énergie potentielle E_1. On cherche à optimiser l'énergie qu'on puisse récupérer sur l'intervalle de temps de t_1 à t_3.

Normalement, les résistances dues aux électrodes imparfaites et au courant de fuite dépendent de l'état de déformation du polymère, on peut considérer donc que sur les deux sous-intervalles (t_1,t_2) et (t_2,t_3) leur valeurs restent constantes (on néglige l'influence du champ électrique sur leur valeurs).

On peut commencer par un raisonnement simple. Tout d'abord on peut remarquer qu'on a intérêt à injecter de l'énergie dans le système avant l'instant t_2 et l'extraire ensuite. En effet, le gain d'énergie et du à la variation de capacité, il n'y aurait aucun raison d'injecter de l'énergie une fois que la capacité a atteint sa valeur minimale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

On peut donc résoudre le problème d'optimisation en deux étapes. Tout d'abord on peut optimiser l'énergie totale injectée dans le système par rapport à l'énergie potentielle transmise au condensateur C_p à l'instant t_2. Ensuite optimiser l'énergie extraite du système par rapport à une énergie finale de C_p donnée. En effectuant un bilan énergétique dans le système entre t_1 et t_2, on obtient :

$$(41)\ E_i = \int_{t_1}^{t_2} \left(R_s \cdot (\dot{q})^2 + \left(\frac{R_s}{R_p} + 1 \right) \frac{q^2}{C^2 R_p} \right) + \frac{2}{R_p} \left(\frac{2R_s}{R_p} + 1 \right) \cdot \Delta E_p$$

ΔE_p c'est la variation de l'énergie potentielle du condensateur. L'expression

(41) montre tout simplement que si on veut transmettre le plus d'énergie possible vers le condensateur il faut minimiser les pertes. Si on requiert que la variation de q soit régulière on peut appliquer la formule d'Euler-Lagrange (calcul variationnel) pour trouver sa forme optimale. On obtient ainsi :

$$(42)\ \ddot{q} = {K_1}^2 \cdot q \text{ avec } {K_1}^2 = \frac{1}{{C_{max}}^2 R_p R_s} \left(\frac{R_s}{R_p} + 1 \right) \text{ et donc } q(t) = Ae^{Kt} + Be^{-Kt}$$

Le même raisonnement peut être appliqué lorsque l'énergie est extraite du système électrostatique. On arrive au même résultat sauf que les résistances et la capacité changent de valeur.

Pour trouver A et B on peut utiliser la charge électrique stockée dans C_p à l'instant t_1, t_2 et t_3. On pourrait pour simplifier considérer que le condensateur est déchargé complétement à l'état initial et final ce qui donne :

$$(43) \begin{cases} q_1(t) = Q \cdot \frac{\sinh(K_1 \cdot (t + t_1))}{\sinh(K_1 t_1)} \\ q_2(t) = Q \cdot \frac{\sinh(K_2 \cdot (t_2 - t))}{\sinh(K_2 t_2)} \end{cases}$$

Cette expression permet de retrouver la variation temporelle optimale de la tension et du courant en entrée du système.

$$(44)\ I_1 = \dot{q} + \frac{q}{CR_p} = Q \cdot \frac{K_1 \cosh(K_1 \cdot (t + t_1)) + \frac{\sinh(K_1 \cdot (t + t_1))}{C_{max} R_p}}{\sinh(K_1 t_1)}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

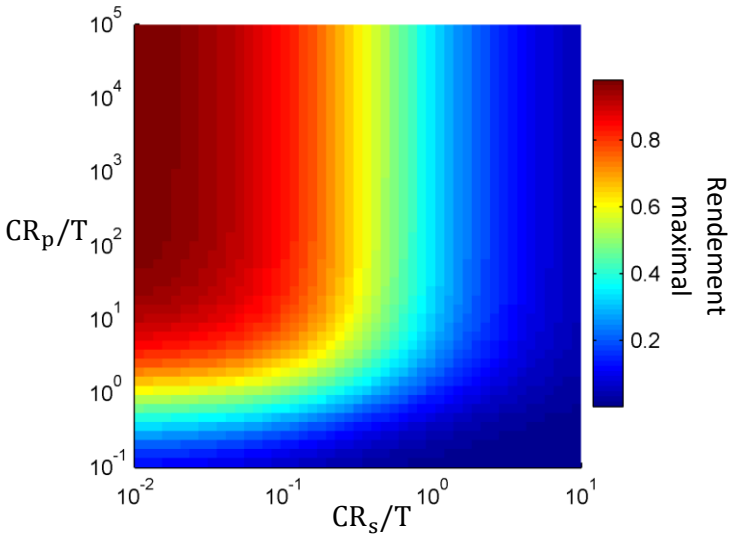


Figure 53 : Rendement maximal du transfert d'énergie sur une période T de temps vers un condensateur connecté en série avec une résistance R_s et en parallèle avec une résistance R_p

On peut montrer d'une manière générale alors que pour un condensateur connecté en série avec une résistance R_s et en parallèle avec une résistance R_p le rendement présente la dépendance illustrée dans la Figure 53.

2.4 Conclusion

Le problème de l'optimisation de l'énergie transférée entre différents systèmes peut s'avérer dans le cas général très complexe. Pour cela il est souvent nécessaire d'analyser leur fonctionnement interne. Une des causes possibles d'un rendement médiocre peut être l'absence d'un mécanisme de transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle des charges électriques. L'utilisation des éléments magnétiques (bobines, transformateurs) permet justement de réaliser une telle conversion. Sinon autre possibilité consiste à diminuer les courants et les différences de tensions électriques dans les circuits (mais cette technique ne fonctionne que pour un régime établi).

Dans le cas général où plusieurs flux énergétiques interdépendants sont présents on est obligé de faire appel à des techniques mathématiques. Les méthodes fréquentielles semblent être plus adaptées dans le cas d'un fonctionnement périodique et sont simples à utiliser pour des systèmes linéaires. Les méthodes temporelles au contraire peuvent être utilisées pour des régimes quelconques, dans certains cas amenant à des résultats très simples et généraux. Pour un matériau électroactif cette technique permet de définir de manière exacte le rendement de la conversion énergétique et de trouver les cycles optimaux.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 3. Considérations théoriques sur la récupération d'énergie avec des systèmes utilisant des matériaux piézoélectriques et des polymères diélectriques

3.1 Introduction

Les matériaux piézoélectriques et les polymères diélectriques présentent des propriétés très intéressantes qui ont été déjà avantageusement utilisés dans des systèmes de récupération d'énergie mécanique [6,147,148]. En même temps, chacun de ces matériaux présente des limitations importantes. Ainsi les matériaux piézoélectriques qui présentent un bon couplage électromécanique sont souvent très rigides et par conséquent l'injection d'énergie mécanique ne peut se faire que sous des contraintes très élevées. Les polymères diélectriques peuvent au contraire être très souples (module d'Young ≈ 1MPa—100MPa) mais leur permittivité diélectrique est souvent assez faible ($\varepsilon_r \approx 2–7$) ce qui veut dire que l'injection d'énergie électrique cette fois-ci est problématique car de très forts champs électriques sont nécessaires. De plus, les polymères diélectriques sont des éléments passifs qui nécessitent une source d'énergie externe pour leur polarisation, ce qui constitue en soi un désavantage important car rendant l'intégration de tels dispositifs plus compliquée. On pourrait se demander alors s'il n'est pas possible de combiner ces deux matériaux dans un seul système utilisant les avantages de chacun. On pourrait imaginer différentes configurations dans lesquelles des éléments piézoélectriques et des structures à base des polymères diélectriques sont actionnées par la même excitation ou par des excitations mécaniques différentes. Une partie ou l'intégralité de l'énergie obtenue avec les éléments piézoélectriques pourrait être transférée au polymère pourvue que l'énergie électrique totale qui pourrait être récupérée serait plus importante que celle obtenue avec un système purement piézoélectrique. Cela pourrait paraître simple mais il existe beaucoup de questions qui s'imposent. Tout d'abord il faut voir si une telle association a après tout un intérêt pratique. En effet, il faut choisir une configuration pour laquelle la présence du polymère améliore de manière substantielle l'énergie qu'on pourrait extraire avec un élément piézoélectrique seul. On pourrait aussi raisonner de manière inverse. Si on conçoit un système récupérateur d'énergie à base de polymères diélectriques est-ce que c'est intéressant d'utiliser un élément piézoélectrique ou d'autres techniques existantes sont plus adaptées dans certains cas? Si un système hybride est intéressant après tout, il faut déterminer les paramètres de fonctionnement optimaux, la meilleure topologie et aussi les circuits électriques les mieux adaptées pour différentes configurations.

Pour répondre à ces questions il faut tout d'abord analyser le comportement des systèmes de récupération d'énergie simples, utilisant des matériaux piézoélectriques ou des polymères diélectriques et déterminer quels systèmes seraient les mieux adaptés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2 Récupération d'énergie avec des polymères diélectriques

3.2.1 Généralités

Les polymères diélectriques sont utilisés pour la récupération d'énergie en exploitant leur capacité électrique variable [148], dépendante de leur état de déformation (pour une configuration donnée des électrodes). Dans ce sens ces systèmes constituent une classe particulière de générateurs électrostatiques. Dans le cas le plus général la polarisabilité électrique d'un matériau peut être dépendante de plusieurs paramètres comme l'état et le taux de déformation [149], la fréquence du champ électrique appliqué [150], la température [151] etc. Les polymères dont la permittivité électrique dépend de la déformation sont désignés usuellement sous le terme de polymères électrostrictifs. Tous les matériaux sont électrostrictifs d'une manière ou d'une autre mais pour des polymères flexibles ce phénomène se manifeste seulement pour des déformations importantes [152]. Souvent, pour simplifier les équations caractéristiques on suppose que les propriétés diélectriques d'un polymère sont indépendantes de l'état de déformation. La capacité électrique d'un film constitué d'un tel polymère ne dépend que de la géométrie de la structure, c'est à dire la distance entre les électrodes et leur surface, mais qui eux peuvent varier dû à une déformation. La déformation du polymère joue donc un rôle primordial sur la quantité d'énergie qui pourrait être récupérée avec un tel système. De plus, comme on l'a déjà dit un polymère diélectrique nécessite aussi une injection d'énergie électrique qui demande aussi une attention particulière. Il est donc important de voir les différentes possibilités d'injection d'énergie mécanique et électrique pour trouver les structures le mieux adaptées. Pour cela il faut modéliser le comportement mécanique et électrique d'une structure à base de polymère diélectrique en prenant en compte si besoin le couplage électromécanique.

3.2.2 Injection et extraction d'énergie électrique

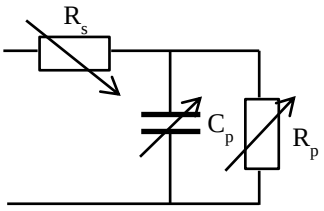


Figure 55 : Schéma électrique simplifiée d'un polymère diélectrique

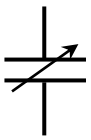


Figure 56 : Système électrostatique idéal

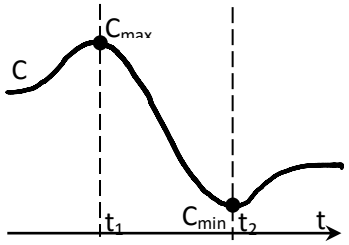


Figure 54 : Variation de la capacité d'un système électrostatique

Le schéma électrique simplifié qui est souvent utilisé [153] pour un système à base de polymère diélectrique est souvent représenté par un condensateur de capacité variable (C_p), une résistance parallèle (R_p) modélisant les pertes dues aux courants de fuite et les phénomènes de relaxation diélectriques, ainsi qu'une résistance connectée en série qui modélise le comportement imparfait des électrodes [154] (Figure 55). Les différents composants de ce modèle à constantes localisées dépendent non seulement de la déformation mais aussi du champ électrique (surtout C_p dans le cas où le couplage électromécanique est important), mais souvent les résistances peuvent être négligées [155].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La plupart des polymères utilisés sont des matériaux isolants présentant des courants de fuites extrêmement faibles (avec des résistivités allant jusqu'à $10^{13}\Omega m$). C'est surtout le cas de l'acrylique, le latex et le silicone, pour ces polymères on peut considérer un mécanisme de conduction de type ohmique. Pour simplifier on pourrait aussi considérer que la résistivité est indépendante de l'état de déformation [156] mais normalement celle-ci pourrait varier et même de manière non-négligeable [69] (la résistivité augmente avec l'extension du film, par exemple pour le latex elle peut varier 4 fois par rapport à celle à l'état relaxé, pour une déformation biaxiale de seulement 50%). La résistivité dépend aussi du champ électrique appliqué, la variation étant exponentielle :

(45) $\boldsymbol{\sigma(\mathbf{E}) = \sigma_0 e^{\frac{E}{E_0}}}$, σ : conductivité, σ_0, E_0: deux constantes caractéristiques, E : champ électrique transversal dans le film

Pour d'autres polymères, comme par exemple le polyuréthane, des mécanismes plus complexes de conduction, de type ionique, ont été observés [157].

Quant à la résistance connectée en série elle dépend beaucoup du type d'électrode utilisé. Elle peut varier entre quelques ohms (électrodes métallique déposées par dispersion [158]) et quelques centaines de kohms [156] (pour des électrodes à base de graisses conductrices ou polymères conducteurs). La dépendance des résistances de la déformation est aussi fonction de la structure utilisée. Par exemple pour des électrodes métalliques flambées [159] la résistance des électrodes ne varie presque pas avec la déformation car ceux-ci subissent que des flexions, au contraire lorsque l'électrode se déforme en même temps que le film la variation peut être très importante [160]. En même temps il faut mentionner le fait que l'influence de la résistance des électrodes sur le fonctionnement d'un système électrostatique est relative au courant qui les traverse. Imaginons par exemple un polymère à l'état tendu présentant une capacité de 5nF. On veut le charger en appliquant une tension de 5kV ce qui correspond à une charge électrique de 25 µC. Si on utilise pour le transfert un courant constant sur un intervalle de temps de 100 ms, ce qui est normalement assez petit par rapport à la période d'actionnement du polymère (>1s), on obtient comme pertes ohmiques même avec une électrode de 1MΩ, 6.2 mJ alors que l'énergie électrostatique stockée est de 62.5 mJ (on a donc 10% de pertes). On voit donc que pour que l'influence de l'électrode soit minimisée il faut que le transfert des charges électriques soit effectué sur des périodes de temps plus grandes que la constante de temps de la capacité du polymère et la résistance série équivalente. Il est aussi intéressant de voir quel est le lien entre les paramètres physiques des électrodes et la résistance vue de l'extérieur. Pour cela on pourrait se placer dans un cas 2D et prendre en considération la propagation du champ électrique qu'on impose aux extrémités du film (on néglige les courants de fuite). Si on néglige aussi l'effet du champ magnétique alors on pourrait considérer le comportement du film similaire à une ligne de transmission (Figure 57).

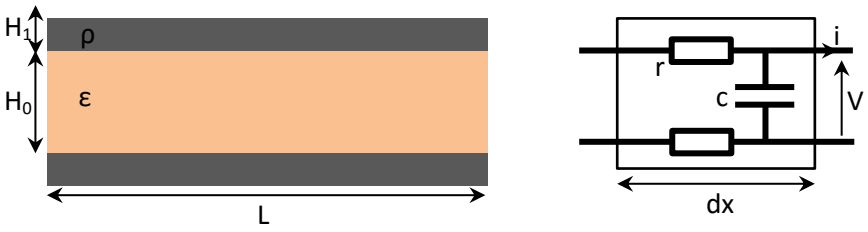


Figure 57 : Modélisation de la propagation du champ électrique dans un film polymère par une ligne de transmission (ρ : résistivité, ε : permittivité)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Si on néglige l'inductance linéique alors l'admittance vue en entrée a la forme :

$$(46)\ \mathrm{Y}(\omega) = \tanh(\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}\mathrm{L})\sqrt{\mathrm{i}\omega\frac{\mathrm{c}}{2\mathrm{r}}}$$

Lorsque $\omega \longrightarrow 0$ alors on retrouve bien $\mathrm{Y} = \mathrm{i}\omega\mathrm{C}$. Pour des fréquences plus importantes on peut utiliser un développement limité. Un développement limité au deuxième ordre donne :

$\mathrm{Y}(\omega) = \left(\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}\mathrm{L} - \frac{(\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}\mathrm{L})^3}{3}\right)\cdot\sqrt{\mathrm{i}\omega\frac{\mathrm{c}}{2\mathrm{r}}} = \mathrm{i}\omega\mathrm{C} + \frac{2}{3}\omega^2\mathrm{RC}^2$, R : résistance électrique de l'électrode d'une extrémité à l'autre, C : capacité électrique totale du film

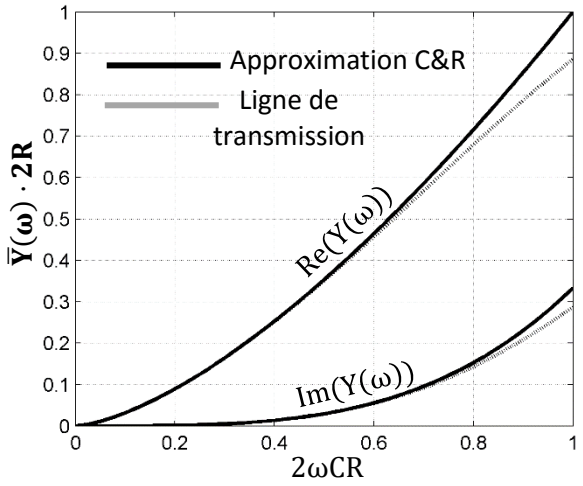


Figure 58 : Variation de l'admittance du film avec la fréquence, pour un modèle à ligne de transmission et circuit RC

En même temps le développement limité de l'admittance donnée par un condensateur (C') connecté en série avec une résistance (R') est de la forme : $\mathrm{Y}(\omega) = \mathrm{i}\omega\mathrm{C}' + 2\omega^2\mathrm{R}'\mathrm{C}'^2$. Pour de faibles fréquences les deux modèles doivent converger, dans quel cas par identification on trouve :

$$(47)\ \mathrm{C}' = \mathrm{C} \quad \mathrm{R}' = \mathrm{R}/3$$

L'approximation d'un circuit RC reste valable tant que la fréquence d'excitation électrique reste faible ou comparable avec l'inverse de RC (Figure 58). En même temps la formule (47) montre que la résistance vue de l'extérieur reste comparable à la résistance de l'électrode mesurée entre les deux extrémités du film. Bien évidemment les résultats devraient dépendre de la position des connexions, par exemple si on imagine que celles-ci sont situées sur chaque extrémité alors l'admittance en entrée est donnée par :

$$(48)\ \mathrm{Y}(\omega) = \frac{\sinh(\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}\mathrm{L})\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}}{(\cosh(\sqrt{2\mathrm{i}\omega\mathrm{rc}}\mathrm{L})+1)\mathrm{R}}$$ ce qui amène aussi à $\mathrm{C}' = \mathrm{C} \quad \mathrm{R}' = \mathrm{R}/3$

On pourrait donc en conclure qu'en première approximation la résistance et la capacité vue pour des fréquences pas très élevées ne dépend pas de la position des connexions. Dans le calcul précédent on a négligé l'inductance du film. En effet, normalement les effets du champ magnétique dans les polymères électroactifs sont toujours négligés [80]. Il est intéressant de vérifier si cette simplification est justifiée et dans quelles conditions.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

D'après [161] pour une ligne de transmission constituée de deux électrodes de forme rectangulaire l'inductance équivalente par unité de longueur est de la forme :

(49) $l = \mu \frac{H_0}{w}$, l : inductance linéique, H_0 : distance entre les électrodes, w : largeur des électrodes

Pour pouvoir négliger l'effet inductif il faut donc que $l\omega \ll r$. La plupart de polymères sont amagnétiques ($\mu_r \approx 1$), si on considère $H_0 \approx 100$ µm et w ≈ 1 cm alors on obtient $l \approx 10^{-10}$ H/m. Même pour des fréquences de 1MHz on a $l\omega \approx 10^{-3}\Omega/m$ ce qui constitue une valeur très faible et donc négligeable. Bien évidemment ces résultats ont été obtenus pour une configuration 2D, généralement la forme du film pouvant avoir une certaine influence mais le propos de ces calculs était seulement de définir des ordres de grandeurs.

Dans le cas où on néglige les pertes et les contraintes électriques, un polymère diélectrique peut être modélisé par un condensateur de capacité variable imposée (Figure 56). Supposons par exemple que sur un certain intervalle de temps la capacité équivalente subit une variation telle que celle représentée dans la Figure 54. Si on cherche à optimiser l'énergie récupérée sur un tel intervalle de temps pour une quantité d'énergie injectée donnée, on observe que pour cela il faut injecter toute l'énergie électrique disponible dans le système électrostatique lorsque la capacité est maximale (C_{max}) d'un seul coup et extraire toute l'énergie disponible lorsque la capacité est minimale (C_{min}). En effet, pour une énergie donnée une quantité de charges électriques plus grande peut être introduite dans un condensateur lorsque sa capacité est maximale. On peut montrer dans ces conditions que lorsque le polymère est initialement déchargé et aussi lorsque l'énergie est extraite de manière complète alors :

(50) $G = \mathcal{E}_{int} \cdot \left(\frac{C_{max}}{C_{min}} - 1\right)$, avec $G = \mathcal{E}_{ext} - \mathcal{E}_{inj}$ le gain en énergie où $\mathcal{E}_{ext}$, $\mathcal{E}_{inj}$: énergies électriques extraite et injectée

Cycle	Gain net d'énergie pour et par rapport à la même quantité d'énergie électrique injectée
Charge constante	$\frac{C_{max}}{C_{min}} - 1$
Tension constante	$1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} < 1$
Champ constant	$2 \cdot \ln\left(\sqrt{\frac{C_{max}}{C_{min}}}\right)$

Tableau 8 : Gain d'énergie électrique normalisé obtenu avec les trois cycles proposés, pour la même énergie électrique injectée[154]

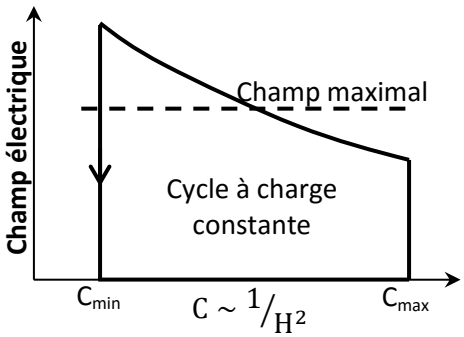


Figure 59 : Cycle à charge constante limité par le champ électrique de claquage. La capacité du film (C) est inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur de celui-ci (H).

On pourrait se demander si ce gain pourrait être amélioré si le condensateur serait initialement pré-chargé c'est à dire s'il y aurait une charge électrique résiduelle. Mais on peut montrer qu'une telle situation ne change pas l'équation (50), une charge résiduelle ne modifie donc pas le gain d'énergie. Un tel cycle de transfert d'énergie électrique est appelé cycle à charge constante [162] parce que la charge électrique stockée sur le polymère reste constante pendent sa relaxation. Deux autres cycles simples ont été proposés auparavant: les cycles à tension et champ constant [163]. Pour chaque cycle pendant l'étape de relaxation soit le champ soit la tension est maintenue constante. On

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

pourrait se demander alors quel est l'avantage de ces configurations. C'est vrai que pour un comportement idéal du polymère pour lequel il peut être considéré comme un condensateur de capacité variable, le cycle à charge constante est optimal mais cela change si on prend en compte le champ de claquage du matériau. En effet, pour un cycle à charge constante le champ électrique augmente en même temps que la tension ($E = \frac{Q}{\varepsilon S}$, avec Q la charge électrique, S : surface du film) ce qui veut dire que l'énergie électrique qui pourrait être injectée dans le polymère lorsque sa capacité est maximale pourrait être limitée par le champ de claquage. Si cela arrive alors le cycle à champ constant pourrait permettre une injection d'énergie électrique plus importante donc à une énergie électrique récupérée plus importante aussi. Le cycle à tension constante a été montré de ne pas fonctionner car on a une consommation d'énergie plus grande que celle extraite [163].

Des cycles mixtes ont été aussi proposés [154]. Ainsi on peut par exemple se placer à charge constante au début de la phase de relaxation et lorsqu'on approche le champ de claquage on peut limiter le champ électrique en le maintenant constant [164].

L'optimisation de l'énergie récupérée pour un polymère en prenant en compte les différentes sources de pertes, le couplage électromécanique, l'électrostriction et les différentes limitations physiques (rupture, champ de claquage, perte de tension mécanique etc.) a été analysé dans [165,166]. Cela montre que dans le cas général l'optimisation et même la modélisation des générateurs utilisant des polymères diélectriques peut être extrêmement complexe. Finalement, l'échange d'énergie électrique se fait par l'intermédiaire d'un certain circuit électrique, les cycles énergétiques étant imposés par celui-ci, ils peuvent ne pas être optimaux mais présenter l'avantage d'être simples.

3.2.2.1 Connexion série

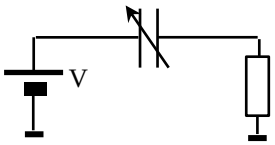


Figure 60 : Circuit simple de récupération avec tous les

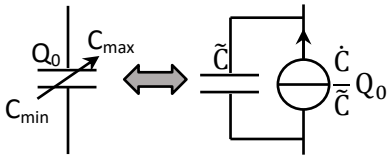


Figure 62 : Equivalence d'un polymère utilisé en régime de faibles déformations avec un élément piézoélectrique

Le moyen le plus simple de récupérer de l'énergie avec un polymère diélectrique c'est d'utiliser une source de tension connectée en série avec le polymère et la charge à alimenter [167] (Figure 60). La variation de la capacité du polymère engendre un courant variable dans la charge et donc une certaine puissance peut être récupérée. La charge reçoit un courant alternatif mais rien n'empêche d'utiliser un circuit redresseur pour se ramener en sortie à une tension continue. Lorsque la variation de la capacité reste faible on peut montrer que l'ensemble source de tension + polymère se comporte comme un élément piézoélectrique [168]. En effet, on peut considérer que les grandeurs électriques sont le résultat de la superposition d'une composante continue et d'une autre variable (Figure 62). Lorsque par contre la variation de la capacité du polymère est importante le fonctionnement est plus compliqué.

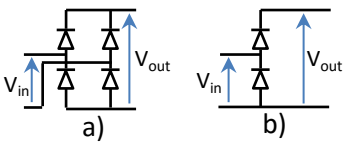


Figure 63 : Pont redresseurs a) 4 diodes b) 2 diodes

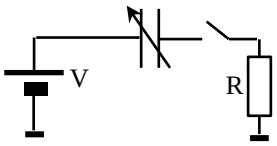


Figure 61 : Connexion série avec interrupteur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour une telle configuration en absence des fuites dans le polymère, toute l'énergie que la source primaire fournie est restituée pendant un cycle de conversion [169]. Pour une variation de capacité imposée et périodique on pourrait se demander quel doit le comportement de la charge pour que l'énergie extraite soit optimale. On peut facilement se rendre compte que la meilleure stratégie c'est de maintenir la majorité du temps le circuit ouvert et laisser les charges circuler que lorsque la valeur de la capacité atteint un extremum. On peut par exemple utiliser un interrupteur et une charge présentant une faible résistance en entrée (Figure 61). L'énergie récupérée dans ce cas pour un fonctionnement périodique, sur un cycle, est donnée par :

$$(51)\ \mathcal{E}_{cycle} = \frac{(C_{max} - C_{min})}{2} \cdot V^2$$

Le désavantage de cette structure c'est le fait que le courant dans la charge est alternatif. Bien évidement on pourrait imaginer une sortie redressée (pont redresseur + charge). Si pour cela un pont à diode est utilisé alors plusieurs possibilités existent (Figure 63). En effet, il pourrait être connecté aussi inversé car l'ensemble source primaire + condensateur est asymétrique. Pour un tel circuit, pour une tension primaire V_1, une tension de sortie V_2 et une période des cycles T on obtient le fonctionnement optimal donné dans le Tableau 9.

Pont redresseur	Energie récupérée maximale par cycle	V_2 optimal	R_{opt}
2 diodes +	$\frac{V_1^2(C_{max} - C_{min})^2}{4C_{max}}$	$\frac{V_1(C_{max} - C_{min})}{2C_{max}}$	$\frac{T}{C_{max}}$
2 diodes -	$\frac{V_1^2(C_{max} - C_{min})^2}{4C_{min}}$	$-\frac{V_1(C_{max} - C_{min})}{2C_{min}}$	$\frac{T}{C_{min}}$
4 diodes	$\frac{V_1^2(C_{max} - C_{min})^2}{2(C_{max} + C_{min})}$	$\frac{V_1(C_{max} - C_{min})}{2(C_{max} + C_{min})}$	$\frac{T}{2(C_{min} + C_{max})}$

Tableau 9 : Performance optimale du circuit série avec sortie redressée

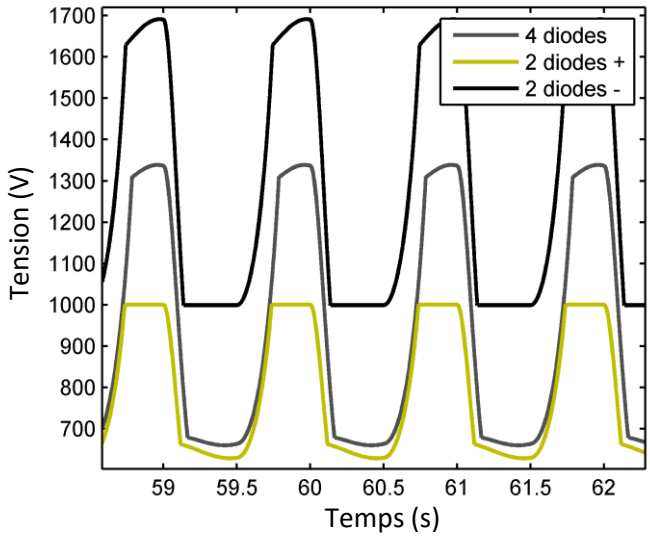


Figure 64 : Variation de la tension aux bornes du polymère pour les trois types de ponts redresseurs utilisés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme on peut le voir le circuit avec un pont redresseur à deux diodes, inversé permet d'obtenir le plus d'énergie. On pourrait se demander pourquoi. Pour cela il est intéressant de voir comment les transferts d'énergie sont effectués pour les trois configurations. Pour cela les trois systèmes ont été simulés avec Simulink pour une tension primaire de 1kV et une sortie optimale, la capacité variable présentant une variation sinusoïdale entre 0.5nF et 2.5nF à une fréquence de 1Hz.

Comme on peut le voir (Figure 64) avec la configuration à deux diodes inversée, l'amplitude de la tension aux bornes du condensateur variable est la plus élevée. Cette configuration permet donc de récupérer plus d'énergie que les autres juste parce que c'est la configuration qui permet d'injecter la plus grande quantité de charges électriques dans le polymère.

3.2.2.2 Connexion parallèle

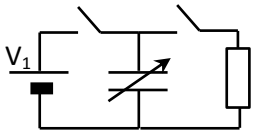


Figure 65 : Circuit à transfert unidirectionnel d'énergie

Autre possibilité de transférer l'énergie consiste à utiliser le schéma de la Figure 65 . La source primaire de tension fournie de l'énergie lorsque la capacité du polymère dépasse une certaine valeur (lorsqu'elle augmente), l'extraction s'effectuant lorsque la capacité est minimale ou lorsqu'elle dépasse une certaine limite. Le transfert des charges électriques comme l'énergie, s'effectue dans un seul sens de la source primaire vers la charge, la source primaire d'énergie est donc en train de se décharger pendent le fonctionnement. Des interrupteurs commandés peuvent être utilisés mais le plus simple c'est d'utiliser des diodes en tant qu'interrupteurs passifs. Lorsqu'à chaque cycle la capacité variable est complétement déchargée alors l'énergie nette récupérée par cycle est donnée par :

$$(52)\ E_{nette} = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{C_{max}}{C_{min}} - 1\right) C_{max} V_1^2$$

Lorsqu'en sortie on utilise une tension continue (V_2) alors le fonctionnement optimal est obtenu pour :

$$(53)\ V_2 = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{C_{max}}{C_{min}}\right)$$, dans quel cas le gain nette d'énergie est donné par :

$$(54)\ E_{nette} = \frac{1}{4} \cdot \frac{(C_{max} - C_{min})^2}{C_{max}} V_1^2$$

L'énergie nette, obtenue dans le cas optimal est donc la même que celle obtenue avec la configuration série (Tableau 9) avec pont redresseur inversé à deux diodes. Ce circuit a été largement utilisé [148,170,171] probablement pour des raisons de simplicité. Le principal problème étant la décharge de la source primaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.3 Excitation mécanique

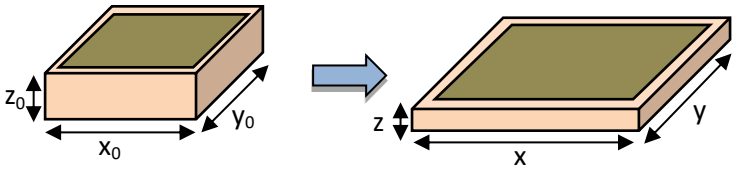
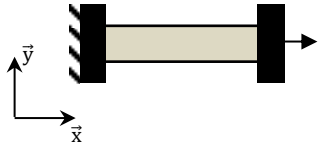
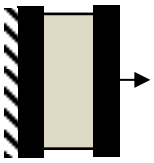
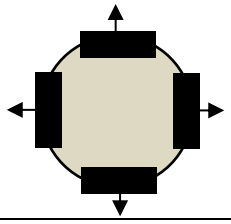


Figure 66 : Partie élémentaire d'un film polymère avant et après déformation

Les films minces sont les structures les plus utilisées dans les systèmes électroactifs probablement principalement pour des raisons pratiques. En effet, il est relativement simple de synthétiser des films de faible épaisseur avec une bonne précision ce qui permet d'appliquer des champs électriques élevés en utilisant en même temps une tension modérée. De plus, appliquer des électrodes sur une surface plane est aussi la technique la moins compliquée. Aussi, plusieurs films peuvent être facilement combinés pour former des structures plus complexes et compactes comme des stacks [172,173] ou des rouleaux [148,174,175].

Déformation uniaxiale	Déformation uniaxiale pure	Déformation biaxiale
		
$\lambda_2 = \lambda_3 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}$ $C = \lambda_1 \cdot C_0$	$\lambda_2 = 1 \text{ ❖ } \lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1}$ $C = {\lambda_1}^2 \cdot C_0$	$\lambda_2 = \lambda_1 \text{ ❖ } \lambda_3 = \frac{1}{{\lambda_1}^2}$ $C = {\lambda_1}^4 \cdot C_0$

◪ : parties fixes → : déplacement ■ : supports rigides ■ : polymère λ_i : les extensions principales C_0 : capacité initiale

Tableau 10 : Variation de la capacité pour différentes configurations utilisant un film polymère

Pour voir quel est le lien entre la déformation et la variation de capacité on peut considérer une surface élémentaire d'un film polymère (Figure 66). Le film est supposé être recouvert sur ses deux faces de deux couches très minces et élastiques parfaitement conductrices constituant les électrodes. Comme les dimensions du film sont très faibles on peut considérer que la déformation est uniforme, la variation de la capacité électrique est donnée alors par:

(55) $C_0 = \varepsilon \frac{x_0 y_0}{z_0} \rightarrow C = \varepsilon \frac{xy}{z}$, C_0 : capacité du film non-déformé, C : capacité du film déformé, ε : permittivité électrique

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Si on considère que les directions principales de la déformation coïncident avec les bords du film (on imagine un repère avec l'axe z perpendiculaire à la surface du film) alors $\frac{C}{C_0} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_3}$ ce qui implique si le polymère est incompressible ($\lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1$) :

$$(56)\ \frac{C}{C_0} = \frac{1}{\lambda_3^2}$$

D'après (56) pour avoir une variation de capacité, il suffit d'imposer une déformation en épaisseur mais en général un film polymère peut être déformé de plusieurs manières (Tableau 10), les forces pouvant être appliquées dans plusieurs directions et certains bords pouvant être bloqués. La déformation uniaxiale est réalisé avec des films dont la longueur est assez large par rapport aux autres dimensions, les contraintes latérales dans un tel cas sont négligeables par rapport à la contrainte axiale. La configuration uniaxiale pure peut être obtenue en utilisant un film mince mais de largeur (dimension latérale à la direction de la force appliquée) comparable à la longueur. L'approximation qui est faite dans un tel cas c'est le fait que la déformation latérale (en largeur) est nulle. La configuration biaxiale consiste à détendre le film dans les deux directions dans le plan du film, pour réaliser cela plusieurs possibilités existent.

La capacité électrique d'un polymère peut être facilement déterminée lorsque sa déformation est imposée (comme dans les exemples précédents) mais en pratique de telles interactions ne sont pas très fréquentes. Dans bien plus de cas on a affaire à des interactions qui se produisent avec des forces imposées. Imaginons par exemple qu'on désire récupérer de l'énergie sur une route ou des voitures et des piétons passent. Dans un tel cas c'est une force qui est imposée (le poids) et on pourrait se demander quelle est la meilleure manière de déformer un polymère pour une certaine force donnée (déformation uniaxiale, biaxiale etc.) pour optimiser l'énergie récupérée. Dans le cas idéal fortement simplifié où des relations linéaires entre les déformations et les contraintes sont considérées ceci peut facilement se faire.

	Déformation uniaxiale	**Déformation uniaxiale pure**	**Déformation biaxiale**
$\frac{\mathbf{C_{max}}}{\mathbf{C_{min}}}$	$\frac{1}{1-\frac{\sigma_0}{Y}}$	$\left(\frac{1}{1-\frac{\sigma_0}{Y}}\right)^2$	$\left(\frac{1}{1-\frac{\sigma_0}{Y}}\right)^4$

Tableau 11 : Expression de la variation de la capacité d'un film pour différents types d'excitations mécanique (Y : module d'Young, σ_0 : contraite appliquée)

Pour une déformation biaxiale il est plus compliqué d'appliquer une seule force. Une possibilité de le faire c'est d'utiliser un piston et exercer une pression par l'intermédiaire d'un fluide de couplage, un montage spécial qui répartit la force sur les bords de la membrane [176] pourrait aussi être utilisé, sinon on pourrait imaginer que la force est appliquée dans la direction perpendiculaire à la surface du film et que celui-ci garde la possibilité de se déformer latéralement (ce qu'on a supposé lors du calcul précédent Tableau 11). Pour les trois configurations les plus simples (Tableau 10) pour une force donnée et un certain volume de polymère on pourrait déterminer la performance d'un film utilisé pour la récupération d'énergie (Tableau 11).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

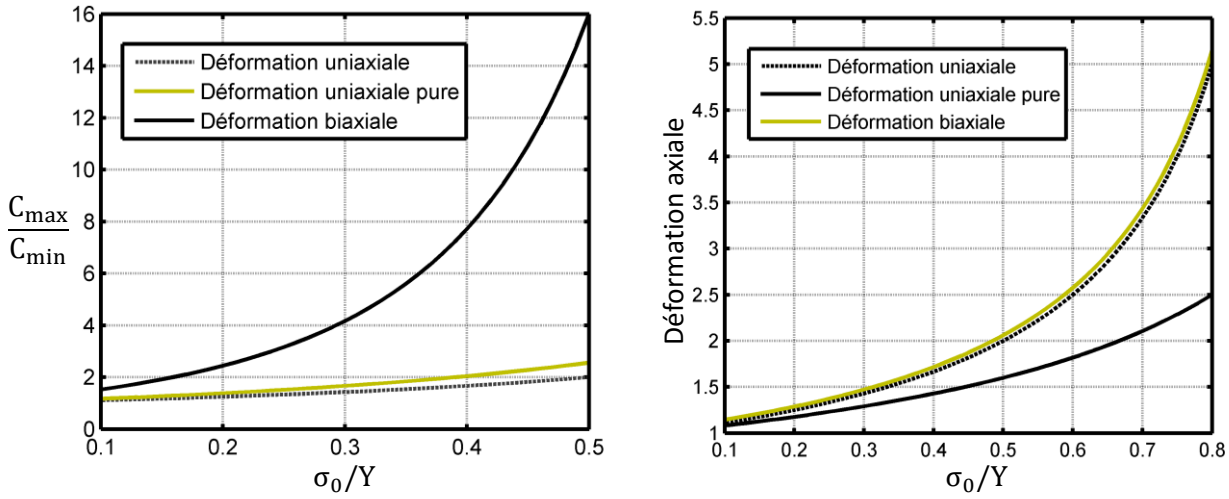


Figure 67 : Variation de la capacité pour une structure en polymère (module d'Young Y) pour une contrainte σ_0 imposée (gauche) pour les trois configurations principales et la déformation axiale respective (droite)

Comme on peut le voir (Figure 67), avec la configuration biaxiale on obtient un maximum de gain énergétique comme dans le cas où les déformations sont imposées. Il faut toutefois mentionner que celui-ci dépend aussi de la géométrie de la structure utilisée. Mais dans tous les cas le gain est augmenté pour des dimensions de la structure plus importantes suivant la direction de la force appliquée, ce qui est logique car on obtient plus de déformation (pour une même quantité de matériau).

Si on regarde les expressions trouvées dans le Tableau 11 on peut s'apercevoir que pour certaines valeurs de la force appliquée elles deviennent infinies. Cela constitue un premier exemple d'un comportement instable d'un polymère (d'un point de vu mécanique). En effet, ce qui se passe c'est qu'en appliquant une certaine force sur un film il se détend mais en même temps sa section diminue ce qui entraîne une augmentation de la contrainte, ce qui augmente la déformation etc. Pour certaines valeurs de la force un équilibre s'établit pour d'autres non, dans quel cas une rupture du film peut se produire. Toutefois les polymères qui sont sujet à des déformations importantes présentent un comportement non-linéaire (relations contraintes-déformations) qui peuvent avoir une importance non-négligeable dans de telles situations. Dans ce cas il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes de rigidification du matériau. Le modèle le plus simple et le plus utilisé pour des études théoriques illustrant ce phénomène est le modèle de Gent ([165,177,178]).

Autre remarque simple c'est la suivante : lorsque des films de polymère sont utilisés pour la récupération d'énergie il n'existe aucun intérêt d'induire des déformations de cisaillement. En effet, ce type de déformation ne contribue que très peu à la variation de la capacité. On a aussi intérêt à induire des déformations aussi uniformes que possible pour utiliser le potentiel maximal du matériau. Ceci reste d'ailleurs valable pour le champ électrique injecté (on utilise un champ électrique uniforme). Cela simplifie souvent avantageusement les équations caractérisant le comportement de tels systèmes.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.3 Récupération d'énergie avec des matériaux piézoélectriques

3.3.1 Généralités

Les matériaux piézoélectriques ont été étudiés d'un manière plus intensive que les polymères diélectriques probablement parce qu'il s'agit d'une technologie plus mûre [179–181]. La récupération d'énergie mécanique avec des matériaux piézoélectriques utilise le phénomène d'apparition et variation de la polarisation électrique du matériau sous l'action des contraintes mécaniques. L'avantage de ces structures par rapport aux systèmes à base de polymères diélectriques c'est qu'elles ne nécessitent pas une source d'énergie électrique supplémentaire. Contrairement aux polymères, normalement les matériaux piézoélectrique sont beaucoup plus rigides et ne se déforment que très peu (0.1% étant la déformation de référence qu'on trouve dans la littérature). Cela présente un avantage d'un point de vue théorique car les équations caractéristiques de fonctionnement restent assez simples (souvent linéaires).

Dans cette partie on se propose de faire une analyse sommaire de principales configurations des systèmes de récupération d'énergie utilisant des matériaux piézoélectriques. Une analyse de leurs performances est nécessaire pour voir si leur association avec des polymères pourrait être intéressante.

3.3.2 Transferts d'énergie électrique

De point de vue électrique un élément piézoélectrique peut être vu comme un condensateur connecté en parallèle avec une source de tension (Figure 31). La source de courant modélise la polarisation du matériau engendrée par la contrainte appliquée alors que le condensateur la polarisation due au champ électrique externe.

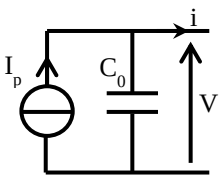


Figure 68 : Schéma électrique équivalente d'un élément piézoélectrique

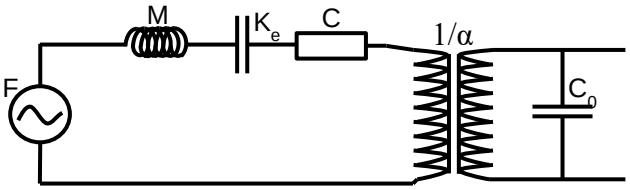


Figure 69 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre bloquée-libre actionnée par une force

Dans le cas général pour des structures complexes le courant I_p dépend du couplage mécanique de l'élément piézoélectrique et son milieu extérieur. Lorsque la fréquence des forces appliquées est faible on peut négliger les effets inertiels et ce courant peut être exprimé en fonction des forces externes. Sinon une pratique courante c'est d'adopter un modèle à constantes localisées adapté autour d'une fréquence particulière [182–185]. Contrairement aux polymères les résistances des connexions et des pertes par des courants de fuite peuvent être négligées. En effet, vu que ces matériaux ne subissent pas des déformations importantes et qu'ils sont assez rigides, des électrodes métalliques assez épaisses sont utilisées qui présentent une très bonne conductivité. Le courant de fuite est aussi très faible et peut être la plupart de temps négligé.

Pour étudier l'énergie électrique transférée entre l'élément piézoélectrique et l'extérieur il est plus commode de considérer la charge électrique fournie par la source de courant (Q(t)) que le courant même.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Ainsi par exemple l'énergie maximale par cycle qu'on peut obtenir avec une résistance et pour un courant I_p sinusoïdal est donnée par :

$$(57) E = \frac{\pi Q_{max}^2}{2C}$$

Comme dans le cas du générateur à polymère, pour obtenir une tension continue en sortie on peut utiliser un pont redresseur à quatre ou à deux diodes mais au moins deux diodes sont nécessaires pour permettre aux charges de se déplacer dans les deux sens. Le fonctionnement est symétrique car seulement la variation de la polarisation présente de l'importance et pas le signe et tous les ponts redresseurs permettent l'extraction de la même quantité d'énergie dans le cas optimal :

$$(58) E = \frac{Q_{max}^2}{4C}$$

Mais cette énergie dépend bien évidement du circuit utilisé pour réaliser le transfert. Comme on l'a vu pour améliorer l'énergie extraite, on pourrait réinjecter de l'énergie dans le système piézoélectrique à certains instants. On pourrait aussi assurer une bonne synchronisation entre l'extraction et l'injection de l'énergie.

3.3.3 Injection d'énergie mécanique

Comme pour les polymères, différentes structures pourraient être utilisées. Les deux principales configurations sont les systèmes vibrants sismiques et les systèmes fonctionnant en régime quasi-statique. Pour les premières on utilise d'habitude des couches minces et pour le matériau actif et pour le substrat. Cela permet d'obtenir des contraintes élevées grâce à l'effet levier de ce type de structure. Des éléments piézoélectriques simples peuvent aussi être utilisés (cylindres, anneaux etc.) par exemple actionnés en compression. Il est simple pour une telle configuration d'estimer la quantité d'énergie mécanique injectée et aussi l'énergie électrique qui pourrait être récupérée.

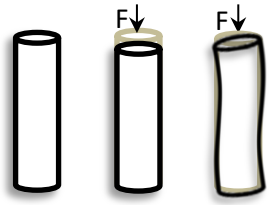


Figure 70 : Illustration du phénomène d'instabilité mécanique pour des éléments piézoélectriques actionnés en compression

Si on imagine un tel élément en compression avec V_p : son volume, sous l'action d'une force F(t) tel que σ_{max} est la contrainte maximale générée. Alors lorsque la force atteint son maximum on peut estimer les deux formes d'énergie (électrique et mécanique) par:

$$(59) E_{elec} = V_p \frac{d_{33}^2 \sigma_{max}^2}{2\varepsilon_{33}^T} \qquad E_{mec} = V_p \frac{s_{33}^D \sigma_{max}^2}{2}$$, avec d_{33} : le coefficient de couplage, ε_{33}^T : la permittivité à contrainte nulle, s_{33}^D : la suppléance

Comme on peut le voir les énergies mécanique injectée ainsi que l'énergie électrique due à la polarisation dépendent de la contrainte appliquée, la dépendance étant quadratique. Pour une force donnée et un volume donné de matériau piézoélectrique on a intérêt à utiliser des structures présentant une section faible et une hauteur plus grande. On peut remarquer aussi que le rapport entre les énergies stockées électrique et mécanique est une constante qui ne dépend que des paramètres matériels. Cela veut dire que si on veut récupérer une quantité importante d'énergie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

électrique une quantité importante d'énergie mécanique devrait être injectée au départ. Le paramètre qui semble caractériser les performances en génération d'énergie électrique d'un matériau piézoélectrique c'est le coefficient $d_{33}^2/\varepsilon_{33}^T$.

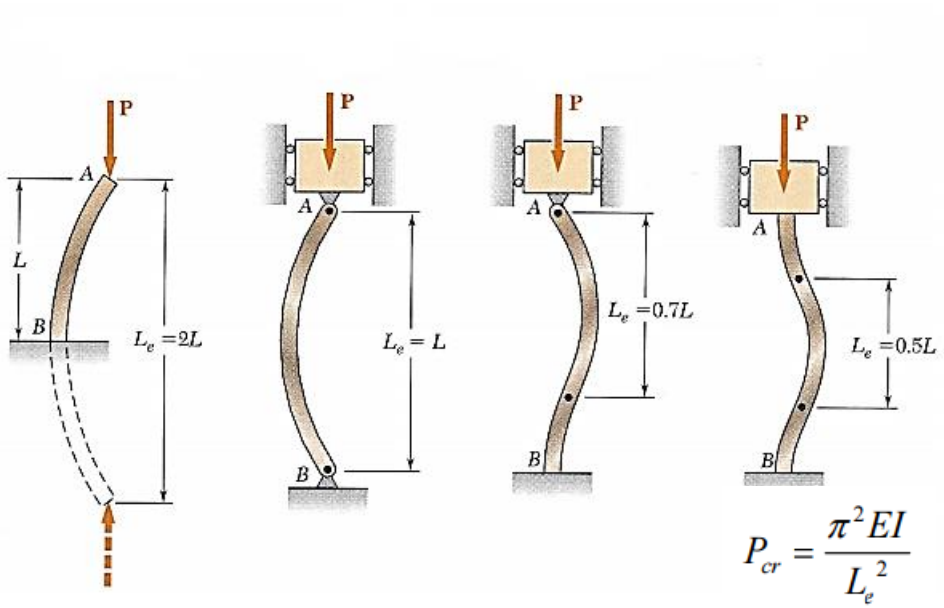


Figure 71 : Charge critique pour différentes conditions aux limites (E : module d'Young, I : moment de la section, P_{cr} : force critique, L: longueur de la colonne)

D'une part on a intérêt à appliquer une contrainte élevée mais en pratique une certaine limitation devrait être respectée pour éviter des problèmes de fractures ou de dépolarisation. Autre problème qui pourrait intervenir (vu que les éléments piézoélectriques devraient présenter une faible section) c'est l'instabilité mécanique. En effet, lorsqu'on applique une force axiale en compression sur une structure présentant une forme allongée, pour des forces élevées la symétrie du problème n'est plus respectée ce qui peut impliquer l'apparition d'une certaine courbure (ce qui veut dire des zones présentant des polarisations opposées, Figure 70) qui peut se traduire par une diminution de l'énergie électrique engendrée voir par l'apparition d'une concentration des contraintes locale. Ce phénomène a été déjà étudié de manière intensive pour des colonnes chargées axialement [186]. Pour celles-ci il existe une force critique pour laquelle la colonne peut subir des flexions, mais bien évidemment celle-ci dépend des conditions aux limites et de la façon dont la force est appliquée (Figure 71). Pour une colonne ayant une section circulaire le moment d'inertie de la section est de la forme : $I = \pi R^4/4$. L'ordre de grandeur de la force critique (avec les notations utilisées précédemment) est donc donnée par l'expression:

$$(60)\ P_{cr} = \frac{\pi Y A^2}{16 H^2}$$

On peut calculer par exemple pour un élément P194 ($c_{33}^D = 105\text{GPa}$) la force critique en fonction des dimensions (Figure 72). Comme on peut le voir cette force reste assez élevée même pour des sections présentant un rayon de quelques millimètres mais le phénomène pourrait quand même se manifester lorsque la surface de la section est faible. Autre phénomène qui pourrait limiter la contrainte appliquée c'est la dépendance des différentes paramètres matériels de celle-ci [187] et le risque de dépolarisation. Pour les céramiques de type douces on a intérêt à se limiter à quelques dizaines de MPa, alors que pour celles de type dures des contraintes qui peuvent aller jusqu'à plus d'une centaine de MPa peuvent être appliquées. En dernier lieu la contrainte est limitée par la fracture du matériau, mais en compression, celle-ci pourrait présenter des valeurs très élevées, pouvant dépasser 500 MPa [188].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

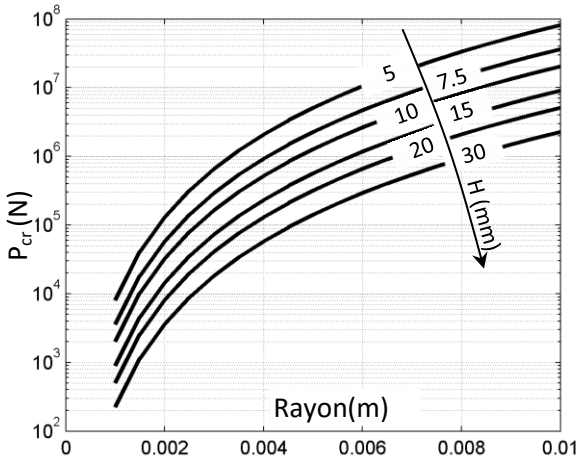


Figure 72 : Variation de la force critique avec la hauteur et le rayon de la section pour un cylindre en P194

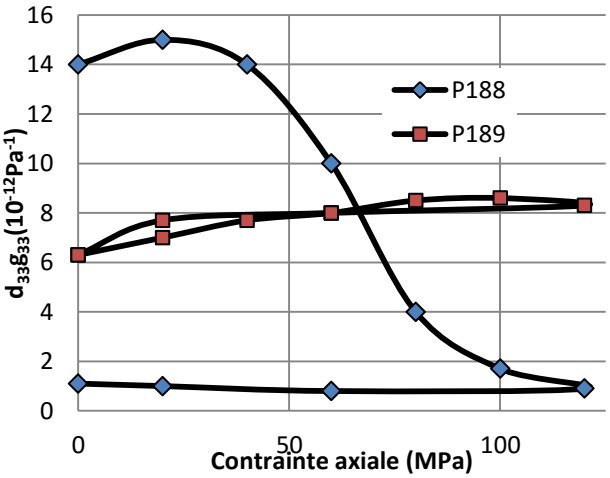


Figure 73 : Variation du facteur de mérite ($d_{33}g_{33}$) des céramiques P188 et P189 en fonction de la contrainte axiale appliquée

Il est intéressant de voir quelles sont les contraintes qu'on arrive à générer dans des conditions normales (Tableau 12).

Interaction	Pression/contrainte approximative
Vent (orage, 25 m/s)	450 Pa
Vagues (1 m en hauteur)	10 kPa
Pied (personne de 80 kg)	100 kPa - 250 kPa
Voiture/Camion (contact pneu-route)	100 kPa - 1 MPa
Roues de trains sur voie ferrée (150 kN/ roue)	500-1500 MPa

Tableau 12 : Pressions et contraintes générées lors des interactions ordinaires [189–192]

Comme on peut le voir on ne génère pas normalement des contraintes aussi élevées qu'on puisse appliquer sur les éléments piézoélectriques d'où l'intérêt d'utiliser des mécanismes spéciaux pour concentrer la force appliquée sur des faibles surfaces.

3.4 Structures de récupération d'énergie hybrides

3.4.1 Introduction

Comme on l'a vu précédemment les polymères diélectriques peuvent présenter des densités énergétiques plus importantes que les matériaux piézoélectriques. De plus, ils présentent aussi l'avantage d'être plus souples et facile à intégrer et même fabriquer. D'autre part la principale limitation des systèmes de récupération d'énergie utilisant des polymères diélectriques est leur besoin d'être alimentés avec des champs électriques élevés qui exigent des circuits d'amplification spéciaux et une source d'énergie externe. Cela pourrait constituer un handicap important en particulier pour des applications pour lesquelles l'accent est mis sur l'autonomie et la capacité d'intégration du système.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les configurations les plus simples (qu'on a déjà vus) impliquent un apport d'énergie électrique, utilisée pour charger le polymère, le transfert étant unidirectionnel. Cependant, une simple batterie ne peut pas être utilisée directement, car normalement il y a besoin des tensions élevées, ce qui nécessite l'utilisation des circuits d'amplification. Un autre problème est le fait que la batterie se décharge dans le temps et une fois qu'elle perd toute son énergie le système cesse de fonctionner. Même si il y a quelques configurations simples qui sont censées conserver l'énergie de la batterie par réinjection d'une certaine quantité d'énergie dans le polymère([169], le circuit série par exemple), la décharge continue à se produire en raison de différentes pertes. La nécessité d'un approvisionnement énergétique constitue en soi un inconvénient important pour un système de récupération d'énergie parce qu'il compromet sa capacité d'être autonome.

Des configurations utilisant des convertisseurs d'énergie spéciaux (comme des convertisseurs DC-DC) sont censés être a priori plus efficaces. Si ces convertisseurs sont bidirectionnels, l'énergie peut être transférée à volonté du polymère vers la charge et vice-versa [193]. En outre, ils pourraient être utilisés dans des situations où le transfert d'énergie doit être synchronisés ou contrôlée, par exemple dans le cas où les excitations mécaniques varient dans le temps. Ils sont par contre plus complexes car ils utilisent des interrupteurs qui doivent être contrôlés et des bobines ou transformateurs qui pourraient être difficiles à intégrer. En fait, des convertisseurs utilisant de condensateurs commutés (donc sans éléments inductif) pourraient également être utilisés pour réinjecter de l'énergie électrique, évitant ainsi les problèmes énumérés ci-dessus. Dans [194] et [195], les auteurs décrivent un tel circuit fait seulement avec des condensateurs et des diodes (qui plus tard ont été remplacés par des films de polymère et des couches revêtues d'un matériau piézo-résistif qui agissaient comme des interrupteurs fermés ou ouverts en fonction de la déformation). Une telle configuration leur a permis de charger un polymère diélectrique, pré-chargé initialement à dix volts, jusqu'à atteindre une tension de plus de 3 kV, après quelques centaines de cycles. Ainsi, seulement une petite quantité d'énergie a été nécessaire pour charger initialement le polymère et commencer la conversion électromécanique.

Une autre méthode consiste à utiliser des électrets [196–198]. Cela semble être une solution intéressante, car un champ électrique permanent signifierait un système totalement autonome et un degré plus élevé d'intégration pourrait être atteint. Les électrets sont des matériaux qui sont polarisés de façon permanente ou électriquement chargés et peuvent donc créer un champ électrique dans l'espace qui les entoure. Ils semblent être l'équivalent des aimants permanents, mais d'un point de vue électrostatique. Cependant, les électrets présentent un défaut important, des charges électriques externes pourrait facilement annuler leur champ électrique, c'est pourquoi l'analogie entre un électret et un aimant n'est pas tout à fait exacte. Le champ électrostatique d'un électret attire des particules électriquement chargées (ce qui n'arrive pas à un aimant) et cela est la raison pour laquelle il ne peut pas être directement ou indirectement (au cas où le milieu intermédiaire présente une certaine conductivité) connecté à un matériau qui contient des charges libres. En raison de ce problème, l'électret doit être placé à proximité du polymère, mais en même temps le contact avec des électrodes doit être évité (un bon exemple de structures possibles est décrit dans [199]). Cela signifie par exemple qu'il pourrait être difficile d'utiliser des électrets avec des générateurs présentant une structure multicouches.

Il y a eu déjà des tentatives de combiner un générateur électrostatique avec un système piézo-électrique afin d'améliorer la quantité d'énergie récupérée [200]. Dans cet article, les auteurs utilisent un système hybride piézoélectrique-électrostatique intégrée dans une chaussure. L'élément électrostatique étant fabriqué avec de la mousse en polymère (probablement du polyuréthane) et relié à la sortie redressée d'un élément piézoélectrique (films empilés de PVDF), il a été conclu qu'il augmentait l'énergie récupérée. Un autre système électrostatique (un microsystème) alimenté par des éléments piézoélectriques, récupérant de l'énergie électrique des vibrations, a été proposé dans [201] et [202]. Les auteurs des deux articles affirmaient qu'une telle approche était originale, mais il

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

semble qu'une analyse détaillée du transfert d'énergie et de la performance pour de tels systèmes n'a pas été faite.

Dans cette partie on montre comment l'association des éléments piézoélectriques et polymères diélectriques, pourrait être réalisée pour être utilisée dans des systèmes de récupération d'énergie.

3.4.2 Configurations électriques possibles

L'idée la plus naïve qui pourrait être exploitée serait de transférer des charges électriques, lorsque l'élément piézoélectrique est polarisé dû aux contraintes appliquées, par l'intermédiaire d'un interrupteur, vers le polymère qui lui se trouve à l'état tendu et présente une capacité maximale. Ensuite, le polymère peut être relaxé et aussi par l'intermédiaire d'un autre interrupteur toute l'énergie électrique stockée pourrait être extraite par une petite résistance (Figure 74).

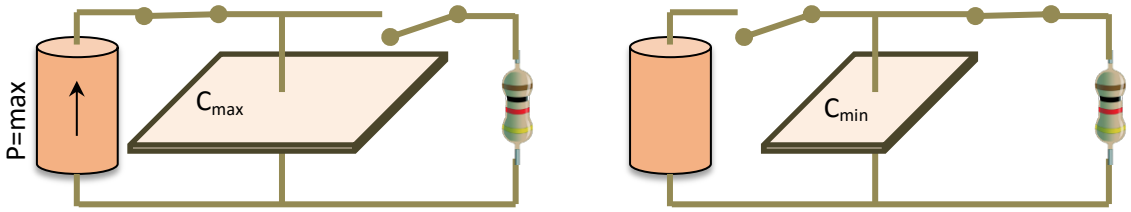


Figure 74 : Configuration hybride possible

P_{out}/P_{piezo}	V_{out}	I_{out}
$\frac{C_{max}}{C_{min}} \frac{1}{\left(1+\frac{C_0}{C_{max}}\right)}$	$\frac{1}{2}\frac{C_{max}Q_0}{C_{min}C_0}$	$\frac{Q_0}{2T_{poly}} \frac{1}{\left(1+\frac{C_0}{C_{max}}\right)}$

Tableau 13 : Paramètres optimaux de la configuration à transfert direct et unidirectionnel de l'énergie

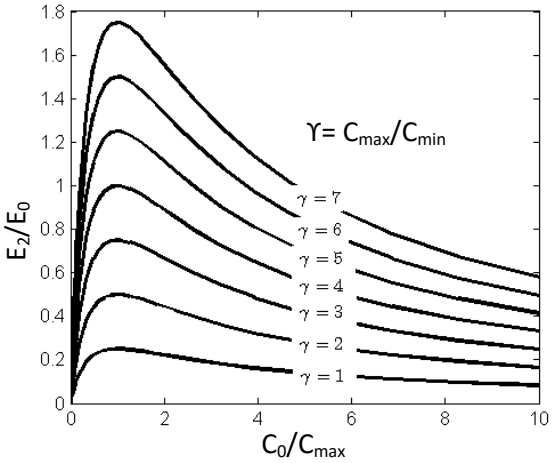


Figure 75 : Energie récupérée en sortie du système normalisée en fonction de l'énergie disponible avec l'élément piézoélectrique seul en fonction du rapport des capacités

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

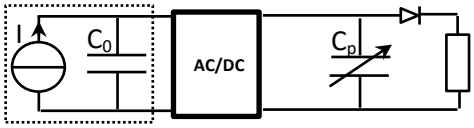


Figure 76 : Configuration hybride avec transfert d'énergie directe et unidirectionnel

Bien évidement avec une telle approche la charge électrique aux bornes de l'élément piézoélectrique change de signe ce qui veut dire que la puissance extraite varie d'une manière alternative.

Supposons que les deux éléments sont excités en régime quasi-statique, Q_0 c'est la charge électrique équivalente due à la polarisation de l'élément piézoélectrique en circuit ouvert, $C_{min/max}$ c'est la capacité minimale/maximale du polymère, C_0 : la capacité de l'élément piézoélectrique. L'énergie électrostatique maximale présente dans l'élément piézoélectrique est donnée par :

$$(61)\ E_0 = \frac{Q_0^2}{2C_0}$$

Si on note E_1 l'énergie qui est transmise au polymère et E_2 l'énergie qui est extraite alors on peut montrer :

$$(62)\ E_1 = \left(\frac{1}{1+\frac{C_0}{C_{max}}}\right)^2 \cdot \frac{C_0}{C_{max}} \cdot E_0 \ \text{❖}\ E_2 = \left(\frac{1}{1+\frac{C_0}{C_{max}}}\right)^2 \cdot \frac{C_0}{C_{min}} \cdot E_0$$

On voit donc qu'une telle approche peut fonctionner que si le facteur d'amplification est assez élevé. Comme on peut le voir (Figure 75) ce type de circuit hybride n'apporte pas un gain d'énergie que si la variation de la capacité du polymère est importante. En utilisant un polymère, il est difficile d'obtenir de telles variations. Comme il a été vu, les variations de capacité les plus importantes sont obtenues en mode bi-axial. La plupart des polymères peuvent subir des étirements assez importants (jusqu'à 36 fois en surface). Pourtant, en pratique pour des cycles de conversion on n'utilise pas des variations aussi élevées [153], même si on a souvent intérêt à préétirer le film [176].

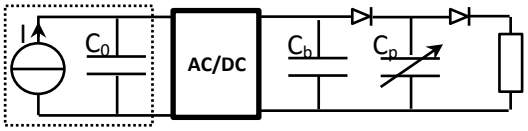


Figure 77 : Configuration unidirectionnelle avec condensateur intermédiaire

L'une de raisons c'est le fait que la tension avec laquelle le polymère est alimenté par la source primaire est normalement déjà assez élevée (de l'ordre de 1 kV), une variation importante de la capacité pourrait alors amener à une amplification de cette tension à plus de quelques dizaines de kV, dans quel cas le transfert des charges électriques pourrait être presqu'impossible de point de vue des composants électroniques. Cette configuration donc ne semble pas être très intéressante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Autre possibilité consiste à accumuler des charges et décharger le polymère que d'une manière partielle. Dans ce cas on peut utiliser des interrupteurs passifs (diodes) ce qui permet de simplifier le circuit. Ainsi, si une synchronisation entre la déformation du polymère et la contrainte appliquée sur l'élément piézoélectrique existe, le circuit représenté dans Figure 74 pourrait être utilisé. Pour assurer une extraction d'énergie pour la tension alternative générée par l'élément piézoélectrique, un pont redresseur à diodes peut être utilisé. Il existe deux configurations possibles [203] à deux et quatre diodes (comme il a été déjà vu). Les deux permettent de transférer la même quantité d'énergie mais le pont à deux diodes permet d'aboutir à une tension deux fois plus élevée pour un courant deux fois plus faible. Si les périodes des excitations de chaque éléments sont les mêmes ($T_{piezo} = T_{poly}$) alors le pont à deux diodes est plus adapté, le pont à quatre diodes pouvant être utilisé dans le cas où l'excitation mécanique du polymère est deux fois plus rapide que celle de l'élément piézoélectrique ($T_{piezo} = 2 \cdot T_{poly}$) même si ce dernier cas semble moins probable. Pour alimenter la charge une seule diode est suffisante car la tension aux bornes du polymère ne change pas de signe. Dans tous les cas pour que le circuit fonctionne il est nécessaire que le niveau de polarisation maximale coïncide dans le temps avec la valeur maximale de la capacité du polymère. La puissance optimale qui peut être extraite (P_{max}) avec un tel circuit peut être comparée avec celle obtenue avec l'élément piézoélectrique seul (avec sortie redressée).

Les expressions du gain en puissance, de la tension et du courant optimaux pour le cas $T_{piezo} = T_{poly}$ en sortie sont donnés dans le Tableau 13. Comme on peut le voir le gain en puissance est proportionnel à la variation de la capacité du polymère. La tension de sortie aussi, par contre le courant est approximativement le même que pour l'élément piézoélectrique seul. On peut remarquer aussi qu'on a intérêt à avoir une capacité du polymère aussi grande que possible par rapport à celle de l'élément piézoélectrique ce qui peut constituer une contrainte importante sur le choix de la structure utilisée. En effet, la plupart des matériaux piézoélectriques présentent des permittivités très élevées par rapport aux polymères diélectriques. Cela veut dire que les structures piézoélectriques sous forme de couches mince semblent peu adaptées pour une telle configuration.

Dans le cas où il n'y a pas de synchronisation entre l'élément piézoélectrique et le polymère ou dans le cas où les fréquences des excitations sont différentes un élément de stockage d'énergie intermédiaire (comme par exemple un condensateur C_b) (Figure 77) peut être utilisé. Le transfert d'énergie entre celui-ci et le polymère peut se faire aussi par une simple diode. Si ce condensateur est assez large pour pouvoir considérer la tension à ses bornes stable on peut encore calculer la puissance optimale sous la forme d'une expression littérale. Comme dans le cas précédent, le gain en puissance par rapport au système piézo-électrique seul est proportionnel à la variation de la capacité du polymère et de nouveau la capacité du polymère doit être grande par rapport à celle de l'élément piézo-électrique, à moins qu'il existe de grandes différences entre les périodes des deux cycles électromécaniques.

Pont redresseur	P_{max}/P_{piezo}	V_{out}	I_{out}
2 diodes	$\frac{C_{max}}{C_{min}} \cdot \frac{1}{1+\frac{C_0 T_{poly}}{C_{max} T_{piezo}}}$	$\frac{1}{2}\frac{C_{max} Q_0}{C_{min} C_0}$	$\frac{Q_0}{2T_{piezo}} \frac{1}{\left(1+\frac{C_0 T_{poly}}{C_{max} T_{piezo}}\right)}$
4 diodes	$\frac{C_{max}}{C_{min}} \cdot \frac{1}{1+4\frac{C_0 T_{poly}}{C_{max} T_{piezo}}}$	$\frac{1}{4}\frac{C_{max} Q_0}{C_{min} C_0}$	$\frac{Q_0}{T_{piezo}} \frac{1}{\left(1+4\frac{C_0 T_{poly}}{C_{max} T_{piezo}}\right)}$

Tableau 14 : Performances optimales pour la configuration à transfert unidirectionnel avec stockage intermédiaire d'énergie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La capacité du Cb doit être choisie de telle sorte que, à chaque transfert de charge électrique, la variation de la tension à ses bornes reste faible. On peut montrer que pour que cela soit vrai il suffit que $C_b >> C_{max}$. Pour voir quelle est l'influence de la capacité Cb du circuit proposé, un circuit avec un pont redresseur à de deux diodes et avec un condensateur (C_{out}) et une résistance (R) reliée à la sortie est simulé en utilisant les paramètres indiqués ci-dessous.

Exemple 1 :

$$I(t) = 1.57 \cdot \sin(10\pi t)\,\mu A;\ C_0 = 25pF;\ C_p(t) = 1.5nF + 0.5 \cdot \sin(2\pi t + \varphi)nF$$
$$C_{out} = 3nF;\ T_{poly} = T_{piezo} = 0.2s;\ R = 17G\Omega;$$

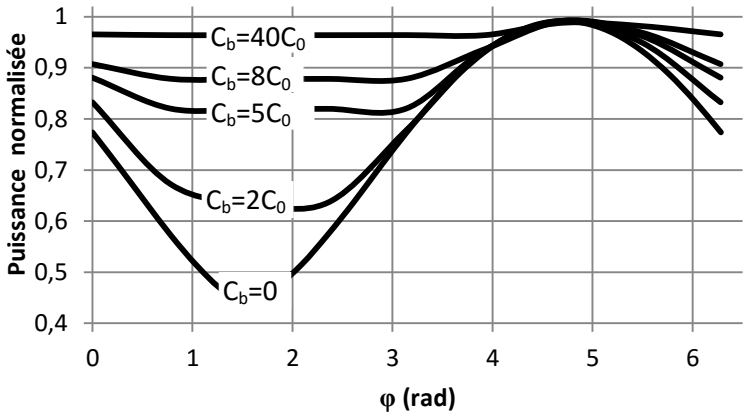


Figure 78 : Variation de la puissance récupérée en fonction du déphasage entre les deux excitations

Les périodes sont considérées les mêmes car dans ce cas l'influence d'un éventuel déphasage doit être le plus important. L'influence de la valeur de la capacité Cb sur la quantité d'énergie récupérée est représentée dans la Figure 78. Comme on peut le voir, il n'y a pas besoin d'utiliser une très grande capacité, dans notre exemple une capacité huit fois celle de l'élément piézo-électrique conduit à l'extraction de plus de 85% de la puissance qui peut être extraite dans un cas idéal. Si aucun condensateur intermédiaire Cb n'est utilisé, la puissance en sortie pourrait être dans le pire des cas, plus de 50% plus petite que dans le cas idéal. Si le déphasage est par contre de $3\pi/2$ aucun condensateur intermédiaire n'est nécessaire, la puissance extraite étant déjà maximale.
Dans cette configuration hybride, il est clair que le polymère joue le rôle d'un amplificateur, en effet l'énergie extraite de l'élément piézo-électrique est multipliée par un facteur proportionnel à la variation de sa capacité électrique. Une condition importante pour que la configuration fonctionne c'est que la capacité électrique du polymère soit assez grande par rapport à celle de l'élément piézoélectrique. Cependant la puissance électrique injectée est celle de l'élément piézo-électrique et dans le cas général, si celle-ci est faible, cela signifie que le polymère peut n'est pas être utilisé à sa pleine capacité.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.4.3 Configurations hybrides avec recyclage des charges électrique

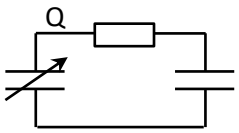


Figure 79 : Circuit préservant la charge électrique en utilisant un condensateur supplémentaire

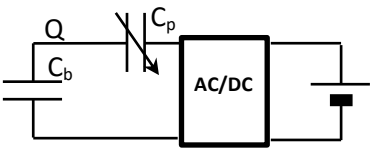


Figure 80 : Circuit préservant la charge électrique utilisant un condensateur supplémentaire et sortie redressée

Comme on l'a déjà dit il existe certaines configurations possibles qui préservent la charge stockée dans le polymère, c'est-à-dire pendant un cycle de conversion, si les pertes sont négligeables, toute la charge extraite est retournée. Un circuit qui utilise une source de tension qui est connectée en série avec le polymère et la charge à alimenter fonctionne ainsi. Une autre possibilité d'avoir un tel fonctionnement, est représenté dans la Figure 79. Pour cela un condensateur supplémentaire monté en série avec le polymère est utilisé. Si une certaine charge électrique (Q) est initialement placée sur les deux, la variation de capacité du polymère peut induire un courant dans le circuit. Il est donc possible de connecter une charge électrique en série qui pourrait extraire l'énergie qui est générée. Un redresseur pourrait également être utilisé si une tension continue en sortie est nécessaire. Le fonctionnement est similaire à celui du circuit à polymère alimenté par une source de tension connectée en série. Si la quantité de charge Q est connue alors la puissance maximale pour une tension redressée, pour chaque type de pont redresseur, peut être déterminée (Tableau 15). L'expression littérale de la capacité C_b optimale peut être déterminée aussi, sauf pour le pont à quatre diodes dans quel cas celle-ci est trop complexe, mais elle peut être calculée de manière numérique. De même manière les puissances maximales obtenues pour chaque type de pont redresseur et avec un condensateur C_b optimal peuvent être déterminées (Figure 81).

Pont	P_{max}	V_{out}	R_{opt}
2 diodes +	$\frac{Q^2(C_{max}-C_{min})^2C_b}{4T_{poly}C_{max}(C_b+C_{min})^2(C_b+C_{max})}$	$\frac{Q\,(C_{max}-C_{min})}{2C_{max}(C_b+C_{min})}$	$\frac{(C_{max}+C_b)T_{poly}}{C_bC_{max}}$
2 diodes -	$\frac{Q^2(C_{max}-C_{min})^2C_b}{4T_{poly}C_{min}(C_b+C_{max})^2(C_b+C_{min})}$	$-\frac{Q\,(C_{max}-C_{min})}{2C_{min}(C_b+C_{max})}$	$\frac{(C_{min}+C_b)T_{poly}}{C_bC_{min}}$
4 diodes	$\frac{Q^2(C_{max}-C_{min})^2C_b}{2T_{poly}(C_b+C_{min})(C_b+C_{max})(C_b(C_{min}+C_{max})+2C_{min}C_{max})}$	$\frac{Q\,(C_{max}-C_{min})}{2[C_b(C_{min}+C_{max})+2C_{min}C_{max}]}$	$\frac{(C_{max}+C_b)(C_{max}+C_b)T_{poly}}{[C_b(C_{min}+C_{max})+2C_{min}C_{max}]}$

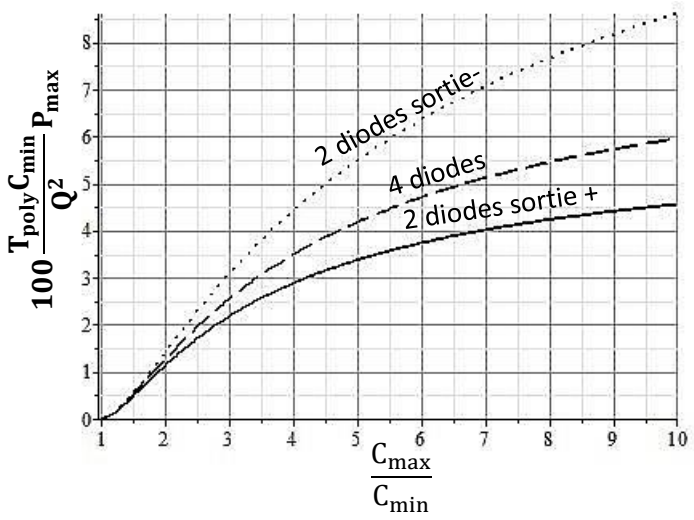
Tableau 15 : Puissance et charge optimale pour le circuit à recyclage des charges et avec condensateur série

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pont	C_b optimal value
2 diodes +	$\frac{1}{4}\sqrt{C_{max}^2 + 8C_{min}C_{max}} - \frac{1}{4}C_{max}$
2 diodes -	$\frac{1}{4}\sqrt{C_{max}^2 + 8C_{min}C_{max}} - \frac{1}{4}C_{min}$

Tableau 16 : Valeur optimale de C_b en fonction du pont redresseur utilisé

Comme on peut le voir la puissance maximale est obtenue avec un redresseur à deux diodes, inversé. La différence devient plus importante quand la variation de la capacité du polymère augmente. La valeur optimale de Cb dépend aussi du rapport Cmax / Cmin mais heureusement elle ne varie pas beaucoup (Figure 84).



T_{poly} : Période de l'excitation mécanique du polymère
$C_{min/max}$: Capacité électrique minimale/maximale du polymère
Q : charge électrique totale placée sur le polymère et le condensateur additionnel
P_{max} : Puissance maximale qui peut être obtenue en sortie

Figure 81 : Puissance maximale normalisée, obtenue avec les trois types de ponts redresseurs en fonction de la variation de la capacité du polymère

Jusqu'à maintenant, nous avons supposé que la charge électrique Q était imposée. Dans un circuit hybride cette charge pourrait être fournie par un élément piézoélectrique. Le transfert peut être effectué à nouveau en utilisant un redresseur (Figure 82). Le condensateur Cb et le polymère pourraient être inter-changés mais cela conduit normalement à un fonctionnement identique. L'inconvénient principal de ce circuit c'est le problème de transfert d'énergie de l'élément piézoélectrique vers C_b et le polymère. En effet, comme on vient de le voir la valeur optimale de C_b est assez proche de la capacité du polymère ce qui veut dire que pendant la déformation du polymère la tension aux bornes de C_b peut varier de manière importante et donc la quantité de charges Q pourrait varier dans le temps. Le circuit fonctionne bien lorsque comme dans le cas des configurations à transfert unidirectionnel d'énergie une synchronisation entre les cycles existe, cela correspond au cas où la valeur maximale de la capacité du polymère coïncide dans le temps avec un

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

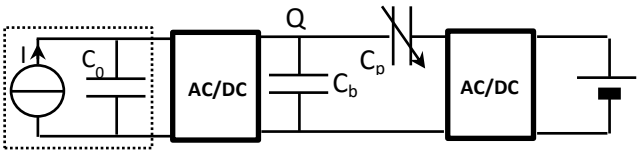


Figure 82 : Circuit hybride avec conservation des charges électriques

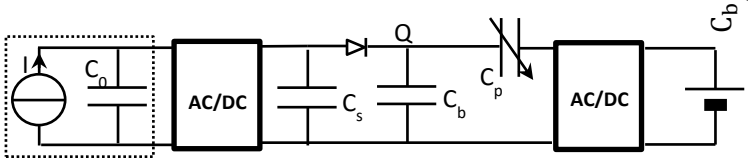


Figure 83 : Structure hybride à transfert bidirectionnel avec capacité de stockage intermédiaire

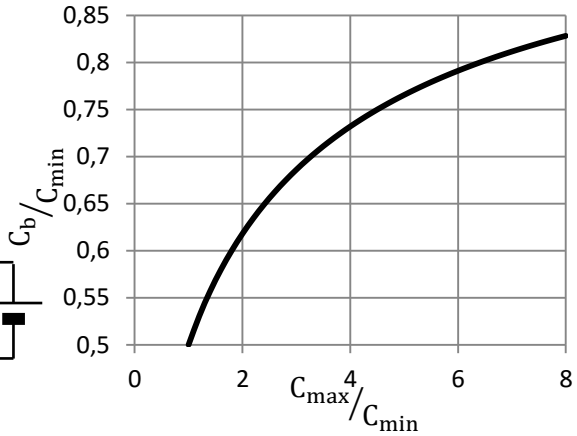


Figure 84 : Valeur optimale de C_b normalisée pour une variation de la capacité du polymère donnée (pont 2 diodes -)

extrémum de la polarisation dans l'élément piézoélectrique. Si on n'a pas de synchronisation alors un condensateur intermédiaire de stockage peut être utilisé (Figure 83).

En absence de pertes la charge Q qui est ramenée sur le polymère et le condensateur C_b est égale à:

(63) $Q = V_0 \cdot (C_{max} + C_b)$, V_0: tension en circuit ouvert en sortie du pont redresseur

Mais en même temps il faudrait mentionner que les pertes (surtout les courants de fuite dans le polymère et dans les interrupteurs), même si normalement faibles, pourraient avoir une influence non-négligeable sur la quantité des charges électriques, finale. Pour l'estimer les approximations suivantes sont utiles. On peut supposer que la résistivité et la permittivité électrique du polymère ne varient que très peu avec la déformation, cela implique alors :

$$(64)\ \mathbf{R_p(t) \cdot C(t) = \tau}$$

Et aussi que le courant de fuite des interrupteurs est constant (I_d), ce qui implique :

$$(65)\ Q = \frac{I_d T(C_0+C_b+C_{max})+Q_0(C_b+C_{max})}{e^{-\frac{T}{\tau}}(C_0-C_b-C_{max})+(C_b+C_{max})}$$

Autre problème c'est le régime transitoire, en effet pour les deux types de configurations proposées, pour que la récupération d'énergie soit efficace, il faut que le polymère se charge et cela peut nécessiter une durée de plusieurs cycles même en absence des pertes. En effet, la récupération d'énergie avec des polymères diélectrique nécessite une injection d'énergie électrique importante. C'est pour cette raison que l'énergie produite par l'élément piézoélectrique doit être petit à petit accumulée dans le polymère (surtout pour la configuration avec recyclage de charges électriques, connexion série). C'est d'ailleurs pour cela que les différentes pertes qui contribue à la décharge du polymère peuvent avoir une influence très importante sur le fonctionnement du système.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a mis en évidence différentes configurations possibles des systèmes de récupération d'énergie, utilisant des matériaux piézoélectriques ou polymères diélectriques. On a proposé aussi quelques configurations hybrides simples qui utilisent les deux à la fois et on a décrit le fonctionnement de chacun. On a vu de plus quelles étaient les meilleures méthodes pour exciter électriquement ou mécaniquement les éléments électroactifs.

Deux morphologies hybrides simples ont été identifiées. Dans la première toute la charge électrique qui est fournie en sortie provient de l'élément piézoélectrique et le polymère est déchargé en continu. Dans la deuxième configuration la charge électrique est périodiquement réinjectée dans le polymère et l'élément piézoélectrique sert (en régime établi) juste pour compenser les différentes pertes électriques. Dans les deux cas l'utilisation d'un élément piézoélectrique qui produit peu d'énergie peut nécessiter une durée de temps importante pour que le polymère se charge d'une manière optimale.

Lorsque le transfert d'énergie est effectué avec des circuits simples on a intérêt à choisir un élément piézoélectrique de faible capacité en comparaison avec celle du film polymère et qui produit une tension élevée. Une attention particulière doit être accordée à l'utilisation des interrupteurs pour éviter différentes pertes.

Les résultats établis dans ce chapitre doivent nous permettre dans la suite de ce travail de pouvoir rapidement dimensionner un système de récupération d'énergie simple ou hybride comportant des polymères et éléments piézoélectriques.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 4. Travail expérimental sur la récupération d'énergie avec des matériaux électroactifs

Dans ce chapitre on se propose de valider de manière expérimentale les résultats trouvés dans les chapitres précédents sur la récupération d'énergie. Tout d'abord on fait la caractérisation des matériaux utilisés, ensuite différents systèmes de récupération d'énergie sont conçus et leur performance est évaluée et comparée aux résultats théoriques. On réalise aussi des systèmes de récupération d'énergie hybrides (comportant des éléments piézoélectriques et des polymères diélectriques) et ainsi on prouve de manière expérimentale leur utilité.

4.1 Caractérisation des matériaux

4.1.1 Polymères diélectriques

En tant que polymères diélectriques les matériaux suivants ont été utilisés : du polyuréthane (PU), silicone, acrylique, latex et du terpolymère (P(VDF-TrFE-CTFE)).

Pour le travail de cette thèse un seul type de polyuréthane PU75A (Estane X-4977 NAT 039) a été utilisé. Lors de travaux antérieures [204] il a été montré que d'autres types de polyuréthane ayant une rigidité plus importante (comme l'Estane 58888 NAT 021 (PU88A) et l'Estane ETE60DT3 NAT 022 (PU60D)) présentaient des permittivités et phénomènes de saturation similaires mais étaient plus rigides. Normalement dans de telles conditions les polymères qui sont plus souples présentent un meilleur couplage électromécanique comme il a été vu dans la partie théorique dédiée à ce sujet. Les films de PU ont été fabriqués en utilisant la méthode décrite dans l'annexe B.1.

Les films en silicone (Elastosil) ont été offerts[4] par l'entreprise Wacker spécialisée dans la production des polymères en silicone et différents produits secondaires fabriqués avec ce matériau. On a pu tester des films de 20µm, 50µm, 100µm, 200µm et 400µm d'épaisseur.

Les films d'acrylique ont été obtenus à partir des mousses adhésives commercialisées par l'entreprise 3M (VHB4905, VHB4910) de 250µm et 1mm d'épaisseur et 2.5cm de largeur (1 pouce).

Les autres polymères ont été achetés.

[4] Les films ont été fournis gratuitement par les représentants de l'entreprise Wacker dont on est très reconnaissant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

4.1.1.1 Propriétés élastiques

Pour la caractérisation mécanique des polymères les montages décrits dans l'annexe (A.2) ont été utilisés. Tous les polymères sauf le terpolymère (qui présente un comportement plastique au-dessus d'environ 5% de déformation) peuvent subir des déformations importantes (> 100%) et présentent un comportement hyperélastique. Dans un tel cas, comme il a été vu, plusieurs modèles peuvent être utilisés pour leur caractérisation mécanique.

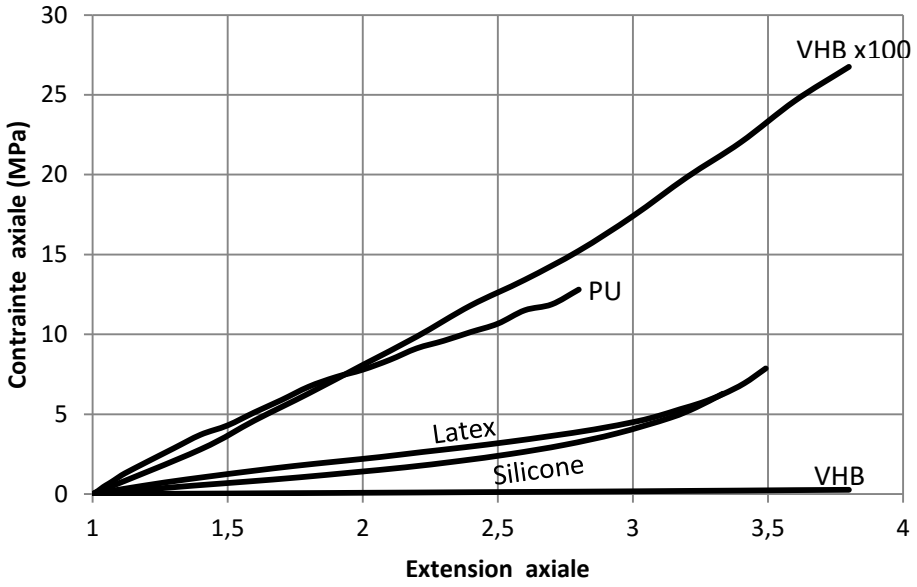


Figure 85 : Contrainte axiale (de Cauchy) en fonction de l'extension axiale du film déformé de manière uniaxiale (en régime quasi-statique)

Dans la Figure 85 on donne les courbes caractéristiques de la contrainte (de Cauchy) axiale en fonction de l'extension (axiale) pour une excitation quasi-statique (le terpolymère ne peut qu'être utilisé pour de faibles déformations). Comme on peut le voir parmi tous les polymères l'acrylique est le plus souple. En même temps en effectuant les mesures on a pu se convaincre du fait qu'il est très compliqué de faire en sorte qu'elles restent précises. En effet, lorsque les déformations deviennent importantes le film voit une variation de sa section et peut glisser entre les mors qui le maintien en place. Un autre phénomène présent c'est ce qu'on appelle l'effet Mullin [205,206] qui fait que le comportement élastique d'un polymère varie dans le temps mais se stabilise lors d'un fonctionnement cyclique. Finalement, il faut mentionner qu'un cycle de déformation est pratiquement toujours accompagné d'une hystérésis soit à cause du comportement viscoélastique soit à cause d'autres facteurs (comme par exemple la cristallisation induite par la déformation [207]).

Pour chaque polymère il existe une limite de déformation à partir de laquelle soit le comportement devient plastique soit le film est endommagé (Tableau 17).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Polymère	Déformation uniaxiale maximale réversible	Déformation biaxiale maximale réversible
Latex	600%–700%	250%–300%
Silicone	300%–350%	100%–150%
PU	250%–300%	150%–200%
VHB	500%–550%	450%–500%
Terpolymère	5%	–

Tableau 17 : Déformation uniaxiale et biaxiale maximale réversible de différents polymères

Comme on peut le voir (Figure 85) en régime quasi-statique, la relation entre la contrainte axiale de Cauchy et l'extension peut encore être supposée linéaire pour des déformations modérées, dans quel cas un module d'Young peut être défini (le coefficient de Poisson est automatiquement égal à 0.5, car on considère les polymères incompressibles comme il a été déjà vu). Cela veut dire en fait qu'on peut ne pas tenir compte des non-linéarités matérielles, seulement géométriques. Cette approche coïncide avec le modèle hyperélastique Neo-Hookean.

Polymère	Module d'Young (grandes déformations)	Module d'Young (faibles déformations)
Latex	2.1 MPa (0–200%)	1.5–1.8 MPa (0–5%)
Silicone	1.6 MPa (0–150%)	1 MPa (0–5%)
PU	7.2 MPa (0–150%)	9 MPa (0–5%)
VHB	96 kPa (0–400%)	–
Terpolymère	–	200–220 MPa (0–1%)

Tableau 18 : Module d'Young des polymères défini pour un régime de grandes et faibles déformations

Bien évidement on peut aussi définir un module d'Young pour un régime à faibles déformations dans quel cas, en général, il peut y avoir aussi l'influence de la pré-déformation qui doit être prise en compte. Dans le Tableau 18 on donne les modules d'Young équivalents calculés à partir des mesures effectuées, pour une pré-déformation nulle, un régime de faibles et grandes déformations. Comme on peut le voir les valeurs pour les deux régimes différent un peu ce qui est logique car un modèle appliqué pour un régime ne doit pas être obligatoirement adapté pour un autre. La même chose peut être observée pour la modélisation d'un comportement hyperélastique, les paramètres du modèle dépendent de l'intervalle de déformations, choisie pour l'optimisation (Figure 87).

Le terpolymère ne peut subir que de faibles déformations alors que l'acrylique présente un comportement un peu spécial (très visqueux) comme on le montrera plus bas.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

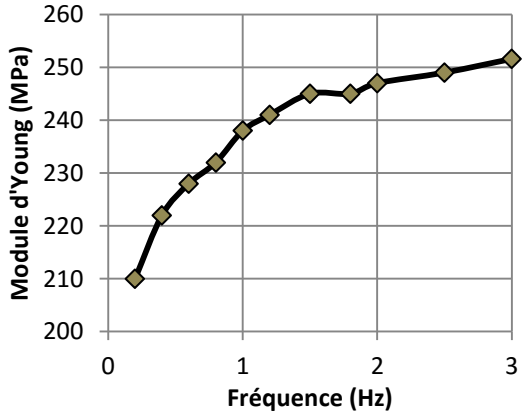


Figure 86 : Evolution du module d'Young du Terpolymère en fonction de la fréquence d'excitation (déformation = 1%)

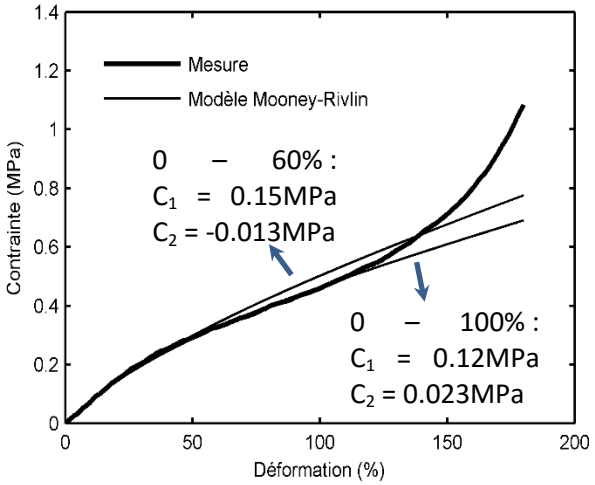


Figure 87 : Modélisation du comportement hyperélastique du silicone en utilisant le modèle de Mooney-Rivlin optimisé pour deux intervalles de déformations différentes

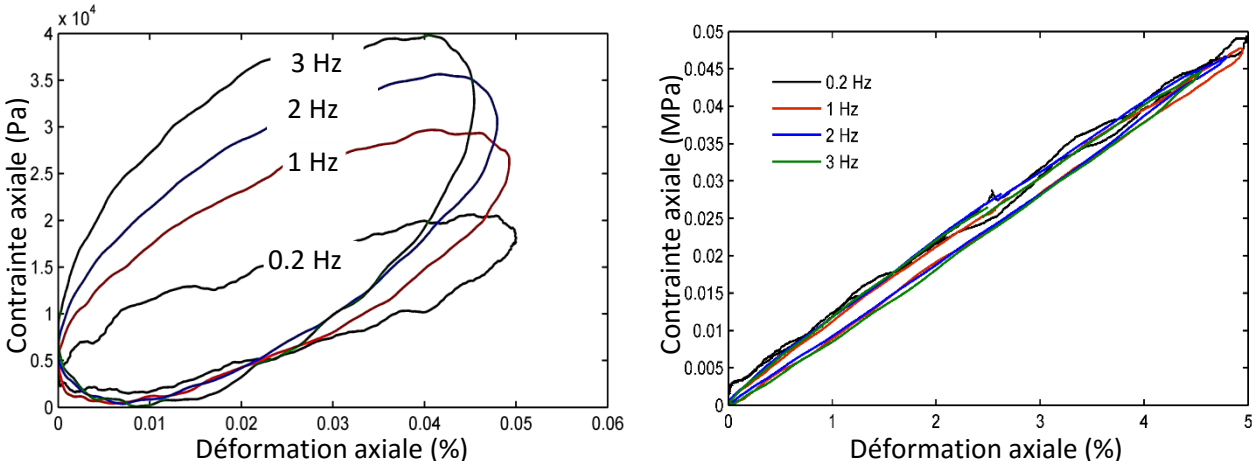


Figure 88 : Réponse de la contrainte à une déformation imposée de 5% pour un film en acrylique (1 mm en épaisseur, 5 mm en largeur préétiré 2 fois la longueur initiale) pour différentes fréquences (gauche) et la même chose pour un film en silicone (400µm en épaisseur, 1 cm en largeur) (droite)

Tous les polymères présentent en fait des hystérésis lors des cycles mécaniques mais normalement celles-ci ne sont pas très importantes et dans une première approximation elles pourraient être négligées (comme il a été observé lors de mesures). Toutefois, l'acrylique est différents des autres polymères par le fait que son comportement visqueux est très marqué. Le matériau présente un certain temps de réponse qui fait que lors des extensions rapides d'un film il faut exercer des forces plus importantes pour une déformation donnée ce qui fait que le matériau semble être plus rigide. Inversement lorsqu'on relâche un film tendu, souvent il peut arriver qu'il n'ait pas le temps nécessaire pour reprendre sa forme initiale ce qui fait que la déformation présente une variation plus faible que celle qu'il pourrait y avoir dans le cas idéal. Pour la récupération d'énergie cela veut dire qu'on injecte plus d'énergie mécanique ou qu'on obtient une variation de capacité plus faible (que dans un cas idéal). Pour solutionner le problème de la perte de tension mécanique il est souvent pratique d'utiliser des films pré-déformés [79,208].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme on peut le voir (Figure 88) le comportement d'un film acrylique est fortement affecté par de phénomènes visqueux même à des fréquences relativement faibles (0.2 Hz) pour un déplacement d'environs 1 mm et un film de 4 cm de longueur. Comme le montrent les mesures dans un tel cas on peut avoir un rapport de presque deux entre la contrainte lorsque le film est en train d'être tendu et relaxé. La même expérience a été répétée avec un film en silicone, et on peut se convaincre que le module d'Young reste à peu près constant et l'hystérésis n'est pas très importante (autour de quelques hertz). Par contre pour l'acrylique pour des déformations de quelques pourcents le temps de réponse (à 75% par rapport à l'équilibre) est estimé à environ 10s.

On a en principe une augmentation du module d'Young apparent avec la fréquence mais comme il a été vérifié pour le silicone, le latex et le PU cette variation peut être négligée. Pourtant pour le terpolymère on peut observer quand même une variation substantielle (≈ 20 %) du module d'Young dans la gamme des fréquences qui nous intéresse (Figure 86).

4.1.1.2 Propriétés électriques

Un de paramètres les plus intéressants pour les matériaux électrostrictifs c'est leur permittivité diélectrique. Il faut pourtant faire attention au fait que dans le cas général il ne s'agit pas d'une grandeur constante. En effet, dans un film polymère on peut avoir des phénomènes assez complexes qui peuvent amener par exemple à une dépendance non-linéaire de la polarisation en fonction du champ électrique appliqué. De plus il peut y avoir aussi des courants de fuite, des courants ioniques et des phénomènes transitoires (dépendance de la polarisation de la vitesse de variation du champ électrique appliqué) qui peuvent jouer un rôle important.

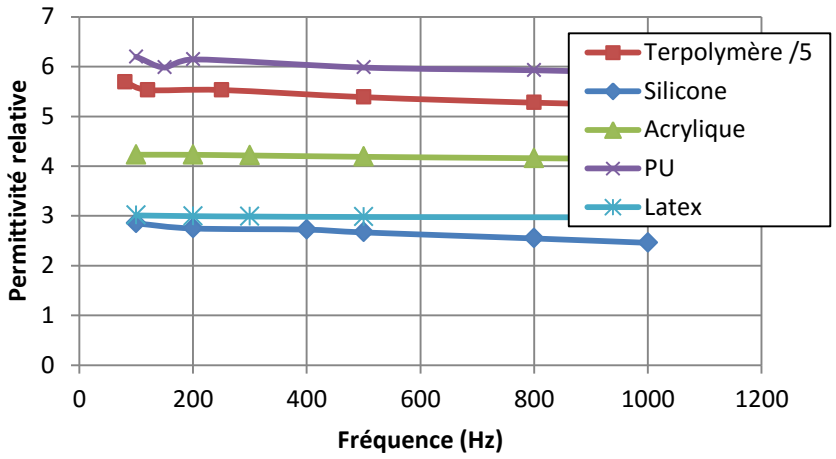


Figure 89 : Permittivité électrique relative de différents polymères en fonction de la fréquence (à faible champ électrique)

Comme on peut le voir (Figure 89) la dépendance de la permittivité avec la fréquence, du moins pour des fréquences pas très faibles, n'est pas très marquée. Pour le silicone, le latex et l'acrylique il a été déterminé que la polarisation varie de manière linéaire avec le champ électrique même pour des champs élevés ce qui n'est pas par contre le cas pour le PU et le Terpolymère. Pour les derniers la polarisation présente des saturations à partir d'un certain champ électrique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

On peut constater aussi que les pertes dues aux décharges dans les polymères sont très faibles pour le silicone, le latex et l'acrylique et beaucoup plus importants pour le PU et le terpolymère. Pour les

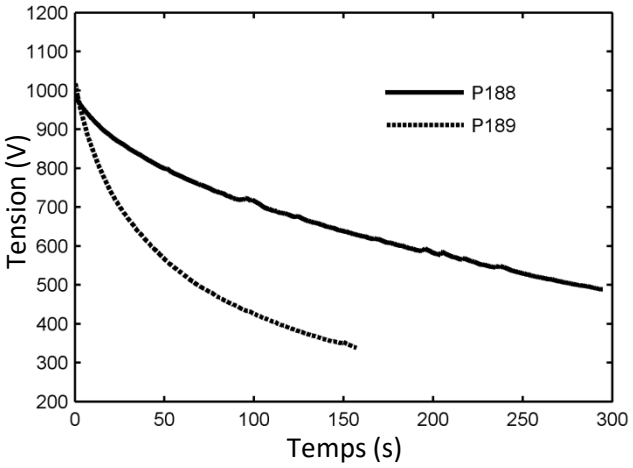


Figure 91 : Décharge statique des éléments piézoélectriques sous l'action d'une force constante (briquets P189, P188)

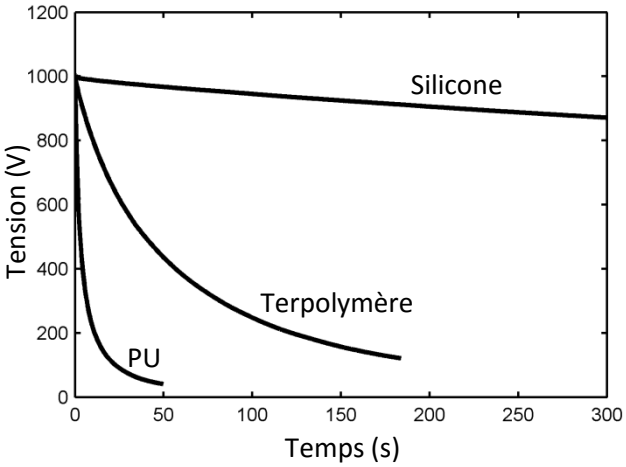


Figure 90 : Décharge en circuit ouvert de différents polymères (Terpolymère : 75µm, ø = 1.5 cm| PU : 85 µm, ø = 1.5 cm| Silicone : 100µm, , ø = 3 cm)

premiers celles-ci sont si faibles qu'il est impossible de pouvoir les mesurer directement. La méthode utilisée consiste à charger un film avec une tension donnée et ensuite observer la variation de celle-ci dans le temps en utilisant un voltmètre de très grande impédance d'entrée (TREK 820). Bien évidement même dans ce cas on ne peut pas garantir qu'il s'agit de vrais courants de fuite dans le polymère et pas des décharges dans le voltmètre lui-même ou dans (l'air, plastique de la platine d'expérimentation etc.) mais cela permet néanmoins de faire une comparaison entre différents matériaux.

Comme on peut se convaincre, le silicone présente des courants de fuites très faibles (Figure 91). Un comportement similaire est observé pour le latex et l'acrylique. Le PU est le plus affecté de ce point de vue, sa décharge étant très rapide. Les céramiques piézoélectriques aussi présentent une résistivité très élevée (Figure 90). Cela est surtout vrai pour des couches minces piézoélectriques pour lesquelles la tension n'est pas très élevée et la capacité pas très faible (en comparaison avec celle des éléments cylindriques). Par exemple pour un buzzer piézoélectrique la chute de tension en circuit (tension initiale de 100V, capacité de 75nF) ouvert pendant 5 min est de seulement quelques pourcents. Pourtant pour des champs électriques élevés le comportement n'est plus ohmique pour aucun des matériaux, ce qui rend plus compliquée la modélisation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

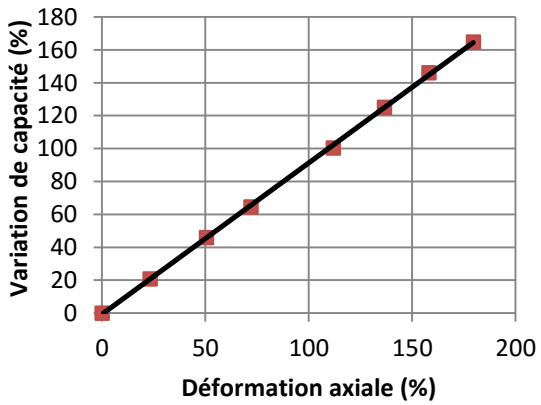


Figure 92 : Variation de la capacité d'un film en silicone soumis à une déformation uniaxiale

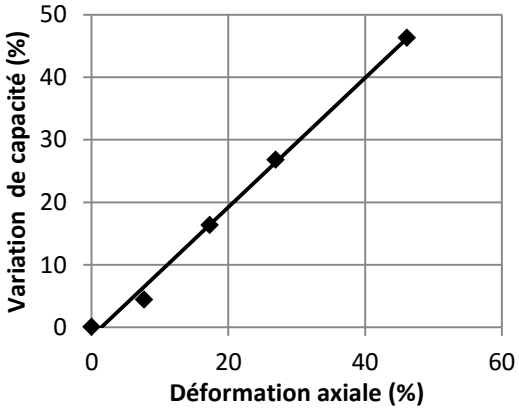


Figure 93 : Variation de la capacité d'un film en PU soumis à une déformation uniaxiale

La permittivité diélectrique des polymères pourrait dépendre normalement de l'état de déformation mais les mesures de capacité de différents films en silicone, latex, acrylique et PU ont montré que la variation de celle-ci est assez faible pour pouvoir être négligée (Figure 92). Cela confirme aussi que la variation de la capacité dans un tel mode (déformation uniaxiale) varie linéairement avec la déformation. Le phénomène d'électrostriction dans le sens de la dépendance de la permittivité avec la déformation est donc négligeable. Pour des champs électriques modérés la résistivité pourrait aussi être considérée indépendante de l'état de déformation (Figure 94).

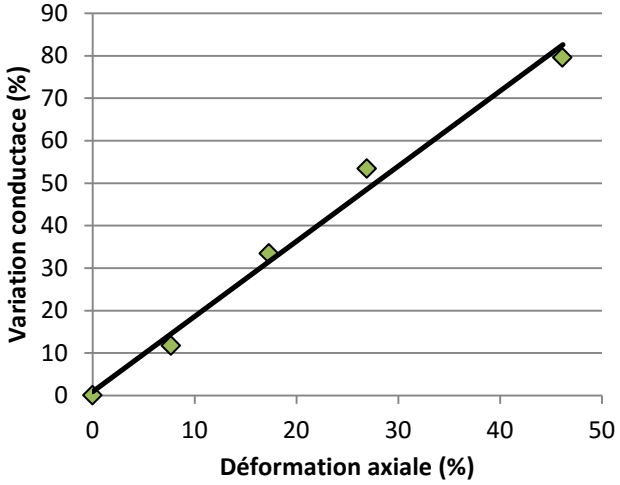


Figure 94 : Variation de la conductance d'un film de PU avec la déformation axiale

Autre paramètre important pour n'importe quel polymère électroactif c'est le champ de claquage. En effet actuellement pour l'actionnement tout comme pour la récupération d'énergie un champ électrique élevée est nécessaire pour obtenir un bon couplage électromécanique (contraintes élevées/ énergie électrique importante). Il s'agit d'une caractéristique qui dépend de beaucoup de paramètres comme la qualité du film ainsi que son état de déformation, l'épaisseur etc. Dans le Tableau 19 des mesures ont été faites en utilisant de la graisse conductrice et sans prendre en considération l'impact possible de l'instabilité électromécanique.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Polymère	Latex	Silicone	Acrylique	PU	Terpolymère
Champ de claquage (MV/m)	16–50	86	30–40	90–110	60–80
Épaisseur	100µm	100µm	250µm	50–60µm	40µm

Tableau 19 : Champ de claquage de différents polymères

4.1.2 Electrodes

Une importance particulière doit être accordée aux matériaux utilisés pour la fabrication des électrodes pour les structures comportant des polymères diélectriques. En effet, il a été déjà montré que ceux-ci peuvent avoir un impact non-négligeable sur le fonctionnement. Lors du travail actuel on a utilisé en tant qu'électrode de l'or dispersé par vaporisation, de la graisse conductrice de carbone, de la poudre de graphite et du polymère silicone conducteur à contenant des particules de carbone. Il est intéressant de faire une description succincte de chaque technique et type d'électrode.

4.1.2.3 Graisses conductrices

La graisse conductrice peut être utilisée avec n'importe quel polymère. Il existe plusieurs variétés constituées de l'huile de silicone et un autre composant conducteur : particules de carbone, d'argent, de cuivre etc.

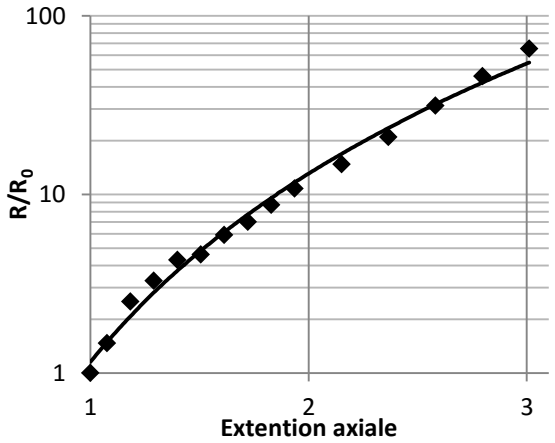


Figure 95 : Variation de la résistance normalisée de l'électrode en fonction de la déformation (pour un film utilisant de la graisse conductrice)

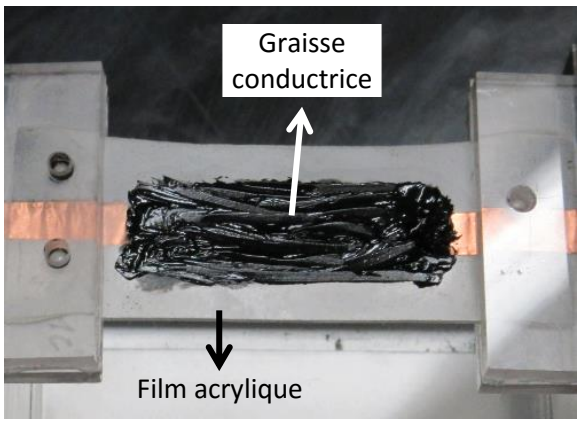


Figure 96 : Film polymère avec des électrodes en graisse de carbone

Elles peuvent être utilisées pour de faibles ou grandes déformations. L'application peut se faire manuellement avec un pinceau et un masque. Bien évidemment l'épaisseur ne peut pas être contrôlée avec une telle technique. Le principal inconvénient des graisses conductrices est leur état pâteux car après application il n'y a pas de solidification. Il est ainsi très difficile d'appliquer la graisse sur une zone bien précise (Figure 96). Autre problème c'est le fait qu'avec le temps et à cause des déformations la graisse a tendance à s'accumuler sur certains endroits ce qui peut affecter l'homogénéité de l'électrode et sa conductivité. Pour d'autres polymères (comme le silicone) il a été observé que l'électrode sèche dans le temps même si la graisse est confinée, encore la rendant pas pratique.

De plus, l'utilisation de la graisse conductrice ne convient pas si on veut utiliser le polymère dans une structure multicouches (en actionnement) car dans ce cas il est obligatoire que l'électrode soit solide sinon le polymère et le substrat risquent de glisser l'un sur l'autre.

Dans la Figure 95 on donne la résistance mesurée entre les extrémités (sur une même face) d'un film couvert d'une couche de graisse conductrice, normalisée par rapport à la résistance à l'état non-déformé (R_0 = 6.5 kΩ), (Figure 96) lorsque celui-ci est soumis à une déformation axiale. Comme on peut le voir la variation de la résistance a une allure exponentielle ce qui paraît tout à fait normal car

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

si on suppose que la graisse à un comportement d'un liquide incompressible lors de son extension uni axiale la section transversale doit varier inversement proportionnellement à l'extension ce qui conduit à l'augmentation observée. Des résistances élevées de plusieurs voire centaines de kΩ sont caractéristiques aux électrodes en graisse conductrice.

Un des avantages de la graisse conductrice est son impact négligeable sur les propriétés élastiques du film, elle peut être donc utilisée pour des mesures des paramètres caractéristiques des polymères.

4.1.2.4 Poudres conductrices

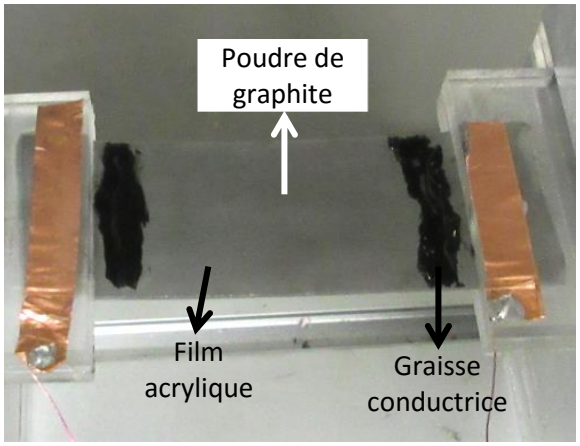


Figure 97 : Film acrylique avec électrode en poudre de graphite

Autre type d'électrode qui peut être utilisé c'est de la poudre de carbone ou graphite. Le seul polymère sur lequel cette technique a été utilisée (lors de cette thèse) c'est le polymère acrylique dû au fait que sa surface est collante (il est utilisé normalement comme bande adhésive). En effet, il est nécessaire que les particules conductrices adhèrent à la surface du film pour pouvoir être maintenues en place. L'application de la poudre est un peu plus délicate à réaliser que celle de la graisse conductrice mais une fois faite l'électrode a l'air d'être plus propre. Pour vérifier le concept, de la poudre de graphite a été utilisée avec un film d'acrylique (Figure 97). Pour améliorer le contact électrique entre l'électrode et les fils métalliques, de la graisse conductrice a été utilisée. Les dimensions de l'électrode à l'état non-déformé étaient de 3.2 cm x 2.5 cm. La résistance mesurée initiale était d'approximativement 12 MΩ mais après une déformation elle a augmenté tellement beaucoup qu'il était impossible de la mesurer avec un analyseur d'impédance (HP 4284 A). Pour voir ce qu'il se passe on a appliqué quelques centaines de volts sur les extrémités de l'électrode et on a mesuré le courant qui la traversait. Une tension sinusoïdale d'amplitude de 400V a révélé un courant d'amplitude de quelque nA et un décalage de presque 90° ce qui indique un comportement capacitif de l'électrode. Donc il ne conduisait presque pas. Mais même si cette technique semble ne pas fonctionner à première vue, on montre plus tard que des électrodes en poudre de carbone peuvent être quand même utilisées pour des actionneurs. Cela montre sans doute que le comportement de l'électrode dépend dans le cas général du champ électrique appliqué. A faible champ les particules conductrices n'échangent pas des charges électriques mais pour un champ plus élevé des transferts des charges électriques deviennent possibles. Mais dans tous les cas la conductivité est très mauvaise.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

4.1.2.5 Silicone conducteur

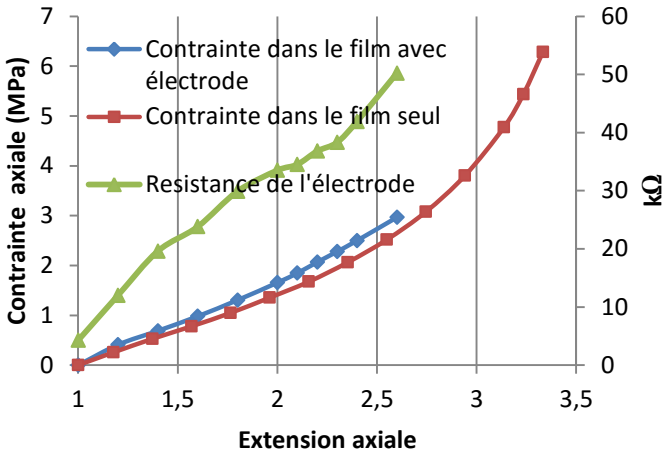


Figure 99 : Influence de la couche de polymère conducteur sur la rigidité du film et variation de la résistance de l'électrode entre ses deux extrémités en fonction de la déformation
(film de silicone 400µm x 1cm x 5cm + électrode en silicone sur une seule face)

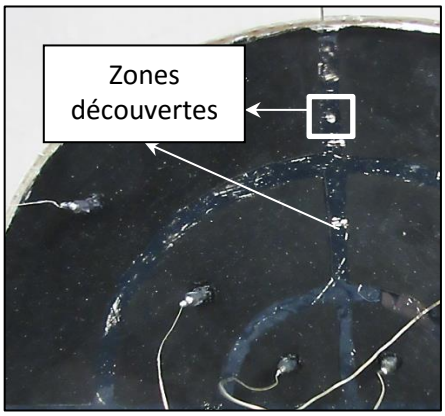


Figure 98 : Les électrodes en silicone conducteur surtout, lorsqu'on utilise du solvant, ont tendance à ne pas recouvrir entièrement la surface du film

Un autre type d'électrode utilisée a été fabriquée avec du silicone conducteur, fait à base d'élastomère silicone et du carbone. Deux composants différents sous forme de pâte sont utilisés (ELASTOSIL® LR 3162 A/B) qui doivent être mélangés dans un rapport massique de 1 : 1. Le mélange obtenu peut être appliqué sur la surface du film avec une spatule ou à la main. Ensuite, il est mis à chaud dans un four pour quelques minutes jusqu'à ce qu'il devient dur. Plusieurs températures ont été testées ce qui a montré qu'une large gamme de 100°C jusqu'à 200°C peuvent être utilisées. Le temps d'attente dépend par contre de la température mais aussi de l'épaisseur de l'électrode. L'épaisseur de l'électrode en utilisant le procédé mentionné plus haut n'est pas très uniforme. Elle peut varier entre 50 µm et 250 µm et voir même plus, celle-ci étant dépendante de la pression avec laquelle on applique le mélange de silicone conducteur. Un moyen pour obtenir des électrodes d'épaisseur plus faible c'est de diluer le mélange avec un solvant comme par exemple du Xylènes. On peut prendre par exemple 5 g de mélange pour 5 ml de Xylènes ce qui présente une consistance d'une crème qui peut être ensuite appliquée sur les films.

Cela permet d'utiliser un pinceau pour l'application mais il a été observé que la répartition n'est pas très bonne ce qui nécessite quand même d'appliquer de la pression pour étaler le produit. Cette technique nécessite une durée plus importante de temps de chauffage car le solvant doit se vaporiser tout d'abord pour que la polymérisation puisse se produire mais en revanche des électrodes très minces peuvent être obtenues (≈ 10 µm contre ≈ 50–250 µm sans solvant). Autre problème qui a été remarqué c'est le fait que le champ de claquage d'un film peut diminuer fortement lorsque des électrodes contenant beaucoup de solvant sont appliquées. En effet, le solvant attaque le film de silicone ce qui peut amener aussi à la diminution de son épaisseur sur certains endroits ou encore il peut pénétrer dans le polymère et favoriser l'insertion des particules conductrices (il n'est pas très claire l'origine de ce phénomène) ce qui peut baisser de manière drastique le champ de claquage.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La conductivité électrique dépend de l'épaisseur mais pour une couche d'une centaine de micromètres et une longueur et largeur de quelques centimètres on obtient des résistances d'un bout à l'autre d'environ une dizaine de kΩ. Les mesures réalisées ont montré aussi que la rigidité des électrodes n'est pas beaucoup différentes de la rigidité du silicone (1MPa).

4.1.2.6 Métallisation à l'or

Un autre type d'électrode a été fabriqué par dépôt (''sputtering'') à l'or grâce à un métaliseur Cressigton Sputter Coater 208HR. Cette méthode permet de générer des couches très minces d'or (≈10 nm) à la surface exposée du film.

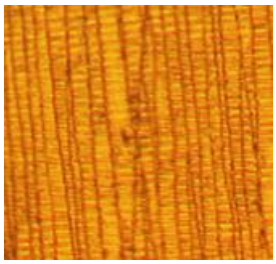


Figure 100 : Allure discontinue de la couche d'or sur un film en silicone

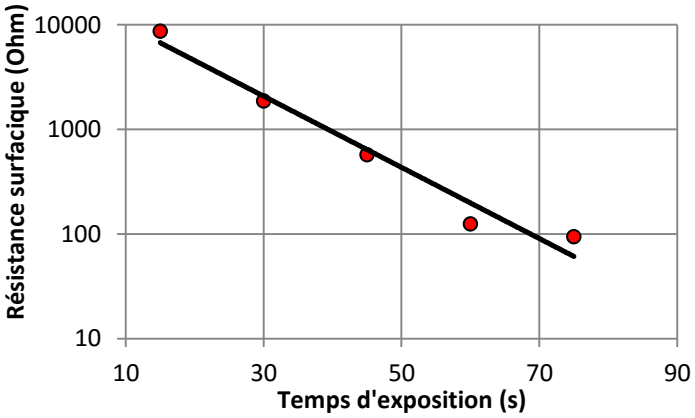


Figure 101 : Variation de la résistance d'une couche d'or sur un film en silicone pour différentes durées d'exposition (courant utilisé pour la métallisation de 40mA, film de 1cm de longueur et 3mm de largeur)

Cette méthode a été utilisée avec succès avec des films de PU, Terpolymère, et Latex. Mais elle ne semble pas être bien adaptée pour le silicone et l'acrylique. Déjà, il faut mentionner le fait que même s'il s'agit d'une couche métallique très mince (quelques dizaines de nm) celle-ci ne peut pas supporter des déformations importantes et se fracture facilement (Figure 100). Or, souvent on a besoin des déformations relativement importantes surtout pour des applications de récupération d'énergie.

En effet, l'or déposé sur des films de silicone s'enlève facilement car l'adhérence n'est pas très bonne, alors que pour l'acrylique le fait que le film est très flexible fait que la couche d'or déposé est endommagée très facilement. La tenue est meilleure pour le PU et le Terpolymère mais même dans ce cas il est difficile d'imaginer si l'or déposé constitue un film uniforme et homogène ou pas. Pour ces polymères pour un film de quelques centimètres carrés la résistance entre les extrémités du film est d'environs quelques ohms. Celle-ci dépend bien évidement du temps d'exposition dans le métalliseur (Figure 101). Dans le Tableau 20 on résume les différents types d'électrodes, ainsi que les principales caractéristiques et les polymères avec lesquels elles peuvent être utilisées.

Électrode	Conductivité	Polymères	Observations
Or	******	Terpolymère, PU, Latex	Faibles déformations
Poudre de graphite	*	Acrylique	Faible adhérence
Graisse conductrice	**	Tous les polymères	Pour des surfaces externes
Silicone conducteur	**	Silicone	Distribution non-uniforme

Tableau 20 : Différents types d'électrodes utilisées

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

En conclusion on peut dire qu'à part les électrodes en or toutes les autres présentent des résistances de l'ordre de 1kΩ –100kΩ (résistance équivalente série du film). Cela semble être une valeur assez élevée pour une électrode. Mais cela reste relatif par rapport aux courants de charge et décharge du polymère et de sa capacité électrique. En effet, par exemple pour un circuit simple à deux diodes le courant de charge/décharge est imposé par la variation de la capacité du film. Les courants dans un tel cas restent faibles. Si on néglige la résistance des électrodes, le courant peut être approximé par :

$$(66)\ I \approx V \cdot \frac{\Delta C}{\Delta t}$$

La résistance des électrodes dans un tel cas induit un retard dans le transfert des charges et bien sûr une perte d'énergie. Par exemple pour une tension de 1kV et une variation de 5nF pendant 1s le courant de charge/décharge est d'environ 5 µA. Maintenant si on essaie de prendre en considération l'influence de la résistance des électrodes, la chute aux bornes de cette résistance équivalente est d'environ 5V pour une résistance de 1MΩ ce qui est négligeable devant 1kV. Le même raisonnement peut être fait en comparant la constante de temps caractéristique du film avec la période des cycles électromécaniques. Pour l'exemple précédent la constante de temps est de l'ordre de 5 ms ce qui est négligeable pour des cycles qui durent une seconde.

La situation est différente si le transfert des charges électriques est fait de manière rapide (en utilisant des interrupteurs, bobines etc.). Dans un tel cas les courants peuvent être bien évidement plus forts et l'impact de la résistance série aussi (Figure 102).

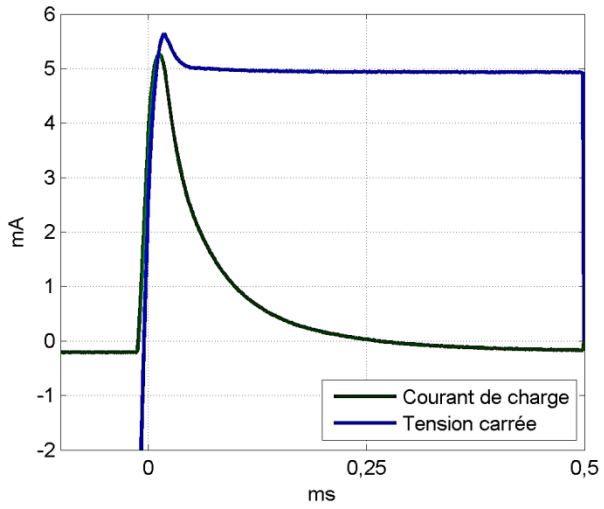


Figure 102 : Courant de charge d'un polymère utilisant de la graisse conductrice (220 pF) lorsqu'une tension carrée (-1kV, 1kV) est appliquée

4.1.3 Caractérisation des céramiques piézoélectriques

Différentes céramiques piézoélectriques (PZT) de forme et dimensions variées ont été essayées (normalement cylindriques sauf les rondelles P189). Les principaux paramètres qui nous intéressent sont la capacité électrique en absence de forces externes en basse fréquence (C_0) et le couplage électromécanique (on peut prendre d_{33} par exemple). Dans le Tableau 21 on présente les paramètres respectifs déterminés de manière expérimentale, ainsi que les dimensions des éléments piézoélectriques caractérisés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 21 : Paramètres caractéristiques des éléments piézoélectriques utilisés

Matériau	d_{33} (pC/N)	Capacité électrique (pF à 100 Hz)	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Masse (g)	$d_{33}^2/\varepsilon_{33}^T$ ($pJ/m^3/Pa^2$)
P762	300	20.1	6.3	15	3.54	9.3
P194	829	92.7	6.3	15	3.6	15.4
P188	547	19.6	2.64	5	0.21	16.7
P189	286	8.41	2.76	5	0.22	11.6
FUJI	391	26.4	5	10	1.85	11.4
Rondelle P189	290	175	4.7–11	3.3	1.96	10.1

La densité énergétique d'un matériau piézoélectrique déformé par une force axiale imposée (dans la direction 33) est proportionnelle au carré de la contrainte et du rapport caractéristique $d_{33}^2/\varepsilon_{33}^T$. D'après les valeurs trouvées dans le tableau précédent on pourrait conclure que le matériau le plus adapté serait la céramique P188, pourtant il faut ne pas oublier que pour récupérer plus d'énergie il faut augmenter les contraintes ce qui peut amener à un régime de fonctionnement non-linéaire pour lequel différents paramètres censés être constants, peuvent devenir variables. Pour voir quel matériau est mieux adapté on est obligé alors de faire des tests en réalisant des cycles de manière expérimentale. En tout cas il n'y a pas une différence importante entre les densités énergétiques entre les différentes céramiques.

Pour déterminer les propriétés élastiques des éléments piézoélectriques la méthode suivante a été utilisée. L'admittance et l'impédance électrique de chaque élément a été mesurée à l'aide d'un analyseur fréquence Agilent E5061B. Les fréquences de la première résonance (impédance nulle, f_m) et antirésonance (admittance nulle, f_M) peuvent être déterminés ce qui permet de retrouver la raideur de chaque élément piézoélectrique [209] en utilisant la formule suivante (valable pour un comportement unidimensionnel) :

(67) $s_{33}^D = \frac{1}{4f_M^2 H^2 \rho}$, f_M : première fréquence d'antirésonance, H : hauteur de l'élément, ρ : masse volumique

Tableau 22 : Masse volumique et paramètres élastiques de différentes céramiques piézoélectriques

Matériau	ρ (kg/m^3)	s_{33}^D(Pa^{-1})	c_{33}^D(GPa)
P762	7574	8,5E-12	117
P194	7703	9,5E-12	105
P188	7676	8,9E-12	113
P189	7358	8,2E-12	121
FUJI	9427	6,8E-12	146

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme on peut le voir les céramiques piézoélectriques présentent une rigidité assez élevée en comparaison avec les polymères diélectriques. Les électrodes utilisées pour celles-ci n'ont alors pas beaucoup d'influence sur leur comportement et peuvent être toujours négligées. Autre particularité des céramiques piézoélectriques c'est le fait que les courants de fuites sont très faibles, presque négligeables devant les courants de fuite dans les circuits de transfert d'énergie ou dans le film en polymère (Figure 90).

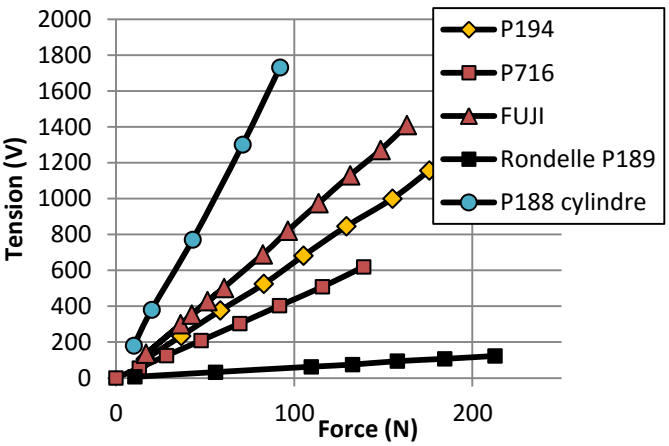


Figure 103 : Tension en circuit ouvert pour différents éléments piézoélectriques en fonction de la force appliquée (quasi-statique)

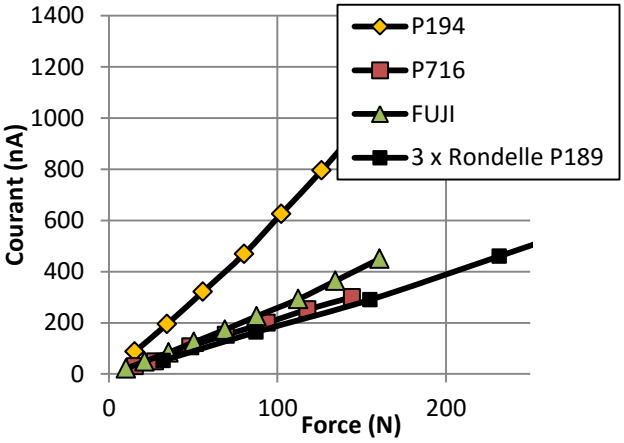


Figure 104 : Courant en court-circuit pour différents éléments piézoélectriques en fonction de la force sinusoïdale appliquée (1Hz)

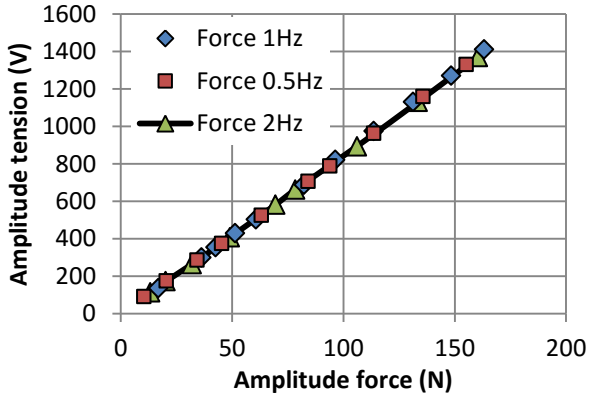


Figure 105 : Tension de sortie d'un élément piézoélectrique (FUJI) en fonction de la force sinusoïdale appliquée pour différentes fréquences

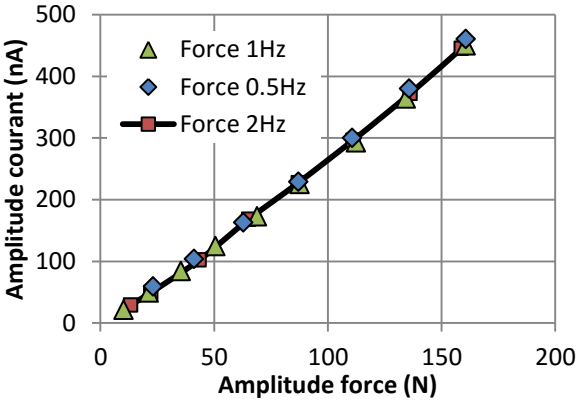


Figure 106 : Courant de court-circuit normalisé par rapport à la fréquence pour un élément piézoélectrique (FUJI) en fonction de la force sinusoïdale appliquée pour différentes fréquences

La première remarque qui peut être faite c'est que les relations entre le courant en court-circuit/ la tension en circuit ouvert et la force appliquée reste approximativement linéaires. Même pour des forces plus élevées allant jusqu'à 500N il a été vérifié que cette hypothèse pourrait être encore utilisée même si un peu de non-linéarités commence à se manifester. Mais pour imposer des forces élevées avec le montage décrit dans l'annexe A.1 le stack monté ne peut plus être utilisé car son déformation est limitée, la force doit alors être imposée manuellement. Autre observation qu'on peut faire c'est le fait que les mesures électriques montrent que la capacité électrique apparente de tous les éléments piézoélectriques utilisés est plus importante que celle mesurée avec l'analyseur en fréquence. En effet, par exemple la capacité mesurée donnée dans le Tableau 21, des éléments de type FUJI était d'environ 26pF alors que celle déduite des mesures (Figure 104) est d'environ 43.5pF. Le même phénomène est observé pour les autres éléments piézoélectriques. Ce phénomène est sans doute dû à des capacités parasités qui sont générées lorsque l'élément piézoélectrique est fixé dans

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

le montage qui sert à imposer des forces et au fait que la capacité propre des céramiques est assez faible. Toutefois rien n'empêche que la capacité totale (en tenant compte de la capacité parasite) peut être mesurée et que le modèle constitué d'une source de courant connectée en parallèle avec un condensateur peut être appliqué.

4.2 Systèmes simples de récupération d'énergie

4.2.1 Récupération d'énergie avec des éléments piézoélectriques excités en compression

Il est utile d'estimer la quantité d'énergie qui pourrait être récupérée avec un système purement piézoélectrique. Pour cela plusieurs circuits pourraient être utilisés mais le plus simple c'est de connecter directement une résistance à ses bornes et d'appliquer une force variable.

Comme on peut le voir la puissance récupérée varie de manière approximativement proportionnelle avec le carré de l'amplitude de la contrainte appliquée. L'allure de la puissance en fonction de la résistance connectée montre aussi que l'approximation des éléments piézoélectriques par une source de courant connectée en parallèle avec un condensateur est acceptable. On peut observer que les éléments qui présentent une faible section transversale et un rapport d_{33}^2/ε plus élevé fournissent plus d'énergie pour la même force appliquée. Ainsi pour l'élément P194 celui-ci peut fournir 72 µJ pour une force appliquée de 200 N alors que trois rondelles P189 connectées électriquement en parallèle et mécaniquement en série donnent pour la même force seulement 3.1 µJ. En fait, la charge électrique sur un élément piézoélectrique (en régime quasi-statique) actionné en compression est déterminée seulement par l'amplitude de la force et le coefficient d_{33}. Les dimensions n'interviennent pas directement. Ceux-ci influent par contre sur la capacité électrique qui à son tour détermine la tension en circuit ouvert pour une quantité de charges donnée. On comprend alors que deux éléments piézoélectriques faits du même matériau mais ayant des formes différentes peuvent fournir la même quantité d'énergie, c'est le cas des éléments qui ont le même rapport section/hauteur.

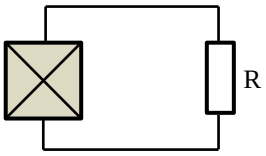


Figure 107 : Montage simple utilisé pour l'estimation de l'énergie électrique récupérée avec les éléments piézoélectriques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

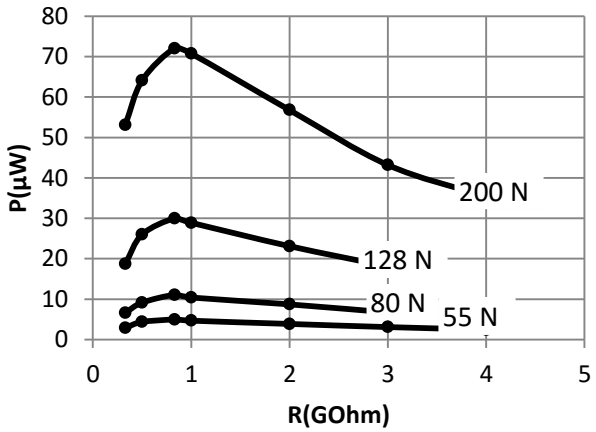


Figure 108 : Puissance élément P194 (1Hz)

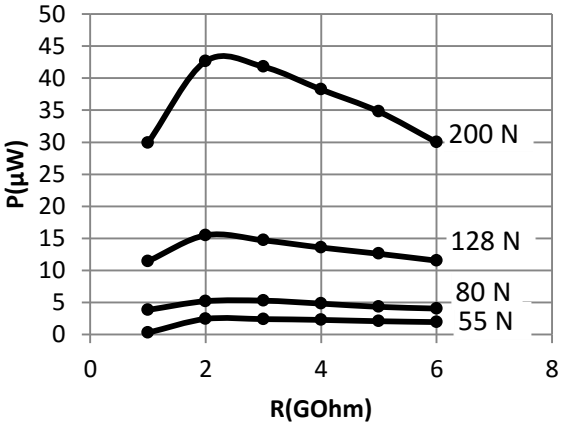


Figure 109 : Puissance élément FUJI (1Hz)

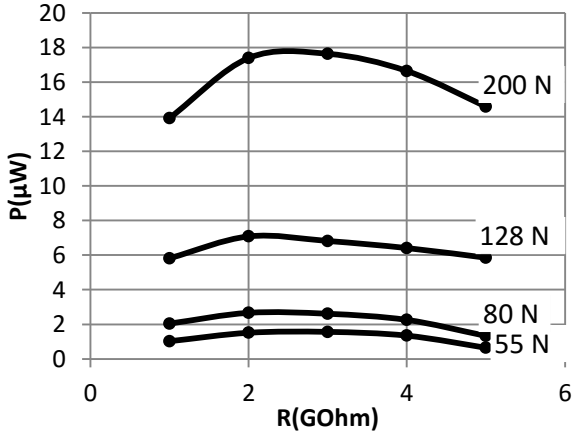


Figure 110 : Puissance élément P716 (1Hz)

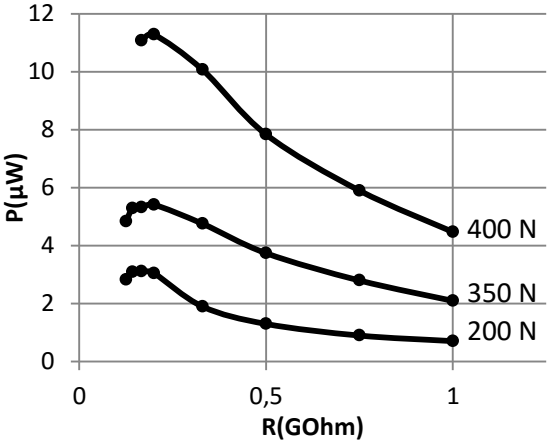


Figure 111 : Puissance 3 x rondelles P189 en // (1Hz)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme il a été montré la réponse des éléments piézoélectriques ne dépend pas beaucoup de la fréquence (0.1Hz – 10Hz). Dans les Figure 108-Figure 111 on donne la puissance moyenne récupérée pour différents éléments piézoélectriques et différentes forces (sinusoïdales) à une fréquence de 1 Hz.

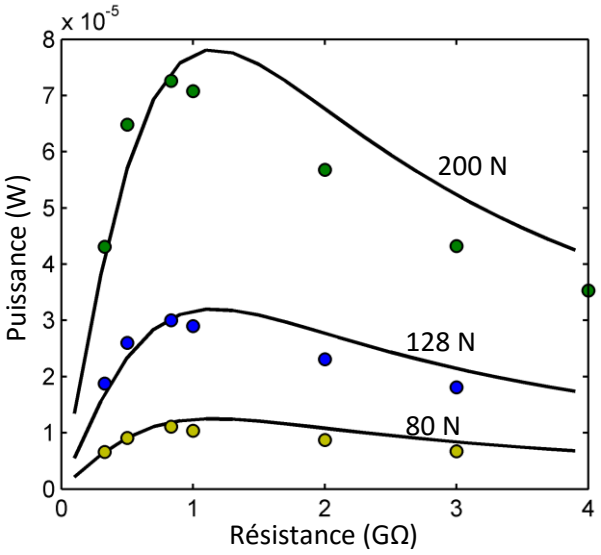


Figure 112 : Comparaison entre modèle (—) et mesure (•) pour un élément de type P194, pour trois forces de 80N, 128N, 200N d'amplitude, à 1Hz

Si la fréquence de l'excitation mécanique augmente alors normalement la puissance doit augmenter aussi de manière proportionnelle. En effet, comme il a été vu la polarisation en court-circuit et la tension en circuit ouvert des éléments piézoélectriques ne dépendait presque pas de la fréquence.

Il est intéressant de comparer l'énergie récupérée avec des éléments piézoélectriques excités en compression avec celle obtenue avec d'autres systèmes piézoélectrique comme par exemple les plaques uni/bimorphes déformées en flexion. Prenons comme exemple un simple buzzer unimorphe. La capacité électrique à l'état initial est égale à 62 nF. Juste par le simple fait de taper sur lui avec un seul doigt on génère des tensions de l'ordre de quelques dizaines de volts en amplitude (Figure 113). Cela veut dire une énergie maximale électrostatique produite d'environ quelques dizaines de µJ par cycle (15 µJ/cycle pour le cas présenté dans la Figure 113). En même temps pour les trois rondelles P189 pour avoir la même quantité d'énergie il fallait appliquer une force de plus de 400 N en amplitude.

En faisant un simple calcul on peut voir que la quantité de matière piézoélectrique pour un buzzer et pour un élément cylindrique est à peu près la même. Le buzzer génère la même quantité d'énergie pour une faible force car en quelque sorte son effet levier est utilisé, la force est beaucoup plus faible mais le déplacement est beaucoup plus important ce qui fait que la quantité d'énergie mécanique et donc aussi électrique est au final presque la même.

En fait on comprend que les deux types de structures sont adaptés pour des excitations mécaniques très différentes. Les éléments en compression pour des forces très élevées et faibles déplacements et les films et les plaques minces pour des forces faibles, mais déplacements importants. En fait même pour les éléments utilisés en compression ont pourrait tenter d'augmenter la quantité d'énergie mécanique injectée. Pour cela il faut un système capable d'amplifier la force appliquée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

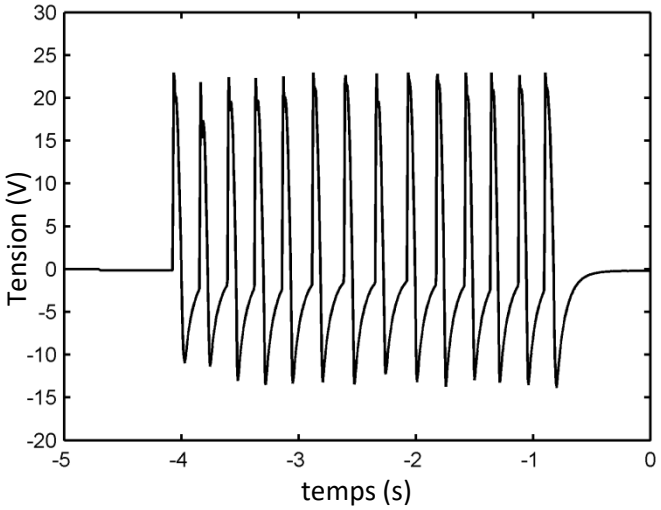
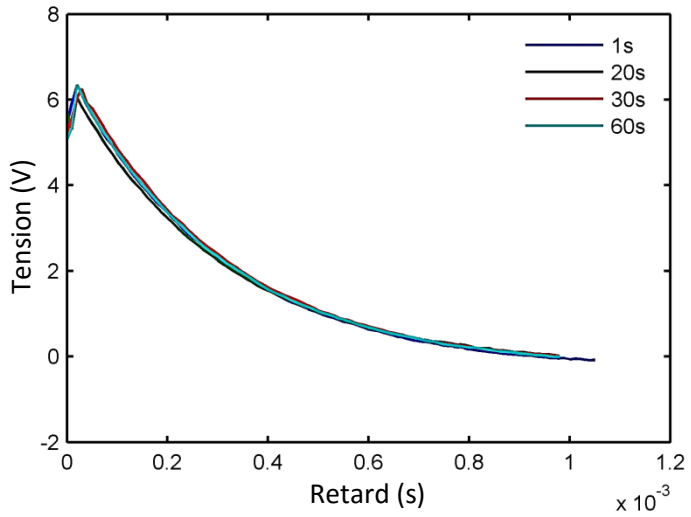


Figure 113 : Tension aux bornes d'un buzzer piézoélectrique excité périodiquement

Comme on l'a dit les pertes des éléments piézoélectriques sont très faibles. Ceci a pu être vérifié lors des mesures de puissance. Par exemple une force étant appliquée sur un élément piézoélectrique celui-ci a été déchargé dans une résistance (1kΩ) après différentes durées de temps situées entre 1s et 1 min (durée pendant laquelle il était maintenu en circuit ouvert) et dans les deux cas il a pu être vérifié que l'énergie extraite était approximativement la même.



Retard (s)	Energie (µJ)
1	6.2
30	6.4
60	6.2

Figure 114 : Tension aux bornes de la résistance pendant la décharge pour différents retards (figure) et l'énergie récupérée pour chaque retard (tableau)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

4.2.2 Sortie redressée

Le montage expérimental précèdent consistant d'un élément piézoélectrique connecté en série avec une simple résistance est très simple du fait qu'il ne comporte aucun autre composant. Cela a permis d'estimer la quantité d'énergie qui pouvait être récupérée et valider les modèles utilisés.

Pourtant, en réalité c'est rare qu'une charge électrique puisse être alimentée d'une telle façon. Dans le cas général le transfert d'énergie doit être contrôlé par des circuits spéciaux mais dans le cas le plus simple on pourrait déjà redresser la tension en sortie de l'élément piézoélectrique avec un pont redresseur.

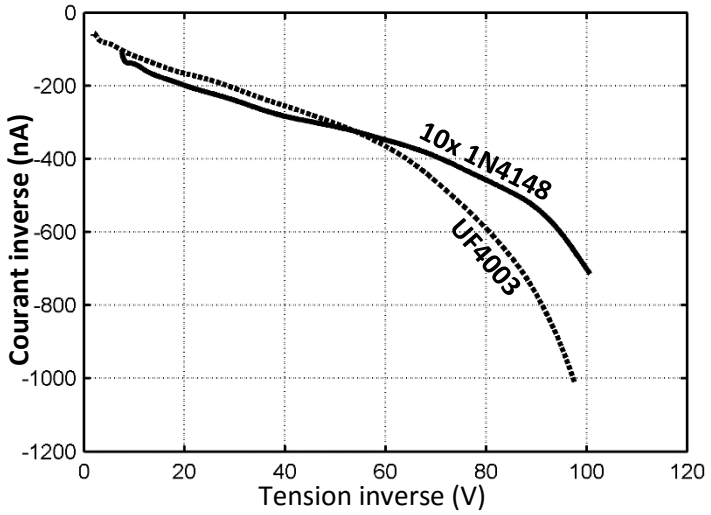


Figure 115 : Courant inverse dans deux diodes utilisées en fonction de la tension inverse appliquée

Pourtant lorsqu'on utilise des éléments piézoélectriques qui présentent une capacité électrique faible on obtient d'habitude des hautes tensions et des faibles courants. En effet, si on regarde l'exemple précédent on avait un courant de court-circuit de l'ordre de 1µA crête à crête et une tension en circuit ouvert crête à crête aux bornes de l'élément piézoélectrique de l'ordre de 1kV. Lorsqu'on se place dans un tel régime les problèmes liés à des décharges statiques dans différents composants deviennent critiques.

Tableau 23 : Différentes diodes commercialisées présentant des faibles courants de fuite

Référence	Tension inverse max (V)	Courant de fuite (25°C)
BAQ35 (Vishay)	140	1 nA
BAS116H (NXP)	75	0.003-5 nA
1N4148 (Vishay)	100	25 nA
BAS21AHT1G	250	40 nA (200 v)
CMAD6001	75	0.5 nA (75 v)

Comme on peut se convaincre (Figure 115) les diodes utilisées habituellement en électronique ne semblent pas être vraiment adaptées pour l'application envisagée dû au courant de fuite trop élevé et la tension inverse maximale insuffisante. Inversement, les composants dimensionnés pour des tensions plus élevées présentent des courants de fuite trop importants.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Une solution possible pour résoudre ce problème serait d'utiliser plusieurs diodes de très faible puissance (qui présentent les plus faibles courants de fuite) et les connecter en série.

Le même problème se pose pour des transistors si ceux-ci sont utilisés. S'ils fonctionnent dans un régime auto-commandé (comme diodes) alors eux aussi pourraient être connectés en série. Mais si la fermeture/ouverture est commandée alors la situation est compliquée par le fait que chaque transistor nécessite un circuit de commande séparé. Si par exemple des transistors bipolaires ou mosfet sont utilisés alors l'interconnexion de toutes les bases/portes amène à une distribution déséquilibrée de la tension entre les transistors à l'état bloqué. Mais dans tous les cas les transistors ont montré des courants de fuite beaucoup plus faibles que ceux des diodes.

Les condensateurs peuvent être aussi sujet à des décharges, mais les courants de fuite mesurés pour des condensateurs de faible capacité (quelques nF) restent négligeables en comparaison avec les fuites dans d'autres éléments (10 nF : décharge de 100V à 97V pendant 6 min).

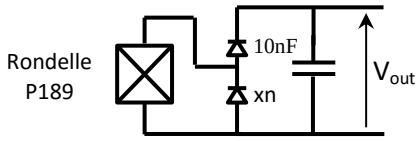


Figure 116 : Circuit avec sortie redressée utilisé pour la récupération d'énergie avec un élément piézoélectrique (rondelle P189)

Nb de diodes (n)	V_{out} (V)
1	118
2	222
3	273
4	286

Tableau 24 : Variation de la tension de sortie en fonction du nombre de diodes utilisé

Pour voir l'influence des pertes dans les diodes le circuit de la Figure 116 a été utilisé. L'élément piézoélectrique c'est une rondelle P189, à la sortie duquel on connecte un condensateur de 10nF et un pont redresseur à ''deux diodes''. L'élément piézoélectrique est actionné avec une force sinusoïdale de 265N d'amplitude crête-à-crête à 1Hz. Dans ce cas la tension en circuit ouvert est de 345V crête et le courant de court-circuit de 470nA. Si les diodes seraient idéales alors V_{out} après une certaine durée de temps doit converger vers la tension crête de l'élément piézoélectrique lorsqu'il est en circuit ouvert mais dû aux courants de fuites dans les diodes celle-ci peut être beaucoup plus faible (Tableau 24). En même temps même si on connecte un grand nombre de diodes en série il y aura toujours un courant de fuite dû au comportement interne de celles-ci, de plus dans un tel cas il y a aussi la chute de tension parasite qui peut intervenir lorsque les diodes sont passantes (même si pour cela il faudrait utiliser un nombre impressionnant de composants connectés en série). Il faut donc en pratique pour utiliser un tel montage trouver des composants adapté mais pour les tensions et les courants qu'on obtient il semblerait que de telles diodes (commercialisées) n'existent pas. En effet, n'importe quel composant est adapté pour une certaine puissance, or en pratique normalement on utilise des puissances plus élevées que celles obtenues avec les éléments piézoélectriques. Une solution serait de ne pas utiliser des éléments piézoélectriques constitués d'un seul bloque mais des stacks. En effet deux éléments piézoélectriques de même forme, faits de mêmes matériaux et actionnés par la même force peuvent fournir la même puissance pour différentes configurations des électrodes. De plus en utilisant des couches plus minces on augmente le courant de sortie tout en abaissant la tension ce qui veut dire que l'impact de différents courants de fuite est moindre. Donc en pratique on serait en fait plutôt intéressé à utiliser des stacks mais le problème c'est que ceux-ci sont plus difficile à fabriquer que des éléments simples et aussi une tension élevée est préférable pour des systèmes hybrides pour alimenter les polymères.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

4.2.3 Dalle piézoélectrique

Il existe un intérêt de plus en plus marqué vers des structures capables de récupérer de l'énergie sur le passage des piétons ou des voitures (comme il a été vu dans le Chapitre I). Dans cette partie on propose quelques structures qui pourraient être utilisées à ce propos.

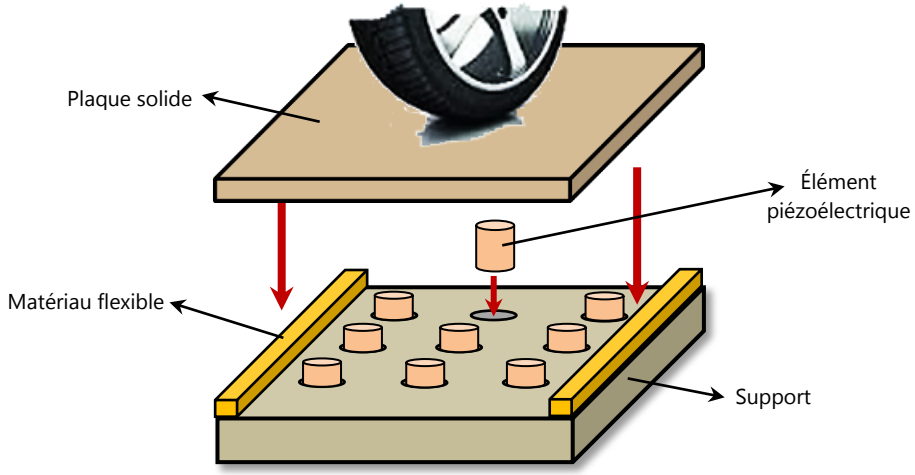


Figure 117 : Structure possible d'une dalle piézoélectrique qui pourrait être utilisée pour la récupération d'énergie sur le passage des voitures et piétons

Parmi les deux morphologies possibles : couches minces piézoélectriques dans des structures déformées en flexion et des éléments volumiques actionnés en compression les derniers semblent être plus simple à intégrer et aussi plus robustes. Si on imagine un tel système de récupération d'énergie quelques contraintes s'imposent. Tout d'abord on a besoin d'un support qui va maintenir les éléments piézoélectriques bien orientés dans la direction de la force externe appliquée. Ceux-ci doivent aussi être protégés contre les forces tangentielles qui risquent de les abîmer (celles-ci pourraient être aussi utilisées pour la récupération d'énergie mais il faudrait une structure un peu différente et des éléments piézoélectriques adaptés). Pour cela plusieurs solutions existent mais une d'entre elles serait de ne pas actionner directement sur les éléments piézoélectriques, mais venir appuyer en utilisant une plaque rigide, plaque qui est fixée à la structure principale par l'intermédiaire d'une couche flexible. La plaque rigide doit permettre en plus de concentrer toute la force appliquée sur les éléments piézoélectriques ce qui amène à une augmentation de l'énergie élastique injectée et donc électrique aussi.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

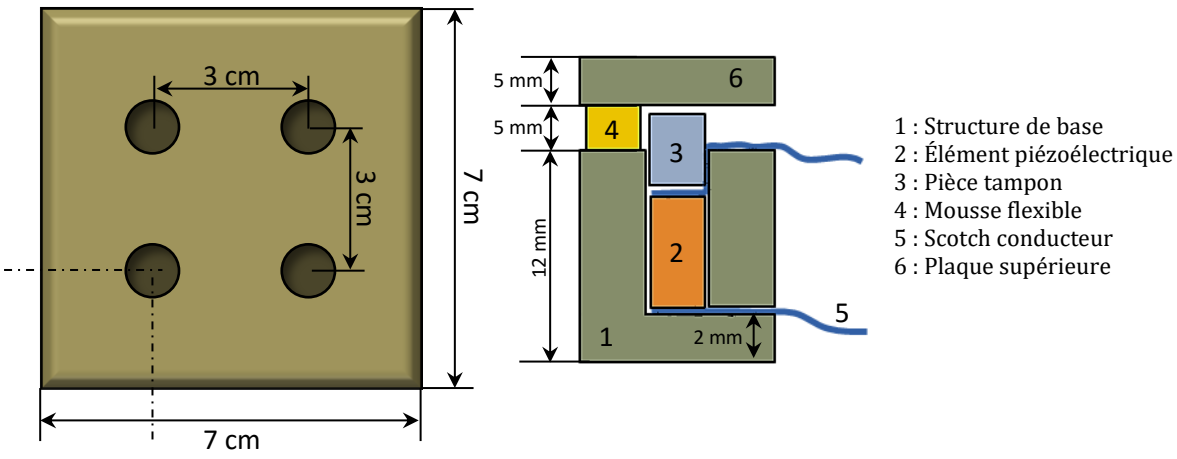


Figure 118 : Prototype d'une structure piézoélectrique utilisée pour la récupération d'énergie sur la marche

Pour la partie expérimentale le prototype représenté dans la Figure 118 a été réalisé. Celui-ci comporte de plus une petite pièce intermédiaire qui joue le rôle d'un tampon entre l'élément piézoélectrique et la plaque. Celui-ci permet d'éviter que la force axiale soit appliquée directement sur les éléments piézoélectriques et qu'il y ait des frottements entre les deux ce qui pourrait abimer les électrodes.

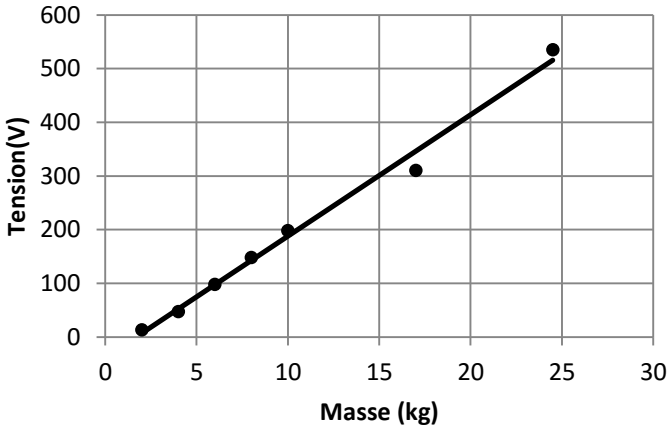


Figure 119 : Tension en circuit ouvert de la dalle piézoélectrique en fonction de la masse qu'elle supporte

Des éléments piézoélectriques cylindriques (FUJI, ø = 5 mm, H = 10 mm) sont utilisés placés dans des trous ayant presque les mêmes dimensions que ceux-ci. La structure de base est fabriquée en PVC alors que la plaque supérieure et les pièces tampon en plexiglass. Pour les connexions on a utilisé du scotch conducteur. Les capacités électriques et les coefficients de couplage (d_{33}) des quatre éléments se sont avérés être un peu différents l'un de l'autre (C_0 = 25.7 pF, 27.2 pF, 27 pF, 28 pF et d_{33} = 391 pC/N, 381 pC/N, 382 pC/N, 394 pC/N).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour estimer la force qui peut être exercée durant la marche par le poids du corps un élément piézoélectrique massive supplémentaire a été utilisé (ø = 5 cm, H = 1 cm, C_0 = 2.85 nF) associé à un circuit spécial pour réduire la décharge électrique. Celui-ci a été entouré avec des plaques en plastique tel que son hauteur dépassait de quelques millimètres pour simuler un appui naturel. Pour un poids de 81 kg, comme on peut le voir (Figure 120), il n'y a qu'une partie de la force qui est transmise et celle-ci dépend de la position du pied. En effet, le pied a tendance à s'appuyer sur la surface qui entoure l'élément et cela dépend de sa position.

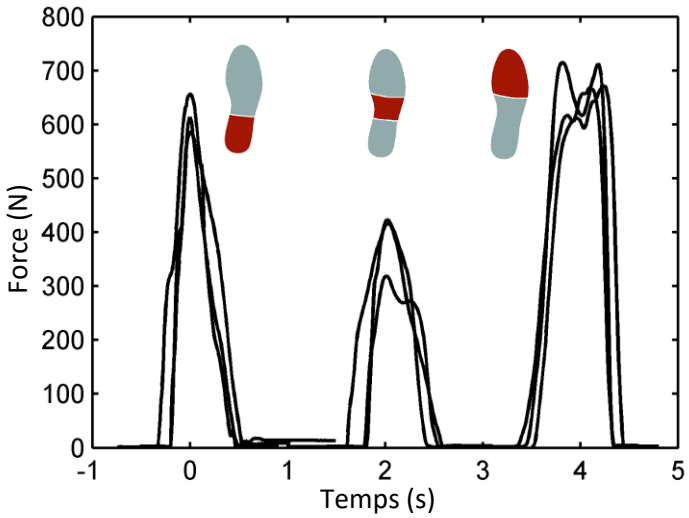


Figure 120 : Réponse du capteur de force à l'action de pression du pied pendant la marche normale

La tension en circuit ouvert de la dalle décrite précédemment qui est fonction du poids qu'elle supporte est donnée dans la Figure 119. L'énergie électrostatique totale emmagasinée dans les quatre éléments piézoélectriques peut être alors estimée à environ 170 µJ/pas/80kg pour un appui parfait.

4.2.4 Récupération d'énergie avec des polymères

Comme dans le cas des éléments piézoélectriques on essaie d'estimer la quantité d'énergie qui peut être récupérée avec les polymères diélectriques seuls. Pour cela on peut utiliser encore une configuration très simple qui ne comporte pas beaucoup d'éléments (diodes, interrupteurs etc.). Le circuit de la Figure 121 semble convenir très bien pour cela car le polymère est directement connecté à la source de tension et à une résistance série.

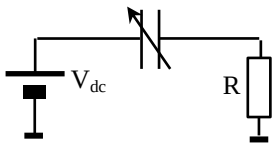


Figure 121 : Montage utilisé pour l'estimation de l'énergie récupérée avec les polymères lorsqu'ils sont alimentés par une source de tension

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour la partie expérimentale, tout d'abord un film en silicone de 100 µm a été utilisé, avec des électrodes en polymère conducteur (sans dilution, application manuelle). Les dimensions de la zone active sont de 2 cm x 5 cm avec une distance passive de 3.5 mm sur les bords latéraux.

Pour imposer la déformation du film on utilise le moteur linéaire contrôlable décrit dans l'annexe A.2. Tout d'abord on peut vérifier que la capacité du film varie de manière linéaire avec la déformation (Figure 122).

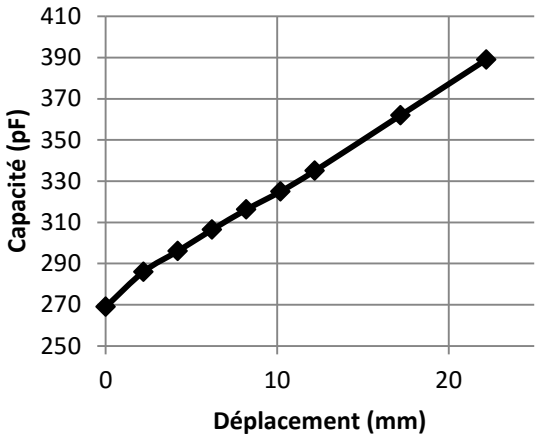


Figure 122 : Dépendance de la capacité du film en silicone du déplacement imposé

Pour une variation de capacité de 10%, à 2Hz, la variation de la puissance moyenne avec la tension continue appliquée, est donnée dans la Figure 123. La force appliquée pour déformer le film (à 10%) est de seulement 0.54 N crête à crête, ne présentant qu'une légère dépendance de la fréquence d'excitation, ce qui prouve encore une fois le fait que le comportement visqueux du matériau peut être négligé. On peut donc voir la différence entre le comportement des éléments piézoélectriques qui nécessitait des forces très élevées de quelques centaines de newtons et les polymères qui sont très flexibles. La section du film sans électrodes est d'environ 2.7 mm² ce qui veut dire que pour une déformation de 10% la force appliquée devrait atteindre 0.27 N. En même temps l'énergie élastique qui est stockée dans le film est beaucoup plus importante que la quantité d'énergie électrique récupérée. En effet, par exemple pour une extension du film de 4.8 mm, on a une énergie élastique injectée d'environ 1.3 mJ, beaucoup plus que la quantité d'énergie électrique extraite par cycle qui est de l'ordre de 1 µJ.

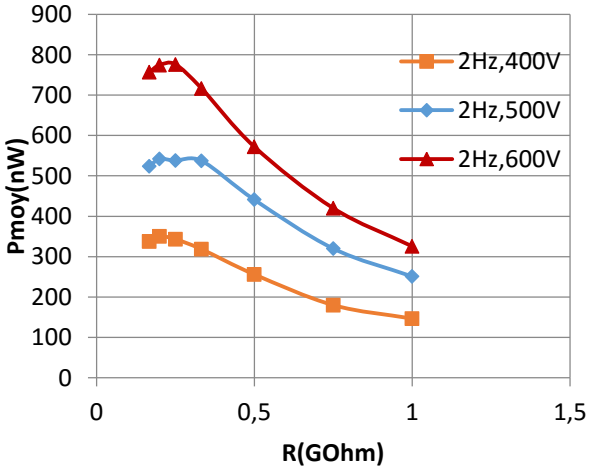


Figure 123 : Puissance moyenne récupérée pour différentes tensions de polarisation (film silicone, 10% de déformation axiale)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats des mesures obtenus sont conformes aux valeurs obtenues par simulation (Figure 124).

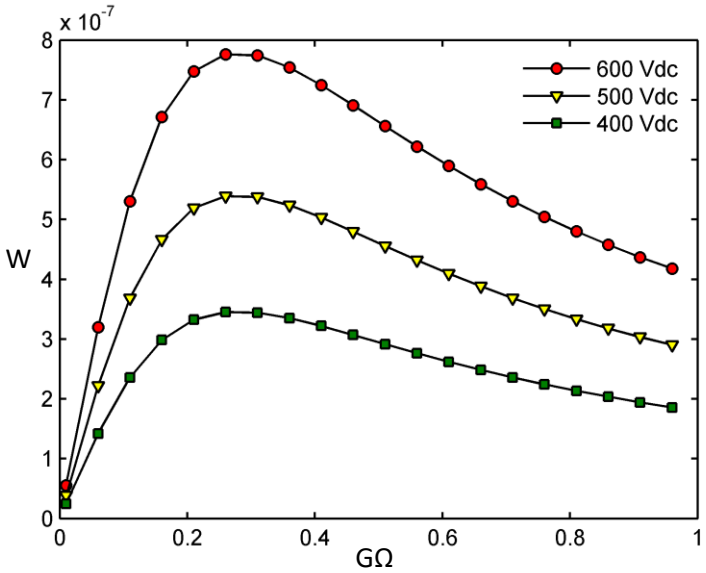


Figure 124 : Puissance théorique moyenne obtenue avec un film en silicone (≈ 10% déformation, 2Hz) pour différentes valeurs de résistances et tensions

Des mesures similaires ont été réalisées sur des films en latex (50µm x 1.5cm x 5.5cm) mais en utilisant des champs électriques et des déformations plus importantes.

Pour les mesures de la puissance le film a été tout d'abord prétendu de 5.5 cm à 7.5 cm et ensuite il a été déformé de manière axiale (toujours à 1Hz). Pour un déplacement de 1cm d'amplitude on a pu mesurer une variation de capacité de 416 pF à 460 pF, pour 2cm une variation de 382pF à 495pF et pour 2.5cm de 367pF à 504pF, ce qui correspond bien encore à une variation linéaire.

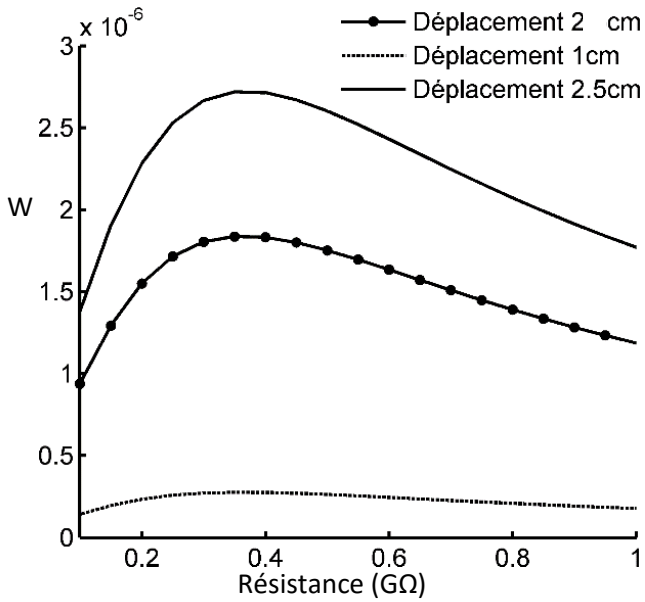


Figure 125 : Puissance extraite pour différentes déformations du film en latex et différentes résistances alimentées en sortie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

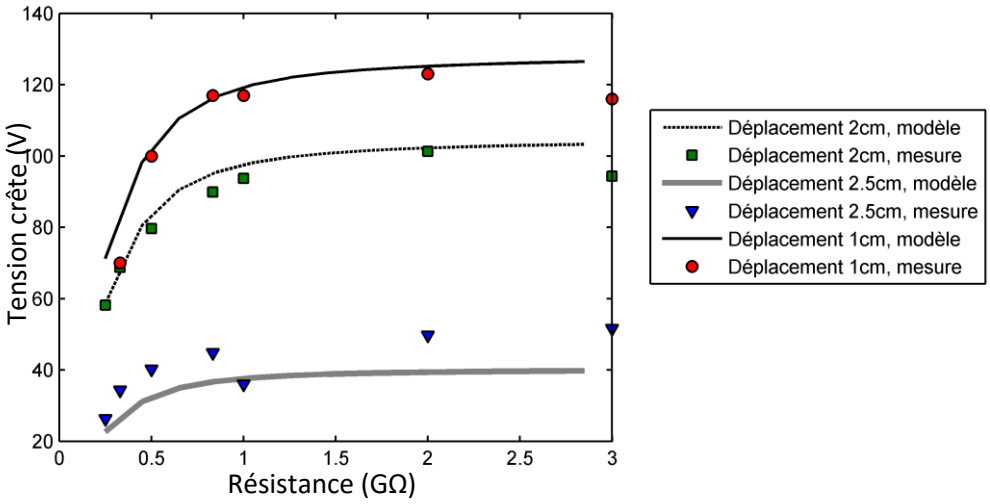


Figure 126 : Variation de la tension de sortie (crête) en fonction de sa valeur et l'amplitude de la déformation axiale (modèle et mesure, film en latex)

Le modèle analytique montre encore une fois une précision satisfaisante surtout pour des variations de capacité plus importantes (Figure 126, le plus probablement dû au fait qu'il est difficile d'imposer une faible déformation de manière précise vu que le film est très flexible). On peut encore vérifier que même avec un volume très faible de polymère (0.04 cm^3) et une déformation pas très importante (≈ 40%) on peut obtenir des énergies comparables avec celles obtenues avec les éléments piézoélectriques. Mais encore une fois la force nécessaire est beaucoup plus faible. Pour le film étudié, celle-ci pourrait être estimée à environ 1N en comparaison avec quelques 100N appliquées sur les éléments piézoélectriques. De plus, celle-ci peut être augmentée de manière significative en utilisant des tensions de polarisation plus élevées car la dépendance est quadratique (Figure 127).

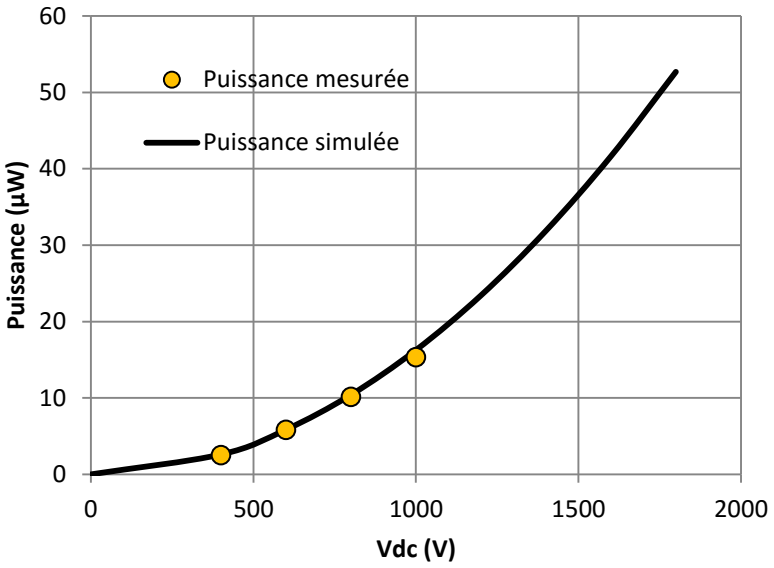


Figure 127 : Variation de la puissance récupérée (R=0.5 GΩ, 1Hz, 40% déformation, C_p = 367pF →504pF, film latex) en fonction de la tension continue appliquée

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les autres polymères semblent être moins adaptés à la récupération d'énergie pour les applications envisagées. En effet, l'acrylique est très visqueux. De plus, il peut être facilement affecté par des phénomènes d'instabilité électromécanique. Le PU de son côté présente des courants de fuites assez élevées ce qui le rend peu pratique pour des fréquences inférieures à 1Hz. Le terpolymère est mieux de ce point de vue. Même s'il est beaucoup plus rigide que les autres polymères sa permittivité est d'un ordre de magnitude plus élevée ce qui veut dire que pour une même force on devrait récupérer une quantité d'énergie comparable avec celle obtenue avec le silicone ou le latex. Mais celui-ci est pour le moment assez cher et difficile à synthétiser.

Si on fait une comparaison entre le silicone et le latex on peut déjà dire que ces deux polymères présentent des propriétés mécaniques et électriques très similaires. Le latex semble pourtant plus robuste et peut supporter des déformations plus élevées. Le silicone quant à lui présente l'avantage de pouvoir être utilisé sur une très large gamme de températures (il reste solide même à 250° C) et dans notre cas les électrodes en polymère conducteur qui fonctionnent avec, aussi représentent un très grand plus.

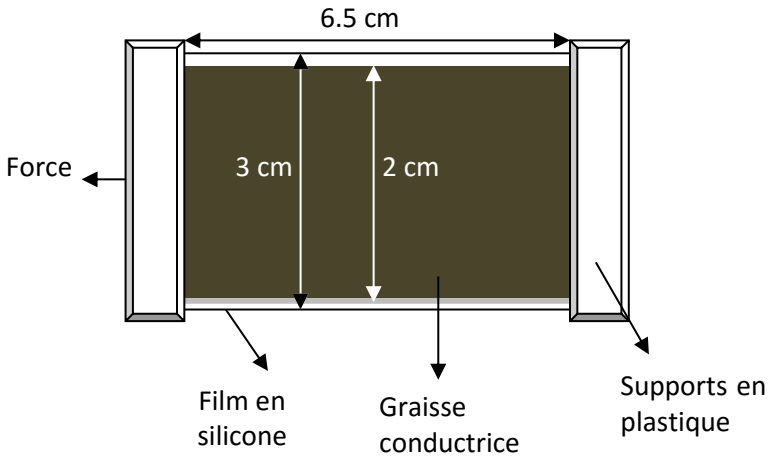


Figure 128 : Film en silicone (100 µm) utilisé pour la récupération d'énergie

La récupération d'énergie avec des polymères en utilisant des circuits plus complexes est affectée par les mêmes problèmes que la récupération d'énergie avec des éléments piézoélectriques lorsque des interrupteurs sont utilisés (diodes, transistors). Pour des films de faible capacité électrique polarisés avec des tensions élevées la nécessité des interrupteurs avec de très faibles courants de fuite est encore présente.

Pour vérifier le fonctionnement en récupération d'énergie avec transfert unidirectionnel des charges électriques un film en silicone (100 µm) a été utilisé (Figure 128). Sur les deux faces du film on a appliqué de la graisse conductrice (largeur 2 cm), ensuite le film a été soumis à des cycles de déformation (extension de 3cm sur une période de 6s). A l'état d'extension maximale on a appliqué 300V à ses bornes par l'intermédiaire d'un interrupteur commandé. Ensuite, le film étant laissé en circuit ouvert, la tension à ses bornes a été mesurée avec un voltmètre de très haute impédance d'entrée (Figure 129). Quand le film se relaxe et atteint sa longueur initiale on le décharge dans une résistance de 40 MΩ (Figure 130).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

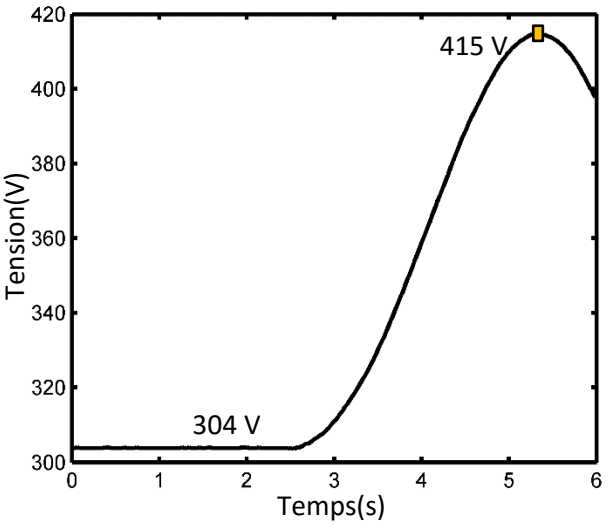


Figure 129 : Variation de la tension aux bornes du film en circuit ouvert lorsque celui-ci est déformé

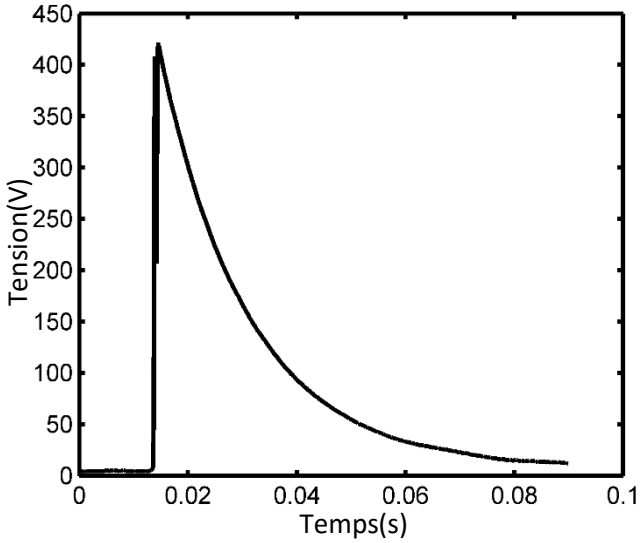


Figure 130 : Tension aux bornes de la résistance de 40MΩ pendant la décharge du film dans celle-ci

Après une intégration de la puissance instantanée on trouve :

$$E_R = 39\ \mu J$$

La capacité électrique du film à l'état non-déformé est estimée à environ 345 pF ce qui veut dire qu'en théorie la tension à l'état relaxé doit augmenter 1.46 fois. En pratique on obtient une augmentation de 415 V/ 304 V= 1.37, ce qui reste assez proche de la valeur théorique.

4.2.5 Systèmes de récupération d'énergie utilisant des polymères diélectriques déformés en compression

Comme on l'a vu dans le chapitre dédié à la modélisation, différentes structures peuvent recevoir plus ou moins d'énergie mécanique et présenter un caractère plus ou moins compact. Par exemple les films électroactifs soumis à un champ de déformation bi-axial voient leur capacité électrique varier de manière proportionnelle à l'extension plane élevée à la puissance quatre alors que pour un film soumis à une extension uniaxiale celle-ci varie de manière linéaire, de plus l'encombrement du système est plus important car pour une variation de capacité donnée le déplacement imposé est plus important lui aussi.

Pour imposer des déformations bi-axiales dans un film plusieurs structures complexes ont été proposées. On pourrait se demander pourquoi ne pas utiliser quelque chose de plus simple similaire aux structures piézoélectriques. On pourrait par exemple fabriquer un stack de plusieurs couches et juste appuyer dessus. Tout d'abord il est clair qu'une telle structure peut s'avérer très instable, il sera alors en pratique utile d'utiliser des structures qui présente un rapport hauteur/diamètre assez faible.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans ce sens on pourrait commencer par le plus simple et utiliser une mousse en polymère. En effet, la plupart de mousses utilisées en industrie sont faites avec du polyuréthane. Il est très simple d'imaginer une telle couche placée entre deux électrodes solides métalliques, qui peut être très facilement comprimée. Le fait que des électrodes solides peuvent être utilisées c'est très commode cela étant possible grâce au caractère poreux de la mousse qui lui permet de se comprimer, sans aucune déformation latérale. Les mesures montrent en effet qu'on peut obtenir des variations de capacité très élevées de presque 10, mais le problème c'est que cette capacité reste néanmoins très faible de quelques dizaines de pF pour une structure de plusieurs cm^3. De plus, les mousses présentent des pertes toute comme les films de PU ce qui fait qu'en pratique l'utilité de telles structures semble peu intéressante. A tout cela s'ajoute de plus la présence des cavités remplies d'air qui amènent à une réduction du champ électrique maximal qui peut être utilisé (un champ plus élevé que 3 MV/m peut être à l'origine des phénomènes de claquage dans l'air qui peuvent affecter aussi le polymère).

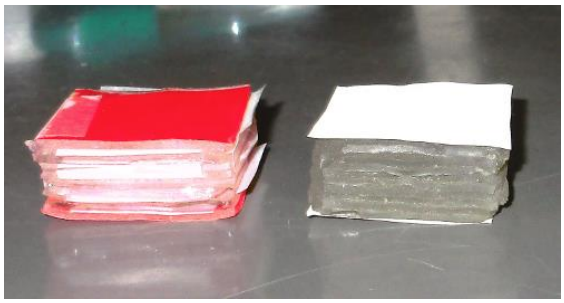


Figure 131 : Pour voir l'importance des électrodes flexibles deux stacks en acryliques ont été utilisés : un constitué de 10 films (de 1 mm d'épaisseur) collés de manière directe et un autre de mêmes dimensions mais en utilisant une couche mince de scotch entre chaque deux films d'acrylique

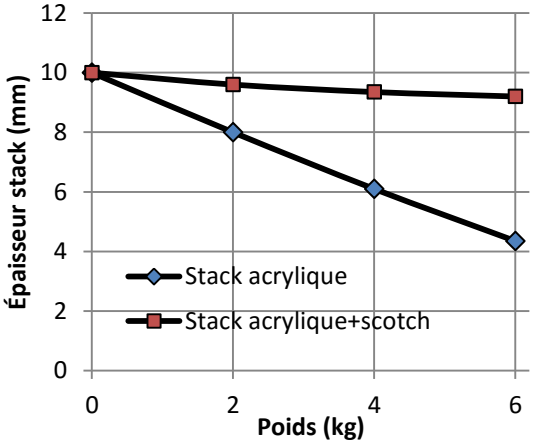


Figure 132 : Variation de l'épaisseur du stack en fonction du poids appliqué

Autre possibilité consiste à utiliser des polymères entiers mais ceux-ci nécessitent par contre des électrodes déformables (le polymère est peu compressible). L'idée la plus simple serait juste de comprimer un stack mais là encore plusieurs manières de le faire existent. On pourrait Imaginer par exemple que les deux surfaces extrêmes sont bloquées ou que celles-ci peuvent glisser sans frottement. On peut montrer que dans ce dernier cas il est facile de se rendre compte qu'il s'agit du cas idéal. Lorsque les surfaces sont bloquées le stack semble être plus rigide. Cela peut facilement être vérifié en utilisant deux stacks fait du même polymère mais un incluant de plus des couches plus rigides. Pour le test on a utilisé deux stacks en acrylique (Figure 131) un constitué de dix films (1 mm en épaisseur, 2.5 cm x 2.5 cm) collés l'un à l'autre et un autre similaire mais comportant des films rigides entre chacun (du scotch de 50 µm d'épaisseur, 2 GPa). En utilisant le montage décrit dans A.3. on peut déterminer la déformation axiale de chacun en fonction de la force appliquée (Figure 132). Comme on peut le voir la présence des couches supplémentaires amène à une augmentation importante de la rigidité globale du stack.

Lorsque les surfaces extrêmes du stacks peuvent glisser sans frottement il est immédiat aussi de montrer que dans ce cas pour un polymère de module d'Young Y et un stack de section initiale S sur lequel on applique une force F on a une variation de capacité de la forme :

$$(68)\ C = C_0 \cdot \left(1 + \frac{F}{YS_0}\right)^2$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette variation est donc logiquement, pour une force donnée, plus importante lorsque le matériau est flexible et la surface de la section est plus petite. Par exemple, pour une force de plusieurs centaines de N (800 N), qui pourrait correspondre au poids d'une personne, pour un stack en silicone de 5 cm x 5 cm on doit être capable d'obtenir une variation de capacité d'environ 75% ce qui n'est pas mal. Cette variation ne dépend pas de l'épaisseur du stack mais plus celui-ci est épais plus sa capacité initiale peut être importante et donc plus d'énergie électrique peut être récupérée.

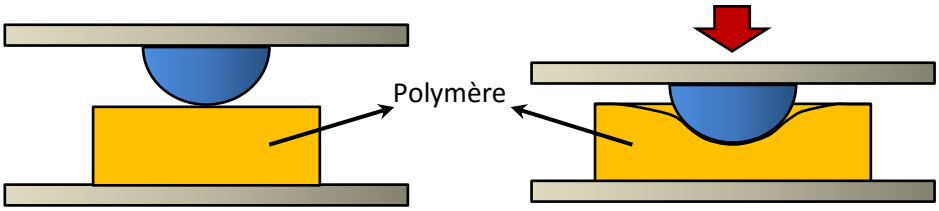


Figure 133 : Déformation du polymère de manière localisée

Pourtant il n'est pas simple d'assurer des conditions aux limites sans frottement. De plus, il est clair que dans un tel cas il faut un mécanisme supplémentaire qui va rigidifier la structure pour des forces appliquées de manière tangentielle (tout comme dans le cas des éléments piézoélectriques). A tout cela s'ajoute le problème de stabilité mécanique, c'est-à-dire il faut empêcher que le polymère subisse des déformations de cisaillement, par exemple. Pour résoudre ces problèmes des structures similaires à celle représentée dans la Figure 138 pourraient être utilisées. En effet, il a été observé en pratique qu'en utilisant des stacks qui présentent un rapport diamètre/hauteur élevé la stabilité mécanique est nettement meilleure mais que la déformation du stack pour une force donnée est plus faible. Pour obtenir des variations de capacité importantes ce type de structure pourrait être déformé de manière localisée en utilisant des concentrateur de force. Bien évidement dans un tel cas on a intérêt à limiter les électrodes aux zones soumises à des déformations importantes et le problème des frottements pourrait être aussi adressé en choisissant des matériaux présentant des coefficients de frottement plus faibles.

Quant au stack lui aussi pourrait être fabriqué de plusieurs manières en utilisant différentes configurations des électrodes. Par exemple il est possible d'utiliser des rouleaux qui sont plus simple à fabriquer ou des électrodes solides sous forme des fils intégrés dans le polymère etc.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

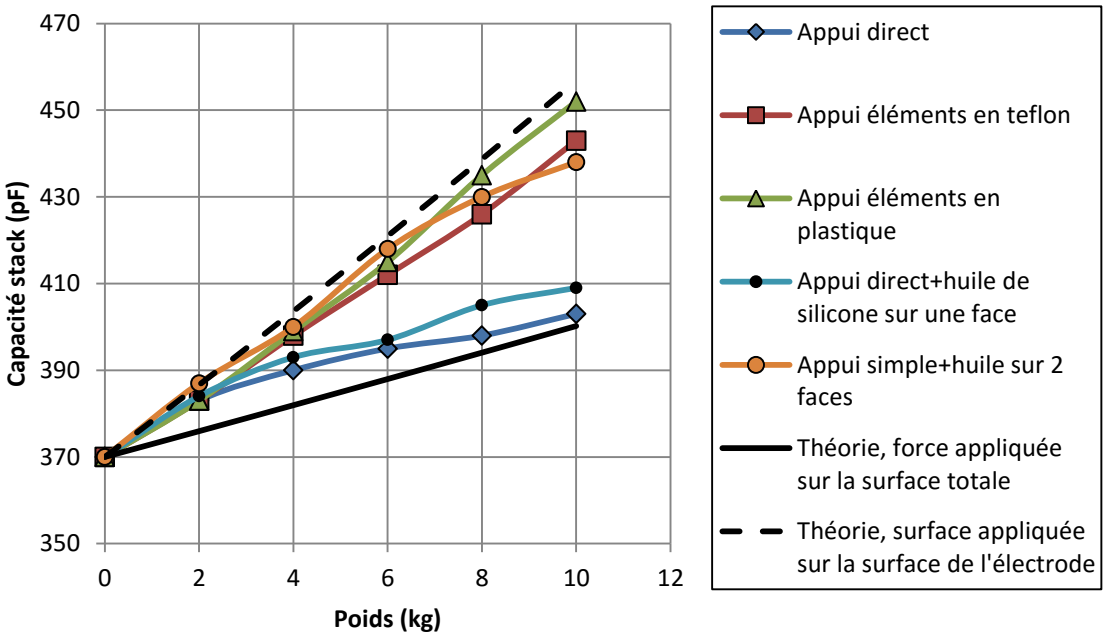


Figure 134 : Variation de la capacité du stack en fonction de la force appliquée et la surface d'appui

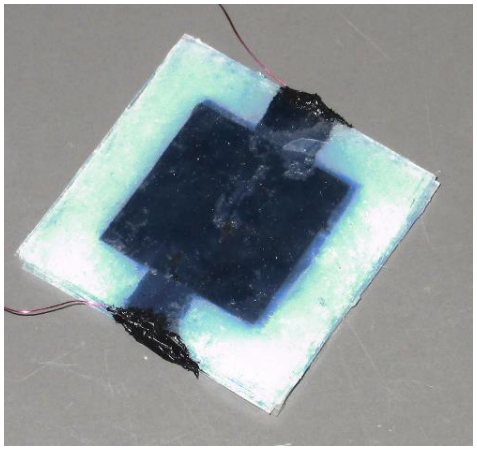


Figure 135 : Stack en silicone avec des électrodes en silicone conducteur

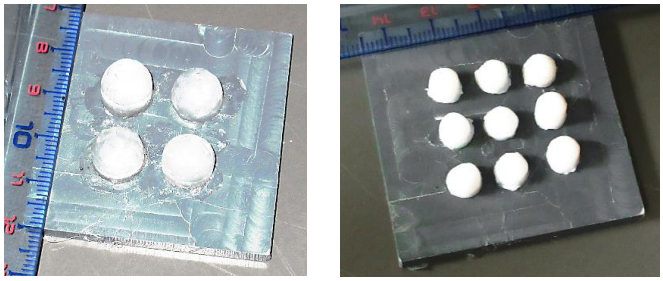


Figure 136 : Différents surfaces utilisées pour la déformation du stack
droite : éléments hémisphériques en teflon (ø ≈ 6mm)
gauche : éléments hémisphériques en plexiglass (ø ≈ 1cm)

Pour vérifier le concept on a utilisé un stack constitué de 9 films de silicone de 400 µm (5 cm x 5 cm) avec des électrodes en silicone conducteur (3 cm x 3 cm) appliquées à la main sans dilution (Figure 135). Le stack a été laissé sécher sous pression pendant quelques jours. La capacité électrique à l'état non-déformé était de 370 pF (contre 418 pF calculée) et l'épaisseur de 6.2 mm ce qui veut dire que l'épaisseur augmente d'environ 42% à cause des électrodes et la colle.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Le montage décrit dans l'annexe A.3 a été ensuite utilisé pour mesurer la variation de la capacité en fonction de la force appliquée (Figure 134). L'appui a été réalisé par l'intermédiaire des éléments hémisphériques solides ou par un simple appui plan en utilisant différentes forces axiales. Pour voir l'influence possible des forces de frottement les mesures ont été refaites en appliquant de l'huile de silicone sur les surfaces extrêmes du stack.

La mesure montre que la concentration de la force au niveau des électrodes amène à une augmentation de la variation de la capacité électrique (ce qui était prévisible). Par contre on peut observer aussi que la variation de la capacité du stack ne dépend pas beaucoup de la forme de la surface d'appui ou du frottement. Cela peut être dû au fait que les déformations restent faibles (≈10%) et que le silicone présente une faible adhérence en général.

On obtient donc facilement une variation de capacité de 90 pF pour un poids de 10 kg. Mais cela correspond à une déformation en épaisseur de seulement 10%. Pour 20kg on devrait alors pouvoir obtenir avec le même stack une variation de 183 pF. On pourrait facilement imaginer un stack 3 fois plus épais que celui-ci (≈ 2 cm) et avec le poids d'une personne de 80 kg on pourrait aussi utiliser une section 4 fois plus importante. En même temps le champ de claquage dans le silicone a été mesuré à 80 MV/m, celui-ci étant presque le même pour tous les échantillons utilisés (de même épaisseur). Si on imagine utiliser la moitié de ce champ électrique l'énergie récupérée nette pourrait être estimée à environ 280 mJ/pas. Le problème avec un tel champ électrique c'est que la tension appliquée peut atteindre des valeurs très élevées de plusieurs kV. Une technique possible pour l'abaisser serait de diminuer l'épaisseur de chaque couche. Cette quantité d'énergie est beaucoup plus élevée que celle qui pourrait être obtenue avec seulement des éléments piézoélectriques et de plus l'intégration est plus simple. Il reste pourtant le problème de la tension de sortie qui est élevée et qui nécessite de circuits électriques spécifiques, mais comme on a vu des composants électroniques adaptés pour des tensions élevées existent si la puissance échangée est suffisamment importante.

4.3 Systèmes hybrides

4.3.6 Transfert unidirectionnel des charges

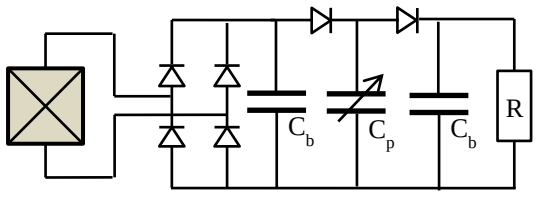


Figure 137 : Circuit hybride (configuration parallèle)

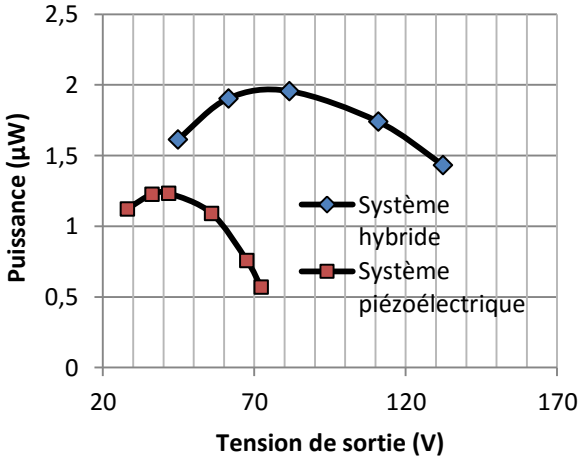


Figure 138 : Puissance moyenne obtenue avec l'élément piézoélectrique seul et avec le circuit hybride (100 N)

Pour pouvoir déjà vérifier le concept des systèmes hybrides on a utilise un élément piézoélectrique de type anneau (P189, d_{33} = 315 pC/N , C_0 = 170 pF, ϕ_{int} = 4.7 mm, ϕ_{ext} = 11 mm, H = 3.3 mm) et un

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

film en Latex (3 cm x 10 cm x 20 µm) avec des électrodes en graisse conductrice. L'actionnement et la mesure de la force a été faite avec le même système utilisé pour la caractérisation des céramiques. Tout d'abord l'élément piézoélectrique seul a été utilisé pour pouvoir ensuite comparer les quantités d'énergie. Pour cela une force sinusoïdale de 1 Hz (0 N ↔ 100 N) a été appliquée tel que la tension en circuit ouvert aux bornes de l'anneau variait entre 0 V et 190 V. Pour une sortie redressée il a été mesuré une puissance maximale d'environ 1.25 µW (tension de sortie de 38 V, pont redresseur à double alternance). La puissance maximale théorique pour une telle configuration est en principe égale à 1.49 µW mais la différence est due le plus probablement aux courants de fuite dans les diodes (1N4148) utilisées pour le redressement. Ensuite, pour le circuit hybride un condensateur de stockage intermédiaire avec des diodes + le polymère ont été rajoutés. Le film polymère a été ensuite déformé à une fréquence de 1 Hz tel que la capacité maximale était deux fois plus importante que celle à l'état relaxé (C_{min} = 1.86 nF, déflection axiale ≈ 3 cm, $C_{max} \approx 2 \cdot C_{min}$). Pour trouver la puissance optimale, comme dans le cas précédent, différentes résistances ont été utilisées en sortie. La variation de la puissance extraite dans les deux cas est illustrée dans la Figure 138. Comme on peut voir le circuit hybride fournit autour de 1.96 µW pour une tension de sortir de 82 V. D'après les formules obtenues dans la partie théorique la puissance maximale devrait être égale à 2.52 µW. Mais encore une fois il semble que cette différence pourrait être due aux pertes dans les diodes. La même expérience a été répétée en utilisant une force de 150 N en amplitude (1 Hz). La variation de la puissance est représentée dans la Figure 139.

Théoriquement l'énergie récupérée avec l'élément piézoélectrique devrait être proportionnelle au carré de l'amplitude de la force appliquée. Cette fois l'élément piézoélectrique fournit autour de 2.92 µW et on peut faire un simple calcul pour vérifier :

$$(69)\ \frac{2.92\ \mu W}{1.25\ \mu W} = 2.34 \approx 2.25 = \left(\frac{150\ N}{100\ N}\right)^2$$

Le système hybride fournit cette foi autour de 5.25 µW pour une tension de sortie de 137 V. Cela correspond à une augmentation de puissance de 1.8 fois en comparaison avec celle obtenue avec le système piézoélectrique seul. La valeur théorique est d'environ 5.67 µW.

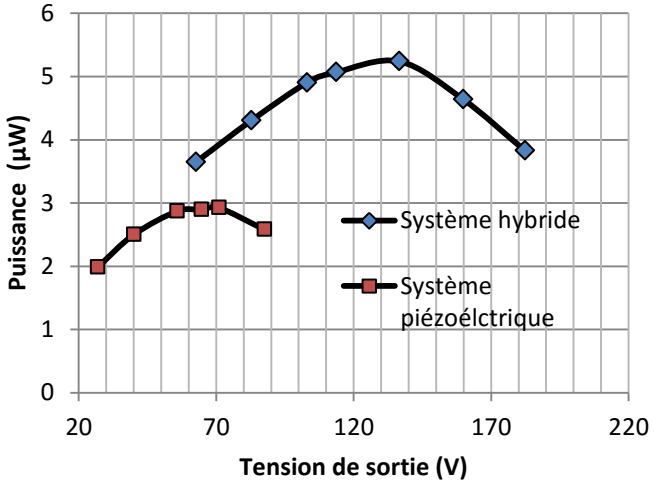


Figure 139 : Puissance moyenne obtenue avec l'élément piézoélectrique seul et avec le circuit hybride (150 N)

Comme on peut le voir, la configuration hybride fonctionne comme prévu, à part l'influence des pertes dues aux diodes. En effet, le courant de fuite des diodes 1N4148 peut dépasser 12 nA. En

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

effet, si nous examinons le premier cas (100N) la tension de sortie optimale pour l'élément piézo-électrique est de 40 V pour une puissance de 1,25 µW ce qui signifie un courant moyen extrait par la résistance de 31 nA. Comme nous pouvons le voir le courant perdu dans les diodes n'est pas négligeable du tout. Il faut donc utiliser des diodes spéciales avec des courants de fuite plus faibles, mais ce problème a été déjà analysé.

D'autre part comme la résistivité du polymère est très élevée (la résistance électrique maximale du film à l'état détendu est d'environ 1 TΩ), le courant maximal perdu dans le polymère à 40 V, était d'environ 40 pA. Les pertes dans le polymère étaient si faibles qu'il n'y avait pas une différence notable entre la puissance récupérée avec l'élément piézo-électrique seul et la puissance récupérée avec le système hybride, lorsque le polymère n'était pas soumis à aucune déformation; il agissait juste comme un condensateur stockant de l'énergie.

Autre remarque doit être faite concernant la puissance récupérée, 5 µW est une quantité très faible, certes, mais cela est dû à la force assez petite qui a été appliquée sur l'élément piézoélectrique. En effet la contrainte qui pourrait être appliquée à l'élément piézoélectrique pourrait être aussi grande que 40 MPa, dans notre cas, la contrainte maximale était inférieure à 2 MPa, comme l'énergie récupérée est proportionnelle au carré de la contrainte, cela signifierait une augmentation de x100.

4.3.7 Préservation des charges électriques

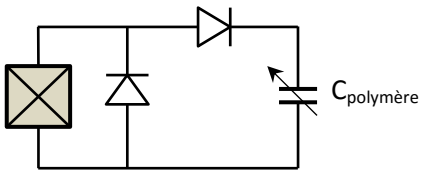


Figure 140 : Circuit utilisé pour le chargement du polymère

Pour cette configuration un petit élément piézoélectrique cylindrique (P188) a été utilisé (d_{33} = 516 pC / N, C_0 = 20 pF, épaisseur = 5 mm, diamètre = 2,6 mm, masse = 0,2 g). Aussi, un film en silicone (avec des dimensions approximatives de 5,5 cm x 10 cm x 100 µm) avec électrodes en silicone conducteur, appliquées à la main sur chaque face, et avec une capacité électrique à 20 Hz, à l'état non déformé de 1,22 nF. Tout d'abord dix condensateurs en polyester, 22 nF chacun, ont été connectés en série et alimentés avec l'élément piézoélectrique à l'aide du circuit de redressement représenté dans la Figure 140. En raison de la haute tension de celui-ci, dix-neuf diodes 1N4148 ont été utilisées à la place d'une seule. La force (harmonique, 1 Hz) appliquée sur l'élément piézoélectrique présentait une amplitude de 125 N. L'évolution dans le temps de la tension aux bornes du condensateur est donnée dans la Figure 141. Dans la première partie du graphique le chargement du condensateur peut être observé, une tension maximale de 1700 V a été atteinte après environ 200 s (200 périodes). Puis l'excitation mécanique sur l'élément piézo-électrique a été arrêtée et le condensateur a été laissé se décharger à travers les diodes. A la fin le condensateur a été déconnecté du redresseur et laissé se décharger par l'intermédiaire de ses propres courants de fuite. La même chose a aussi été réalisée en utilisant cette fois-ci le polymère à la place des condensateurs (Figure 142).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

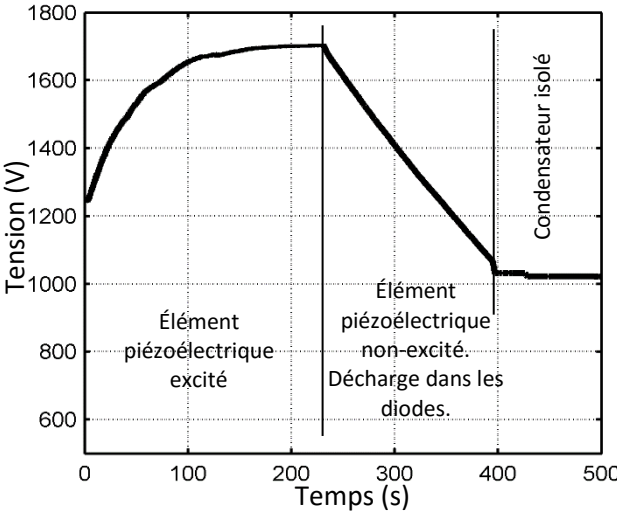


Figure 141 : Chargement d'un condensateur en utilisant un élément piézoélectrique

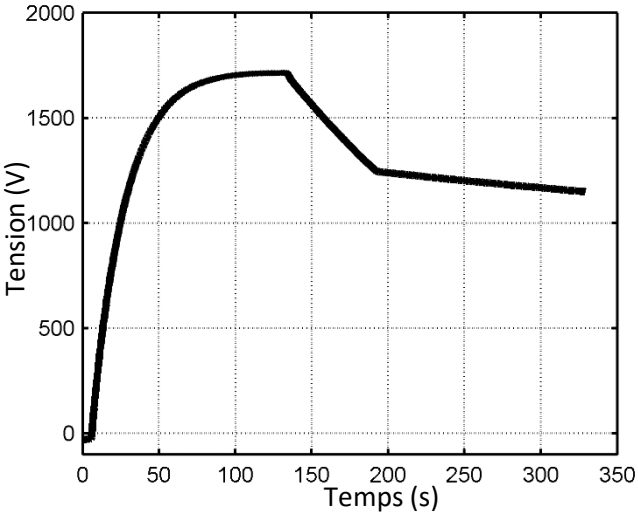


Figure 142 : Chargement d'un film de silicone avec élément piézoélectrique

Premièrement, comme nous pouvons le voir à cause des pertes dans les diodes, la tension maximale est de seulement 1700 V par rapport à la valeur attendue de 2500 V. D'autre part, les pertes dues à la décharge du condensateur sont beaucoup plus faibles (la chute de tension due à la décharge dans le condensateur a été estimée à quelques pourcents après 6 minutes). Le courant de fuite dans le polymère est estimé à 0,85 nA à environ 1,2 kV, cela signifierait un courant de 1,2 nA à 1,7 kV. Si le pont redresseur serait parfait le même élément piézoélectrique pourrait alimenter un film 8 fois la surface de celui utilisé à 1,7 kV (équivalent à un champ électrique de 17 MV/m). Dans ce cas, le volume du polymère serait de 4.4 cm^3 tandis que celle de l'élément piézo-électrique est de seulement de 0,027 cm^3, il s'agit donc d'un rapport de plus de 160 à 1.

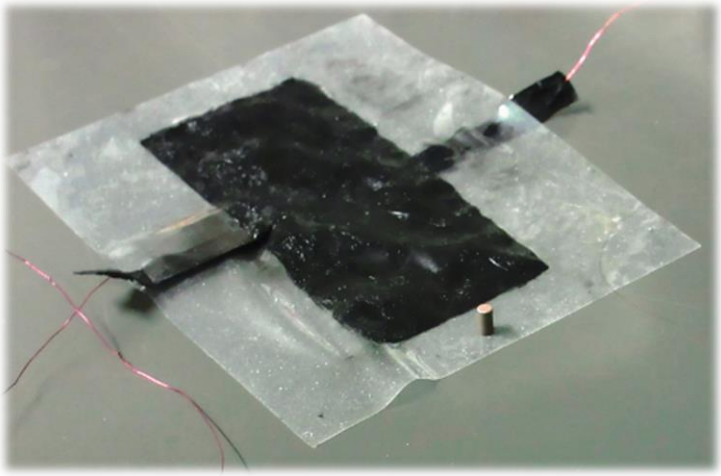


Figure 143 : Film en silicone et élément piézoélectrique utilisé pour son chargement

Les deux techniques sont adaptées pour des polymères qui présentent de faibles courants de fuite car dans les deux cas les charges électriques doivent être petit à petit accumulées sur le film. Dans ce sens le latex, l'acrylique (mais le problème de sa viscosité reste toujours présent) et le silicone semble être de très bons candidats. Le PU au contraire ne semble pas être acceptable car même utilisé avec une source de tension la performance obtenue n'est pas très bonne. Le terpolymère pourrait fonctionner car les pertes même si pas aussi faibles que celles des trois autres polymères restent beaucoup plus faibles que celles du PU, de plus sa permittivité électrique est beaucoup plus élevée (≈ 33) que la permittivité des autres polymères.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la possibilité d'utiliser des systèmes de récupération d'énergie simples et hybrides combinant des polymères diélectriques et des éléments piézoélectriques. Pour les systèmes hybrides deux configurations simples ont été étudiées : une dans laquelle la charge électrique est transférée dans un seul sens, de l'élément piézoélectrique vers le polymère et ensuite au circuit alimenté et une autre dans laquelle la charge électrique est systématiquement retournée par le circuit alimenté au polymère. La première configuration semble être adaptée à des situations où l'élément piézoélectrique fournit déjà une quantité importante d'énergie. Le polymère pourrait être utilisé dans une telle configuration, afin de multiplier l'énergie fournie par celui-ci, l'augmentation étant proportionnelle en première approximation à la variation de la capacité, à condition qu'elle soit beaucoup plus grande que celle de l'élément piézo-électrique. Cependant l'énergie de sortie est limitée par l'énergie fournie par l'élément piézoélectrique. La seconde configuration d'autre part est beaucoup plus intéressante si la densité d'énergie qui peut être obtenue avec le polymère est supérieure à celle du matériau piézo-électrique (ce qui est normalement le cas à l'heure actuelle). Dans ce cas, la charge électrique est accumulée sur le polymère et en utilisant un condensateur supplémentaire et les phénomènes d'induction électrostatique la charge électrique peut être conservée ou au moins réutilisé pendant plusieurs cycles et en même de l'énergie peut être transférée à un circuit électrique. Dans les deux cas, l'inconvénient de l'utilisation d'un système hybride par rapport à une alimentation à haute tension c'est le temps qu'il faut pour que le polymère se charge à un niveau de tension élevé (ce qui peut nécessiter plusieurs centaines de cycles) et commencer à travailler dans un régime optimal. Un autre problème ce sont les circuits électriques de transfert d'énergie qui doivent être adaptés à des tensions très élevées et faibles courants.

En tout cas, nous montrons dans ce chapitre que des éléments piézoélectriques et des polymères diélectriques pourraient être utilisés ensemble ou séparés dans un système de récupération d'énergie. Les systèmes hybrides étant en mesure de faire un bon usage des deux : l'élément piézo-électrique fournissant l'énergie électrique initiale et celle nécessaire à compenser les pertes plus la tension élevée et le polymère sa haute densité d'énergie, son élasticité et sa simplicité d'intégration.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 5. Étude et modélisation des films électroactifs

Dans ce chapitre on s'intéresse au comportement des films minces contenant des couches électroactives (qu'on va appeler tout simplement films électroactifs). La principale application visée est celle de changement et contrôle de forme des films minces. Différentes structures peuvent être utilisées avec différentes conditions aux limites et avec différents mécanismes d'interaction avec le milieu externe. On voudrait donc être capable de modéliser ces structures pour trouver les configurations optimales et comparer leur fonctionnement. Ce chapitre est organisé de la manière suivante. Tout d'abord on commence par la mise en forme des équations nécessaires pour caractériser les films électroactifs en expliquant les hypothèses et simplifications utilisées. La seconde partie s'articule autour de la modélisation des films électroactifs et la déduction de résultats généraux sur des structures caractérisées par un comportement à deux dimensions.

5.1 Considérations générales sur la modélisation des films électroactifs

Dans le cas général n'importe quelles grandeurs physiques utilisées peuvent être définies en fonction de la position de la structure à l'état de référence (approche lagrangienne) ou à l'état déformé (approche eulérienne). En effet, n'importe quelle grandeur est définie par rapport à un point matériel, on peut alors faire cette définition par rapport à la position de ce point à un instant donné ou suivre le point dans son mouvement. Si on a un régime des faibles déplacements alors les deux définitions peuvent être considérées coïncidentes, mais ce n'est plus le cas lorsque les déplacements deviennent importants. Dans notre cas on peut prendre comme état de référence la structure qui n'est pas alimentée en tension et dont on n'applique pas de force externe. Ces deux façons de définir les grandeurs physiques amènent à beaucoup de définitions possibles et il semble alors nécessaire de faire un court rappel.

5.1.1 Cinématique

Si on note $\vec{x}$ le vecteur-position de n'importe quel point matériel alors son gradient (le Jacobien) c'est une de plus simple manières de caractériser l'état de déformation du milieu:

$$(70)\ \overline{\overline{\mathrm{F}}} = \overline{\overline{\mathrm{grad}}}_{\mathrm{X}}(\vec{x})$$

Ce tenseur est définit en utilisant l'approche lagrangienne, le symbole X indiquant le fait que les dérivées sont faites par rapport à des positions dans l'état de référence. Mathématiquement il s'agit de la transformation qui à un vecteur reliant deux points infiniment proches dans l'état de référence attribue le vecteur qui relie les mêmes points à l'état déformé. L'inconvénient de ce tenseur c'est qu'il peut être variable même en absence de toute déformation (mouvement de rotation d'un corps solide par exemple).

Pour résoudre ce problème on peut dériver d'autres tenseurs. Ainsi on peut par exemple utiliser la forme bilinéaire qui à n'importe quels deux vecteurs infinitésimaux voisins attribue le produit scalaire de ces deux vecteurs à l'état déformé. On pourrait faire de même mais inversement pour deux vecteurs à l'état déformé et associer leur produit scalaire à l'état initial. Les deux transformations amènent aux tenseurs appelés tenseurs de déformation de Cauchy-Green droit et gauche :

$$(71)\ \overline{\overline{\mathrm{C}}} = \overline{\overline{\mathrm{F}}}^{\mathrm{T}}\overline{\overline{\mathrm{F}}} \quad \text{❖} \quad \overline{\overline{\mathrm{B}}} = \overline{\overline{\mathrm{F}}}\overline{\overline{\mathrm{F}}}^{\mathrm{T}}$$

Ainsi on a : $\mathrm{d}\vec{\mathrm{x}}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{x}}_2 = \mathrm{d}\vec{\mathrm{X}}_1 \cdot \overline{\overline{\mathrm{C}}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{X}}_2$ ou $\mathrm{d}\vec{\mathrm{X}}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{X}}_2 = \mathrm{d}\vec{\mathrm{x}}_1 \cdot \overline{\overline{\mathrm{B}}}^{-1} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{x}}_2$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour rendre le tenseur des déformations nul lorsqu'aucune déformation n'existe on peut utiliser une transformation qui soustrait le produit scalaire des vecteurs à l'état final et initial ce qui amène à la définition des tenseurs de déformations de Green-Lagrange (tenseur lagrangien) et Euler-Almansi (tenseur eulérien) :

$$(72)\ \overline{\overline{E}} = \frac{1}{2}\cdot\left(\overline{\overline{C}} - \overline{\overline{I}}\right) \qquad \overline{\overline{A}} = \frac{1}{2}\cdot\left(\overline{\overline{I}} - \overline{\overline{B}}^{-1}\right)$$

Plusieurs d'autres tenseurs de déformations peuvent être dérivés mais souvent l'intérêt d'utiliser une définition particulière est motivé par la précision avec laquelle on arrive à retrouver les résultats expérimentaux ou la simplification des calculs pour certaines configurations [210–212].

5.1.2 Contraintes et forces

Le tenseur de contraintes peut aussi être représenté de plusieurs manières. Le plus utilisé c'est probablement le tenseur des contraintes de Cauchy qui est un tenseur eulérien. Le tenseur de Cauchy attribue à une surface élémentaire orientée, dans le matériau déformé, la force élémentaire avec laquelle, les deux parties isolées du milieu, interagissent. Ce tenseur est symétrique s'il n'y pas de moment mécanique local généré.

La loi d'équilibre locale faisant intervenir ce tenseur fournit l'équation suivante :

$$(73)\ \overrightarrow{\mathrm{div}_x}(\overline{\overline{\sigma}}) = \vec{0}$$

D'une manière similaire aux tenseurs de déformation on peut définir un tenseur de contraintes lagrangien qui à une certaine surface élémentaire non-déformée, attribue la force qui agit. Ce tenseur est appelé premier tenseur de Piola-Kirchhoff ($\overline{\overline{t}}$) et souvent il n'est pas symétrique mais il peut être rendu ainsi par une normalisation de la surface, ce qui ramène à la définition du second tenseur de Piola-Kirchhoff ($\overline{\overline{T}}$).

Entre différents tenseurs de contraintes on a les relations suivantes :

$$(74)\ \overline{\overline{t}} = \left|\overline{\overline{F}}\right|\cdot\overline{\overline{\sigma}}\cdot\overline{\overline{F}}^{-T} \ \text{❖}\ \overline{\overline{T}} = \left|\overline{\overline{F}}\right|\cdot\overline{\overline{F}}^{-1}\cdot\ \overline{\overline{\sigma}}\cdot\overline{\overline{F}}^{-T}$$

La loi de la dynamique peut être exprimée en fonction de ces tenseurs ce qui peut amener à une simplification des équations. En effet dans l'équation (73) l'opérateur divergent est définit par rapport à la géométrie déformée (qui est une inconnue du problème à priori). L'équation de l'équilibre utilisant le premier tenseur de Piola-Kirchhoff devient :

$$(75)\ \overrightarrow{\mathrm{div}_X}\left(\overline{\overline{t}}\right) = \vec{0}$$

Dans les matériaux électroactifs il est usuel de considérer que le tenseur des contraintes c'est la superposition des contraintes d'origine élastique et des contraintes électriques [80] :

$$(76)\ \overline{\overline{\sigma}} = \overline{\overline{\sigma}}^{\mathrm{elec}} + \overline{\overline{\sigma}}^{\mathrm{élas}}$$

Les premières sont dues au déplacement des points matériels autour de leur point d'équilibre et il s'agit des forces de courte distance, alors que les deuxièmes représentent l'interaction entre des particules chargées (dipôles et charges libres) et leur distance d'action est beaucoup plus importante.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

5.1.3 Régime de faibles et grandes déformations, déplacements et rotations

Pour décrire les déformations le tenseur d'Euler-Lagrange est le plus souvent utilisé [213,214]. Si celui-ci est exprimé en fonction du champ de déplacements on obtient l'expression suivante :

$$(77)\ \overline{\overline{\mathrm{E}}} = \frac{1}{2}\left[\overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{\mathrm{u}}) + \overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{\mathrm{u}})^{\mathrm{T}} + \overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{\mathrm{u}})^{\mathrm{T}} \cdot \overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{\mathrm{u}})\right]$$

Lorsque le champ de déplacements est assez faible alors les déformations restent forcément très faibles aussi. Dans ce cas le produit de deux tenseurs dans l'expression (77) peut être considéré négligeable. Avec cette simplification on obtient le tenseur de déformation souvent utilisé :

$$(78)\ \bar{\bar{\varepsilon}} = \frac{1}{2}\left[\overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{u}) + \overline{\overline{\mathrm{grad}}}\ (\vec{u})^{T}\right]$$

Pourtant il faut remarquer que des faibles déformations n'impliquent pas toujours des petites déplacements ou rotations. L'exemple le plus simple qui illustre ce phénomène est une poutre très longue et très mince actionnée par une force applique à son extrémité.

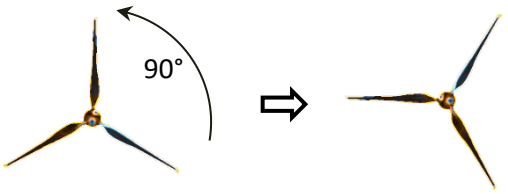


Figure 144 : Hélice solide tournant autour d'un axe

La déflection dans un tel cas pourrait être comparable à la longueur de la poutre même si les déformations restent assez faibles. Un régime à faibles déformations ne permet pas de simplifier le tenseur $\overline{\overline{E}}$ pour arriver à $\bar{\bar{\varepsilon}}$. Par exemple pour un corps **solide** en rotation le facteur des deux tenseurs dans (77) est loin d'être négligeable. Si on considère par exemple une hélice solide qui tourne autour de son axe de 90° (Figure 144). On peut montrer que le tenseur $\bar{\bar{\varepsilon}}$ exprimé dans un repère orienté selon l'axe de rotation comporte des composants qui sont égaux à 1 alors qu'il n'y a aucune déformation. Le tenseur $\bar{\bar{\varepsilon}}$ pourrait par contre être utilisé lorsqu'il est définit dans un repère mobile qui tourne avec le système.

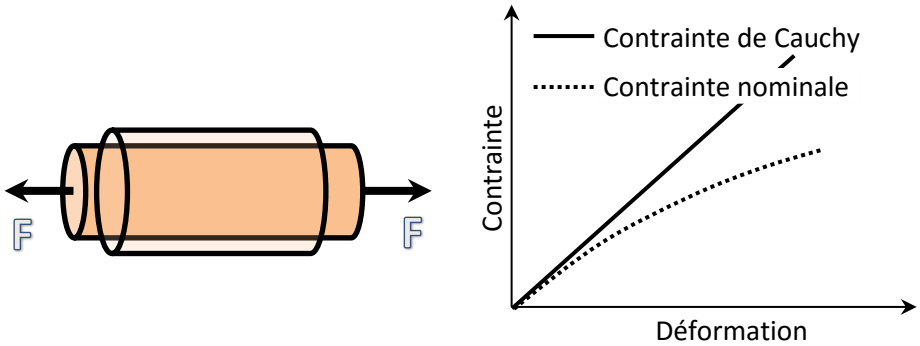


Figure 145 : La relation entre les contraintes et les déformations peut devenir non-linéaire à cause de s variations géométriques

La même chose peut arriver avec une structure électroactive lorsque des rotations importantes sont générées ce qui veut dire qu'une attention particulière doit être accordée à la façon dont différents tenseurs sont utilisés et définis. Lorsque les déformations restent faibles (<10%) on considère souvent que celles-ci présentent une dépendance linéaire des contraintes élastiques (c.à.d. la loi de Hooke est applicable). Les matériaux peuvent être isotropes ou anisotropes ce qui fait que le comportement élastique est caractérisé par deux (par exemple le module d'Young et le coefficient de Poisson) ou plusieurs paramètres. Mais, lorsque les déformations deviennent plus importantes

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

des non linéarités se manifestent celles-ci peuvent avoir deux causes à leur origine. Ainsi, on peut distinguer les non-linéarités géométriques et les non-linéarités du comportement élastique du matériau. Les premières arrivent à cause du fait que pour des déformations non-négligeables les tenseurs définis d'une manière lagrangienne ou eulérienne commencent à différer. Ainsi par exemple même s'il existe une relation linéaire entre le tenseur de Cauchy de contrainte et le tenseur de Green-Lagrange celle-ci n'est plus vérifiée si on considère le même tenseur de déformation et les contraintes de Piola-Kirchhoff. L'exemple très simple qui illustre ce phénomène c'est un simple fil très élastique et incompressible auquel on applique une force en extension. Lorsque la déformation longitudinale atteint 50%, la section diminue de 50% aussi. Il y a donc un facteur de deux entre les contraintes de Cauchy et de Piola-Kirchhoff, et donc si on utilise celles-ci lors des mesures (contraintes nominales) alors la caractéristique de comportement élastique du matériau n'est pas linéaire mais hyperbolique et cela même si la relation entre la contrainte de Cauchy et la déformation est linéaire (Figure 145).

Autre type de non-linéarité peut se manifester lorsque les déformations sont très importantes au niveau du matériau même. Celle-ci est caractéristique aux matériaux très flexibles comme par exemple les élastomères. En effet, ceux-ci sont très élastiques (hyperélastiques) grâce à leur structure moléculaire constituée par des chaines très longues qui sont reliées seulement à certains endroits [215]. A l'état initial les chaînes moléculaires sont fortement repliées sur elles-mêmes, les déformations importantes étant possibles grâce au mouvement de rotation des molécules qui sont reliées entre elles par des liaisons simples. Mais une fois que ces chaînes deviennent tendues, des forces de plus en plus grandes sont nécessaires pour produire des déformations. Ce qu'on voit alors est une sorte de saturation de la déformation. Dans ces conditions on ne peut plus utiliser des équations linéaires qui relient les contraintes aux déformations. De nouvelles formulations sont alors nécessaires. Lorsqu'on utilise des matériaux isotropes et uniformes il est plus simple de raisonner en faisant intervenir l'énergie élastique due à la déformation. Ainsi on commence par postuler une certaine dépendance de la densité d'énergie élastique en fonction de la déformation et on en déduit ensuite les contraintes en appliquant le principe des travaux virtuels. Cette approche est une de plus utilisées actuellement. Si on note la densité volumique de l'énergie élastique W (par rapport à la configuration de référence), alors celle-ci ne devrait dépendre que des invariants (par rapport à n'importe quel changement de base) des tenseurs de déformations. Les trois invariants le plus souvent utilisées sont les suivants :

$$(79)\quad \begin{cases} \mathrm{I}_1 = \mathrm{trace}\left(\bar{\bar{\mathrm{C}}}\right) = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ \mathrm{I}_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \cdot \lambda_3^2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\mathrm{trace}\left(\bar{\bar{\mathrm{C}}}\right)\right)^2 - \mathrm{trace}\left(\bar{\bar{\mathrm{C}}}^2\right)\right] \\ \mathrm{I}_3 = \mathrm{J}^2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 = \det(\bar{\bar{\mathrm{C}}}) \end{cases}$$

Dans les définitions précédentes λ_i^2 représentent les valeurs propres du tenseur de déformations $\bar{\bar{\mathrm{C}}}$ tel que défini dans (71). La fonction $W(\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2, \mathrm{I}_3)$ peut être approximée de plusieurs manières ce qui amène à de différents modèles hyperélastiques possibles. Les plus utilisés à l'heure actuelle ce sont les modèles de Mooney-Rivlin, de Gent, Neo-Hookean, Ogden, Arruda-Boyce etc. [216]. Certains modèles sont basés sur des expressions empiriques d'autres sur le comportement moléculaire du matériau. Mais tous ces modèles ne sont que des approximations de la vraie énergie ce qui veut dire que souvent pour un matériau on peut avoir un modèle qui peut être plus adapté que l'autre pour certaines conditions et que normalement la précision est améliorée en utilisant des modèles comportant beaucoup de paramètres qui peuvent être ajustés en effectuant des tests expérimentaux [217,218].

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Souvent cette fonction est simplifiée par le fait qu'on suppose que le matériau est incompressible ce qui implique :

$$(80)\ \mathrm{I}_3 = 1 \text{ et donc que } \mathrm{W} = \mathrm{W}(\mathrm{I}_1, \mathrm{I}_2)$$

Même si cette hypothèse est souvent utilisée il faut toutefois mentionner que sa validité dépend aussi de la nature du problème. En effet, si on prend comme exemple le caoutchouc naturel celui-ci présente un module de compressibilité beaucoup plus faible que celui de l'acier. En effet le module de compressibilité isostatique de l'acier est d'approximativement 150 GPa contre quelques GPa pour le caoutchouc [219]. Pourtant, ce sont les polymères qui sont considérées incompressibles habituellement et la principale raison c'est le fait que la notion d'incompressibilité doit être interprétée de manière relative et le module d'incompressibilité doit être comparé aux autres coefficients élastiques (module d'Young de 1 MPa pour le caoutchouc contre 200 GPa pour l'acier.

Comme on l'a dit le tenseur des contraintes élastiques peut être retrouvé, une fois la densité d'énergie élastique définie, en appliquant le principe des travaux virtuels (la variation de l'énergie élastique doit être égale au travail des forces externes qui provoquent les déformations). Le raisonnement est simple est peut être expliqué de manière succincte. Pour cela on peut imaginer un volume élémentaire de matière (τ) à l'état de référence autour d'un certain point (noté O). Ensuite on peut supposer qu'on applique une force externe pour amener ce volume à un certain état de déformation d'une manière quasi-statique (ce qui permet de supposer l'énergie cinétique négligeable à tout moment). Le déplacement d'un point au voisinage immédiat d'un point A, contenu dans le volume élémentaire de matière, peut être approximé par :

$$(81)\ \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{A} = \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{O} + \bar{\bar{\mathrm{F}}} \cdot \overrightarrow{\mathrm{OA}}$$

Le travail des force externes effectué sur ce volume sur un certain instant initial et un certain t_f est donné par :

$$\delta W \cdot \tau = \int_{dS} \left(\left[\bar{\bar{t}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{S}} \right]^T \cdot \delta \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{A} \right) \approx \int_{dS} \left(\left[\bar{\bar{t}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{S}} \right]^T \cdot \delta \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{O} + \left[\bar{\bar{t}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{S}} \right]^T \cdot \left[\delta \bar{\bar{\mathrm{F}}} \cdot \overrightarrow{\mathrm{OA}} \right] \right)$$

$$= \underbrace{\left(\int_{dS} \left[\bar{\bar{t}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{S}} \right] \right)^T}_{\vec{0}} \cdot \delta \vec{\mathrm{u}}_\mathrm{O} + \int_{dS} \left(\mathrm{d}\vec{\mathrm{S}}^T \cdot \left[\bar{\bar{t}}^T \cdot \delta \bar{\bar{\mathrm{F}}} \right] \cdot \overrightarrow{\mathrm{OA}} \right) = \int_{dS} \left(\mathrm{d}\vec{\mathrm{S}}^T \cdot \left[\bar{\bar{t}}^T \cdot \delta \bar{\bar{\mathrm{F}}} \right] \cdot \overrightarrow{\mathrm{OA}} \right)$$

Ce qui amène à :

$$\delta W = \frac{1}{\tau} \cdot \left\{ \int_{dS} \left(\left\{ \overrightarrow{\mathrm{OA}}^T \cdot \left[\delta \bar{\bar{\mathrm{F}}}^T \cdot \bar{\bar{t}} \right] \right\} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathrm{S}} \right) \right\} = \frac{1}{\tau} \cdot \left\{ \int_\tau \mathrm{div} \left\{ \overrightarrow{\mathrm{OA}}^T \cdot \left[\delta \bar{\bar{\mathrm{F}}}^T \cdot \bar{\bar{t}} \right] \right\} \right\} = \underbrace{\frac{1}{\tau} \cdot \int_\tau \overline{\overline{\mathrm{div}}} \left\{ \overrightarrow{\mathrm{OA}} \right\}}_{I} \odot \left[\delta \bar{\bar{\mathrm{F}}}^T \cdot \bar{\bar{t}} \right]$$

Et donc en passant aux limites :

$$(82)\ \mathrm{dW} = \sum_{\mathrm{ij}} \mathrm{t}_{\mathrm{ij}} \cdot \mathrm{dF}_{\mathrm{ij}} \ \Rightarrow\ \mathrm{t}_{\mathrm{ij}} = \frac{\partial \mathrm{W}}{\partial \mathrm{F}_{\mathrm{ij}}}$$

On peut aussi en déduire les contraintes de Cauchy, en utilisant les formules de passage (74) :

$$(83)\ \bar{\bar{\sigma}} = \left| \bar{\bar{\mathrm{F}}} \right|^{-1} \cdot \frac{\partial \mathrm{W}}{\partial \bar{\bar{\mathrm{F}}}} \cdot \bar{\bar{\mathrm{F}}}^{\mathrm{T}}$$

Dans le cas général l'équation d'équilibre local (73) associé à un comportement hyperélastique amène à des équations fortement non-linéaires sauf cas particuliers. C'est le cas lorsqu'on considère

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

les déformations uniformes et lorsqu'on travaille dans un repère orienté dans les directions des déformations principales (dans quel cas le tenseur gradient est diagonal). Dans un tel repère on a :

$$(84)\ \sigma_{ii} = \frac{1}{J} \cdot \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} \cdot \lambda_i$$

Si on considère que le matériau est incompressible alors le passage de (82) à (83) n'est pas possible car on ne peut faire varier chaque composant du tenseur $\bar{\bar{F}}$ de manière indépendante. En effet, il faut assurer que son déterminant reste égal à un ($J = 1$, condition nécessaire pour assurer la condition d'incompressibilité). Lorsque le matériau est incompressible on peut avoir un tenseur des contraintes non-nulles en absence de toute déformation. Cela veut dire qu'il est impossible dans cette situation d'en déduire le tenseur des contraintes à partir de l'énergie élastique. On peut montrer que dans un tel cas le tenseur des contraintes de Cauchy à la même forme que dans (83) plus un tenseur diagonal ayant les même éléments sur la diagonale et qui ne dépend pas de la position :

$$(85)\ \bar{\bar{\sigma}} = \left|\bar{\bar{F}}\right|^{-1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \bar{\bar{F}}} \cdot \bar{\bar{F}}^T - p \cdot \bar{\bar{I}}$$

Comme on l'a déjà dit il existe plusieurs modèles qui expriment la densité volumique d'énergie élastique en fonction des déformations (Tableau 25). Le modèle Neo-Hookean est sans doute un de plus simple car il s'agit en fait de la loi de Hooke exprimé par rapport à des contraintes nominales et qui prend en compte les non-linéarités géométriques [220]. Le modèle de Gent est aussi assez simple et de plus il peut prendre en considération le phénomène de saturation des déformations [78]. Quant au modèle d'Arruda-Boyce celui-ci est remarquable par le fait qu'on essaie de faire intervenir des paramètres caractéristiques microscopiques du matériau [221].

Modèle	**Matériau compressible**	**Matériau incompressible**
Neo-Hookean	$W = C_1 \cdot (I_1 - 3) + \frac{1}{D} \cdot (J - 1)^2$	$W = C_1 \cdot (I_1 - 3)$
Yeoh	$W = \sum_{i=1..3} \left[C_i \cdot (I_1 - 3)^i + \frac{1}{D_i} \cdot (J - 1)^{2i} \right]$	$W = \sum_{i=1..3} C_i \cdot (I_1 - 3)^i$
Mooney-Rivlin	$W = \sum_{ij} \left[C_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i \cdot (I_2 - 3)^j + \frac{1}{D_i} \cdot (J - 1)^{2i} \right]$	$W = \sum_{ij} C_{ij} \cdot (I_1 - 3)^i \cdot (I_2 - 3)^j$
Ogden	$W = \sum_{i} \left[C_i \cdot \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 \right) + \frac{1}{D_i} \cdot (J - 1)^{2i} \right]$	$W = \sum_{i} C_i \cdot \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_1^{\alpha_i} \lambda_2^{\alpha_i} - 3 \right)$
Arruda-Boyce	$W = \mu \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (I_1 - 3) + \frac{1}{20N} \cdot (I_1^2 - 9) + \ldots \right) + \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{J^2 - 1}{2} - \ln(J) \right)$	$W = \mu \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot (I_1 - 3) + \frac{1}{20N} \cdot (I_1^2 - 9) + \ldots \right)$
Gent	$W = -\frac{\mu}{2} \cdot J_m \cdot \left\{ \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right) + 2 \cdot \ln(J) \right\}$	$W = -\frac{\mu}{2} \cdot J_m \cdot \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{J_m} \right)$

Tableau 25 : Dépendance entre la densité d'énergie élastique et les déformations, pour différents modèles hyperélastiques [222,223]

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Mooney - Rivlin est aussi un modèle qui est souvent utilisé, normalement avec deux ou trois paramètres. Même si dans beaucoup de publications on voit des comparaisons entre la précision de différents modèles, il faut remarquer qu'en réalité le modèle qui comporte le plus de paramètres sur lesquels on peut jouer est aussi le plus précis. Bien évidement dans certains cas, par chance, un modèle même comportant peu de paramètres peut décrire très bien le comportement d'un matériau particulier mais cela ne garantit pas la même précision pour d'autres. En fait, on pourrait imaginer une infinité de tels modèles qui revient à approximer la densité d'énergie élastique par différentes fonctions.

5.1.4 Contraintes électriques

L'application d'un champ électrique dans un matériau diélectrique se traduit par l'apparition des contraintes (on les appelle ici de manière conventionnelle contraintes électriques). Mais le mécanisme microscopique qui génère ces contraintes peut être très différent pour chaque type de matériau électroactif.

Lorsque le matériau actif est piézoélectrique on suppose souvent que les contraintes électriques générées présentent une dépendance linéaire en fonction du champ électrique appliqué. Les équations peuvent alors être utilisées. Mais cela reste valable seulement dans le cas où le champ électrique n'est pas très élevé dans le cas contraire des non-linéarités peuvent se manifester [224,225].

On peut avoir des phénomènes complexes aussi dans les matériaux purement diélectriques. La façon la plus simple de modéliser ces contraintes c'est par l'intermédiaire des contraintes de Maxwell (tenseur eulérien) définies de la manière suivante [226] pour un matériau isotrope et présentant un comportement diélectrique idéal :

$$(86)\ \overline{\overline{\sigma}}_{\mathrm{Maxwell}} = \vec{\mathrm{E}} \otimes \vec{\mathrm{D}} - \frac{\varepsilon \cdot \left(\vec{\mathrm{E}}\right)^2}{2} \overline{\overline{\mathrm{I}}} + \vec{\mathrm{H}} \otimes \vec{\mathrm{B}} - \frac{\mu \cdot \left(\vec{\mathrm{H}}\right)^2}{2} \overline{\overline{\mathrm{I}}}$$

En effet, dans le cas général les champs magnétiques contribuent aussi aux contraintes générées. Mais souvent pour des structures électroactives le champ magnétique est considéré négligeable ce qui amène à :

$$(87)\ \overline{\overline{\sigma}}_{\mathrm{Maxwell}} = \vec{\mathrm{E}} \otimes \vec{\mathrm{D}} - \frac{\varepsilon \cdot \left(\vec{\mathrm{E}}\right)^2}{2} \overline{\overline{\mathrm{I}}}$$

Si on prend un film diélectrique idéal mince et on applique une tension électrique sur les électrodes situés sur les deux faces (dans quel cas le champ électrique peut être supposé uniforme et perpendiculaire) alors d'après la formule précédente on obtient dans un repère orienté avec son axe z suivant l'épaisseur :

$$(88)\ \overline{\overline{\sigma}}_{\mathrm{Maxwell}} = \begin{pmatrix} \frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} \end{pmatrix}$$

Comme on peut voir on génère des contraintes perpendiculaires compressives mais aussi latérales ayant tendance à détendre le film. Si le matériau peut être supposé incompressible alors l'ajout d'un tenseur diagonal constant aux tenseurs des contraintes ne modifie pas les équations dynamiques. On peut par exemple soustraire $\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2/2$ de tous les éléments diagonaux de l'expression précédente ce qui amène à une seule composante non nulle :

$$(89)\ \sigma_{33}^{\mathrm{M}} = -\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2,\ \sigma^{\mathrm{M}} \text{ : contraintes de Maxwell}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La formule (89) est souvent utilisée pour les films électroactifs (diélectriques) comme on peut le voir dans la plupart des articles concerné par ce sujet [164,227–229]. Mais souvent son interprétation est moins claire. Ainsi par exemple on peut rencontrer dans la littérature spécialisé dans le domaine, l'idée conforme laquelle les déformations qui se produisent dans un matériau diélectrique sont directement liées à l'attraction des charges électriques placées sur les électrodes. Pourtant cette explication du phénomène semble ne pas être vraiment satisfaisante. Comme il est expliqué dans [80] cette hypothèse semble marcher seulement si le matériau est incompressible, sinon les déformation latérales d'un film ne peuvent pas être expliquées seulement par l'attraction des électrodes. On pourrait par exemple imaginer un film diélectrique qui est placé entre les armatures d'un condensateur (sans aucun contact) alimenté en tension. On peut alors observer même dans ce cas une déformation dans le film sans qu'aucune charge (libre) soient placée directement sur le film [230]. Par conséquent il semble plus logique que les contraintes électriques générées sont dues à la polarisation locale et à l'interaction de ces dipôles en plus de l'interaction des charges libres.

Mais on pourrait déjà se demander pourquoi dans un matériau piézoélectrique les contraintes présentent une dépendance linéaire alors que dans un matériau diélectrique celles-ci sont quadratiques. Même s'il n'y a pas de réponse simple à cette question car il faut analyser le comportement microscopique de chaque matériau, une dépendance quadratique semble naturelle du fait que la force qui est exercé sur un dipôle est proportionnelle au champ électrique généré par les autres charges et de plus le moment du dipôle–même doit être proportionnel au champ aussi pour un diélectrique idéal (d'où une relation quadratique).

Mais habituellement on utilise plutôt une approche thermodynamique pour en déduire les équations caractéristiques des matériaux électroactifs. Cela implique l'application du principe de la conservation d'énergie et d'autres hypothèses supplémentaires (température constante, transformation adiabatique etc. durant une transformation) en faisant abstraction de la structure microscopique du matériau [164] mais en supposant un certain comportement macroscopique prédéfini.

En utilisant une telle approche on peut montrer qu'un matériau diélectrique électrostrictif dont la permittivité dépend de la déformation génère des contraintes électriques qui diffèrent un peu de celles décrites par la formule (87). Ainsi pour un matériau dont la permittivité dépend de la déformation $\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ on obtient dans un repère orienté selon les axes principaux de déformation et un champ électrique axial (suivant z) [80,152] :

$$(90)\begin{cases} \sigma_{11}^{\mathrm{M}} = \frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \mathrm{E}^2}{2} \\ \sigma_{22}^{\mathrm{M}} = \frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2 \cdot \mathrm{E}^2}{2} \\ \sigma_{33}^{\mathrm{M}} = -\frac{\varepsilon \cdot \mathrm{E}^2}{2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial \lambda_3} \cdot \frac{\lambda_3 \cdot \mathrm{E}^2}{2} \end{cases}$$

Souvent, surtout lorsque les déformations restent faibles on suppose que la permittivité varie de manière linéaire en fonction de celles-ci. On peut alors dans un tel cas utiliser des équations matricielles pour relier le champ électrique local aux contraintes électriques générées :

$$(91)\ \overline{\overline{\sigma}}_{\text{élec}} = \mathrm{M} \cdot [\mathrm{E}_{11}^2\ \mathrm{E}_{22}^2\ \mathrm{E}_{33}^2\ \mathrm{E}_{23}^2\ \mathrm{E}_{13}^2\ \mathrm{E}_{12}^2]^{\mathrm{T}}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

5.1.5 Remarques supplémentaires

Bien évidemment les équations qu'on a présentées ici ne servent qu'à modéliser un comportement électromécanique simplifié. Il existe normalement beaucoup d'autres aspects qui pourraient être pris en considération, comme par exemple le comportement visqueux, plastique ou hystérétique des matériaux. Le comportement électrique est aussi marqué par des phénomènes transitoires, des courants de fuite, hystérésis etc. Néanmoins, l'application visée dans ce travail (contrôle et changement de forme) ne fait pas intervenir à priori des variations temporelles importantes et beaucoup de phénomènes mentionnés précédemment peuvent être négligés.

5.2 Modélisation des films électroactifs présentant un comportement bidimensionnel

On peut montrer que dans certains cas on peut ramener un problème tridimensionnel à un problème bidimensionnel. Même si cela peut sembler une simplification importante cela permet souvent d'identifier les principales difficultés qu'on peut rencontrer lorsqu'on modélise de telles structures. Le système qu'on veut étudier est un film comportant plusieurs couches parmi lesquelles des couches électroactives (ou actives) (piézoélectriques ou électrostrictives) et des couches passives (substrat, colle, électrodes) (Figure 146).

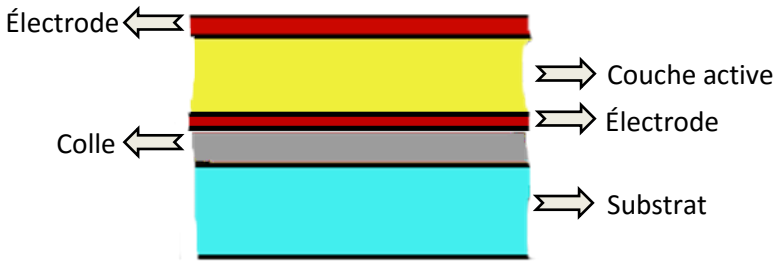


Figure 146 : Exemple de vue en coupe d'un film électroactif

Se ramener à un problème à deux dimensions est une approche naturelle pour des structures comme des plaques ou poutres actionnées en flexion [231–233] ayant des longueurs importantes par rapport à l'épaisseur et la largeur. Mais même dans ce cas il existe plusieurs manières de déduire les équations caractéristiques, moyennant telle ou telle hypothèse. On peut par exemple obtenir un modèle à deux dimensions en supposant que les déformations latérales sont nulles (déformations planes) ou inversement que les contraintes latérales sont nulles (contraintes planes). La première hypothèse est plus adaptée pour les structures qui présentent une largeur comparable à l'épaisseur alors que la deuxième lorsque la largeur du film est beaucoup plus importante que son épaisseur et lorsque la déflection est due à des forces et pressions qui sont appliquées perpendiculairement à la surface du film.

Le comportement d'un film électroactif est différent par exemple de celui d'une plaque en flexion par le fait que les couches actives génèrent (par l'intermédiaire des contraintes électriques) et des moments mais aussi des forces qui ont tendance à produire des déformations longitudinales non-négligeables. De plus, les moments générés sont bidirectionnels à cause des matériaux électroactifs qui sont le plus souvent orthotropes. Mais dans certaines conditions on peut considérer que la déformation est unidirectionnelle (forme du film, utilisation des éléments rigides comme des fibres parallèles etc.). Dans ce qui suit on va supposer que la déformation est toujours nulle dans une des directions du film électroactif. Cela va permettre dans un premier temps de se familiariser avec le problème. Mais celui-ci doit être tout d'abord formulé en termes d'équations et paramètres et c'est ce qu'on se propose de faire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

5.2.1 Comportement élastique

Le film est constitué des couches actives et passives. On considère que les déformations restent en général faibles (< 5%) et donc que la relation entre celles-ci et les contraintes d'origine élastiques est purement linéaire. Si le matériau est isotrope et uniforme alors on peut appliquer la loi d'Hooke. En même temps on peut montrer que même si le matériau est orthotrope pour de telles structures (couches minces) il peut être considéré comme isotrope et uniforme, et un module d'Young et un coefficient de Poisson équivalents peuvent être calculés. Dans les équations suivantes on va utiliser des notations généralisées. On note par Y le module d'Young et par v le coefficient de Poisson mais on les considère d'une manière implicite comme des fonctions de la position dans le film (suivant l'épaisseur).

5.2.2 Contraintes électriques

L'application d'un champ électrique externe dans les couches actives se traduit par l'apparition des contraintes électriques. Pour les matériaux piézoélectriques la dépendance de ces contraintes du champ électrique est linéaire alors que pour les matériaux électrostrictifs, quadratique. Normalement pour des matériaux orthotropes il n'y a pas de contraintes de cisaillement. Ici on suppose que ces contraintes sont connues sans se poser la question de leur dépendance avec le champ électrique et le type de matériau. Ainsi on note par $\overline{\overline{\sigma}}^{\mathrm{elec}}$ le tenseur des contraintes électriques et par $\overline{\overline{\sigma}}^{\mathrm{élas}}$ le tenseur des contraintes élastiques. La contrainte totale est définie d'après (76) comme la somme de ces deux tenseurs.

5.2.3 Comportement et hypothèses simplificatrices

La loi de la dynamique est alors appliquée au tenseur de contraintes totales alors que les déformations sont reliées aux contraintes élastiques par l'intermédiaire de la loi d'Hooke. Comme on s'intéresse à des transformations très lentes on considère comme négligeables les effets inertiels (au moins pour le moment). Cela veut dire que l'équation locale de la dynamique se réduit à :

$$(92)\ \overrightarrow{\mathrm{div}}(\overline{\overline{\sigma}}) = \vec{0}$$

On va considérer seulement des structures dont l'épaisseur est beaucoup plus faible que les autres dimensions. Dans ces conditions comme sur chaque surface du film la contrainte normale s'annule elle doit être très petite à l'intérieur du film aussi. Si on utilise un film plan à l'état initial et un repère avec son origine placée à l'intérieur du film, l'axe x orientée suivant la longueur et z suivant l'épaisseur alors cela se traduit par :

$$(93)\ \sigma_{33} = 0$$

Comme le film est mince sa forme à l'état déformé dépend en première approximation que de la déformation moyenne et le gradient de déformation en épaisseur. Cela permet de simplifier souvent les équations et permet de se ramener d'un problème général à un modèle de type poutre ou plaque [234–236].

Cela revient quelque part à supposer que le champ de déplacements varie de manière linéaire dans l'épaisseur du film. Et donc par conséquent que les déformations présentent une variation aussi linéaire. Pourtant comme on va le voir par la suite cela n'est pas tout à fait conforme à la réalité. En effet, même si les déformations ayant une orientation dans le plan du film peuvent être considérées linéaires avec une bonne approximation, souvent la déformation perpendiculaire à la surface du film dans une telle structure multicouche est discontinue mais celle-ci n'a que peu d'influence sur la forme globale du film.

Il est intéressant de montrer comment les équations classiques d'un film minces actionné de l'extérieur peuvent être déduites, pour pouvoir ensuite faire une comparaison avec le fonctionnement d'un film électroactif et définir différentes grandeurs qui seront utilisées par la suite.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Film passif actionné de l'extérieur (2D).

Supposons un film multicouche, mince, uniforme en longueur sujet à différentes conditions aux limites et sous l'action des forces et moments externes appliqués. On considère un repère (xOz) orienté avec l'axe z suivant la direction perpendiculaire au film et on prend un certain plan dans le film pour lequel la position en épaisseur est considérée nulle (il s'agit d'un plan de référence pour lequel z = 0).

L'hypothèse du champ de déplacements linéaire en épaisseur implique que le déplacement axial de n'importe quel point est donné par :

(94) $\mathrm{u} = \mathrm{u}_0 + \theta \cdot \mathrm{z}$ et donc que la déformation axiale principale est de la forme[5] $\varepsilon_{11} = \frac{\partial \mathrm{u}_0}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{x}} \cdot \mathrm{z}$

Dans l'expression précédente u_0 représente le déplacement axial du point situé à l'origine (sur le plan de référence) et θ c'est le gradient de déplacement qui est aussi en première approximation l'angle formé par la section du film à l'état déformé avec la normale au film à l'état initial. L'application de la loi de Hooke donne de plus (le film étant passif toutes les contraintes ont des origines élastiques) :

$$(95)\begin{cases} \varepsilon_{11} = \frac{1}{Y} \cdot (\sigma_{11} - \nu \cdot \sigma_{22}) \\ \varepsilon_{22} = \frac{1}{Y} \cdot (\sigma_{22} - \nu \cdot \sigma_{11}) \end{cases}$$

Et l'hypothèse des déformations planes :

(96) $\varepsilon_{11} = 0$; ce qui amène à $\sigma_{11} = \frac{\mathrm{Y}}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial \mathrm{u}_0}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{x}} \cdot \mathrm{z}\right)$

L'équation locale d'équilibre (73) implique :

(97) $\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial \mathrm{z}} = 0$ car on considère σ_{12} négligeable puisque on n'applique pas de forces dans la direction y du film. L'équation (97) est valable pour n'importe quel point en épaisseur mais dans notre cas (due à l'hypothèse de la distribution linéaire des déplacements) on a besoin seulement de deux équations. Celles-ci peuvent être obtenues en utilisant des valeurs moyennées dans l'épaisseur du film. On a par exemple :

$$(98)\begin{cases} \int_{\mathrm{z}} \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial \mathrm{z}}\right) = 0 \\ \int_{\mathrm{z}} \mathrm{z} \cdot \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial \mathrm{z}}\right) = 0 \end{cases} \text{ ce qui implique } \begin{cases} \left(\frac{\partial \int_{\mathrm{z}} \sigma_{11}}{\partial \mathrm{x}} + \overbrace{[\sigma_{13}]_{z_1}^{z_2}}^{0}\right) = 0 \\ \frac{\partial \int_{\mathrm{z}} (z \cdot \sigma_{11})}{\partial \mathrm{x}} + \overbrace{[z \cdot \sigma_{13}]_{z_1}^{z_2}}^{0} - \int_{\mathrm{z}} \sigma_{13} = 0 \end{cases}$$

Dans l'expression précédente les termes qui comportent la contrainte de cisaillement σ_{13}, sont nuls car celle-ci s'annule sur les deux surfaces du film.

On peut noter : $N_1 = \int_{\mathrm{z}} \sigma_{11}$ ❖ $\mathrm{T}_{13} = \int_{\mathrm{z}} \sigma_{13}$ ❖ $\mathrm{M}_2 = \int_{\mathrm{z}} z \cdot \sigma_{11}$ et comme on peut le voir on fait apparaitre de manière naturelle les forces généralisées utilisées dans les théories des poutres et plaques.

[5] Ici on travaille avec le tenseur de déformation définit pour de faibles déformations et déplacements, voir (78)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Si on utilise la formule (96) alors on arrive à :

(99) $N_1 = \int_z \left(\frac{Y}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot z \right) \right) = \left\{ \int_z \left(\frac{Y}{1-\nu^2} \right) \right\} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial x} + \left\{ \int_z \left(\frac{zY}{1-\nu^2} \right) \right\} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}$ ❖ $M_2 = \int_z \left(\frac{zY}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial x} \cdot z \right) \right) = \left\{ \int_z \left(\frac{zY}{1-\nu^2} \right) \right\} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial x} + \left\{ \int_z \left(\frac{z^2 Y}{1-\nu^2} \right) \right\} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}$

Dans ce qui suit, on utilise les notations suivantes : $I_{z^k} = \int_z \left(z^k \cdot \frac{Y}{1-\nu^2} \right)$. On a donc :

$$(100) \begin{cases} \frac{\partial N_1}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial M_2}{\partial x} - T_{13} = 0 \end{cases}$$

Autre équation locale fournie par la loi d'équilibre c'est :

$$(101) \ \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial T_{13}}{\partial x} = 0$$

Donc on peut mettre le système (100) sous la forme :

$$(102) \begin{cases} \frac{\partial N_1}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I \cdot \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + I_z \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \\ I_z \cdot \frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} + I_{z^2} \cdot \frac{\partial^3 \theta}{\partial x^3} = 0 \end{cases}$$

En fait on peut montrer qu'in peut toujours choisir un plan de référence tel que $I_{\frac{zY}{1-\nu^2}} = 0$, si c'est le cas les équations précédentes sont équivalentes au système découplé suivant :

$$(103) \begin{cases} I \cdot \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} = 0 \\ I_{z^2} \cdot \frac{\partial^3 \theta}{\partial x^3} = 0 \end{cases}$$

Souvent, lorsqu'aucune force n'est appliquée dans la direction axiale du film on considère que $N = 0$ ce qui implique immédiatement $u_0 = 0$ si le repère est choisi de manière à ce que le système (103) puisse être utilisé. Cela fait apparaître donc de manière naturelle aussi le plan ''neutre'' utilisé très souvent dans la théorie des poutres et plaques.

Le système (103) peut être complétement résolu étant données les conditions aux limites du film et les forces appliquées, pourtant comme on peut le voir il ne fait pas intervenir du tout la déflection verticale. Pour la faire apparaitre il faut encore utiliser quelques hypothèses supplémentaires. Due à l'épaisseur du film assez faible par rapport à sa longueur et la façon dont celui-ci est actionné, localement on peut considérer que les déformations de cisaillement sont négligeables devant la déformation axiale principale. Cela implique d'après la définition de la déformation de cisaillement:

$$(104) \ \frac{\partial w}{\partial x} + \theta = 0$$

Il y a quelques remarques qu'on pourrait faire à propos de cette équation. Le paramètre θ ne varie pas dans l'épaisseur alors qu'on n'a fait aucune hypothèse quant à la variation de la déflection verticale. Cela veut dire qu'on admet à priori que le gradient de la déflection verticale en longueur est beaucoup plus important que celui en épaisseur. On peut donc négliger la variation de la déflection dans la même section. Cette hypothèse est appelle le principe d'Euler-Bernoulli dans la théorie des poutres.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

D'autres théories existent, qui prennent en compte les déformations de cisaillement (poutre de Timoshenko) mais celles-ci semblent nécessaires seulement si l'épaisseur de la structure devient relativement importante.

Une autre question qui pourrait être posée est la suivante. Dans l'équation (104) qui relie la déflection verticale au gradient de déplacement axial, on néglige la déformation de cisaillement alors que dans l'équation de l'équilibre mécanique (100) la contrainte de cisaillement est prise en considération. Or les deux sont proportionnelles, en vertu de la loi de Hooke. La raison pour laquelle on peut faire la simplification dans un cas mais pas dans l'autre est due au fait que l'équation (104) reste purement locale alors que l'équation (100) même si présentée sous forme locale doit être développé globalement pour prendre en compte toute les forces externes appliquées. En effet, si on a comme problème un film bloqué-libre dont on applique une force verticale à l'extrémité on est obligé de prendre en compte la contrainte de cisaillement car celle-ci même si localement n'a pas un effet considérable, sur des distances importantes dû à l'effet levier, génère un moment mécanique qui quant à lui est proportionnel à la déformation axiale.

En utilisant les équations (103) et (104) on obtient un système d'équations découplées faisant intervenir que les déplacements vertical (w_0) et axial (u_0) du plan de référence :

$$(105)\begin{cases} \mathrm{I}\cdot\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2}=0 \\ \mathrm{I}_{z^2}\cdot\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4}=0 \end{cases}$$

Si le film est uniforme alors il s'ensuit immédiatement que u_0 présente une variation linéaire par rapport à la longueur alors que la déflection verticale (w_0) une variation polynomiale d'ordre trois, quel que soient les conditions aux limites.

Autre observation qu'on peut faire c'est le comportement d'une telle structure lorsque certains paramètres sont modifiés. Par exemple on n'a pas besoin de résoudre aucune équation pour se rendre compte que pour les mêmes conditions aux limites un film qui est plus long est équivalent à un film plus court mais plus épais etc. Cela permet d'obtenir des résultats généraux qui dépendent que de la configuration dans laquelle le film est utilisé.

Comme on a pu se rendre compte la modélisation même d'un simple film élastique n'est pas immédiate est fait intervenir une bonne dizaine d'hypothèses. Les équations obtenues et les définitions qu'on a fait seront très utiles par la suite lorsqu'on va modéliser les film électroactifs. On a pu aussi se convaincre que les équations des plaques peuvent être obtenues à partir des hypothèses définies d'une manière claire est précise.

5.2.4 Film électroactif en régime de faibles déplacements

Quelle est la différence alors entre le comportement du film précédent et un film électroactif ? Tout d'abord c'est le fait que l'alimentation des couches actives d'un film électroactif génère des contraintes locales contrairement au cas précédent où des forces externes étaient appliquées. Déjà les équations (95) doivent être modifiées pour un film électroactif car dans une couche active la loi de Hooke doit faire intervenir les contraintes élastiques et plus les contraintes totales. Comme on fait l'hypothèse de la superposition de deux types de contraintes on obtient :

$$(106)\ \sigma_{11}=\frac{Y}{1-\nu^2}\varepsilon_{11}+\left[\underbrace{-\frac{\nu}{1-\nu}\sigma_{33}^{elec}+\sigma_{11}^{elec}}_{\sigma_0}\right]$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Normalement les matériaux actifs utilisés sont orthotropes et ne génèrent pas des contraintes de cisaillement. Les contraintes électroactives doivent aussi être prises en compte dans les équations qui relient les forces généralisées au déplacement (99) :

$$(107)\ \mathrm{N}_1 = \mathrm{I}\cdot\frac{\partial \mathrm{u}_0}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{I}_\mathrm{z}\cdot\frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{N}_1^0 \ \text{❖}\ \mathrm{M}_2 = \mathrm{I}_\mathrm{z}\cdot\frac{\partial \mathrm{u}_0}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}\cdot\frac{\partial \theta}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{M}_2^0$$

Avec : $\mathrm{N}_1^0 = \int_\mathrm{z}\sigma_0$ ❖ $\mathrm{M}_2^0 = \int_\mathrm{z}\mathrm{z}\cdot\sigma_0$.

Les autres équations et hypothèses restent les mêmes sauf si le film présente des propriétés discontinues suivant la longueur. En effet on pourrait imaginer que les paramètres I, I_z, $\mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}$, N_1^0, M_2^0 soient implicitement des fonctions de la position dans la longueur du film. En pratique, il s'agit des fonctions constantes par morceaux.

Dans ce cas les équations à résoudre ont la forme suivante :

$$(108)\ \begin{cases} \frac{\partial^2}{\partial \mathrm{x}^2}\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(\mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}\cdot\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}\right) + \mathrm{M}_0\right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \mathrm{x}}\left(\mathrm{I}\cdot\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{N}_0\right) = 0 \end{cases}$$

On pourrait ainsi commencer par analyser le problème simple d'un film uniforme pour différentes conditions aux limites. On pourrait déjà regarder la déflection maximale qu'on peut obtenir pour un champ électrique donnée. Autre paramètre qui est souvent mentionné pour les actionneurs électroactifs c'est la force bloquée qui représente la force nécessaire pour ramener un certain point du film déformé à l'état initial.

Film bloqué-libre :

Le film est complétement bloqué d'un côté et libre à l'autre ce qui implique :

$w(0) = 0$ ❖ $\frac{\partial \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}}(0) = 0$ ❖ $\mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}\cdot\frac{\partial^2 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}^2}(\mathrm{L}) = -\mathrm{M}_0$ ❖ $\frac{\partial^3 \mathrm{w}}{\partial \mathrm{x}^3}(\mathrm{L}) = 0.$ Ce qui implique immédiatement d'après (108) :

$$(109)\ \mathrm{w}(\mathrm{x}) = -\frac{\mathrm{M}_0}{\mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}}\cdot\mathrm{x}^2 \ \text{❖}\ \mathrm{u}(\mathrm{x}) = \frac{\mathrm{N}_0}{\mathrm{I}}\cdot\mathrm{x}$$

La déflection maximale est obtenue à l'extrémité libre du film :

$$(110)\ \mathrm{w}_{\max} = \frac{\mathrm{M}_0}{\mathrm{I}_{\mathrm{z}^2}}\cdot\mathrm{L}^2$$

Et la force bloquée (F_{bl}) aussi à l'extrémité du film est normale à celui-ci est égale à :

$$(111)\ \mathrm{F}_{\mathrm{bl}} = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{M}_0}{\mathrm{L}}$$

Film bloqué-bloqué :

L'influence du champ électrique se manifeste seulement aux bords des zones actives alimentées mais comme celles-ci sont bloquées la déflection et le déplacement axial doivent rester nuls :

$$(112)\ \mathrm{w}(\mathrm{x}) = 0 \ \text{❖}\ \mathrm{u}(\mathrm{x}) = 0$$

Bien évidement on ne peut pas définir une force bloquée car on n'a aucun déplacement en premier lieu.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Film appuyé-appuyé :

Contrairement au cas précédent, les bords du film peuvent tourner librement mais le déplacement d'un point de la section située à l'une des extrêmes reste bloqué. Lorsque les points bloqués appartiennent au plan de référence alors dans un repère centré au milieu du film dans la longueur, on obtient :

$$(113)\ w(x) = \frac{M_0}{2I_{z^2}} \cdot \left(\frac{L^2}{4} - x^2\right) \text{ ❖ } u(x) = 0$$

La déflection maximale est obtenue au centre du film est atteinte au milieu du film et est égale à :

$$(114)\ w_{max} = \frac{M_0}{8 \cdot I_{z^2}} \cdot L^2$$

La force bloquée définie au centre du film est donnée alors par :

$$(115)\ F_{bl} = 6 \cdot \frac{M_0}{L}$$

Film bloqué-appuyé :

Le film est complétement bloqué d'un côté alors qu'à l'autre la section peut librement tourner même si le mouvement de l'extrémité du plan de référence est bloqué aussi.

Cela amène à :

$$(116)\ w(x) = \frac{M_0}{4I_{z^2}} \cdot \left(x^2 - \frac{x^3}{L}\right) \text{ ❖ } u(x) = 0$$

Et une déflection maximale atteinte pour $x = 2L/3$ de :

$$(117)\ w_{max} = \frac{M_0}{27 \cdot I_{z^2}} \cdot L^2$$

La force bloquée pour le même point est égale à :

$$(118)\ F_{bl} = \frac{3}{2} \cdot \frac{M_0}{L}$$

Comme on peut le voir la déflection est maximale pour la configuration bloqué-libre, pour des conditions appuyé-appuyé celle-ci est 8 fois plus faible et 27 fois plus faibles pour les conditions bloqué-appuyé. Pour des conditions aux limites de type bloqué-bloqué la déflection est nulle (Figure 147). Quant au déplacement axial celui-ci est toujours nul sauf pour la configuration bloqué-libre dans quel cas la déformation axiale du plan de référence est constante. La force bloquée est maximale pour la configuration appuyé-appuyé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

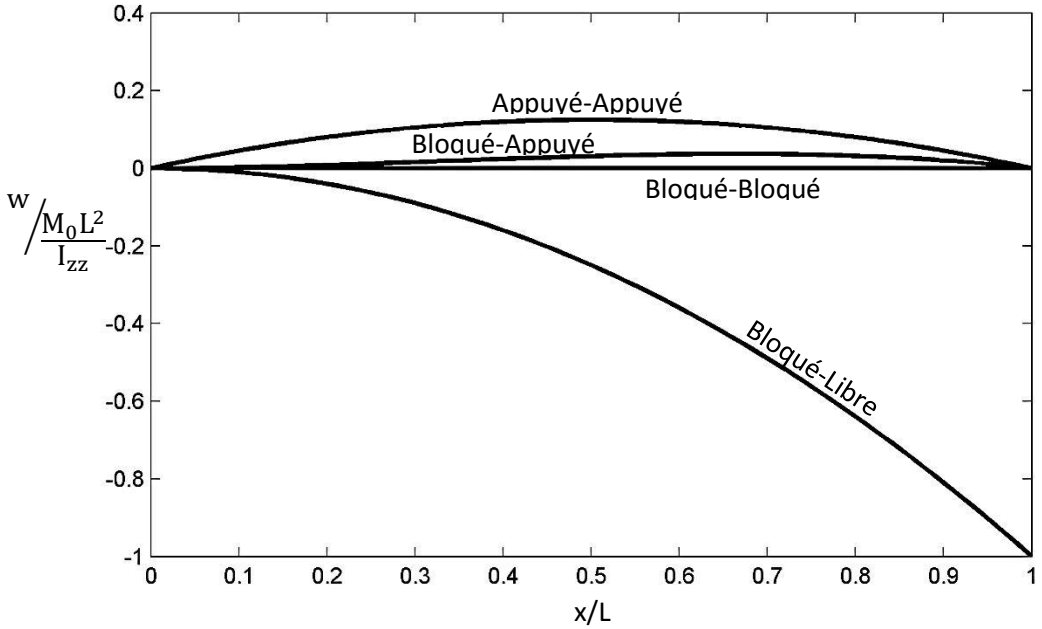


Figure 147 : Distribution de la déflection verticale d'un film électroactif uniforme alimenté en tension sur toute sa surface pour différentes conditions aux limites ($M_0 > 0$)

La force bloquée et la déflection maximale permettent d'évaluer l'énergie mécanique maximale que l'actionneur peut fournir à une éventuelle charge mécanique. En effet, comme le fonctionnement est linéaire pour un champ électrique donné la déflection d'un certain point doit varier de manière linéaire aussi en fonction de la force appliquée. Cela implique immédiatement que l'énergie mécanique maximale que le film peut fournir est donné par :

$$(119)\ E_{max} = \frac{F_{bl} \cdot w_{max}}{2}$$

Configuration	Bloqué-Bloqué	Bloqué-Libre	Appuyé-Appuyé	Bloqué-Appuyé
Energie mécanique maximale	0	$\frac{3}{4}\frac{M_0^2}{I_{z^2}}L$	$\frac{3}{8}\frac{M_0^2}{I_{z^2}}L$	$\frac{1}{36}\frac{M_0^2}{I_{z^2}}L$

Tableau 26 : Énergie mécanique maximale qu'un film électroactif peut fournir pour différentes configurations

Le **Tableau 26** donne les expressions de l'énergie mécanique maximale qu'un film uniforme peut fournir pour différentes conditions aux limites. Comme on peut le voir la plus grande énergie peut être fournie par un film bloqué-libre.

Comme on l'a vu le déplacement axial pour un film uniforme est non-nul seulement pour la configuration bloqué-libre. Il est intéressant de faire une comparaison entre celle-ci est la déflection verticale. Le rapport entre la déflection verticale maximale et le déplacement axial maximal est donné par :

$$(120)\ \frac{w_{max}}{u_{max}} = \frac{M_0 I L}{N_0 I_{z^2}} = \frac{\int_z (z \cdot \sigma_0) \cdot \int_z \left(\frac{Y}{1-\nu^2}\right)}{\int_z (\sigma_0) \cdot \int_z \left(\frac{z^2 Y}{1-\nu^2}\right)} L = \mathcal{O}\left(\frac{L}{H}\right)$$

Cela montre que le déplacement axial est normalement négligeable devant la déflection axiale car $L \gg H$ et souvent il n'influe que très peu la forme du film actionné.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Bien évidemment le film peut être alimenté seulement sur certaines portions et avec des tensions différentes. Il est utile alors de remarquer que pour des conditions aux limites données le problème est linéaire par rapport à la distribution de la tension (et donc du moment imposé M_0 et la force axiale N_0).

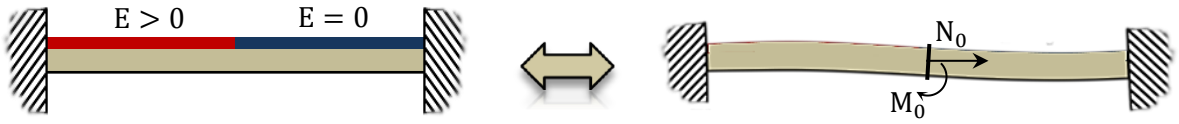


Figure 148 : Un film électroactif (en régime de faibles déplacements) est équivalent à un simple film dans lequel on applique des moments et forces aux bords des zones actives

On pourrait par exemple imaginer que le film contient trois patchs répartis dans la longueur. A faibles déplacements on peut considérer que la forme du film dans le cas général c'est la superposition de la forme pour chaque patch alimenté séparément.

Si on prend par exemple un film bloqué-libre contenant plusieurs segments (patchs) alors un seul segment alimenté donne à l'équilibre une courbure seulement sur le segment alimenté, le reste du film reste droit. La déformation axiale est aussi non-nulle seulement sur la zone alimentée.

Pour un film bloqué-bloqué alimenter un patch placé au milieu (tel que $M_0 > 0$) amène à une déflection dans le sens positif. Dû au principe de superposition, le fait que l'alimentation uniforme du film amène à une déflection nulle implique immédiatement que l'alimentation des patchs latéraux avec la même tension produit une déflection opposée à la précédente et de même amplitude et cela reste en fait valable pour n'importe quelle position des patchs.

On peut facilement montrer que pour un film bloqué-bloqué, avec trois zones actives, une déflection maximale au centre est obtenue lorsque la longueur de la zone centrale est égale à la moitié de la longueur totale du film, dans quel cas la déflection au centre et la force bloquée sont données par :

$$(121)\ w_{max} = \frac{M_0}{32 \cdot I_{zz}} \cdot L^2 \ \text{❖}\ F_{bl} = 6 \cdot \frac{M_0}{L}$$

Donc pour la configuration bloqué-bloqué la déflection est toujours plus petite que pour les autres conditions aux limites pour un même champ électrique.

On pourrait alors essayer de résoudre le problème suivant généralisé. Étant donné un film électroactif quelle est la forme qu'on peut obtenir dans le cas général et comment il doit être alimenté pour obtenir la forme désirée. Pour cela on pourrait encore imaginer que le film est uniforme sur chaque segment et qu'on peut alimenter n'importe quelle zone avec des tensions différentes. Dans un tel cas on peut montrer que la déflection est polynomiale par morceaux ayant la forme :

$$(122)\ w_i(x) = a_i x^3 + b_i x^2 + c_i x + d_i$$

La solution peut-être alors déterminée en utilisant les conditions aux limites et les relations de continuité à travers chaque zone active ou passive. Celles-ci imposent :

$$(123)\begin{cases} w(x^-) = w(x^+) \\ w'(x^-) = w'(x^+) \\ I_{zz}^- \cdot w''(x^-) + M_0^- = I_{zz}^+ \cdot w''(x^+) + M_0^+ \\ I_{zz}^- \cdot w'''(x^-) = I_{zz}^+ \cdot w'''(x^+) \end{cases}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Mais en fait, on pourrait passer par une formulation plus simple de point de vue calculatoire directement en exploitant l'équation (108). En effet, on peut initialement supposer que les grandeurs I_{zz} et M_0 varient de manière continue suivant la longueur du film. Dans ces conditions on a comme solution générale :

$$(124)\ w(x) = A + B \cdot \int_0^x \left(\frac{1}{I_{zz}}\right) dX + C \cdot \int_0^x \left(\frac{X}{I_{zz}}\right) dX + D \cdot \int_0^x \left(\frac{X^2}{I_{zz}}\right) dX - \int_0^x \left(\frac{1}{I_{zz}} \int_0^X M_0\right) dX$$

Pour déterminer les quatre constantes il faut juste utiliser les conditions aux limites car les relations de continuité entre différentes zones sont automatiquement satisfaites grâce à cette forme intégrale, d'où l'intérêt de la méthode. Dans le cas où le film peut être considéré uniforme de point de vue élastique l'expression (124) peut être mise sous la forme :

$$(125)\ w(x) = A + B \cdot x + C \cdot x^2 + D \cdot x^3 - \frac{1}{I_{zz}} \cdot \int_0^x \left(\int_0^X M_0\right) dX$$

Si on reprend l'exemple d'un film bloqué-bloqué alors on a :

$A = 0$ ❖ $B = 0$ ❖ $C = \frac{3}{L^2 \cdot I_{zz}} \int_0^L \left(\int_0^X M_0\right) dX - \frac{1}{L \cdot I_{zz}} \int_0^L M_0 dx$ ❖ $D = -\frac{2}{L^3 \cdot I_{zz}} \int_0^L \left(\int_0^X M_0\right) dX + \frac{1}{L^2 \cdot I_{zz}} \int_0^L M_0 dx$

Ce qui équivaut à :

$$(126)\ w(x) = \left(\frac{3}{L^2 \cdot I_{zz}} \int_0^L \left(\int_0^X M_0\right) dX - \frac{1}{L \cdot I_{zz}} \int_0^L M_0 dX\right) \cdot x^2 - \left(\frac{2}{L^3 \cdot I_{zz}} \int_0^L \left(\int_0^X M_0\right) dX - \frac{1}{L^2 \cdot I_{zz}} \int_0^L M_0 dx\right) \cdot x^3 - \frac{1}{I_{zz}} \cdot \int_0^x \left(\int_0^X M_0\right) dX$$

Pour illustrer la méthode on peut prendre un exemple concret. On considère un film de 2 cm de longueur constitué de deux couches : substrat (100 µm, module d'Young de 2 GPa, coefficient de Poisson de 0.4) et la couche active électrostrictive (25 µm, module d'Young de 100 MPa, coefficient de Poisson de 0.48, permittivité électrique 50). On imagine qu'on peut appliquer un champ électrique quelconque dans la longueur (en pratique pour imposer un certain champ électrique on utilise des électrodes ce qui implique que celui-ci doit être constant par morceaux dans la longueur).

Tout d'abord on peut calculer les paramètres caractéristiques du film: $z_0 = 50.8\ \mu m$ ❖ $I_{zz} = 2.11e-4\ Pa \cdot m^2$ ❖ $M_0 = K \cdot E^2$ ❖ $K = 1.2e-18\ Pa \cdot m^2$ avec z_0 la distance entre le plan de référence ($I_z = 0$) et la face inférieure du film.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Utilisant la formule (126) on peut alors facilement calculer la distribution de la déflection suivant la longueur du film pour une certaine distribution du champ électrique. La solution obtenue présentant une forme intégrale peut très facilement être implémentée dans un simple script Matlab pour être calculée (quelques lignes de code). Les résultats peuvent être alors comparés avec ceux obtenus avec le logiciel de simulation par éléments finis, Ansys. On pourrait imaginer par exemple que le film contient quatre zones différentes qui peuvent être alimentés de manière indépendante.

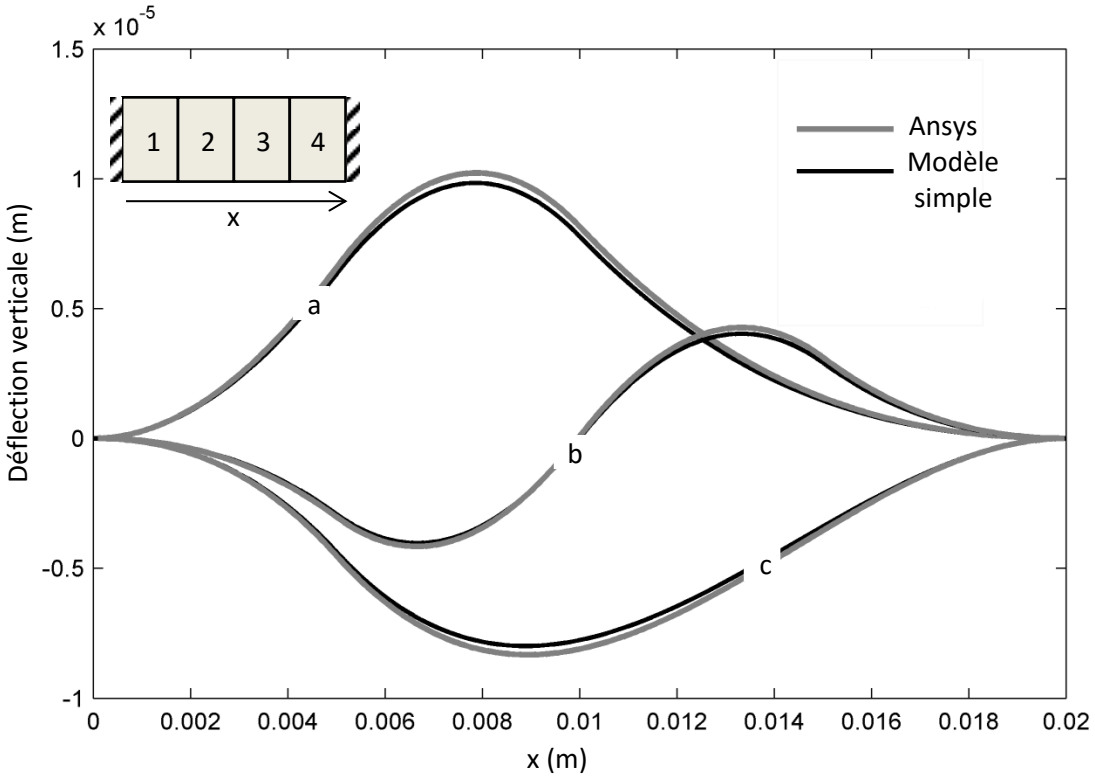


Figure 149 : Déflection verticale pour différentes zones alimentées (20 V/µm) : Alimentation de a) zone 2; b) zone 1+3; c) zone 1

Comme on peut le voir pour cette exemple, la différence entre les résultats obtenus avec Ansys et le modèle linéaire simple est assez faible (Figure 149). Ce qu'on peut observer aussi et qui reste un fait assez général c'est que l'application d'un champ électrique dans un certain segment influe principalement sa courbure et pas sa déflection. La déflection est quant à elle très dépendante des conditions aux limites et de l'influence des zones voisines.

On peut trouver des solutions intégrales similaires à (126) pour différentes conditions aux limites (Tableau 27). De la même manière que pour le cas bloqué-bloqué on peut alors facilement calculer la distribution de la déflection verticale pour n'importe quelle distribution du moment des contraintes électriques donnée (M_0).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Configuration	Distribution de la déflection verticale
Bloqué-Bloqué	$w(x) = (3 \cdot C_2 - L \cdot C_1) \cdot x^2 - \left(2 \cdot \frac{C_2}{L} - C_1\right) \cdot x^3 - W_0(x)$
Bloqué-Libre	$w(x) = -W_0(x)$
Bloqué-Appuyé	$w(x) = \frac{3C_2}{2}x^2 - \frac{C_2}{2L}x^3 - W_0(x)$
Appuyé-Appuyé	$w(x) = LC_2x - W_0(x)$
$C_1 = \frac{1}{I_{zz}L^2}\int_0^L (M_0)dx$ ❖ $C_2 = \frac{1}{I_{zz}L^2}\int_0^L \left(\int_0^X M_0\right)dX$ ❖ $W_0(x) = \frac{1}{I_{zz}} \cdot \int_0^x \left(\int_0^X M_0\right)dX$	

Tableau 27 : Distribution de la déflection verticale d'un film plan pour différentes conditions aux limites (forme intégrale)

La déformation d'un film électroactif est toujours un phénomène délocalisé, pour illustrer cela on pourrait regarder la déflection obtenue lorsque la zone alimentée en tension est de très faible longueur (quasi-nulle). Il est déjà clair que dans le cas d'un film bloqué-libre l'effet de l'alimentation d'une zone de très faibles dimensions se traduit par l'apparition d'un angle du film à l'état déformé à l'endroit où la tension est appliquée. Mais, il est aussi intéressant de voir ce qui se passe lorsque des conditions de type bloqué-bloqué ou appuyé-appuyé sont utilisés. Suivant les formes intégrales données dans le Tableau 27 on peut montrer que pour un film bloqué-bloqué on obtient :

$$(127)\ {w(x)}\Big/{\left(\frac{M_0L^2}{I_{z^2}}\Delta x\right)} \rightarrow \begin{cases} (2x_0 - 1) \cdot x^3 - (3x_0 - 2) \cdot x^2, & x < x_0 \\ (2x_0 - 1) \cdot x^3 - (3x_0 - 2) \cdot x^2 - x + x_0, & x > x_0 \end{cases}$$

Avec x_0 : la position de la zone alimentée normalisée par rapport à la longueur totale du film; Δx : longueur de la zone alimentée; x : position d'un point dans le film normalisé par rapport à la longueur totale du film (L).

Pour un film appuyé-appuyé avec les mêmes notations on obtient :

$$(128)\ {w(x)}\Big/{\left(\frac{M_0L^2}{I_{z^2}}\Delta x\right)} \rightarrow \begin{cases} (1 - x_0) \cdot x, & x < x_0 \\ (1 - x) \cdot x_0, & x > x_0 \end{cases}$$

Comme on peut le voir (Figure 150) diminuer la longueur de la zone alimentée en tension n'augmente pas la localisation de la déflection. On peut voir aussi dû à la linéarité du problème qu'en principe pour un film appuyé-appuyé on ne pourra jamais obtenir une déflection négative si le moment induit par les contraintes électrique est toujours positif (comme dans le cas d'un film unimorphe électrostrictif). En effet, on peut par exemple approximer la distribution du champ électrique par une distribution constante par morceaux dans quel cas la déflection c'est la somme de la déflection due à l'alimentation de chaque zone élémentaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

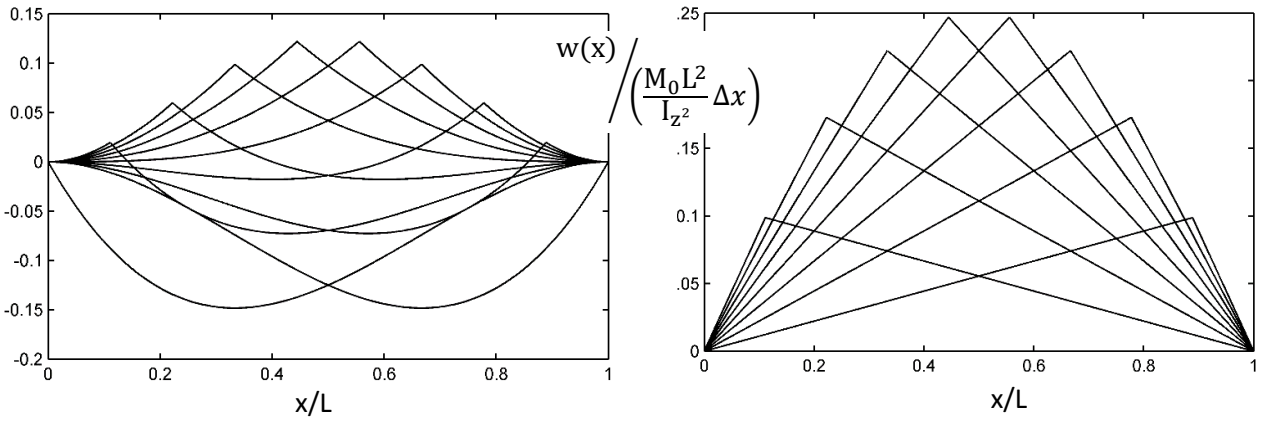


Figure 150 : Distribution de la déflection verticale normalisée pour différentes positions de la zone active (la position peut être identifiée par le changement rapide de pente) pour un film bloqué-bloqué (gauche) et appuyé-appuyé (droite)

Cela amène immédiatement à la formulation du problème d'une manière inverse, lorsque pour un film et conditions aux limites données on cherche à trouver la distribution du champ électrique qui donne à l'équilibre une certaine déflection.

5.2.5 Optimisation de différentes couches

Comme on peut le voir pour n'importe quelles conditions aux limites dans un tel régime la quantité M_0/I_{zz} joue un rôle très important. Plus elle est grande plus l'effet, en terme de changement de forme en réponse d'un champ électrique appliqué est important. On pourrait alors se demander dans quelles conditions il devient maximal. En fait, on peut montrer que dans certaines conditions les épaisseurs de différentes couches peuvent être ajustées pour avoir un comportement optimal.

Pour une structure composée seulement de deux couches c'est simple de trouver les paramètres pour lesquels le fonctionnement est optimal. Ainsi pour un substrat donné si on veut maximiser le rayon de courbure (quel que soit le champ électrique) il suffit que le rapport des épaisseurs de deux couches respecte la condition suivante:

(129) $\frac{H_1}{H_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{-a+2+2\sqrt{1-a}}{a}} + \sqrt[3]{\frac{a}{-a+2+2\sqrt{1-a}}} - 1 \right)$ avec $a = \frac{G_1}{G_0}$ (valable même si $a > 1$, en passant par des nombres complexes), H_0, H_1 : Épaisseur du substrat et de la couche active ; G_0, G_1 : élasticité en flexion du substrat et la couche active.

Ainsi, par exemple pour un substrat fait avec le même matériau que la couche électrostrictive on voit que son épaisseur optimale doit être la moitié de l'épaisseur de la couche active. Pour une structure unimorphe la configuration optimale consiste d'un substrat et une couche active, il n'y a aucun intérêt de rajouter d'autres couches. On pourrait faire une étude similaire pour une structure bimorphe. L'intérêt d'une telle structure pourrait être le déplacement dans deux sens d'un film bloqué-libre lorsque seulement des couches électrostrictives sont utilisées. Pour un film bimorphe dans lequel les couches actives ont la même épaisseur (H_1) et rigidités en flexion (G_1) on obtient :

(130) $\frac{H_1}{H_0} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{-a+1+\sqrt{1-2a}}{a}} + \sqrt[3]{\frac{a}{-a+1+\sqrt{1-2a}}} - 1 \right)$ avec $a = \frac{G_1}{G_0}$

Pour une configuration bimorphe pour laquelle le même matériau est utilisé partout, le rapport optimal des épaisseurs est de $\frac{\sqrt{3}-1}{2}$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

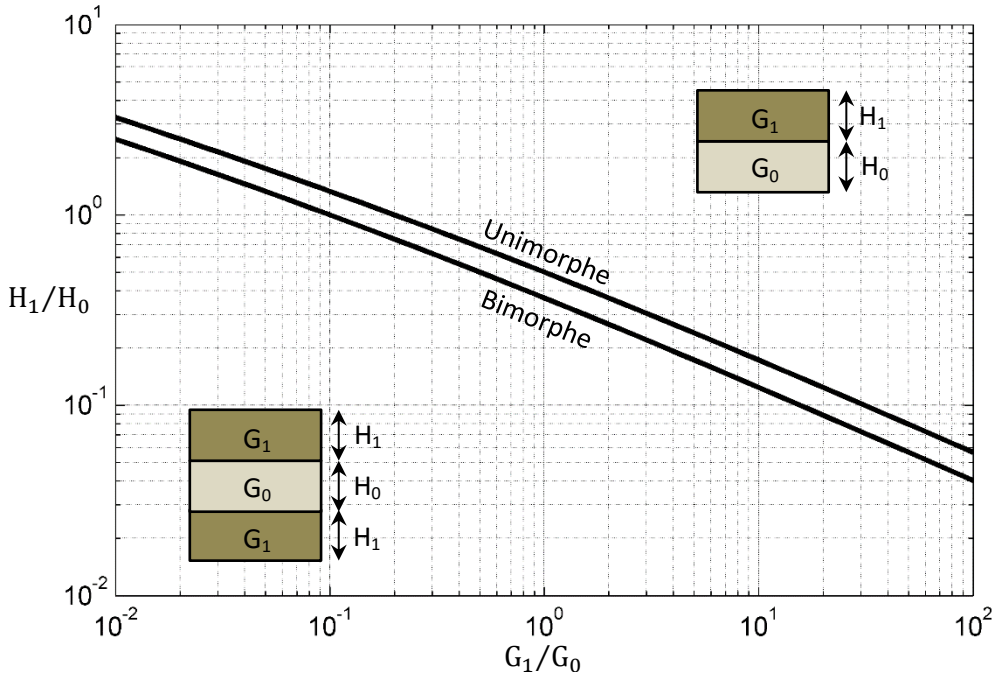


Figure 151 : Rapport des épaisseurs optimal pour un rapport des rigidités donné (pour une structure unimorphe et bimorphe)

Comme on peut se convaincre (Figure 151) l'épaisseur de la couche active devrait être presque toujours comparable en épaisseur avec le substrat pour un fonctionnement optimal. Le rapport optimal des épaisseurs varie aussi de manière presque linéaire dans un système logarithmique en fonction du rapport des raideurs. On peut aussi voir quel est l'impact de la variation de l'épaisseur d'une des deux couches sur le rapport M_0/I_{zz}.

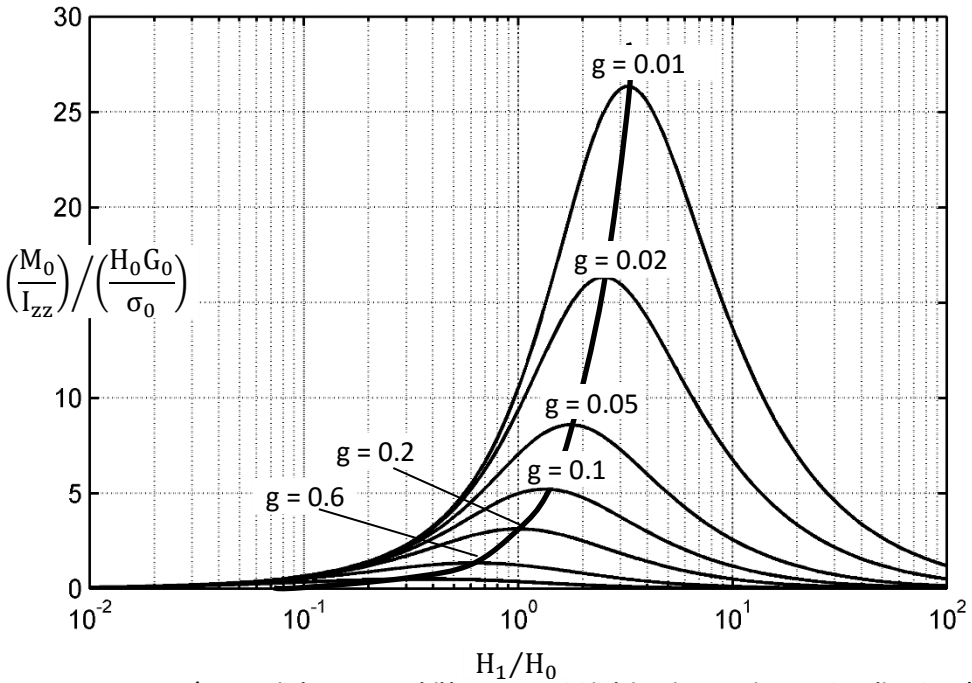


Figure 152 : Rapport M_0/I_{zz} normalisé par rapport à l'épaisseur et rigidité du substrat et la contrainte électrique (σ_0) en fonction du rapport des épaisseurs pour différents rapports des raideurs ($g = G_1/G_0$) (film unimorphe)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Lorsque la rigidité de la couche active est beaucoup plus faible que celle du substrat la quantité M_0/I_{zz} est presque la même pour les configurations unimorphes et bimorphes. Mais lorsqu'elles sont comparables entre elles alors on peut avoir des différences importantes (Figure 153).

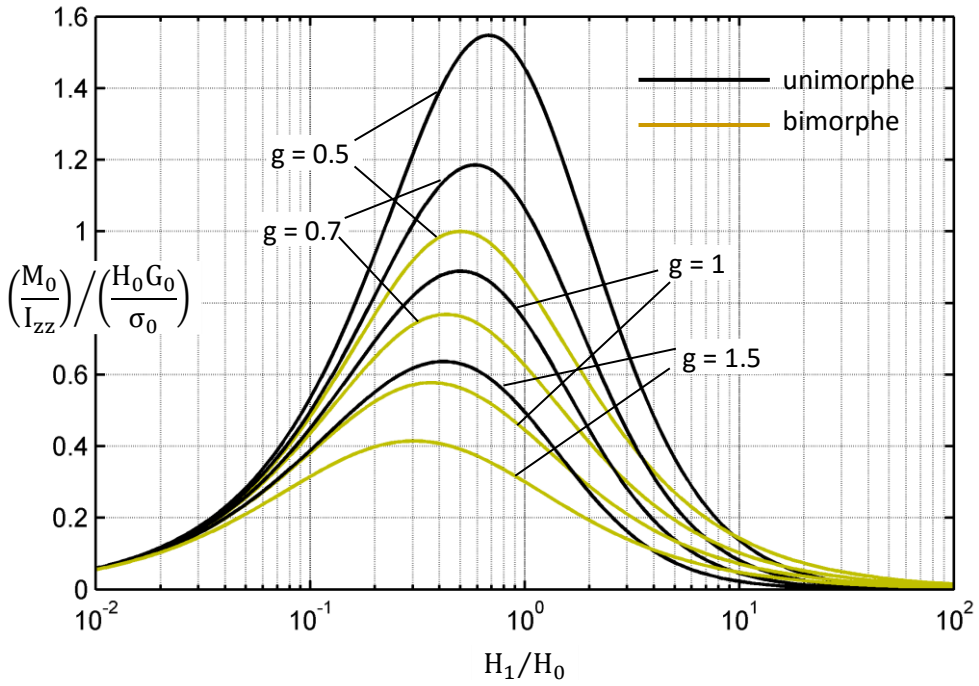


Figure 153 : Rapport M_0/I_{zz} normalisé par rapport à l'épaisseur et rigidité du substrat et la contrainte électrique (σ_0) en fonction du rapport des épaisseurs pour différents rapports des raideurs ($g = G_1/G_0$) (film unimorphe, bimorphe)

Une structure bimorphe est intéressante lorsqu'on utilise un matériau électrostrictif en tant que matériau actif, car dans un tel cas les contraintes électriques générées présentent toujours le même signe et pour certaines conditions aux limites comme par exemple un film bloqué – libre on peut obtenir qu'une déflection unidirectionnelle avec une structure unimorphe. Pourtant des fois on n'a pas la possibilité d'utiliser des structures bimorphes, c'est le cas lorsque le substrat joue le rôle d'un réflecteur d'un miroir ou d'une antenne et il serait impossible d'ajouter une couche qui pourrait les couvrir. La solution à un tel problème pourrait être l'utilisation de deux couches actives à la place d'une seule situées de même côté du substrat.

Pour que la structure puisse prendre une courbure dans les deux sens il faut que le moment généré dans la section du film puisse être et négatif et positif en fonction de la couche active alimentée. Pour une telle configuration aussi on pourrait se poser la question sur les épaisseurs qui optimisent le fonctionnement. Utilisant un raisonnement simple on peut se rendre compte qu'on a intérêt à choisir de telles épaisseurs de couches pour avoir le plan de référence pour lequel $I_z = 0$ situé à l'interface entre les deux couches actives. En effet, dans tous les cas pour pouvoir obtenir un moment et négatif et positif il faut déjà que ce plan soit situé au niveau du matériau actif. Si ce n'est pas le cas, alors on ne peut pas obtenir des moments opposés. Si par contre ce plan se trouve dans les couches actives on comprend très simplement qu'on a intérêt alors que la surface de séparation entre celles-ci soit située au même niveau.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

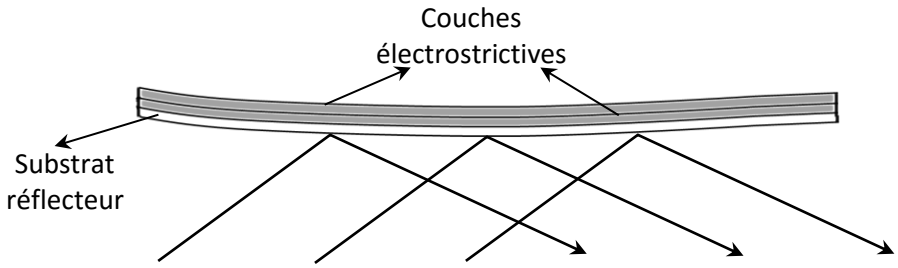


Figure 154 : Structure possible d'un miroir électroactif (utilisant des couches électrostrictives)

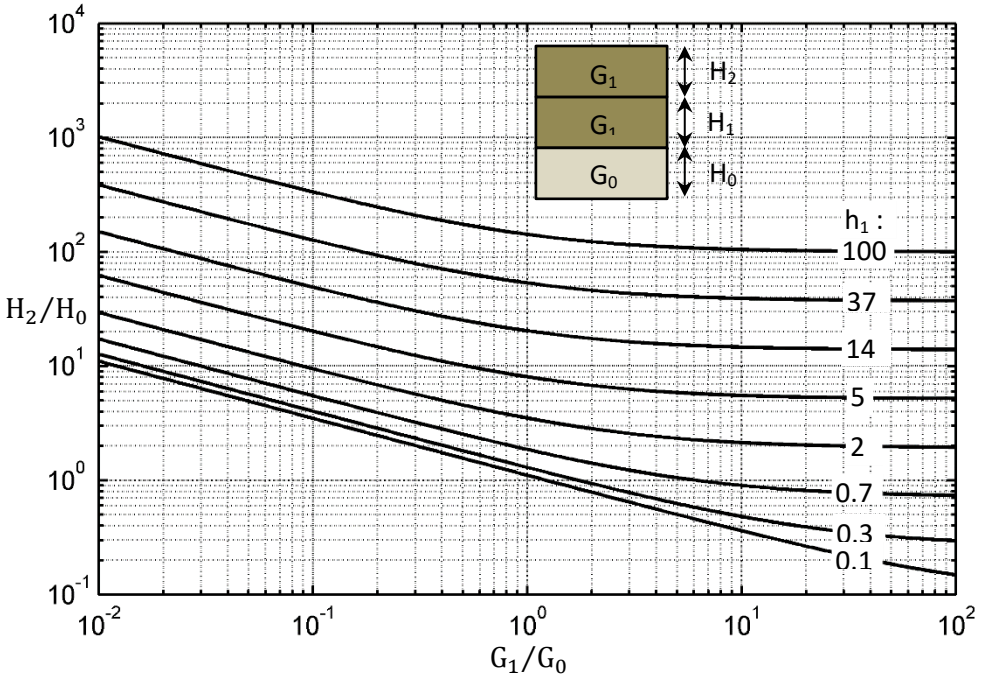


Figure 155 : Épaisseur optimale normalisé de la couche active extrême en fonction des raideurs des couches et l'épaisseur de la couche active intermédiaire normalisée ($\mathbf{h_1 = H_1/H_0}$)

Cela implique qu'il n'y a jamais d'intérêt d'alimenter les deux couches actives en même temps même avec des champs différents car d'après la condition précédente les deux moments générés par chacune seront de signe opposé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

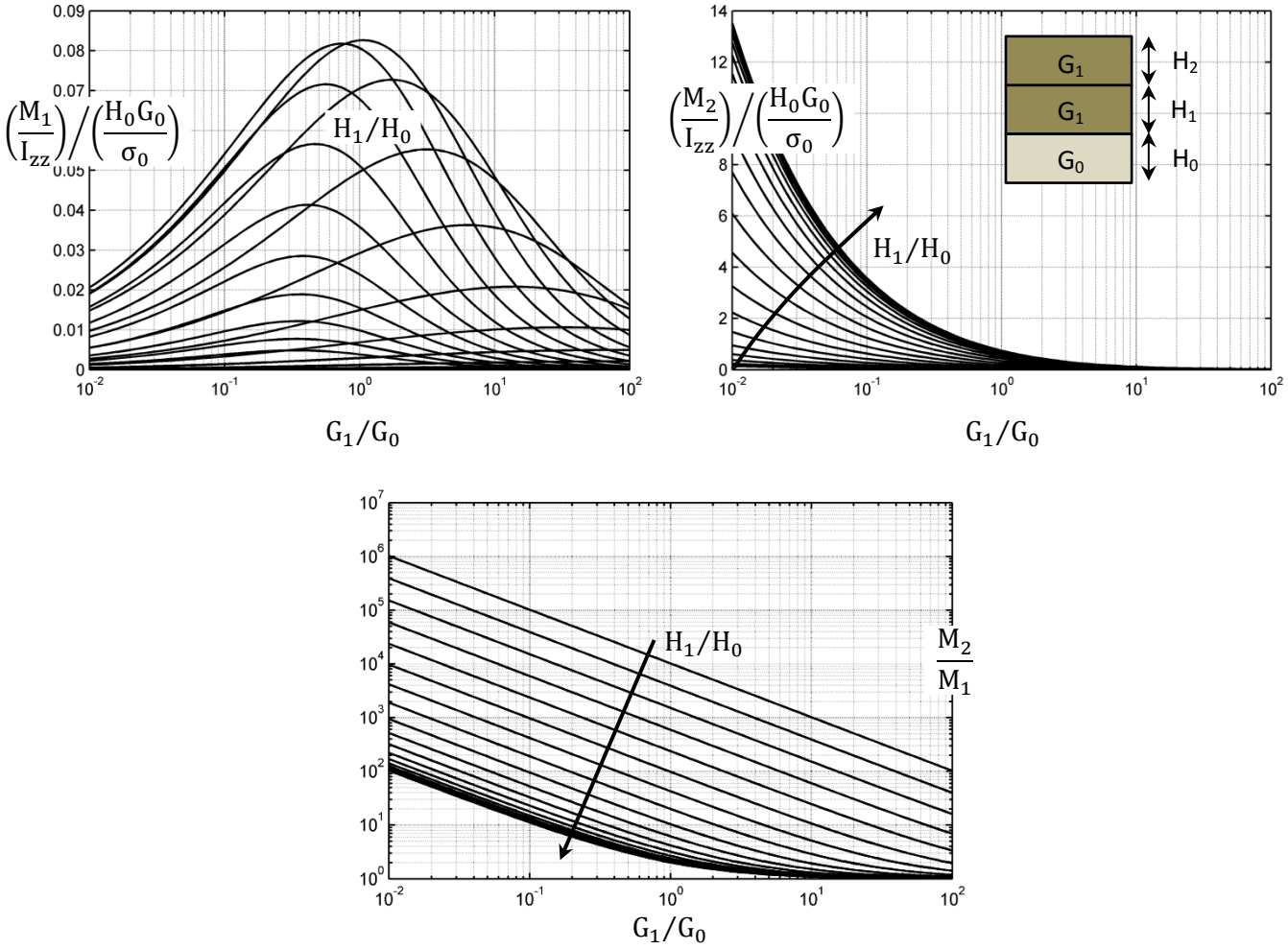


Figure 156 : Moments des forces électriques normalisés générées par chaque couche électroactive pour différents rapport des épaisseurs

Comme on peut le voir dans une telle configuration on peut avoir une dissymétrie importante par rapport au fonctionnement d'une structure unimorphe. En effet normalement le moment généré par la couche intermédiaire est très faible sauf dans le cas où la rigidité du matériau actif est beaucoup plus grande que celle du substrat. Pour résoudre ce genre de problème une méthode possible qui pourrait être utilisée serait de ne pas coller directement la couche active sur le substrat mais de réaliser un couplage mécanique spécial (comme il sera vu par la suite).

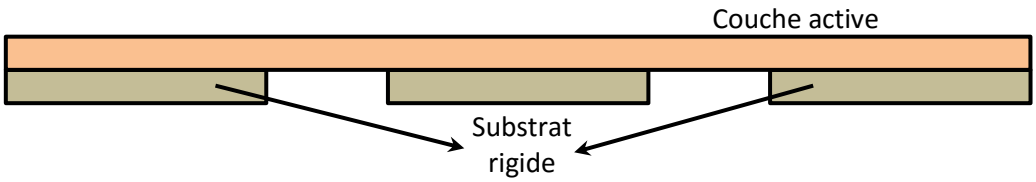


Figure 157 : Pour rendre le film plus flexible on peut utiliser un substrat avec des ''trous''

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme on l'a vu si le substrat est très rigide alors les déflections peuvent être très faibles. On pourrait alors se demander s'il n'y aurait pas des moyens pour le rendre un peu plus flexible. On pourrait par exemple fractionner le substrat (Figure 157).

Même si le film devient avec cette technique plus flexible pour des actions (forces, moments externes) cela n'améliore pas le fonctionnement électromécanique. En effet, lors de l'application des forces externes la déflection d'un tel film est plus grande du fait que les déformations se concentrent dans les régions où le substrat est absent mais par contre lorsqu'on applique un champ électrique dans ces régions on ne génère aucun moment. Il peut y avoir par contre une déformation axiale beaucoup plus importante mais celle-ci n'a pas toujours une influence importante sur la forme du film. On pourrait par contre utiliser sur certaines zones un substrat ayant une épaisseur plus faible, dans quel cas on peut amplifier la courbure.

Cela peut être vérifié en prenant un exemple réel (unimorphe : substrat 100 µm, module d'Young de 2 GPa, coefficient de Poisson de 0.4, couche active de 100 µm, module d'Young de 250 MPa, permittivité de 50, champ électrique appliqué de 10 V/µm). La longueur totale du film est de 3 cm et le substrat est composé de trois segments. Comme on peut le voir (Figure 158) la simulation par éléments finis confirme le raisonnement qu'on a fait. La déflection en bout du film diminue en effet lorsqu'on réduit la surface du substrat.

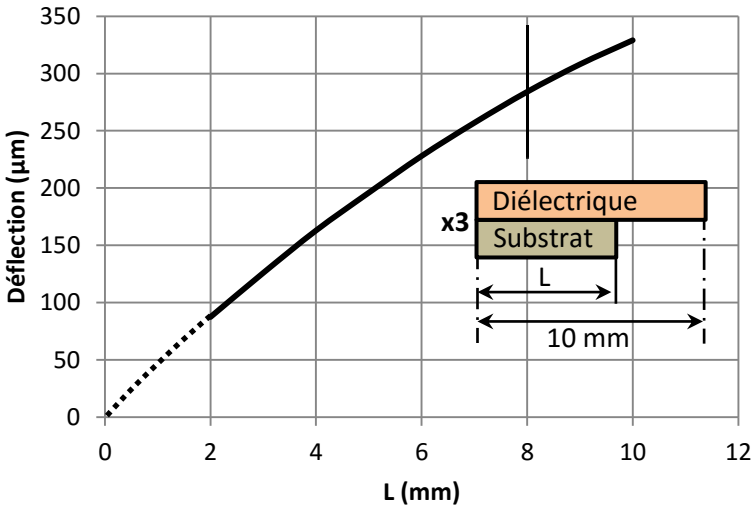


Figure 158 : Déflection en bout d'un film bloqué-libre unimorphe avec substrat segmenté

Si au contraire on reprend le film précédent mais on diminue l'épaisseur du substrat sur certaines zones (mais pas en l'éliminant complétement) on peut obtenir une certaine amélioration (Figure 159). On peut voir par l'intermédiaire de cet exemple un phénomène assez général : la performance d'un film électroactif dépend de ses propriétés locales et pas globales.

Normalement d'autres couches comme la colle ou les électrodes doivent être souvent pris en compte. Dans certains cas une couche intermédiaire de colle pourrait amener à une amélioration du fonctionnement. C'est le cas lorsque la présence de cette couche n'augmente pas beaucoup la rigidité en flexion du film mais augmente le moment du aux contraintes électriques à cause du fait que la couche active est éloignée du plan médian.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

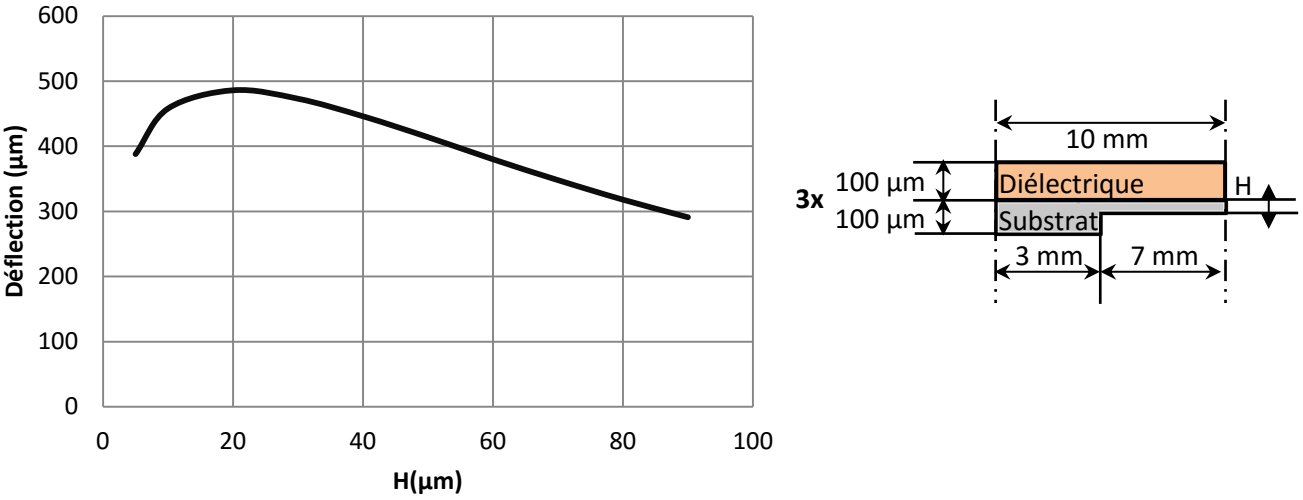


Figure 159 : Déflection en bout d'un film électroactif avec substrat segmenté de différentes épaisseurs (droite), en fonction de l'épaisseur du substrat (Ansys)

5.3 Conclusion

Les équations obtenues précédemment restent valables lorsque les déplacements obtenus en réponse de l'application d'un champ électrique sont très faibles et la géométrie du film déformé peut être considérée confondue avec sa géométrie initiale. Souvent cette condition n'est pas respectée il est alors nécessaire de construire des modèles plus complexes. Dans le cas général c'est possible que les déformations axiales (qu'on a négligé aussi) influent aussi sur la forme du film électroactif et il serait utile d'estimer cette influence.

Dans tous les cas ce chapitre nous a permis de définir les principaux paramètres qui interviennent lors de la modélisation des films électroactifs. On a vu aussi que des modèles simples peuvent être utilisés lorsque certaines hypothèses sont vérifiées. Ceux-ci ont permis de voir comment optimiser le couplage dans un film électroactif et comment les contraintes de Maxwell agissent localement.

Un film électroactif est caractérisé de point de vue mécanique par deux paramètres : une rigidité en extension et une autre en flexion et les contraintes de Maxwell se manifestent localement par l'intermédiaire d'un moment mécanique et une force orientée dans le plan du film. Différentes couches qui constituent le film électroactif peuvent être optimisées pour améliorer la déformation à l'état actionné mais la déformation totale dépend de l'action localisée du champ électrique appliqué et des propriétés élastiques locales aussi.

Différentes conditions aux limites peuvent être utilisées (blocage, appui simple, bords libres) et le champ électrique peut être appliqué de manière sélective ce qui peut amener à une déformation complexe.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 6. Travail expérimental sur l'actionnement et le changement de forme des structures minces utilisant des matériaux électroactifs

Dans ce chapitre on se propose de valider de manière expérimentale les résultats trouvés dans le chapitre précédent et de montrer que le changement de forme des structures utilisant des films électroactifs est possible même si sous différentes conditions certaines difficultés peuvent se manifester. Tout d'abord la caractérisation des films électroactifs est discutée et différentes méthodes pour la réaliser sont analysées. Ensuite plusieurs polymères sont testés intégrés dans des films électroactifs de type bloqué-libre ce qui permet de vérifier la validité des modèles et l'influence des différentes paramètres comme les électrodes, la colle ou le poids sur le fonctionnement. On montre ensuite que le fonctionnement des films électroactifs utilisant plusieurs zones actives est possible et un prototype ayant de grandes dimensions a été réalisé. On finit le chapitre par la réalisation pratique des structures couplées et on montre leur intérêt.

6.1 Méthodes de caractérisation des films électroactifs

Le comportement d'un film électroactif d'un point de vue électrique dépend directement du comportement des couches actives incorporées. Comme les déformations restent normalement faibles on peut en pratique considérer que la capacité électrique (ainsi que d'autres paramètres comme la résistivité des polymères ou des électrodes) de celles-ci reste constante.

Quant au comportement mécanique d'un film électroactif, comme il a été vu celui-ci peut être caractérisé par trois paramètres caractéristiques (notés respectivement I, I_z et I_{zz}). Si on choisit une référence dans l'épaisseur du film tel que $I_z = 0$ alors le nombre des paramètres est réduit à deux. Il s'agit de la rigidité en extension (I) et en flexion (I_{zz}). La rigidité en extension pourrait être mesurée directement en utilisant une configuration uniaxiale (par exemple avec le montage déjà utilisé pour la caractérisation des polymères). Le problème c'est que pour que cette rigidité (I) puisse être directement mesurée il faudrait qu'on assure que les déformations latérales dans le film soient maintenues nulles. Or pour un tel montage ce sont plutôt les contraintes latérales qui sont négligeables. Cela semble évident pour des films très flexibles mais lorsque ceux-ci sont rigides cela n'est pas si évident que ça car les bords bloqués peuvent avoir une influence non-négligeable. Pour voir ce qui se passe en réalité une simulation par éléments finis peut être réalisée, ce qui permet d'estimer l'influence des conditions aux limites dans le film sur la valeur de la rigidité déterminée en utilisant cette technique (**Tableau 28**).

Tableau 28 : Valeur du module d'Young d'un film déterminé en utilisant la déformation et la force appliquée dans une configuration uniaxiale (Y : module d'Young réel du film, coefficient de Poisson 0.4, l : largeur du film, épaisseur de 100 µm)

	l = 0.5 cm	l = 1 cm	l = 1.5 cm	l = 3 cm
Y = 100 MPa	100.5 MPa	100.9 MPa	101.4 MPa	102.7 MPa
Y = 1 GPa	1.01 GPa	1.01 GPa	1.01 GPa	1.03 GPa
Y = 10 GPa	10.1 GPa	10.1 GPa	10.1 GPa	10.3 GPa

Les simulations montrent que le blocage des extrémités n'influe presque pas sur la valeur du module d'Young déterminé en utilisant la force dans le film et la déformation axiale imposée dans celui-ci (Tableau 28) tant que la largeur du film est plus faible que son longueur. Même pour une largeur de 3 cm et une longueur de 5 cm la valeur déterminée ne diffère que de quelques pourcents par rapport à la vraie valeur. Mais en pratique il a été remarqué que pour que la mesure soit précise il est aussi important que le film reste plan ce qui est plus compliqué à assurer lorsque celui-ci est plus large.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Lorsque le film est composé de plusieurs couches la même méthode donne le module d'Young moyen et pas la rigidité en extension équivalente (I). Pour déterminer celui-ci on pourrait mesurer le module d'Young de chaque couche ainsi que la rigidité en flexion et ensuite en déduire les rigidités en flexion et extension du film entier.

Pour mesurer la rigidité en flexion d'un film uniforme plusieurs méthodes peuvent être utilisées. On pourrait par exemple faire vibrer le film et déterminer les fréquences de résonance et à travers celles-ci remonter aux paramètres mécaniques. Autre possibilité c'est d'exercer sur le film une certaine force en régime quasi-statique et mesurer sa déflection qui aussi peut être reliée aux paramètres élastiques du matériau. On peut montrer que la première fréquence de résonnance (en flexion) d'un film rectangulaire uniforme bloqué-libre est donnée par :

$$(131)\ f_0 \approx \frac{1.76}{\pi \mathrm{L}^2}\sqrt{\frac{\mathrm{I_{zz}}}{\mathrm{I_\rho}}},$$

Avec L : longueur du film, $\mathrm{I_{zz}}$: rigidité en flexion, $\mathrm{I_\rho}$: masse par unité de surface du film

Pour vérifier la méthode un film en mylar de 5 cm de longueur, 1 cm de largeur et environ 100 µm en épaisseur a été utilisé (Figure 161). La masse volumique du plastique est estimé à 1417 kg/m^3, en utilisant une balance de grande précision. Cela implique :

$$\mathrm{I_\rho} = 0.142\ \mathrm{kg/m^2}$$

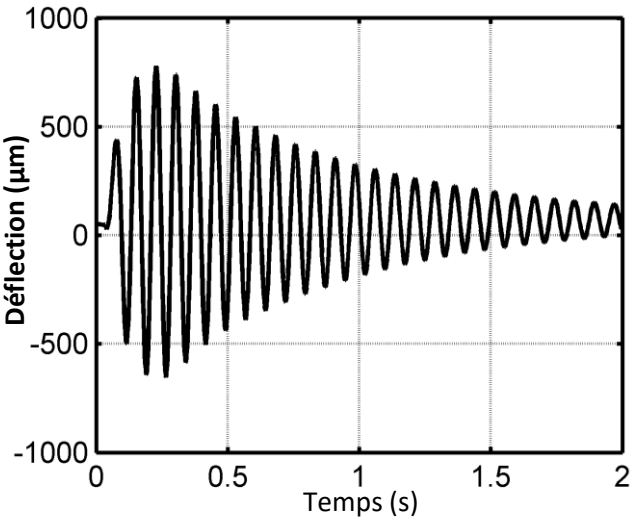


Figure 160 : Excitation impulsionnelle du film

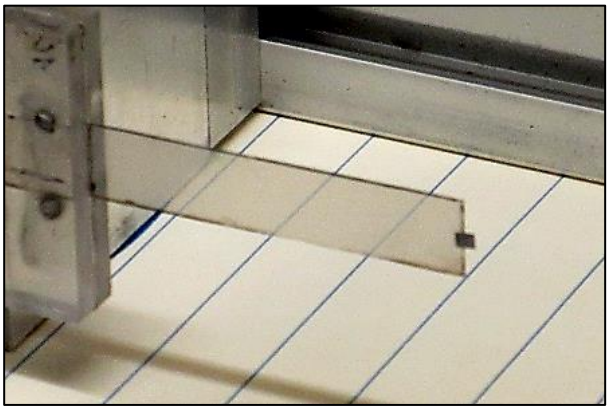


Figure 161 : Film de mylar utilisé pour les mesures de rigidité

Le module d'Young du mylar a été estimé à environ 3 GPa. Pour que le film soit mis en mouvement d'oscillation un bref impact lui a été appliqué (Figure 160). En utilisant la formule (131) on peut en déduire I_{zz}. Dans notre cas la fréquence de résonance mesurée est égale à 12.5 Hz. Si on considère un coefficient de Poisson de 0.4 on obtient avec la formule précédente autour de 11.3 Hz, une valeur qui n'est pas très éloignée (10 % de différence). Mais il ne s'agit pas d'une mesure précise non plus, en effet pour un coefficient de Poisson qui varie entre 0.3 et 0.5 la fréquence de résonance varie entre 10.9 Hz et 12 Hz.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

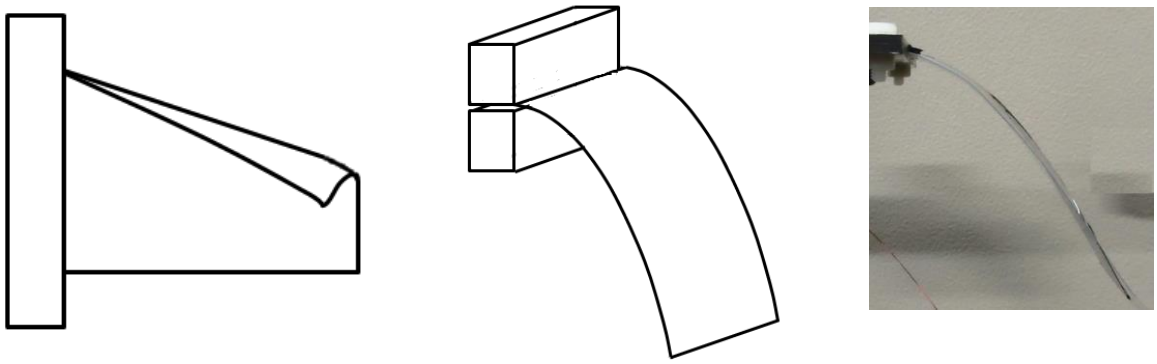


Figure 162 : Impact non-négligeable de la force de pesanteur sur différentes structures

Autre méthode possible simple pour estimer la rigidité c'est de se placer dans un régime statique et laisser le film se déformer sous l'action de son propre poids. En effet, pour certains paramètres un film placé de manière horizontale peut changer de forme de manière considérable (Figure 162).

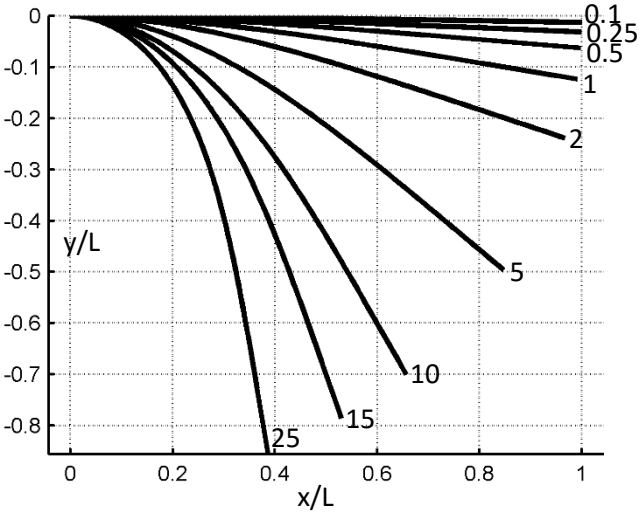


Figure 164 : Forme d'un film de longueur normalisée pour différentes valeur de Γ (132)

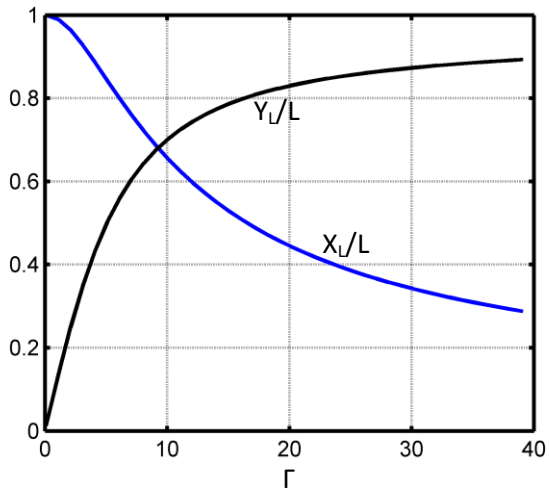


Figure 163 : Position de l'extrémité du film pour différentes valeur de Γ avec (X_L,Y_L) position de l'extrémité du film

Il est possible de montrer que pour un film bloqué-libre sa forme à l'état déformé sous l'action de son propre poids est donnée par l'équation :

$$(132)\ \frac{\partial^2\theta}{\partial l^2} = \frac{gI_\rho}{I_{zz}} \cdot (L - l) \cdot \cos(\theta),\ l \in [0, L]$$ qui peut être mis sous la forme $$\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2} = \frac{gI_\rho L^3}{I_{zz}} \cdot (1 - x) \cdot \cos(\theta),\ x \in [0,1]$$ et on peut noter $$\Gamma = \frac{gI_\rho L^3}{I_{zz}}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Il s'agit d'un problème non-linéaire mais qui peut être résolu d'une manière générale par des méthodes numériques (Figure 163,Figure 164). Si on veut utiliser ce phénomène pour déterminer les propriétés mécaniques des films alors on comprend que la sensibilité de cette méthode sera plus grande pour $\Gamma \in (5; 15)$. Si le film est trop rigide alors sa déflection à l'équilibre sera trop faible pour qu'elle puisse être mesurée avec précision, si au contraire il est trop souple ou trop long alors le film déformé est quasi-vertical.

Pour vérifier le concept un film en plastique de 95 µm d'épaisseur a été utilisé. La masse volumique a été déterminée en mesurant la masse d'un film de dimensions connues, celle-ci a été estimée être égale à 1431 kg/m^3. Un film de 2 cm de largeur a été fixé à une de ses extrémités et maintenu à cet endroit en position horizontale; pour différentes longueurs, la position de l'extrémité du film a été mesurée. Le module d'Young du matériau est d'environ 4 GPa.

Tableau 29 : Position de l'extrémité d'un film en plastique sous l'action de son poids (calculée et mesurée)

Longueur du film	X mesuré	X calculé	Y mesuré	Y calculé
10 cm	9 cm	8.9 cm	4.2 cm	4.2 cm
12 cm	9.4 cm	9.2 cm	7 cm	7.6 cm

Si on considère un coefficient de Poisson de 0.4 alors le calcul donne une position de l'extrémité assez proche de celle mesurée (Tableau 29). On peut vérifier que l'influence du coefficient du Poisson sur la forme du film à l'état déformé n'est pas très importante (Figure 166) mais une variation de celui-ci entre 0.3 et 0.5 peut amener à une erreur d'environ 10% de la rigidité calculée. Cela veut dire qu'en principe si on ne cherche pas beaucoup de précision la raideur en flexion pourrait être approximée par (si le coefficient de Poisson de chaque couche est approximé à 0.4) :

$$(133)\ I_{zz} \approx \frac{1}{1-0.4^2} \cdot \int_Z \{Y(Z) \cdot Z^2\} dZ$$

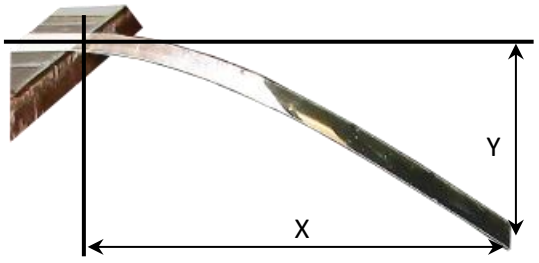


Figure 165 : Film déformé par son propre poids (photo)

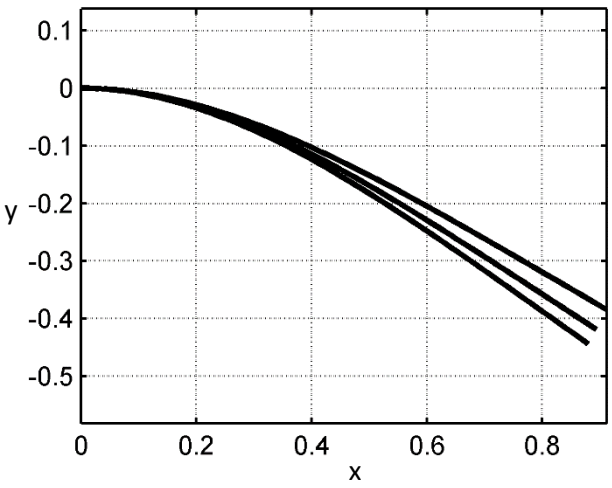


Figure 166 : Forme du film (simulation) pour différents coefficients de Poisson (0.3, 0.4, 0.5)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les substrats utilisés sont en général assez souples (plastique, module d'Young de l'ordre de quelque GP et une épaisseur de ≈ 100 µm). On pourrait alors se demander quelles doivent être les rigidités et les épaisseurs des films acceptables pour que l'influence du poids puisse être négligée. Encore une fois on peut remarquer que l'influence du poids d'un film est très sensible aux dimensions. Si on prend par exemple un film en plastique (module d'Young de 1 GPa, 0.4 comme coefficient de Poisson, densité de 1000 kg/m^3, 100 µm d'épaisseur) bloqué-libre on obtient : $\Gamma = 1e4L^3$ (L : longueur du film). Ce qui veut dire que le poids commence à se manifester de manière visible même pour un film de 5 centimètres de longueur (Γ ≈ 1).

Bien évidement ce phénomène est indésirable lorsque les films électroactifs sont utilisés en pratique. Comme on peut le voir on a intérêt que Γ reste inférieur à 1 si on travaille avec un film placé de manière horizontale. L'influence du poids est d'autant plus importante que le film est long car Γ est proportionnel au cube de la longueur (132). Lorsqu'il s'agit d'un film bloqué aux deux extrémités la déflection induite reste assez faible, le calcul étant plus simple on peut montrer que la déflection au centre du film, imposée par le poids, est donnée par :

$$(134)\ w_0 = \frac{gI_\rho L^4}{384 \cdot I_{zz}}$$

Certains matériaux (comme par exemple le scotch double face ou les électrodes) ne peuvent pas être utilisés directement lors des mesures. En effet, par exemple pour le test uniaxial il est très important que le film soit bien plan ce qui est presqu'impossible de réaliser avec un scotch. Il est aussi trop flexible pour faire des tests en flexion. Quant aux électrodes ceux-ci sont toujours fabriqués sur un substrat. Une méthode possible de caractériser de tels matériaux c'est d'utiliser directement le substrat associé à la couche à caractériser, pourvu que les paramètres du substrat ont été déjà déterminés. C'est ainsi que le module d'Young du scotch double-face a été estimé à environ 12 MPa.

Même si différentes méthodes de caractérisation ont été essayées celles-ci ne se sont pas avérées vraiment précises (erreur ≈ 10%). Mais en même temps si on cherche juste à simuler le comportement de telles structures d'une manière approximative alors celles-ci pourraient s'avérer suffisantes.

6.2 Structures unimorphes simples

6.2.1 Films bloqué-libres

Parmi toutes les configurations uni- ou bimorphes les films électroactifs qui présentent une certaine liberté de mouvement (condition sur les bords de type bloqué-libre par exemple) subissent aussi les plus grandes déflections lorsqu'ils sont actionnés. Comme il a été vu celles-ci sont dues dans un tel cas presqu'en exclusivité à la courbure du film engendrée par les moments des forces électriques.

- **Paramètres du film :**
- Capacité électrique = 479 pF
- Résistance série = 15.5 kΩ
- Épaisseur totale = 410–480 µm
- Première fréquence de résonance ≈ 2 Hz

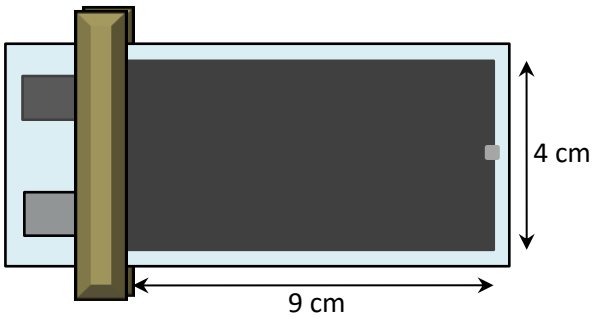


Figure 167 : Film unimorphe utilisant du silicone comme matériau électroactif

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

La première structure testée consiste d'un film électroactif réalisé en utilisant un film de silicone de 200 µm d'épaisseur collé à un substrat en plastique de 100 µm d'épaisseur (3.5 GPa) avec du scotch double face (50 µm, module d'Young ≈ 12 MPa). Pour diminuer l'influence de la force de pesanteur le film est fixé de manière à ce que son plan soit parallèle à la verticale et son axe est maintenu horizontal.

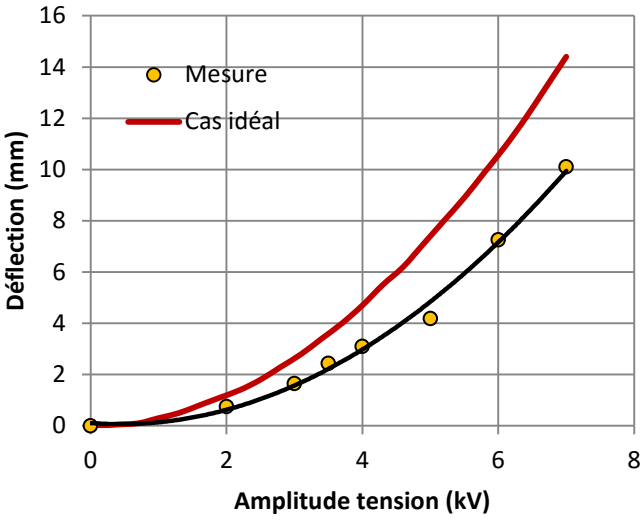


Figure 168 : Dépendance de l'amplitude de la déflection en extrémité de l'amplitude crête de la tension appliquée

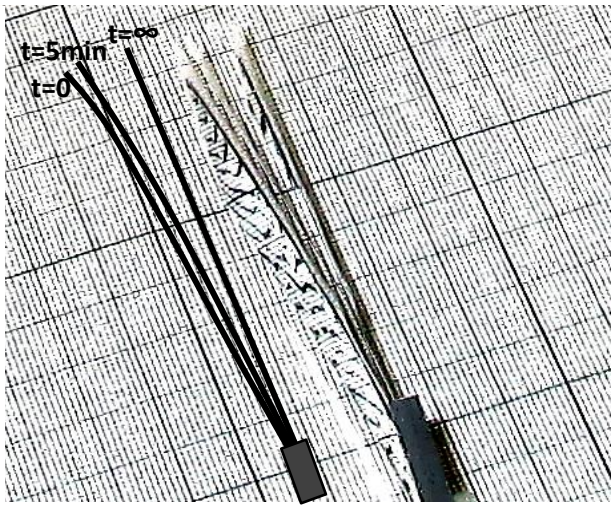


Figure 169 : Due aux faibles courants de fuite le film arrive à maintenir sa forme courbé même après la déconnexion de la source de tension principale pour de longues durées de temps (6 kV)

La variation de la déflection de ce film en fonction de la tension appliquée est représentée dans la Figure 168. La mesure indique une déflection inférieure à celle calculée pour un cas idéal où l'influence des électrodes, de la courbure latérale ou la présence des contraintes parasites serait négligeable. Les mesures peuvent être refaites avec le même film mais en utilisant de la graisse conductrice sur la surface externe du film. Ces mesures ont montré que pour un tel film la principale limitation peut venir de la présence des contraintes résiduelles ainsi que l'influence du poids (Figure 171) et pas des électrodes. Avant d'analyser les résultats il faut mentionner que le film avec des électrodes en graisse conductrice est plus flexible mais il garde plus ou moins le même poids en raison de la couche épaisse de graisse appliquée. De plus, cette fois-ci le film de silicone a été collé au substrat tout en étant attaché à son propre film (de protection). Ceci a apparemment conduit à la génération dans le film de silicone des contraintes résiduelles qui combinées à l'action du poids conduisait à une déflection même plus faible que celle obtenue avec une électrode solide. La mesure a été aussi répétée pour une position verticale du film et il a été observé que le fonctionnement était plus instable lorsque le film était placé de manière horizontale, son plan étant parallèle à la verticale (Figure 171). En effet, la déflection subit un changement rapide lors de la variation de la tension appliquée ce qui constitue un signe concluant de la présence d'un comportement instable. Cet exemple est assez intéressant parce qu'il montre les limitations possibles de l'utilisation des films électroactifs souples ou longs.

On peut observer aussi que les courants de fuite dans le film de silicone restent très faibles. En effet on peut par exemple charger le film et ensuite ouvrir le circuit. On peut remarquer alors que celui-ci reste courbé pendant plusieurs minutes lorsqu'il est laissé en circuit ouvert (Figure 169).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Les fréquences de résonance de telles structures restent assez faibles, de l'ordre de quelques Hz. Cela peut poser des problèmes d'une part si l'actionnement du film doit être dynamique et précis car on excite des vibrations parasites. Mais d'une autre part ce phénomène pourrait être même utile si la précision n'est pas un objectif et ce qui compte plus c'est l'amplitude de la déflection. Même s'il s'agit d'un système résonnant assez amorti l'amplitude de la déflection peut être sensiblement augmentée en excitant le film à sa fréquence de résonance (Figure 170).

Autre observation qu'on peut faire c'est le fait que pour les dimensions données du film, son poids n'est pas du tout négligeable. Le film final après dépôt des électrodes (en silicone conducteur) est assez épais (≈ 450 µm). Même si le film est posé avec son plan parallèle à la verticale lorsque sa déflection devient importante on peut observer sa tendance de se plier.

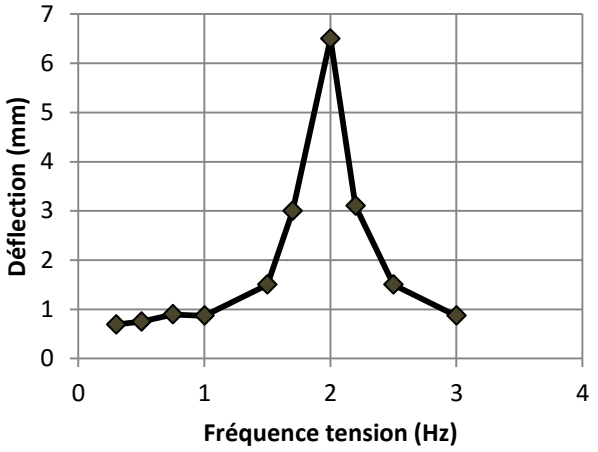


Figure 170 : Variation de l'amplitude de la déflection en bout du film en fonction de la fréquence de la tension appliquée (Tension

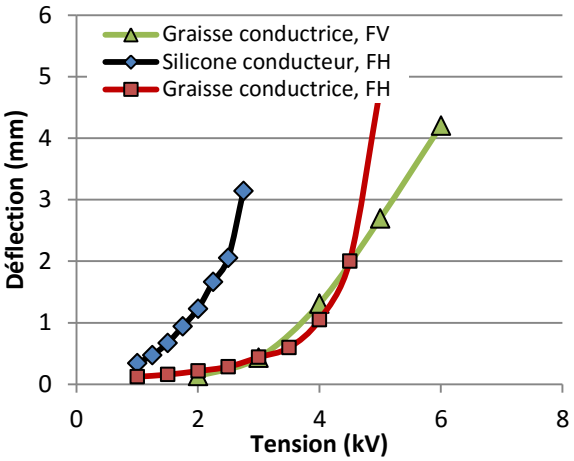


Figure 171 : Comparaison entre la déflection du même film utilisant une électrode solide ou de la graisse conductrice et pour différentes positions (FV : film vertical, FH : film horizontal)

Un moyen de diminuer l'influence du poids c'est de placer le film en position verticale avec l'extrémité libre orientée vers le bas. Cela reste très efficace si les déflections induites restent faible mais si celles-ci sont plus importantes alors l'influence de la force de pesanteur devient comparable au cas où le film est horizontal. De plus, pour différentes positions du film différents modes de résonnances sont excités lors de l'actionnement.

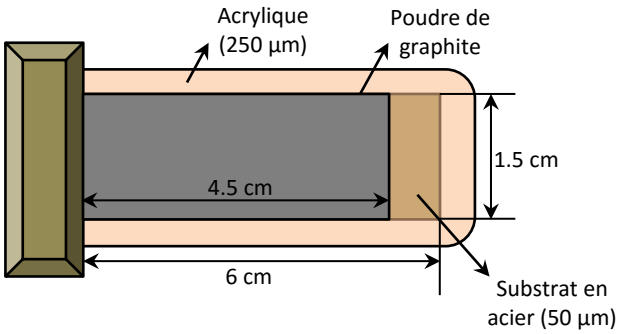


Figure 172 : Film unimorphe : acrylique + substrat en acier

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Contrairement au silicone l'utilisation de l'acrylique ne nécessite pas de colle car il s'agit déjà d'un scotch, mais pour que l'adhésion entre celui-ci et le substrat soit possible il faut que l'électrode intermédiaire soit déjà solide et appliquée sur le substrat. La métallisation avec de l'or semble être la plus adaptée dans ce cas. Autre possibilité c'est d'utiliser directement un substrat qui est déjà conducteur. Pour vérifier le concept on utilise la structure représentée dans la Figure 172.

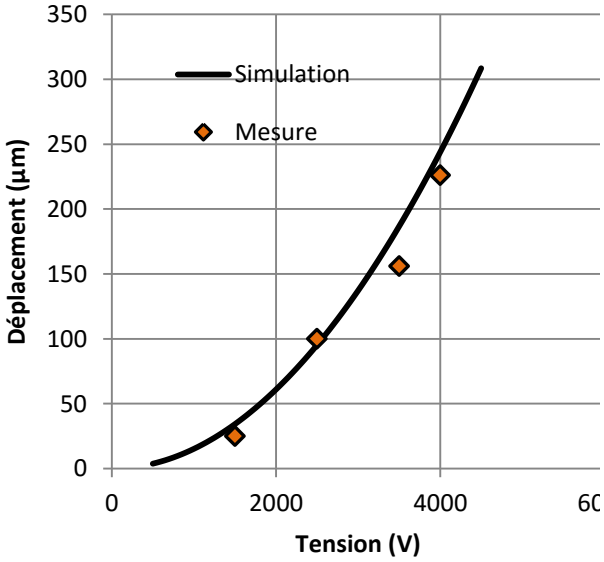


Figure 173 : Évolution de l'amplitude de la déflection du film en fonction de la tension appliquée

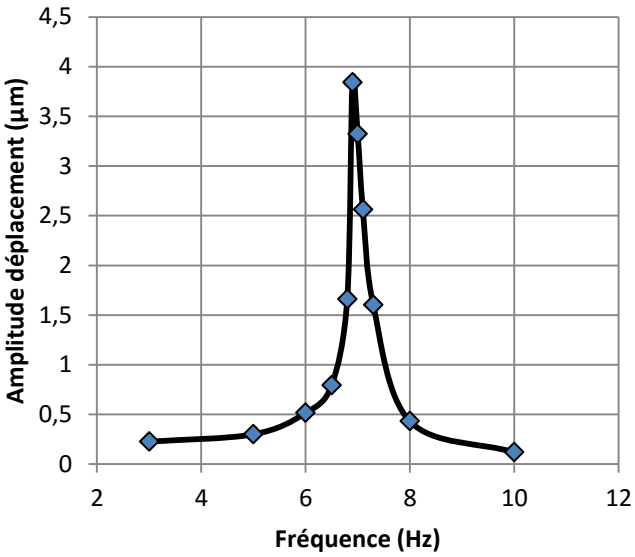


Figure 174 : Variation de la déflection en bout du film avec la fréquence (pour une tension de 4kV)

Le substrat de ce film est constitué de l'acier de 50 µm d'épaisseur (dimensions : 1.5 cm x 6 cm), module d'Young de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0.33 (valeurs courantes). L'acrylique a été directement colle sur le substrat et sur sa surface externe une électrode a été fabriquée en utilisant de la poudre de graphite appliquée à l'aide d'un masque (dimensions d'électrode : 4.5 cm x 1.5 cm).

L'amplitude de la déflection en bout du film (à 1 Hz) mesurée et calculée est donnée dans la Figure 173. On peut se convaincre que le modèle permet de retrouver plus ou moins les valeurs mesurées. La fréquence de résonnance du film est approximativement de 7 Hz et on peut remarquer que même si l'épaisseur du polymère est 5 fois celle du substrat le facteur de qualité du film reste assez élevé, l'amplitude à la résonance étant environ 10 fois plus grande que celle en dehors de celle-ci. L'électrode en graphite montre une résistance très élevée (plusieurs dizaines de MΩ). Probablement à cause de cela la capacité mesurée à faible champ électrique est de seulement 20 pF à la place de 100 pF qu'on devrait normalement avoir. Pourtant, comme on peut le voir pour des champs électriques élevés le fonctionnement est assez conforme au comportement idéal ce qui peut suggérer que l'électrode en poudre de graphite présente un comportement compliqué en fonction du champ électrique utilisé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

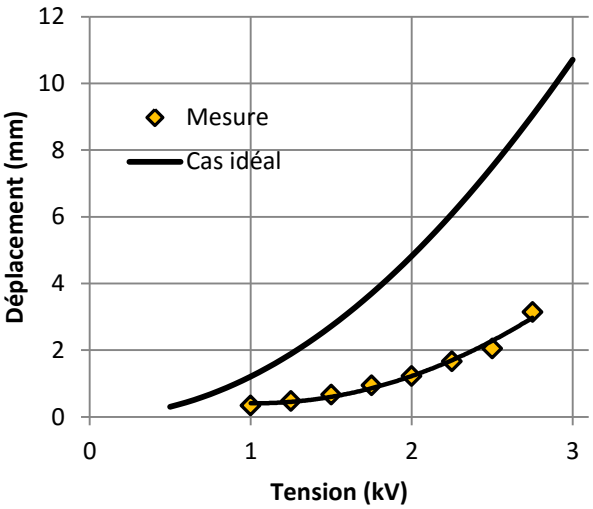


Figure 175 : Déflection à l'extrémité du film en fonction de la tension appliquée (acrylique + substrat plastique souple)

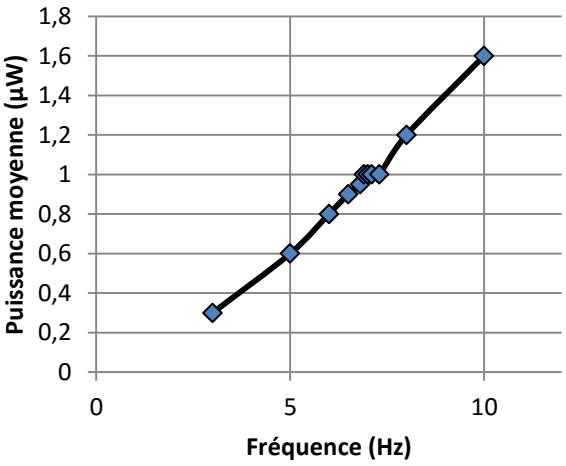


Figure 176 : Variation de la puissance moyenne consommée par le film en fonction de la fréquence d'excitation (tension crête de 4 kV

L'énergie nette consommée par le film pour un cycle reste assez faible de l'ordre de 0.13 µJ/période ce qui est beaucoup plus faible que l'énergie électrostatique totale injectée dans le film d'environ 800 µJ/période (Figure 176). C'est une conséquence directe du fait que les pertes ohmiques dans l'acrylique sont très faibles tout comme dans le silicone) et donc celui-ci se comporte comme un condensateur idéal.

Autre possibilité d'utiliser l'acrylique c'est d'appliquer directement l'électrode sur le substrat et coller le polymère ensuite (Figure 177). Dans notre cas cette idée a été réalisée en utilisant un film en plastique de 70 µm d'épaisseur et plus souple que le substrat précédent, présentant un module d'Young de 700 MPa. Celui-ci a été métallisé par ''sputtering'' (40 mA, 40 s, sans support). Comme on peut voir la déflection calculée pour un film à deux couches idéales est beaucoup plus importante que celle mesurée en pratique. Cela pourrait être dû d'une part au champ de déformations qui n'est pas forcement plan ou encore (ce qui est plus probable) à l'influence du poids qui impose une certaine déformation parasite.

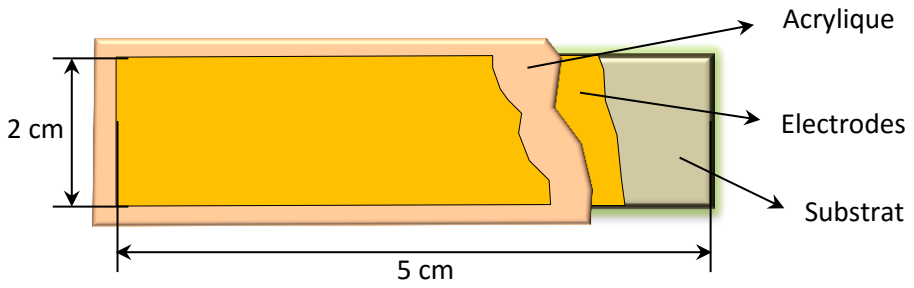


Figure 177 : Dimensions du film électroactif utilisant de l'acrylique et un substrat en film plastique métallisé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

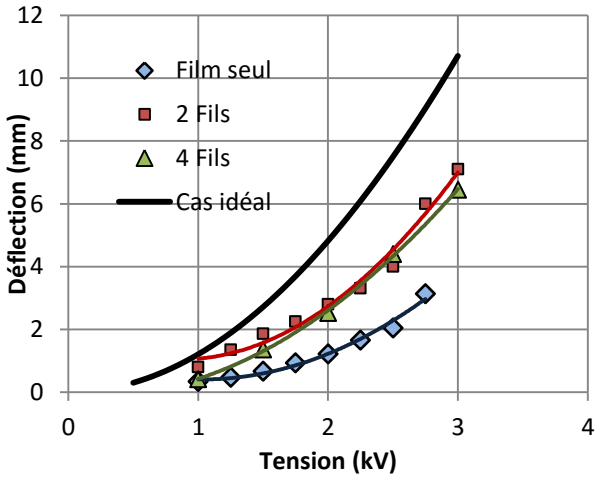


Figure 178 : Déflection d'un film bloqué – libre simple, avec 2 fils rigides et avec 4 fils rigides (limitant sa courbure latérale) en fonction de la tension appliquée

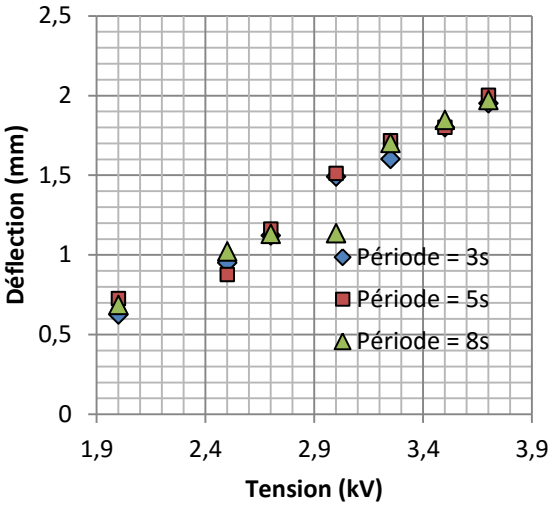


Figure 179 : Déflection d'un film bloqué-libre (film plastique métallisé + acrylique) pour différentes périodes de la tension (en dehors d'une résonnance)

Pour voir quel est l'impact de la courbure latérale sur la déflection du film, des fils rigides sont rajoutés de manière à limiter celle-ci. Tout d'abord on colle 2 fils (en cuivre de ≈ 500 µm de diamètre, un au milieu et un autre à l'extrémité libre), ensuite on utilise 4, aussi espacés de la même distance.

On peut en effet remarquer (Figure 178) que la courbure latérale du film diminue la déflection de son extrémité. L'ajout des éléments rigidifiant peut améliorer le fonctionnement. Mais en même temps utiliser beaucoup de tels éléments n'amène pas forcement à une amélioration importante de la déflection (la déflection avec l'utilisation de 2 fils est approximativement la même que lorsque 4 fils sont utilisés). L'ajout des éléments rigides conduit à une amélioration du fonctionnement aussi en diminuant l'influence du poids sur la déformation.

L'acrylique c'est un polymère très visqueux (voir la caractérisation des polymères) mais les mesures montrent que lorsque celui-ci est collé sur un substrat beaucoup plus rigide (comme par exemple le film dont la déflection est représenté dans la Figure 179) alors celle-ci n'a pas une grande influence sur l'amplitude du déplacement. En effet on peut voir que la déflection ne varie presque pas pour différentes périodes de la tension comprises entre 3 et 8 s, alors que pendant la caractérisation de l'acrylique il a été observé qu'il nécessitait une durée de plusieurs secondes pour arriver à un équilibre.

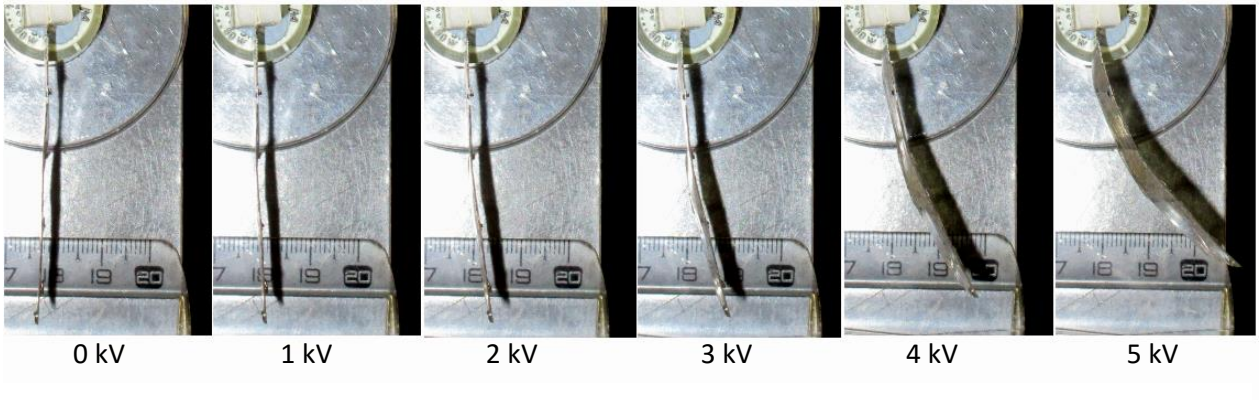


Figure 180 : Déformation du film acrylique + plastique sous l'action des tensions élevées

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Le même substrat et la même technique (sauf le collage car on utilise dans ce cas du scotch double-face de 50 µm) a été utilisé avec un film de PU (≈ 75 µm). On peut voir que dans un tel cas le modèle et les résultats expérimentaux sont en bonne concordance, du moins pour des tensions pas très élevées. En comparaison avec le film utilisant de l'acrylique celui-ci est plus léger car plus mince c'est donc probable que cela soit la raison pour laquelle le comportement du film reste celui qu'on attend.

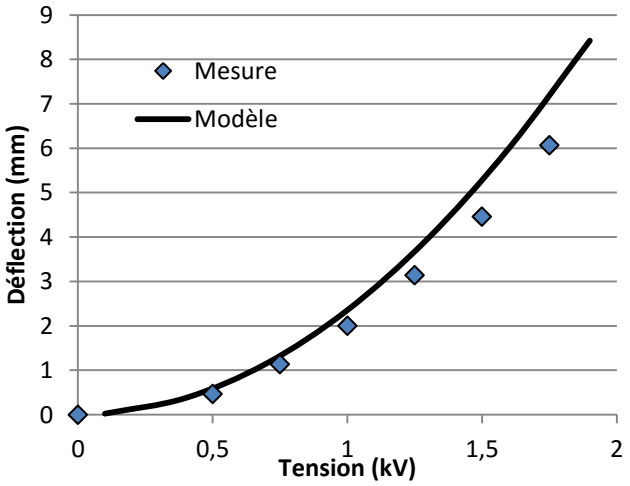


Figure 181 : Déflection à l'extrémité du film en fonction de la tension appliquée (film substrat plastique + PU)

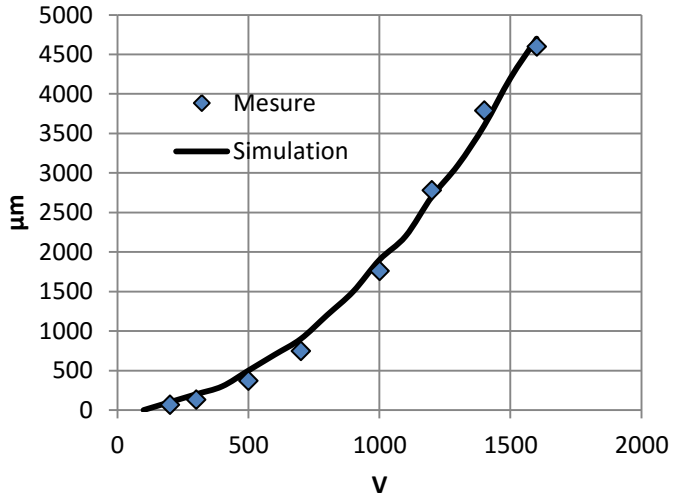


Figure 182 : Déflection d'un unimorphe utilisant du terpolymère en fonction de la tension appliquée

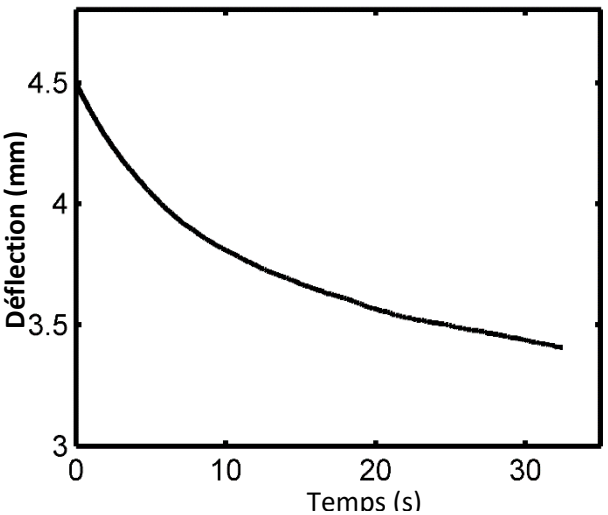


Figure 183 : Variation de la déflection du film lorsque celui-ci est maintenu en circuit ouvert (tension initiale 1.6 kV)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Le terpolymère a été essayé avec un film de 5 cm de longueur et 1 cm de largeur avec un substrat de 100 µm (4 GPa) et collé avec du scotch double-face (50 µm). Comme on peut le voir dans un tel cas encore le modèle donne de bons résultats. Les pertes par des courants de fuite dans le terpolymère ne sont pas aussi faibles que dans le cas du silicone, l'acrylique et le latex mais elles sont suffisamment faibles pour qu'un film chargé initialement à 1.6 kV et ensuite laissé en circuit ouvert garde sa forme déformée pendant un certain temps (Figure 183).

Ces tests montrent que les contraintes de Maxwell et les modèles simples permettent d'expliquer suffisamment bien le comportement des films électroactifs bloqués-libres. On a pu observer aussi l'influence négative de différents facteurs sur le comportement des films électroactifs utilisés dans une telle configuration. Le poids peut être un vrai problème, l'influence de celui-ci augmentant très sensiblement avec la longueur du film et son épaisseur. Le comportement pourrait être aussi perturbé par des contraintes résiduelles générées lors du collage de différentes couches. Finalement les électrodes peuvent avoir aussi une influence non-négligeable mais cela reste vrai plutôt pour le silicone conducteur. Quant aux électrodes en or celles-ci ne semblent pas présenter un impact sensible sur la rigidité du film, le plus probablement dû au fait qu'il ne s'agit pas vraiment d'une couche continue mais plutôt fragmentée.

6.2.2 Films segmentés avec les bords bloqués

Les films électroactifs qui sont plus ou moins bloqués sur leurs bords présentent des déflections beaucoup plus faibles que les films qui sont laissés se courber en toute liberté. Les déformations axiales peuvent aussi avoir un effet loin d'être négligeable mais par rapport aux films bloqués-libres l'avantage de ces derniers c'est que leur déformation peut être rendu plus localisé. Pour contrôler la forme du film différentes régions du polymère peuvent être alimentées avec différentes tensions.

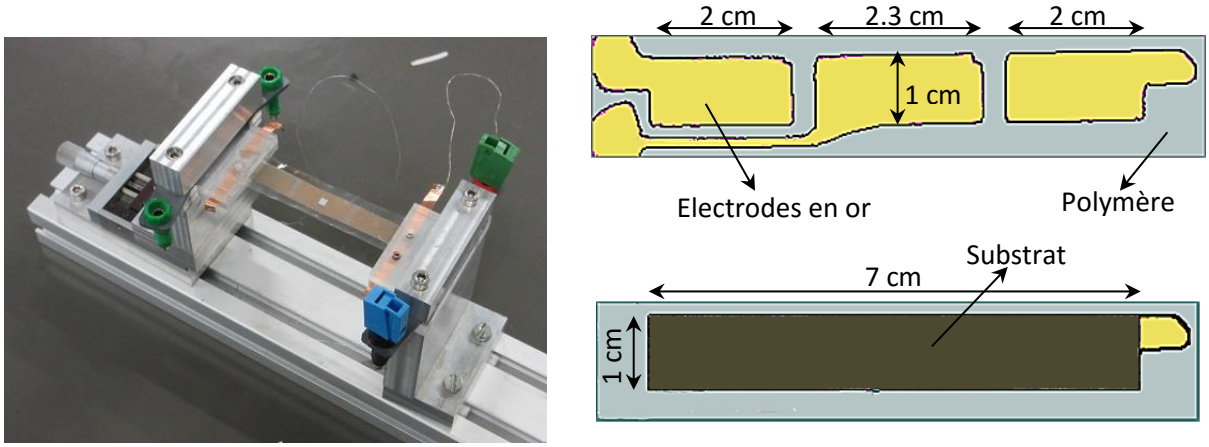


Figure 184 : Film électroactif segmenté bloqué-bloqué (PU) mis en place (gauche) dimensions du film (droite)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour vérifier le concept on utilise un film de PU d'une épaisseur approximative de 70 µm et un substrat en mylar (3 GPa, 100 µm) collés l'un à l'autre à l'aide du scotch double face (100 µm). Trois électrodes rectangulaires en or (tel que présentées dans la Figure 184) ont été fabriquées à l'aide d'un masque et un pulvérisateur cathodique (Cressington 208 HR). Une distance d'environ 3.5 mm séparait chaque électrode l'une de l'autre. Le film a été placé ensuite dans le banc de positionnement de précision (fabriqué pour cela, Figure 184) avec ses extrémités bloquées.

Une tension sinusoïdale décalée ($0 \leftrightarrow V_{max}$) d'une période de 2 secondes a été appliquée sur un ou plusieurs électrodes. En alimentant d'abord les zones actives situées aux extrémités du film il a été observé (en utilisant un interféromètre laser OFV5000) que cela amène à une courbure positive dans le sens du substrat. En alimentant que l'électrode centrale un déplacement dans le sens inverse a été obtenu. La déflection du centre du film en fonction de la tension appliquée et les électrodes alimentées est donnée dans les Figure 185 - Figure 186.

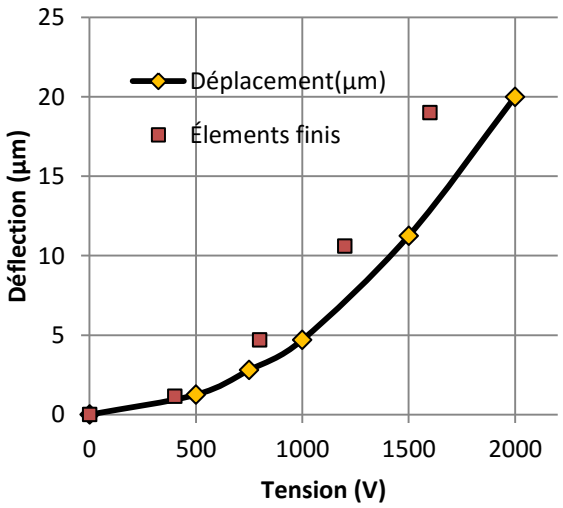


Figure 185 : Amplitude du déplacement en alimentant les patchs latéraux du film en fonction de la tension appliquée

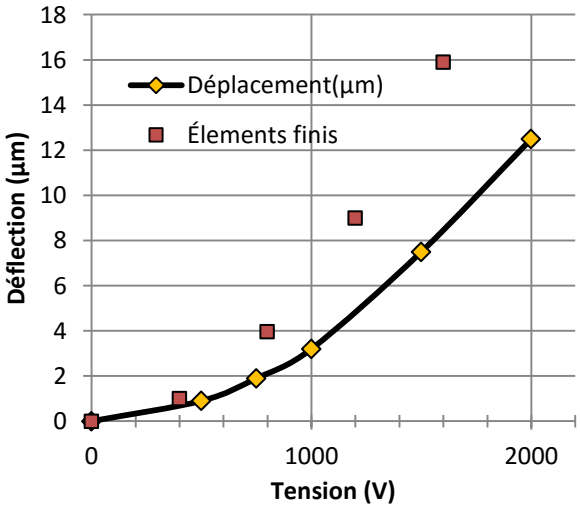


Figure 186 : Amplitude du déplacement en alimentant le patch central du film en fonction de la tension appliquée

On a pu remarquer que pour une tension crête à crête de 2 kV le courant a commencé à présenter des saturations et des variations incontrôlables (signe des décharges par des claquages) ce qui aurait pu être la raison pour laquelle la déflection calculée était plus élevée que celle mesurée en pratique. Un tel comportement est assez caractéristique aux films électroactifs utilisant des électrodes en or.

Comme prévu le courant était à peu près en phase avec la tension délivrée ayant une amplitude crête de 3.5 µA (pour une tension de 2 kV crête-crête, lorsque la partie centrale du film était alimentée) ce qui veut dire une puissance moyenne d'environ 1 mJ dépensé dans le polymère.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

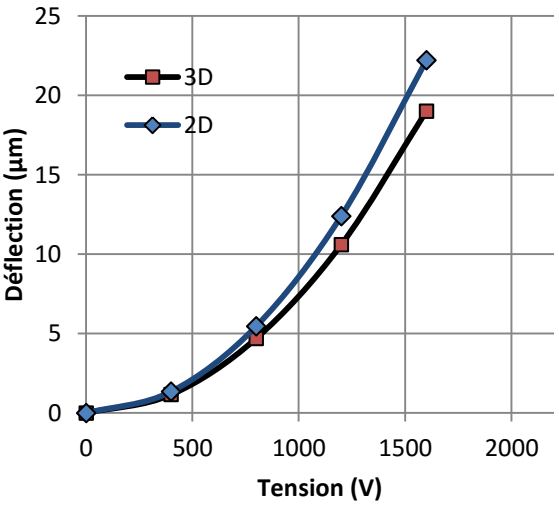


Figure 187 : Différence entre la déflection au centre obtenue par simulation avec un modèle 3D ou 2D (éléments finis, alimentation des zones latérales)

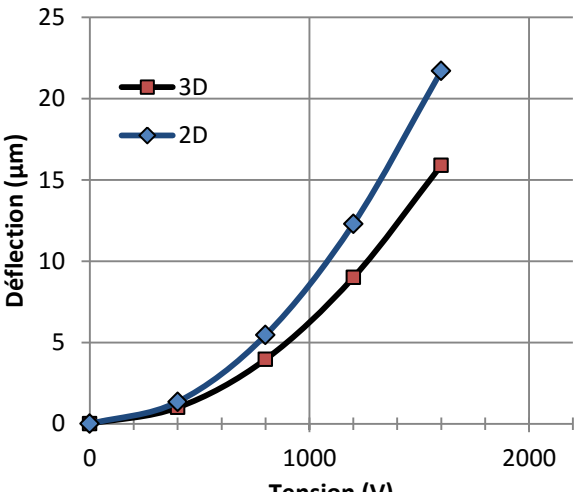


Figure 188 : Différence entre la déflection au centre obtenue par simulation avec un modèle 3D ou 2D (éléments finis, alimentation de la zone centrale)

Le film a été modélisé par des éléments finis (Ansys v.13, éléments de type solid227) mais comme on peut le voir une certaine différence entre les calculs et les résultats pratiques existe. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de ces écarts. C'est possible par exemple que le scotch avec sa structure particulière ne transmette pas très bien les forces axiales générées au substrat. D'autre part c'est possible aussi qu'en pratique le film n'est pas vraiment plan ce qui peut affecter aussi la déflection.

La même structure peut être modélisé en deux dimensions (hypothèse des déformations planes) pour voir si la courbure latérale affecte la déflection ou pas. Comme on peut le voir (Figure 193-Figure 196) la déformation latérale du film diminue en principe la déflection mais pas beaucoup.

Même si les éléments finis ne permettent pas de reproduire avec une bonne précision les résultats de mesure on peut quand même les utiliser pour visualiser la forme du film à l'état déformé dans un cas idéal. En effet, il est très complique de faire ceci en pratique en utilisant un interféromètre car plusieurs points sont nécessaires.

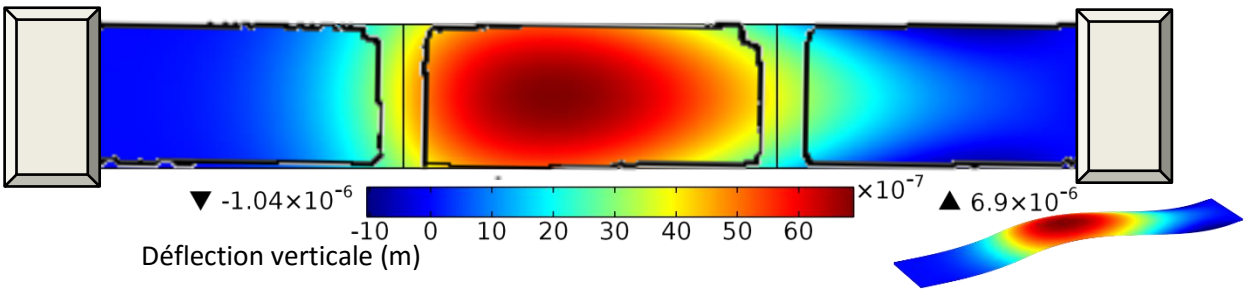


Figure 189 : Déflection verticale, alimentation de deux dernières zones (1.6 kV)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

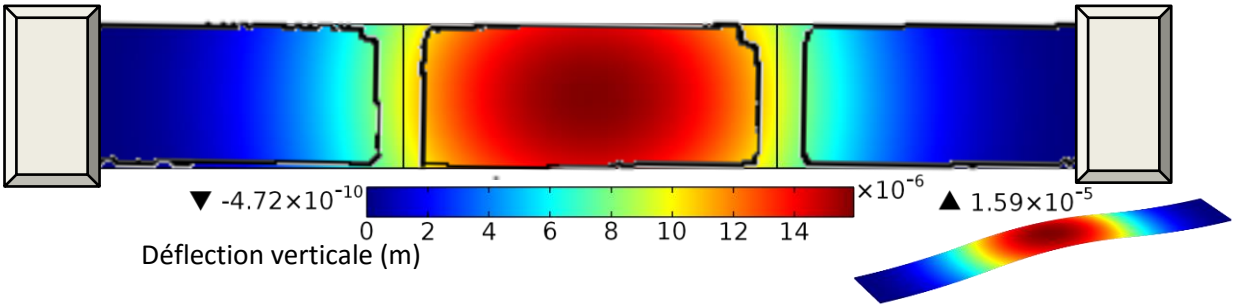


Figure 190 : Déflection verticale, alimentation de la zone centrale (1.6 kV)

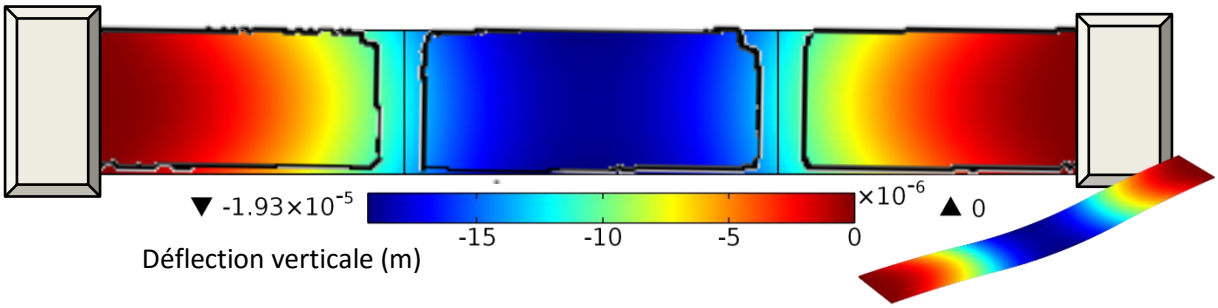


Figure 191 : Déflection verticale, alimentation des deux zones latérales (1.6 kV)

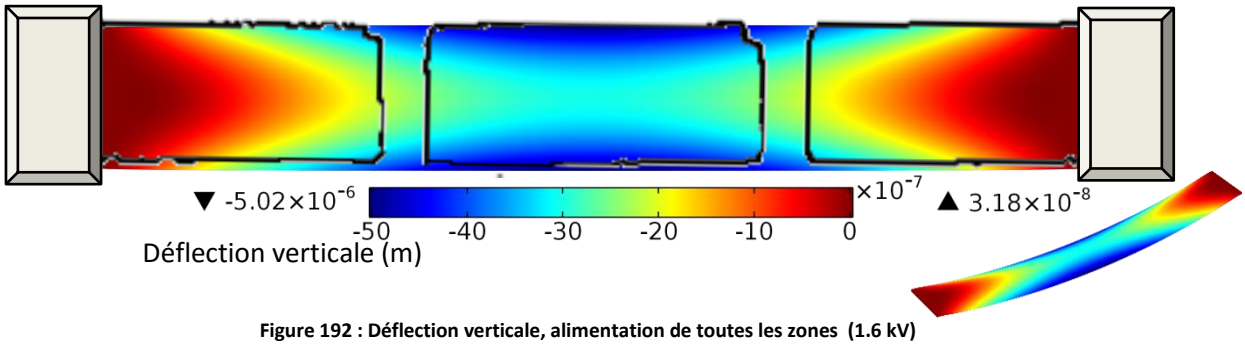


Figure 192 : Déflection verticale, alimentation de toutes les zones (1.6 kV)

En alimentant différentes régions du film différentes formes peuvent être obtenues à l'état déformé. On peut obtenir une déflection et positive et négative comme il a été montré dans la partie théorique. Pourtant cet exemple montre de plus que la déformation axiale pourrait jouer un rôle non-négligeable sur l'amplitude de la déflection. En effet, avec Ansys on peut visualiser les déformations dans une section (segment passant par le centre du film). On peut voir déjà que celle-ci varie de manière linéaire mais aussi que la déformation axiale moyenne n'est pas négligeable. En effet on trouve avec les éléments finis une déformation axiale moyenne lorsque l'électrode centrale est alimentée avec 1.6 kV de 6e-6 alors que la valeur maximale atteinte au niveau de la surface supérieure est de 15e-6.

Cette déformation peut être calculée en utilisant un modèle simple dans quel cas on obtient :

(135) $\tilde{\varepsilon} = N_0/I$, avec N_0 : force électrique axiale, I : rigidité en extension, $\tilde{\varepsilon}$: déformation axiale moyenne

Dans notre cas on obtient $I = 302\,\mathrm{kN/m}$ et pour 1.6 kV on a $N_0 = 1.9\,\mathrm{N/m}$ ce qui implique $\tilde{\varepsilon} = 6.3e-6$ ce qui très proche de la valeur obtenue avec des éléments finis. Il s'agit d'une

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

déformation très faible mais comme la courbure du film est limitée toutes les déformations restent faibles et au final il semblerait que celle-ci (la déformation axiale) influe sur la déflection.

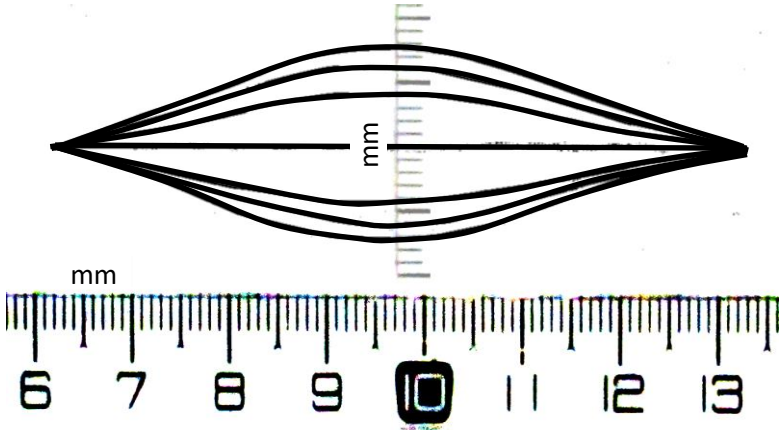


Figure 193 : Forme du film après changement de la distance entre les mors (traitement d'image)

Il est intéressant de voir aussi comment le film se comporte lorsqu'il est déjà dans un état courbé. Pour cela on pourrait modifier la distance entre les mors et ensuite l'alimenter avec une tension. Celle-ci a été diminuée respectivement de 1 mm, 2 mm et 3 mm, le film ainsi pré-déformé est représenté dans la Figure 193.

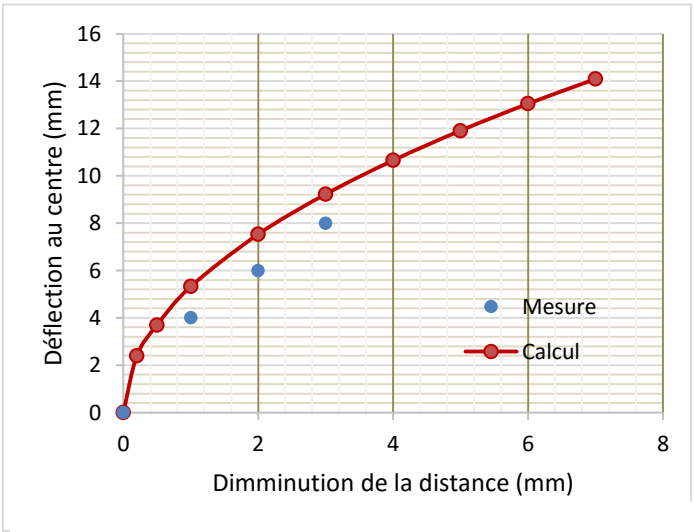


Figure 194 : Déflection du centre du film en fonction de la diminution de la distance entre les extrémités du film (L = 7 cm)

Théoriquement la déflection d'un film, lorsque ses bords sont bloqués et maintenus horizontaux, dont la distance entre les deux extrémités est modifiée, est caractérisée par l'équation suivante :

(136) $\frac{\partial^2\theta}{\partial l^2} + \frac{F}{I_{zz}} \cdot \sin(\theta) = 0$, avec l : abscisse curviligne du film, θ : angle de la section, F force axiale à l'extrémité du film, I_{zz} : rigidité en flexion du film

Lorsque la déflection reste faible on peut considérer : $\sin(\theta) \approx \theta$ ce qui implique :

(137) $\theta(l) = A\sin(Kl) + B\cos(Kl)$, dans un repère ayant son origine au centre du film

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

L'équation (137) admet plusieurs solutions possibles (pour les mêmes conditions aux limites), on parle alors de différents modes. Le premier mode est de la forme :

$$(138)\ \theta(\mathrm{l}) = \mathrm{A}\sin\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}\mathrm{l}\right), \text{ avec L la longueur du film}$$

Ce qui veut dire que la déflection verticale (w) peut être exprimé sous la forme :

$$(139)\ w(l) = \int_0^l \sin\left(\mathrm{A}\sin\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}l\right)\right)\mathrm{dl} \approx \int_0^l \mathrm{A}\sin\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}l\right)\mathrm{dl} = \frac{\mathrm{w}_0}{2}\cdot\left(1+\cos\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}\mathrm{l}\right)\right),\ \mathrm{w}_0 : \text{déflection au centre du film}$$

Pour trouver w_0 on peut utiliser le fait que la longueur du film ne change pas et que la distance entre les extrémités est connue (D). On a :

$$(140)\ D = \int_{-\mathrm{L}/2}^{\mathrm{L}/2}\cos\left(\mathrm{A}\sin\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}\mathrm{l}\right)\right)\mathrm{dl} \approx \int_{-\frac{\mathrm{L}}{2}}^{\frac{\mathrm{L}}{2}}\left(1-\left[\mathrm{A}\sin\left(\frac{2\pi}{\mathrm{L}}\mathrm{l}\right)\right]^2/2\right)\mathrm{dl} = \mathrm{L}-\mathrm{A}^2/4$$

Cela implique :

$$(141)\ \mathrm{w}_0 = \frac{2}{\pi}\sqrt{\mathrm{L}(\mathrm{L}-\mathrm{D})}$$

On voit au finale que dans un tel cas la déflection ne dépend pas des propriétés mécaniques du film. On peut par exemple vérifier que la formule (141) peut être utilisée pour caractériser la forme du film électroactif lorsque la distance entre ses extrémités est diminuée (Figure 194). Même si on peut observer un écart systématique le calcul permet de retrouver l'ordre de grandeur et l'allure de la variation de la déflection.

C'est intéressant de remarquer que la mesure montre que le changement de forme du film (Figure 193) varie beaucoup initialement mais moins ensuite en fonction du déplacement latéral. Ce résultat est conforme à la théorie. En effet la dérivée de $w_0(D)$ d'après (141) est de la forme :

$$(142)\ \frac{\mathrm{dw}_0}{\mathrm{dD}} = -\frac{1}{\pi}\frac{\sqrt{\mathrm{L}}}{\sqrt{\mathrm{L}-\mathrm{D}}} \text{ maximale lorsque } \mathrm{D} \approx \mathrm{L}$$

La variation de la déflection est donc maximale lorsque la distance qui sépare les extrémités du film reste proche de la longueur de celui-ci.

Tableau 30 : Déflection des différentes parties du film lorsque celui-ci est courbé de manière intentionnée en rapprochant les bords

Diminution de la distance entre les deux extrémités	**0 mm**	**1 mm**	**2 mm**	**3 mm**
Déflection crête-crête patch centre courbé +	20 µm	2.25 µm	1.65 µm	1.15 µm
Déflection crête-crête patch centre courbé -	20 µm	1 µm	1.05 µm	bruit
Déflection crête-crête patchs latéraux courbé +	12.5 µm	1.5 µm	1.75 µm	2.1 µm
Déflection crête-crête patchs latéraux courbé -	12.5 µm	7 µm	6.35 µm	6.75 µm

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour cette expérience, comme dans le cas précédent on applique une tension sinusoïdale avec offset (0 ↔2kV). Le film peut être initialement courbé dans les deux sens. On prend alors en tant que sens positif le sens de courbure qui se traduit par un déplacement positif dans le sens du substrat. L'amplitude de la déflection mesurée en fonction est donnée dans le Tableau 30.

Comme on peut le voir la courbure du film diminue l'amplitude du déplacement pour une même tension appliquée, de manière drastique. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que pour les mêmes forces électriques un film qui est courbé présente des déflections plus faibles dans n'importe quelle configuration.

Il est intéressant aussi de voir comment varie cette amplitude pour de faibles variations de distance entre les extrémités du film, de l'ordre de quelques dizaines de microns. On revient donc à la position initiale de départ dans laquelle le film est plan. En réalimentant les patchs latéraux avec une tension variant de 0 à 2 kV on obtient une amplitude de déplacement de 15 µm crête à crête (plus que le résultat obtenu initialement 12.5 µm). A partir de cette position on rapproche les deux extrémités de 100 µm. Lorsque la courbure du film ainsi produite est orientée dans le sens du substrat alors on mesure un déplacement de 2.8 µm et on obtient un déplacement de 11 µm pour une courbure inverse. Lorsqu'on éloigne les extrémités de 100 µm de la position initiale on obtient un déplacement de 1.05 µm sans qu'aucune courbure ne soit remarquée. On repositionne le film à l'état initial : on obtient cette fois 18.75 µm, après une autre tentative : 31 µm. Il semble donc que l'amplitude du déplacement du film dépend beaucoup de son positionnement initial. Même avec 30 µm de décalage entre extrémités, l'amplitude du déplacement peut passer de 30 µm à quelques micromètres et en utilisant les patchs latéraux et celui de milieu. C'est intéressant de remarquer que les premières mesures ont données des déplacements différents quand les patchs latéraux ou ceux du milieu étaient alimentés mais en jouant un peu sur la distance entre les extrémités du film on arrive presque à la même amplitude : ≈ 30 µm ce qui devrait être le cas en théorie pour des faibles déplacements et si on néglige les portions non électrodes du polymère. Ceci pourrait être une bonne méthode de positionner le film correctement.

On peut voir donc que l'amplitude du déplacement du film est assez sensible par rapport au positionnement initial du film mais néanmoins on a pu vérifier que le film peut prendre différentes formes en fonction de son alimentation.

L'utilisation du silicone en tant que polymère diélectrique et des électrodes en polymère permettent de fabriquer des films électroactifs ayant de grandes surfaces (Figure 195). En effet les films de silicone mis à notre disposition avaient les dimensions d'une feuille A4 mais l'application des électrodes en silicone conducteur peut être facilement réalisée mêmes dans un tel cas. Les fours qui peuvent être utilisés, nécessaires pour la polymérisation des électrodes, sont assez spacieux et on pourrait fabriquer des films électroactifs beaucoup plus larges.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

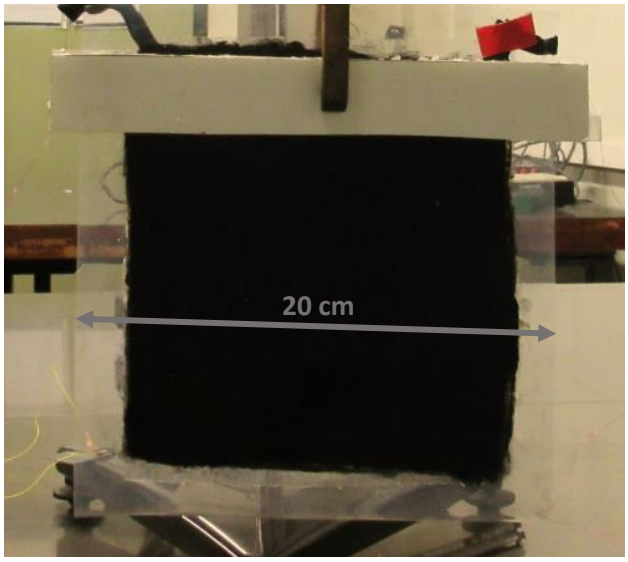


Figure 195 : Film électroactif en silicone avec des électrodes en silicone conducteur

On peut donc vérifier le concept de film électroactif avec plusieurs zones actives en utilisant un film de dimensions importantes. Pour cela un film de silicone de 400 µm d'épaisseur a été utilisé. Les dimensions et la position de différentes électrodes sont représentées dans la Figure 196. Les électrodes ont été appliquées à la main à l'aide d'un masque (la distance entre deux électrodes voisines a été fixée à 3 mm, le polymère conducteur a été aussi dilué avec du Xylènes avant d'être appliqué).

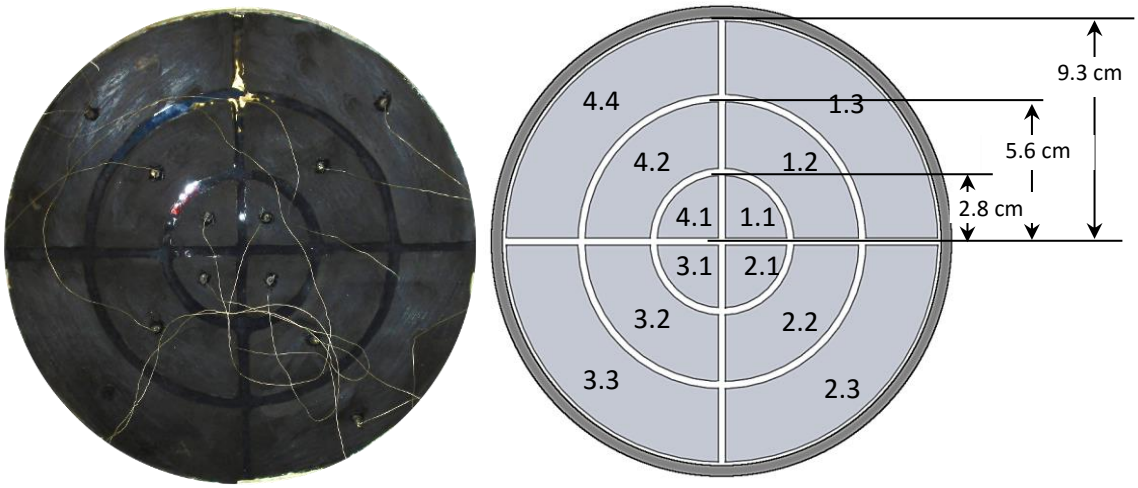


Figure 196 : Film électroactif unimorphe circulaire avec les bords bloqués (plastique + silicone) avec électrodes segmentés en silicone conducteur (électrodes espacées de 3 mm)

Pour cela tout d'abord le polymère conducteur a été appliqué sur le film de silicone (manuellement) par l'intermédiaire d'un masque et ensuite celui-ci a été mis au four pour la solidification pendant quelques minutes (≈ 5 min). Il a été ensuite collé en utilisant du scotch double face (50 µm) à un film en PET (≈ 100 µm, 4GPa). Pour les connexions électriques des fils très minces (100 µm de diamètre)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

ont été utilisés, collés directement à la surface des électrodes aussi avec du silicone conducteur. La mesure de la capacité électrique de chaque zone active a montré une symétrie satisfaisante de la structure (Tableau 31).

Pourtant on a remarqué le fait que le collage entre le film en silicone et le substrat était assez imparfait présentant des zones délaminées probablement à cause de la présence d'air et le fait que le silicone en général n'adhère pas particulièrement bien aux différents colles. Cela a entrainé aussi des déformations parasites de la surface du film. Néanmoins le dispositif permet de valider le concept de contrôle de forme d'un film. En effet il a été observé que différents électrodes peuvent être alimentées pour obtenir différentes distributions de la déflection.

Il a été par exemple vérifié qu'en alimentant les électrodes situées au milieu on peut obtenir un déplacement au centre dans la direction de la couche de polymère et inversement lorsqu'on alimente les électrodes situées aux extrémités le déplacement se produit dans le sens inverse. Par exemple pour une tension de 5 kV, l'alimentation des zones centrales (1.1, 1.2, 1.3, 1.4) la déflection était d'environ 25 µm. Pour des tensions plus élevées des phénomènes de décharges entre deux électrodes voisines (alimentée –non-alimentée) ont été remarquées. En effet, même si une électrode n'est pas alimentée son potentiel est de toute manière en moyenne nul dû à la capacité formé avec l'électrode placé sur l'autre face du film. Pour une tension trop élevée une décharge dans l'aire peut se produire. Cela montre que pour un film électroactif à électrodes segmentée la limitation de la tension maximale qui peut être appliquée peut dépendre aussi de la distance qui les sépare.

Patch	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3
Capacité	29pF	102pF	192pF	30pF	103pF	207pF	30pF	107pF	204pF	33pF	103pF	200pF

Tableau 31 : Capacité électrique des différentes électrodes du film électroactif circulaire segmenté

En même temps il semble que dû au fait que le film présente un rayon important il se met très facilement à résonner et peut être affecté plus facilement par des facteurs externes ce qui se traduit par un bruit d'autant plus important que la rapidité de la variation du champ électrique imposé est grande aussi. Une modélisation par éléments finis a donné une déflection au centre du film proche de celle mesurée. On peut donc utiliser le modèle pour représenter la distribution de la déflection en fonction des électrodes alimentées (Figure 197-Figure 202).

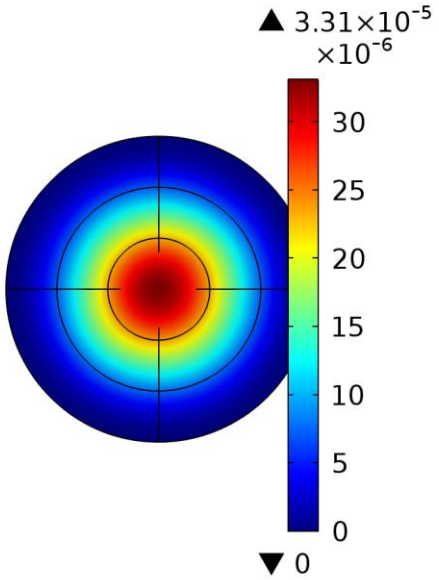


Figure 197 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.1, 2.1, 3.1, 4.1) sont alimentées avec 5 kV

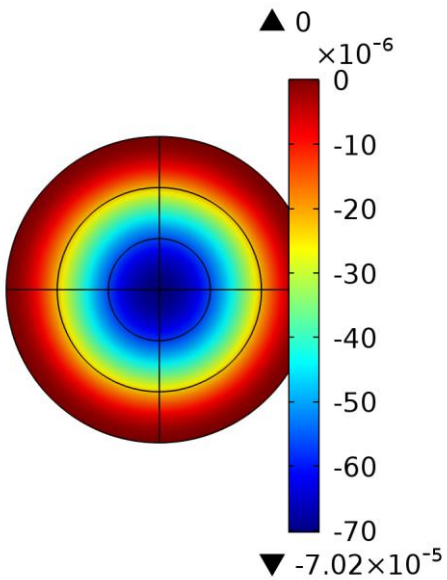


Figure 198 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.3, 2.3, 3.3, 4.3) sont alimentées avec 5 kV

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

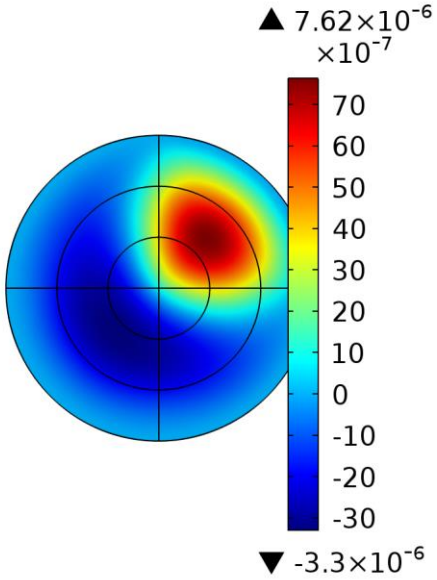


Figure 201 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.1, 1.2, 1.3) sont alimentées avec 5 kV

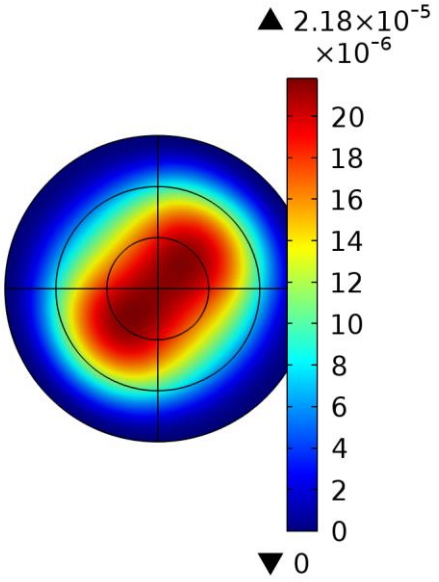


Figure 202 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.2, 3.2) sont alimentées avec 5 kV

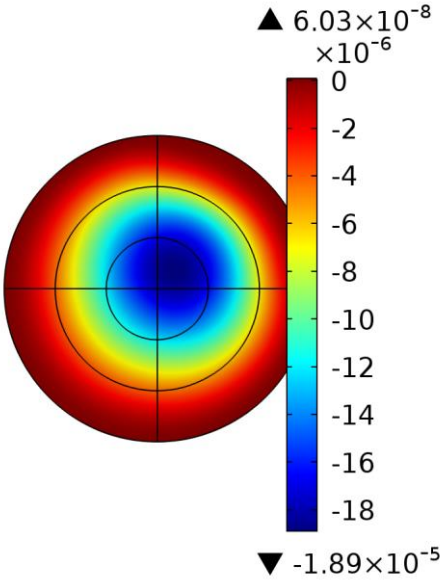


Figure 200 : Déflection (m) du film lorsque la zone (1.3) est alimentée avec 5 kV

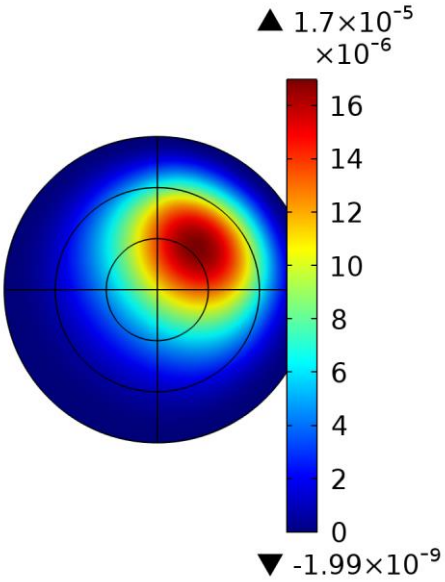


Figure 199 : Déflection (m) du film lorsque la zone (1.2) est alimentée avec 5 kV

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Comme on peut le voir le film peut présenter une distribution de la déflection assez complexe qui dépend de la façon dont les zones actives sont alimentées. Ainsi l'alimentation des patchs périphériques amène à un déplacement moyen opposé à celui imposé par l'alimentation des patchs situés au centre (Figure 197-Figure 198). Le comportement de la structure reste approximativement linéaire ce qui veut dire que l'alimentation de plusieurs électrodes en même temps peut amener à une superposition constructive des déflections imposées par chaque zone individuelle (Figure 198 et Figure 201) ou inversement (Figure 199).

6.3 Films électroactifs couplés

6.3.1 Mode flexion

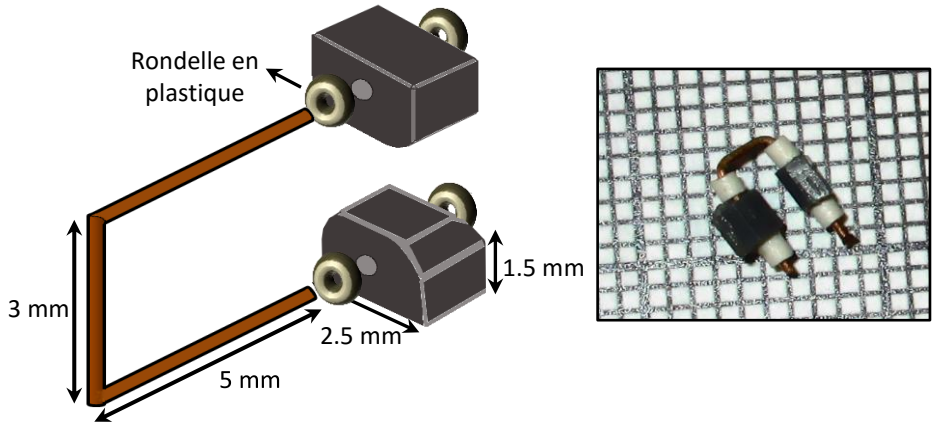


Figure 203 : Pivot fabriqué pour coupler des films électroactifs (à droite photo du pivot réalisé)

Dans le chapitre précédent on a montré qu'un film boqué-libre électroactif unimorphe ne pouvait pas être actionné que dans un seul sens. Pour résoudre ce problème on pourrait utiliser des films avec les bords bloqués et des électrodes sectorisées. Mais comme on vient de le voir les déplacements qu'on obtient avec ce type de structure restent faibles, de l'ordre de quelques dizaines de microns. Pour pouvoir garder des déplacements importants une solution possible pourrait être d'utiliser des structures bimorphes, (en mode bloqué-libre) mais dans certains cas on n'a pas la possibilité d'utiliser les deux faces du substrat (antenne, miroir etc.). En principe utiliser deux couches actives placées du même côté du substrat c'est possible mais dans un tel cas la déflection est d'une part très asymétrique et beaucoup plus faible que celle d'un film unimorphe simple.

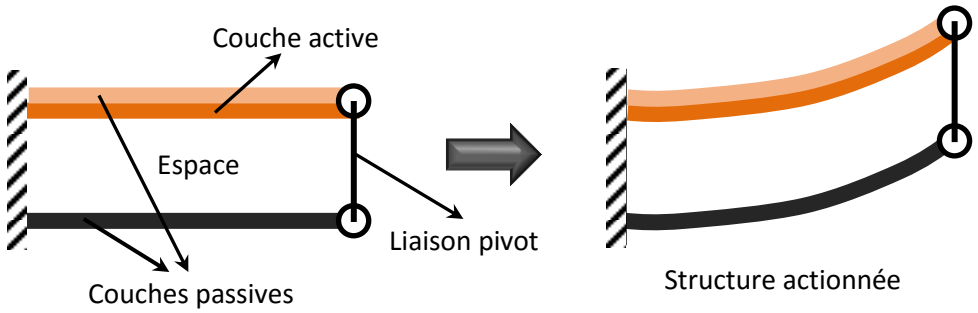


Figure 204 : Couplage entre deux films en utilisant une seule liaison pivot placée à l'extrémité des deux films

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Une autre solution possible c'est de coupler plusieurs films électroactifs entre eux. Le principe est illustré dans la Figure 204. C'est simple de se rendre compte que la meilleure façon de le faire c'est d'utiliser des liaisons de type pivot car ceux-ci ne limitent pas les déformations axiales et cela permet à chaque film de garder une ''ligne neutre'' en flexion. Plusieurs liaisons peuvent être utilisées (Figure 205) ce qui doit améliorer le couplage.

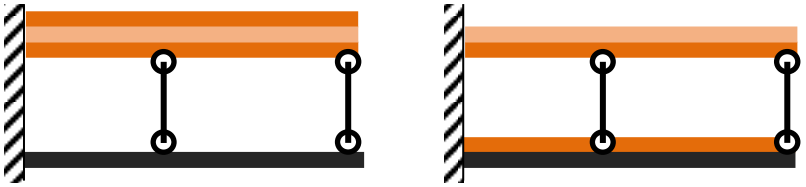


Figure 205 : Films couplées utilisant deux couches actives (gauche : film bimorphe, droite : deux unimorphes)

Dans le cas idéal la déflection de n'importe quel point est la même pour les deux films si le nombre de pivots est important.

Bien évidement si on veut un déplacement dans les deux sens il faut utiliser deux couches électroactives. Pour cela on pourrait coupler un film bimorphe avec un autre film simple ou coupler deux films unimorphes entre eux (Figure 205).

Pour tester la possibilité d'utiliser des films couplés en flexion, des pivots de faibles dimensions sont nécessaires. Comme on n'a pas trouvé de tels mécanismes déjà fait, commercialisés, ceux-ci ont dû être fabriqués par nous-même. La géométrie des pivots obtenus est illustré dans la Figure 203.



Figure 206 : Poutre piézoélectrique utilisée pour la validation du concept des films couplés

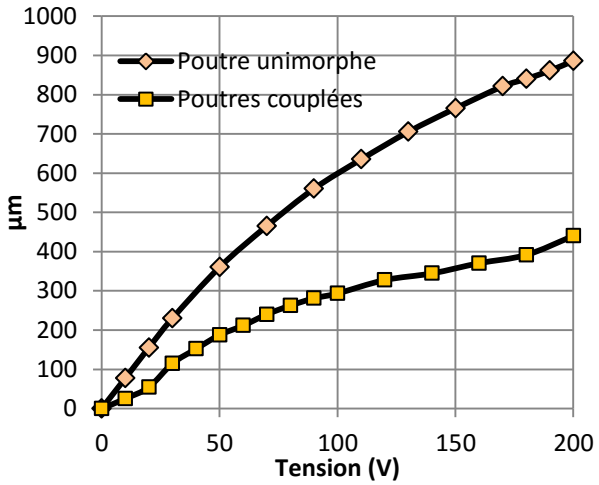


Figure 207 : Déflection de l'extrémité en fonction de la tension appliquée pour une poutre piézoélectrique seule et avec un film métallique supplémentaire couplé

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Le principe de fonctionnement a pu être vérifié en utilisant une poutre piézoélectrique unimorphe (substrat acier de 50 µm + couche piézoélectrique de 50 µm) ayant les dimensions données dans la Figure 206. Celle-ci a été couplée à un film en acier de 50 µm d'épaisseur, ayant la même longueur et largeur que l'unimorphe.

Tout d'abord la déflection de l'extrémité de l'unimorphe seul, a été mesurée en fonction de la tension appliquée (Figure 207). Si la même poutre piézoélectrique est couplée au film en acier par l'intermédiaire de deux pivots (un placé au milieu et un autre en bout des films) la déflection diminue d'environ 2 fois. On a donc la possibilité de coupler les deux films mais bien évidement le déplacement de la structure finale ne peut qu'être plus faible que celle du film actionné seul.

Bien évidement normalement on a intérêt en pratique à remplacer ce système de couplage avec des liaisons qui est assez compliqué à réaliser par une couche continue ayant des propriétés mécaniques similaires.

6.3.2 Mode membrane

L'idée de fonctionnement de ces structures est la suivante. Un film électroactif est préétiré soit par des forces statiques permanentes soit il est maintenu déformé en le bloquant sur ses bords. Ensuite on peut appliquer un champ électrique sur certaines zones ce qui se traduit par des déformations du film dans son plan. Ce qui peut être fait de plus c'est de fixer des films sur la surface de la membrane au niveau de leurs extrémités. La déformation de la membrane entraine une déformation du film attaché en flexion et donc son changement de forme. Bien évidemment on a intérêt à ce que le film fixé soit actionné en flexion pour augmenter le déplacement.

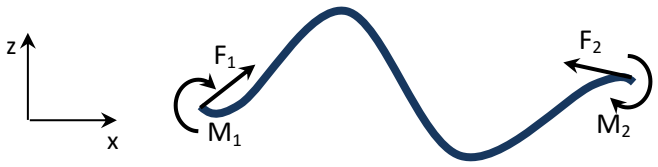


Figure 208 : Film mince avec des forces et moments appliquées au niveau de ses extrémités

Il existe plusieurs possibilités. Le film pourrait être initialement déjà courbé sans qu'aucune force ne soit appliquée ou courbé pendant la fixation et donc maintenu sous une tension mécanique permanente. Il existe aussi plusieurs moyens de réaliser la fixation. Les bords pourraient être bloqués ou attaché par des liaisons spéciales comme des pivots etc.

Pour évaluer les performances d'un tel système il est nécessaire de voir comment un film se déforme lorsque des forces sont appliquées sur ses bords. On pourrait déjà prendre comme exemple un film qui est initialement plan et dont la position de ses extrémités est imposée. Le problème c'est de trouver la forme finale du film. Dans un premier temps la déformation tangentielle au film peut être négligée, la variation de forme étant due en première approximation au gradient de déformation dans l'épaisseur. Pour un film initialement courbé (angle initial θ_0) on peut supposer alors que :

$$(143)\ M = I_{zz}\frac{\partial(\theta-\theta_0)}{\partial l}$$

Avec M le moment mécanique total qui agit sur la surface d'une section dans le film, θ : l'angle entre la tangente au film pour un point particulier et une axe arbitraire, I_{zz} : rigidité en flexion du film, *l* : abscisse curviligne.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

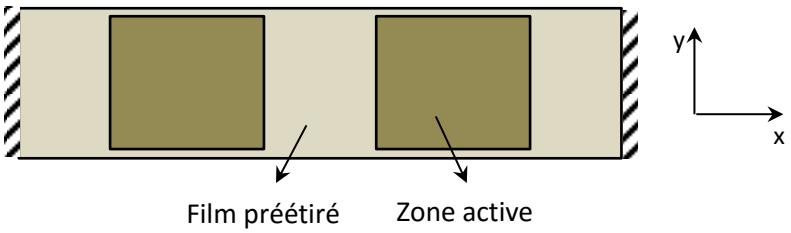


Figure 209 : Polymère tendu avec plusieurs zones actives

L'équilibre statique impose déjà pour le film représenté dans la Figure 208 que pour n'importe quelle section la force totale projetée sur les axes x et z est de la forme :

$$(144)\ \mathrm{F}_1 = \mathrm{Cte} \text{ et } \mathrm{F}_3 = 0$$

Une autre équation peut être obtenue en faisant un bilan des moments mécaniques qui amène à :

$$(145)\ \frac{\partial \mathrm{M}}{\partial \mathrm{l}} + \mathrm{F}_1 \sin(\theta) = 0 \implies \frac{\partial^2 \theta}{\partial \mathrm{l}^2} + \frac{\mathrm{F}_1}{\mathrm{I}_{zz}} \sin(\theta) = \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial \mathrm{l}^2}$$

Comme on peut se convaincre il s'agit de la même équation que celle caractéristique d'un film avec les bords bloqués dont on change la position des extrémités. Il s'agit d'une équation non-linéaire qui n'admet pas de solution explicite simple. Mais lorsque l'angle reste relativement faible (< 30°) le sinus peut être approximé par son argument ce qui implique pour un film normalement plan ($\theta_0 = 0$) :

$$(146)\ \theta(l) = \mathrm{A} \cdot \cos(\mathrm{K}l + \varphi)$$

De la même manière on peut établir les équations caractéristiques du comportement du film diélectrique tendu. Alors que le film courbé fonctionne en flexion celui-ci travaille exclusivement en extension.

Si le polymère est très élastique il pourrait être tendu initialement tel que la déformation axiale imposée soit de plusieurs centaines de pourcents. Mais on va considérer quand même que les contraintes de Maxwell générées lorsque le film est alimenté avec une tension ne produisent pas de grosses variations de la déformation (< 10%). Imaginons qu'on travaille avec un film de forme rectangulaire et que celui-ci présente initialement un rapport largeur/longueur assez élevé pour considérer qu'on se place dans une configuration à déformation uniaxiale pure ($\varepsilon_{y0} = 0$).

La condition d'équilibre implique que la force axiale totale dans le film ne doit pas varier dans la longueur sauf aux endroits où les films courbés sont fixés. On note σ_0 la contrainte axiale moyenne en absence de contraintes électriques. Lors de l'application d'un champ électrique dans les zones électrodées des contraintes de Maxwell sont générées. D'après la loi de Hooke autour du point de fonctionnement :

$$(147)\ \varepsilon_x = \frac{1}{\mathrm{Y}} \cdot \left(\sigma_x + \frac{\varepsilon}{2}\mathrm{E}^2\right)$$

Si le film reste tendu après l'application du champ électrique alors on a de plus :

$$(148)\ \int_x \varepsilon_x = 0$$

En couplant les équations caractéristiques du film utilisé en flexion et l'autre en mode membrane le changement de forme peut être déterminé.

L'avantage de telles structures par rapport à des films multicouches c'est un couple mécanique plus important imposé au niveau du film utilisé en flexion et de plus on évite aussi l'utilisation de la colle qui transmet que partiellement les contraintes générées dans la couche active.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

6.3.3 Validation expérimentale

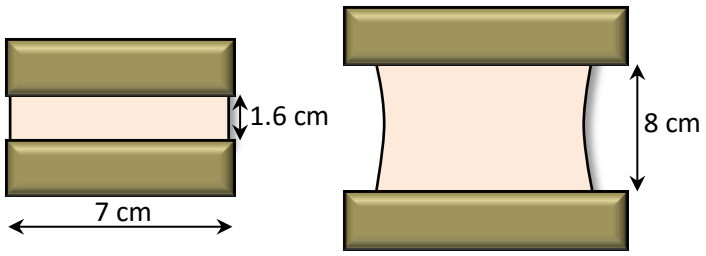


Figure 210 : Pré-déformation du film en Acrylique

Tout d'abord le principe d'un actionneur avec pré-déformation imposée a été vérifié. Pour fabriquer la membrane, du polymère acrylate a été utilisé obtenu du scotch VHB 4910 (3M, 2.5 cm de largeur et 1mm d'épaisseur). Le film d'une longueur totale de 7 cm a été placé entre deux mors fixes tel que sa largeur libre était de 1.6 cm et a été ensuite étiré jusqu'à ce qu'elle atteint 8 cm (ce qui correspond approximativement à une extension de 5). La déformation du film n'était pas uniforme ce qui s'est traduit par une largeur variable à travers la direction de pré-étirement. Ainsi la largeur au milieu du film n'était que de 5.3 cm contre celle de 7 cm sur les bords. Sur une des faces une électrode en graisse conductrice a été appliquée, de dimensions approximatives 6.5 cm x 3 cm. Sur l'autre on a appliqué 2 électrodes en graisse conductrice de dimensions totales égales à l'autre électrode mais séparées au milieu par une distance de 5 mm. Les mesures de capacité des deux patchs ainsi formés a montré qu'une certaine dysmétrie était présente (capacité à 100 Hz de 179 pF contre 156 pF). Ensuite deux films métalliques, en acier, d'épaisseur 50 µm de forme carré de 4 cm de longueur totale, ayant une courbure naturelle (7 cm) ont été placés au-dessus de deux patchs, et fixés aussi avec de l'acrylique au niveau de leur bords (Figure 211). L'alimentation d'un de deux électrodes amène alors à l'extension de sa zone active et à la contraction de la zone passive et se traduit aussi par une déflection des couches fixées en flexion dans des sens opposés (Figure 212).

La variation de l'amplitude des déplacements obtenus (centre de chaque film métallique) en fonction de la tension appliquée est donnée dans la Figure 213.

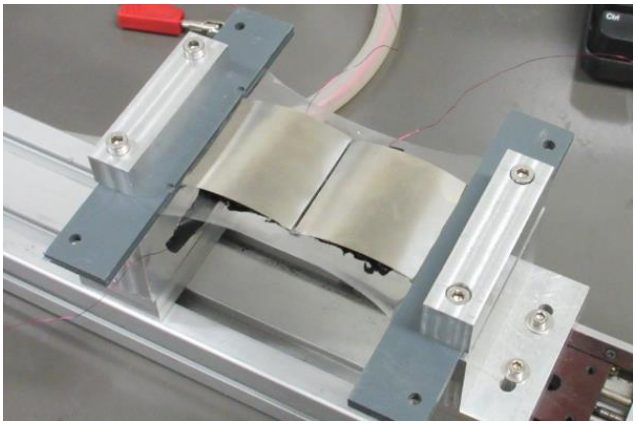


Figure 212 : Actionneur membrane avec des films couplés en flexion

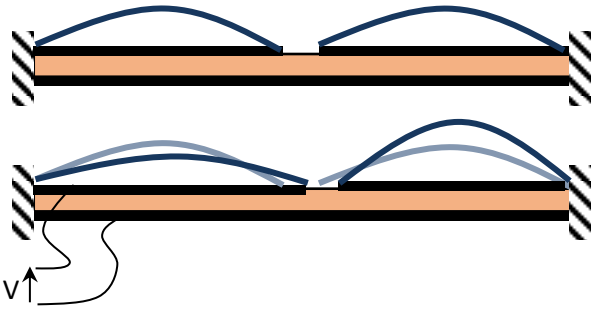


Figure 211 : Mode de fonctionnement de l'actionneur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

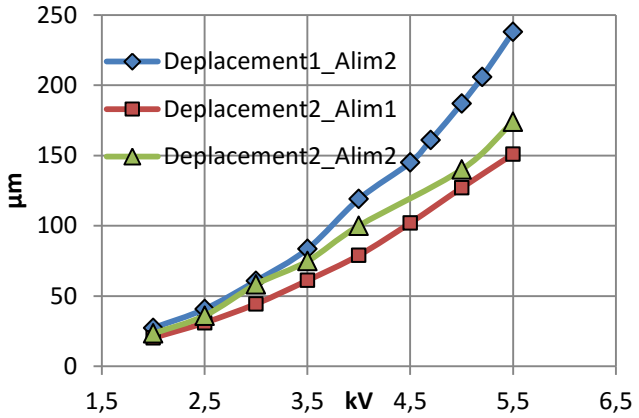


Figure 214 : Amplitude du déplacement en fonction de l'amplitude de la tension

Dans la configuration précédente le film a été préétiré dans une seule direction après ses bords ont été bloqués. Une autre possibilité c'est d'utilisé une force constante. Par exemple le film peut être maintenu tendu à l'aide d'un poids, dans un tel cas il n'y a plus besoin des zones passives pour que l'actionnement soit possible.

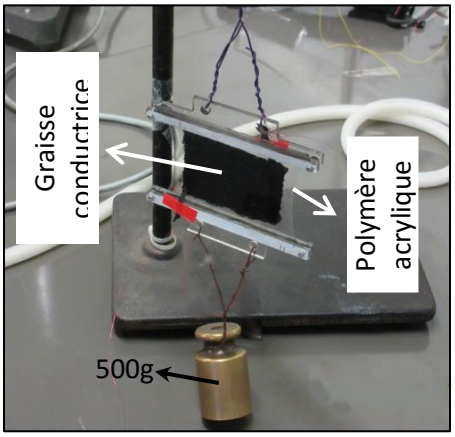


Figure 215: Mode membrane uniaxiale utilisant une force fixe

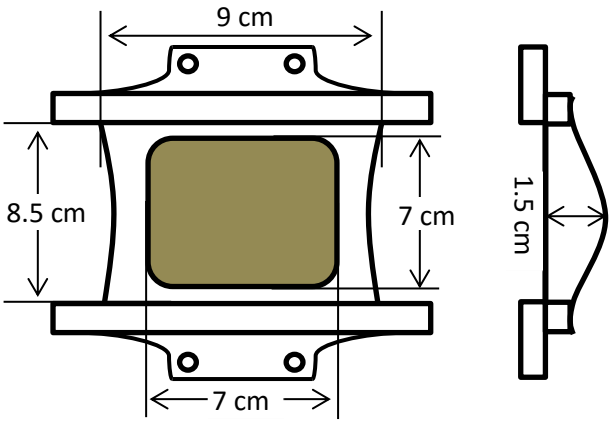


Figure 213: Dimensions de l'actionneur

Dans l'actionneur représenté dans la Figure 214 un film acrylique (1 mm d'épaisseur) fixé entre deux mors tel que la zone libre présentait une largeur de 1.5 cm. Après la fixation d'un poids de 500g le film est laissé se déformer librement. A l'équilibre la longueur était de 8.5 cm (Figure 215) ce qui correspond à une extension d'environs 5.7. Lorsque le film est alimenté avec quelques kilovolts la masse se déplace de quelques millimètres. On peut fixer ensuite un autre film sur les mors (le film qu'on veut actionner 100µm, 2.8 GPa, Figure 215). Pour une tension sinusoïdale décalée de 0 à environ 5kV on obtient un déplacement de son centre de quelques millimètres

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

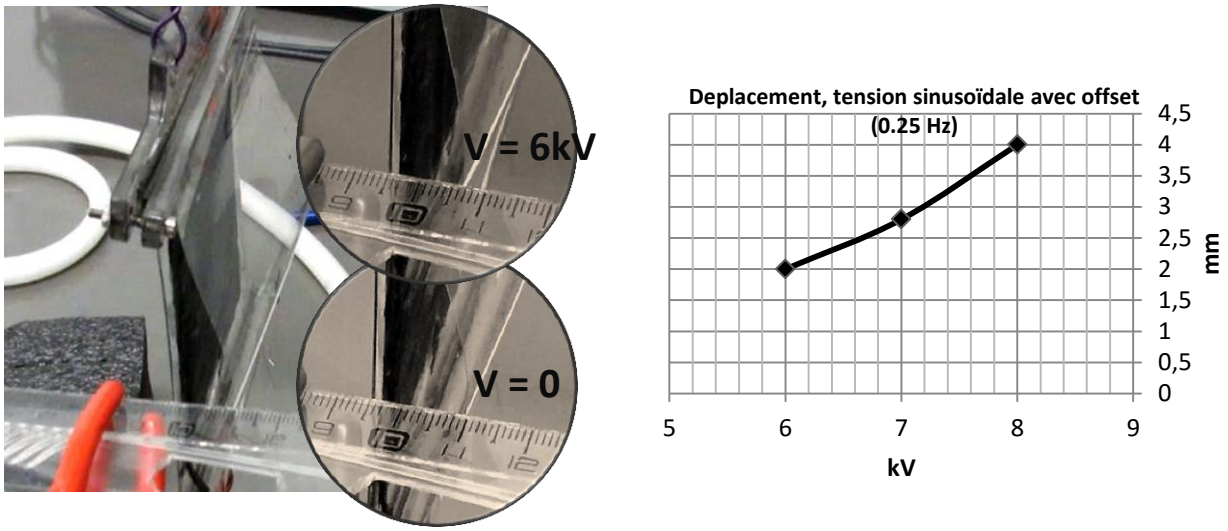


Figure 216: Membrane avec film externe ; Déplacement du centre du film courbé en fonction de la tension appliquée

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre on montre de manière pratique la possibilité d'utiliser des polymères diélectriques pour le contrôle de forme des structures minces. Tout d'abord on a testé plusieurs méthodes pour caractériser le comportement mécanique des films électroactifs. On a pu voir que ces méthodes permettent de retrouver de manière approximative les caractéristiques mécaniques des matériaux mais si une précision meilleure est nécessaire alors d'autres méthodes devraient être employées.

Différents polymères diélectriques ont été testés et leur fonctionnement a été vérifié par l'intermédiaire des modèles analytiques. Comme prévu les polymères qui présentent une permittivité électriques plus élevée génèrent des forces plus élevées aussi et donc des déflections plus importantes pour un même champ électrique appliqué peuvent être obtenues. Les polymères qui présentent des faibles courants de fuites peuvent aussi maintenir une forme déformée pendant des minutes même si ils ne sont plus alimentés et sont laissés en circuit ouvert.

Des films électroactifs utilisant des électrodes segmentées ont confirmé la possibilité de pouvoir déformer un même film de plusieurs manières en alimentant seulement certaines zones. De tels films présentant des surfaces plus importantes ont pu être fabriqués et le principe de fonctionnement a été de nouveau vérifié.

Dans ce chapitre ont a aussi fabriqué des actionneurs utilisant des films électroactifs couplés, fonctionnant soit en mode membrane soit en flexion, qui permettent d'obtenir des déplacements plus importants dans plusieurs directions et assurer une transmission des forces générées d'une manière plus efficace.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Conclusion générale et perspectives

Le travail de cette thèse a été orienté principalement vers la récupération d'énergie mécanique et l'actionnement appliqué au contrôle de forme des structures minces en utilisant des polymères diélectriques.

Les polymères diélectriques ont démontré des densités énergétiques importantes et des paramètres mécaniques convenables pour être facilement intégrés par exemple dans des chaussures ou dans des pavages et être utilisés pour la récupération de l'énergie mécanique.

Il a été aussi montré que l'idée des systèmes hybrides de récupération d'énergie à base de polymères diélectriques et matériaux piézoélectriques est viable. L'intérêt de tels systèmes peut être multiple. D'une part les matériaux piézoélectriques peuvent remplacer la source d'énergie qui est nécessaire au fonctionnement d'un générateur utilisant que du polymère et le rendre ainsi complètement autonome. Autre intérêt c'est la possibilité de récupérer de l'énergie sur plusieurs sources mécaniques ou environnements différents, les éléments piézoélectriques étant plutôt adaptés pour des forces élevées mais faibles déformations alors que les polymères sont facile à intégrer sur de grandes surfaces et sont plus flexibles. Dans tous les cas, le fonctionnement du système dépend beaucoup de la manière dont le transfert d'énergie est réalisé. Généralement si c'est la quantité d'énergie extraite qui est optimisée, on a intérêt que les éléments piézoélectriques soient utilisés seulement pour la compensation des pertes par des courants de fuites dans les polymères. En ce qui concerne les cycles électromécaniques réalisés par le polymère, il est plus utile de réutiliser l'énergie extraite en sortie. Autre problème vient du fait que normalement pour une utilisation efficace des polymères, des tensions élevées de l'ordre de 1kV sont nécessaires vue les limitations actuelles des épaisseurs des films. Or cela peut poser beaucoup de problèmes au niveau des composants électriques utilisés pour réaliser le transfert d'énergie. En effet, la plupart de composants commercialisés soit présentent des courants de fuite trop importants, soit une tension maximale trop faible, soit ils sont surdimensionnés en termes de taille. Cela a rendu par exemple très difficile la partie expérimentale ou des prototypes de faible puissance ont été utilisés. Comme on vient de le dire un paramètre important pour les systèmes hybrides c'est le faible courant de fuite dans les polymères. Ainsi il a été montré que certains polymères sont plus adaptés que d'autres. Les élastomères souples (comme le silicone, le latex et l'acrylique) présentent les meilleures caractéristiques de ce point de vue. Par exemple, il a été estimé qu'avec un petit élément piézoélectrique on pourrait alimenter un polymère 20 fois son volume (silicone, en prenant en compte les pertes dans les composants) avec un champ de presque 20 V/µm après un régime transitoire d'une centaine de cycles. En ce qui concerne l'injection de l'énergie mécanique l'utilisation des stacks en polymère, actionnés en compression semble être la manière la plus optimale, surtout en termes de dimensions. Cela reste valable pour les éléments piézoélectriques. On a vu qu'il était intéressant d'utiliser des éléments massifs qui généraient des tensions élevées en sortie. Or ceux-ci nécessitent des forces relativement élevées et le plus simple c'est aussi de les utiliser en compression.

Comme perspectives futures on pourrait suggérer la finalisation du prototype hybride utilisé en compression et l'amélioration des circuits de transfert énergétique (utilisation des convertisseurs dc-dc par exemple).

La deuxième partie de cette thèse a porté sur le contrôle de forme des structures minces en utilisant des polymères diélectriques. Pour comprendre comment les polymères diélectriques pourraient être utilisés dans des applications de contrôle de forme il est important de savoir comment les structures minces se comporte en général. Pour cela différentes modèles ont été utilisés, ce qui a permis de comprendre le mécanisme selon lequel les contraintes électriques générées dans les couches actives amènent à un changement de forme. Les différentes structures réalisées en pratiques ont permis de

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

démontrer la validité des modèles proposés. Il a été aussi montré qu'en alimentant de manière sélective les électrodes d'un film sectorisé, des déflections complexes, bidirectionnelles pouvaient être obtenus.

Le principe a été validé pour des structures de petite et grande taille, linéaires et circulaires. Encore une fois, différents polymères ont été testés ce qui a permis de mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacun. Par exemple le silicone, l'acrylique et le latex génèrent des contraintes plus faibles que le terpolymère et même le PU mais en revanche ils consomment moins d'énergie.

A part utiliser des structures unimorphes d'autres manières de coupler le film à déformer et le polymère ont été envisagées. Par exemple, pour des structures de type bloquées-libres une façon de réaliser un tel couplage, qui permet de garder à la fois des déflection importantes et aussi maintenir la surface du film à déformer complétement libre, c'est d'utiliser des liaisons mécaniques (par exemple des pivots). Pourtant, leur fixation s'avère compliqué et imprécise ce qui voudrait dire qu'il serait plus pratique de réaliser une couche continue présentant des propriétés mécaniques similaires (faible rigidité en extension, rigidité importante suivant l'épaisseur). Pour des structures avec les bords bloqués une autre manière de réaliser le couplage c'est d'utiliser le polymère électroactif en mode membrane (avec pré-déformations) et le film à déformer en flexion, fixé seulement au niveau de ses extrémités. Cela permet de s'affranchir d'une part de l'influence de la colle sur la transmission des contraintes et d'une autre part d'appliquer les forces électriques d'une manière plus efficace.

Comme perspectives futures on pourrait envisager de réaliser une loi de commande pour le contrôle en temps réel de la forme d'un film sectorisé. Mais d'autres études supplémentaires s'imposent pour comprendre l'influence de différents paramètres sur le fonctionnement global de telles structures.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Références :

[1] **Advances in Robot Kinematics: Theory and Applications. Springer Science & Business Media; 2002.**

[2] **Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges. SPIE Press; 2001.**

[3] **Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD). SPIE; 2000.**

[4] **Piezo Systems: History of Piezoelectricity n.d. http://www.piezo.com/tech4history.html (accessed January 22, 2015).**

[5] **Cady GW. Method of maintaining electric currents of constant frequency. US1472583 A, 1923.**

[6] **Mason WP. Piezoelectricity, its history and applications. J Acoust Soc Am 1981;70:1561. doi:10.1121/1.387221.**

[7] **Cady WG. The Piezo-Electric Resonator. Proc IRE 1922;10:83–114. doi:10.1109/JRPROC.1922.219800.**

[8] **Chubb L. Piezo-electric loud speaker. US1526319 A, 1925.**

[9] **Chambers L, Gaines N. Some effects of intense audible sound on living organisms and cells. J Cell Comp … 1932.**

[10] **Pierce G. Piezoelectric Crystal Oscillators Applied to the Precision Measurement of the Velocity of Sound in Air and CO_2 at High Frequencies. Proc Am Acad Arts … 1925.**

[11] **Shimamura K, Takeda H, Kohno T, Fukuda T. Growth and characterization of lanthanum gallium silicate La3Ga5SiO14 single crystals for piezoelectric applications. J Cryst Growth 1996;163:388–92. doi:10.1016/0022-0248(95)01002-5.**

[12] **Xu Y. Ferroelectric Materials and Their Applications. Elsevier; 2013.**

[13] **Shiosaki T, Kawabata A. Piezoelectric thin films for saw applications. Ferroelectrics 2011;42:219–32. doi:10.1080/00150198208008115.**

[14] **Haertling GH. Ferroelectric Ceramics: History and Technology. J Am Ceram Soc 1999;82:797–818. doi:10.1111/j.1151-2916.1999.tb01840.x.**

[15] **Leontsev S, Eitel R. Progress in engineering high strain lead-free piezoelectric ceramics. Sci Technol Adv 2010.**

[16] **Seifert K. Lead-Free Piezoelectric Ceramics 2010.**

[17] **Zhu Z. Lead-free piezoelectric ceramics 2012.**

[18] **Nogami K, Fujii M, Ohashi H, Miyachi T, Sasaki S, Hasegawa S, et al. Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission. Planet Space Sci 2010;58:108–15. doi:10.1016/j.pss.2008.08.016.**

[19] **Maurer J, Savvas E. The Esteem System: a totally implantable hearing device. Adv Otorhinolaryngol 2010;69:59–71. doi:10.1159/000318523.**

[20] **Liang R, Wang Q. Pulse pressure sensor based on flexible PZT thick-film composite device. Ultrason Symp (IUS), 2014 IEEE … 2014.**

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

[21] Diamanti K, Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures. Prog Aerosp Sci 2010;46:342–52. doi:10.1016/j.paerosci.2010.05.001.

[22] Tang H-Y, Winkelmann C, Lestari W, La Saponara V. Composite Structural Health Monitoring Through Use of Embedded PZT Sensors. J Intell Mater Syst Struct 2011;22:739–55. doi:10.1177/1045389X11406303.

[23] Lei Q, Shenfang Y, Qiang W, Yajie S, Weiwei Y. Design and Experiment of PZT Network-based Structural Health Monitoring Scanning System. Chinese J Aeronaut 2009;22:505–12. doi:10.1016/S1000-9361(08)60133-8.

[24] Baptista FG, Filho JV. A New Impedance Measurement System for PZT-Based Structural Health Monitoring. IEEE Trans Instrum Meas 2009;58:3602–8. doi:10.1109/TIM.2009.2018693.

[25] Lallart M, Richard C, Garbuio L. High efficiency, wide load bandwidth piezoelectric energy scavenging by a hybrid nonlinear approach. Sensors Actuators A … 2011.

[26] Shen H, Qiu J, Balsi M. Vibration damping as a result of piezoelectric energy harvesting. Sensors Actuators A Phys 2011.

[27] Rakbamrung P, Lallart M, Guyomar D. Performance comparison of PZT and PMN–PT piezoceramics for vibration energy harvesting using standard or nonlinear approach. Sensors Actuators A … 2010.

[28] Nakamura K, Wada Y. Piezoelectricity, pyroelectricity, and the electrostriction constant of poly (vinylidene fluoride). J Polym Sci Part A-2 … 1971.

[29] Yasuda I. On the piezoelectric activity of bone. J Jpn Orthop Surg Soc 1954.

[30] Martin A. Tribo-electricity in wool and hair. Proc Phys Soc 1941.

[31] Fukada E. Piezoelectricity as a fundamental property of wood. Wood Sci Technol 1968.

[32] Kang SJ, Bae I, Shin YJ, Park YJ, Huh J, Park S-M, et al. Nonvolatile polymer memory with nanoconfinement of ferroelectric crystals. Nano Lett 2011;11:138–44. doi:10.1021/nl103094e.

[33] Li M, Stingelin N, Michels JJ, Spijkman M-J, Asadi K, Feldman K, et al. Ferroelectric Phase Diagram of PVDF:PMMA. Macromolecules 2012;45:7477–85. doi:10.1021/ma301460h.

[34] Sümer B, Aksak B, Şsahin K, Chuengsatiansup K, Sitti M. Piezoelectric Polymer Fiber Arrays for Tactile Sensing Applications. Sens Lett 2011;9:457–63. doi:10.1166/sl.2011.1498.

[35] Chang J, Dommer M, Chang C, Lin L. Piezoelectric nanofibers for energy scavenging applications. Nano Energy 2012;1:356–71. doi:10.1016/j.nanoen.2012.02.003.

[36] Nilsson E, Lund A, Jonasson C, Johansson C, Hagström B. Poling and characterization of piezoelectric polymer fibers for use in textile sensors. Sensors Actuators A Phys 2013;201:477–86. doi:10.1016/j.sna.2013.08.011.

[37] Lee M, Chen C-Y, Wang S, Cha SN, Park YJ, Park YJ, et al. A hybrid piezoelectric structure for wearable nanogenerators. Adv Mater 2012;24:1759–64. doi:10.1002/adma.201200150.

[38] Rocha JG, Cardoso V, Correia V, Mendez SL, Minas G. Piezoelectric micropump for lab-on-a-chip applications. 2009 Int. Conf. Microelectron. - ICM, IEEE; 2009, p. 410–3. doi:10.1109/ICM.2009.5418596.

[39] Wiederkehr RS, Salvadori MC, Degasperi FT, Cattani M. Development of microvalves for gas

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

flow control in micronozzles using PVDF piezoelectric polymer. J Phys Conf Ser 2008;100:052046. doi:10.1088/1742-6596/100/5/052046.

[40] Wiederkehr RS, Salvadori MC, Brugger J, Degasperi FT, Cattani M. The gas flow rate increase obtained by an oscillating piezoelectric actuator on a micronozzle. Sensors Actuators A Phys 2008;144:154–60. doi:10.1016/j.sna.2007.12.024.

[41] Fang Y, Tan X. A novel diaphragm micropump actuated by conjugated polymer petals: Fabrication, modeling, and experimental results. Sensors Actuators A Phys 2010;158:121–31. doi:10.1016/j.sna.2009.12.012.

[42] Wang H-H, Wu T-J, Hsu C-C, Lee C-K, Hsu Y-H. A light-activated optopiezoelectric thin-film actuator for microfluidic applications. In: Gray BL, Becker H, editors. SPIE BiOS, International Society for Optics and Photonics; 2015, p. 93200D. doi:10.1117/12.2079873.

[43] Harrison J, Ounaies Z. Piezoelectric polymers 2002.

[44] Ohigashi H. Piezoelectric Polymers–Materials and Manufacture. Jpn J Appl Phys 1985;24:23. doi:10.7567/JJAPS.24S2.23.

[45] Encyclopedia of Polymer Science and Technology. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2002.

[46] Park C, Ounaies Z, Wise K, Harrison J. In situ poling and imidization of amorphous piezoelectric polyimides. Polymer (Guildf) 2004.

[47] Young J, Harrison J. Design Requirements for Amorphous Piezoelectric Polymers 1999.

[48] Wang TT, Takase Y. Ferroelectriclike dielectric behavior in the piezoelectric amorphous copolymer of vinylidenecyanide and vinyl acetate. J Appl Phys 1987;62:3466. doi:10.1063/1.339290.

[49] Maranganti R, Sharma P. Revisiting quantum notions of stress. Proc R Soc A Math Phys Eng Sci 2010;466:2097–116. doi:10.1098/rspa.2009.0636.

[50] Gonzalo B, Vilas JL, San Sebastián M, Breczewski T, Pérez-Jubindo MÁ, de la Fuente MR, et al. Electric modulus and polarization studies on piezoelectric polyimides. J Appl Polym Sci 2012;125:67–76. doi:10.1002/app.34702.

[51] Ramadan KS, Sameoto D, Evoy S. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. Smart Mater Struct 2014;23:033001. doi:10.1088/0964-1726/23/3/033001.

[52] Dunn ML, Taya M. Micromechanics predictions of the effective electroelastic moduli of piezoelectric composites. Int J Solids Struct 1993;30:161–75. doi:10.1016/0020-7683(93)90058-F.

[53] Galassi C. Processing of porous ceramics: Piezoelectric materials. J Eur Ceram Soc 2006.

[54] Erturk A, Inman D. Piezoelectric energy harvesting. 2011.

[55] Wang Q-M, Zhang Q, Xu B, Liu R, Cross LE. Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuators under strong electric fields. J Appl Phys 1999;86:3352. doi:10.1063/1.371213.

[56] Griffiths D, College R. Introduction to electrodynamics. 1999.

[57] Keplinger C, Kaltenbrunner M, Arnold N, Bauer S. Rontgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability. Proc Natl Acad Sci U S A

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

2010;107:4505–10. doi:10.1073/pnas.0913461107.

[58] Boltzmann L. A contribution to the theory of so-called electrical expansion or electrostriction. Philos Mag Ser 5 1881;11:75–6. doi:10.1080/14786448108626974.

[59] Bruhat G, Pauthenier M. Sur la théorie de l'électrostriction dans les liquides isolants. J Phys le Radium 1925;6:1–9. doi:10.1051/jphysrad:01925006010100.

[60] More LT. I. On electrostriction. Philos Mag Ser 6 1903;6:1–19. doi:10.1080/14786440309462982.

[61] Lewis TJ, Llewellyn JP, van der Sluijs MJ. Electrically induced mechanical strain in insulating dielectrics. Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. -, IEEE; n.d., p. 328–33. doi:10.1109/CEIDP.1994.591765.

[62] Lippmann G. Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques. J Phys Theor Appl 1881.

[63] Shkel YM, Klingenberg DJ. Electrostriction of polarizable materials: Comparison of models with experimental data. J Appl Phys 1998;83:7834. doi:10.1063/1.367958.

[64] Mason WP. Electrostrictive Effect in Barium Titanate Ceramics. Phys Rev 1948;74:1134–47. doi:10.1103/PhysRev.74.1134.

[65] Xu Y. Ferroelectric materials and their applications 2013.

[66] Baumgartner R. Dielectric elastomers: from the beginning of modern science to applications in actuators and energy harvesters. SPIE Smart … 2011.

[67] O'Halloran A, O'Malley F, McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. J Appl Phys 2008.

[68] Carpi F, Rossi D De, Kornbluh R, Pelrine RE, Sommer-Larsen P. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology. Elsevier; 2011.

[69] Vertechy R. Open-access dielectric elastomer property database. SPIE Smart … 2014.

[70] Carpi F, De Rossi D. Dielectric elastomer cylindrical actuators: electromechanical modelling and experimental evaluation. Mater Sci Eng C 2004;24:555–62. doi:10.1016/j.msec.2004.02.005.

[71] Carpi F, Salaris C, Rossi D De. Folded dielectric elastomer actuators. Smart Mater Struct 2007;16:S300–5. doi:10.1088/0964-1726/16/2/S15.

[72] Gatti D, Haus H, Matysek M, Frohnapfel B, Tropea C, Schlaak HF. The dielectric breakdown limit of silicone dielectric elastomer actuators. Appl Phys Lett 2014;104:052905. doi:10.1063/1.4863816.

[73] Wissler M, Mazza E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators. Smart Mater Struct 2005;14:1396–402. doi:10.1088/0964-1726/14/6/032.

[74] Huang J, Shian S, Diebold R. The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer. Appl Phys … 2012.

[75] Kornbluh R, Pelrine R, Joseph J, Pei Q, Chiba S. Ultra-High Strain Response of Elastomeric Polymer Dielectrics. MRS Proc 2011;600:119. doi:10.1557/PROC-600-119.

[76] Zhao X, Suo Z. Theory of Dielectric Elastomers Capable of Giant Deformation of Actuation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Phys Rev Lett 2010;104:178302. doi:10.1103/PhysRevLett.104.178302.

[77] Pelrine R, Kornbluh R, Kofod G. High-Strain Actuator Materials Based on Dielectric Elastomers. Adv Mater 2000;12:1223–5. doi:10.1002/1521-4095(200008)12:16<1223::AID-ADMA1223>3.0.CO;2-2.

[78] Kaltseis R, Keplinger C, Koh S. Natural rubber for sustainable high-power electrical energy generation. RSC Adv 2014.

[79] Koh SJA, Keplinger C, Li T, Bauer S, Suo Z. Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted? IEEE/ASME Trans Mechatronics 2011;16:33–41. doi:10.1109/TMECH.2010.2089635.

[80] Suo Z. Theory of dielectric elastomers. Acta Mech Solida Sin 2010;23:549–78. doi:10.1016/S0894-9166(11)60004-9.

[81] Tiwari R, Kim K, Kim S. Ionic polymer-metal composite as energy harvesters. Smart Struct Syst 2008.

[82] Biddiss E, Chau T. Electroactive polymeric sensors in hand prostheses: Bending response of an ionic polymer metal composite. Med Eng Phys 2006.

[83] Shahinpoor M. Ionic polymer-metal composites (IPMCs) as biomimetic sensors, actuators and artificial muscles-a review. Smart Mater … 1998.

[84] Shahinpoor M, Kim K. Ionic polymer–metal composites: IV. Industrial and medical applications. Smart Mater Struct 2005.

[85] Kleinschmidt P, Schmidt F. How many sensors does a car need? Sensors Actuators A Phys 1992;31:35–45. doi:10.1016/0924-4247(92)80077-G.

[86] Marr B. Big Data: Using SMART Big Data Analytics and Metrics To Make Better Decisions and Improve Performance 2015.

[87] Kishi M, Nemoto H, Hamao T, Yamamoto M, Sudou S, Mandai M, et al. Micro thermoelectric modules and their application to wristwatches as an energy source. Eighteenth Int. Conf. Thermoelectr. Proceedings, ICT'99 (Cat. No.99TH8407), IEEE; 1999, p. 301–7. doi:10.1109/ICT.1999.843389.

[88] Randall J. On the use of photovoltaic ambient energy sources for powering indoor electronic devices 2003.

[89] Kim S, Cho N, Song S-J, Yoo H-J. A 0.9 V 96 W Fully Operational Digital Hearing Aid Chip. IEEE J Solid-State Circuits 2007;42:2432–40. doi:10.1109/JSSC.2007.907198.

[90] Fiorini P, Doms I, Van Hoof C, Vullers R. Micropower energy scavenging. ESSCIRC 2008 - 34th Eur. Solid-State Circuits Conf., IEEE; 2008, p. 4–9. doi:10.1109/ESSCIRC.2008.4681783.

[91] Jansen A, Stevels A. Human power, a sustainable option for electronics. Electron Environ IEEE … 1999.

[92] Carroll A, Heiser G. An Analysis of Power Consumption in a Smartphone. USENIX Annu Tech Conf 2010.

[93] Chen X, Chen Y, Ma Z, Fernandes FCA. How is energy consumed in smartphone display applications? Proc. 14th Work. Mob. Comput. Syst. Appl. - HotMobile '13, New York, New York, USA: ACM Press; 2013, p. 1. doi:10.1145/2444776.2444781.

[94] Vullers RJM, van Schaijk R, Doms I, Van Hoof C, Mertens R. Micropower energy harvesting.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Solid State Electron 2009;53:684–93. doi:10.1016/j.sse.2008.12.011.

[95] Rodriguez A. Electric lamp for velocipedes. US568209 A, 1896.

[96] Morgan J. Electric flash-light. US1186422 A, 1916.

[97] Chapin DM, Fuller CS, Pearson GL. A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power. J Appl Phys 1954;25:676. doi:10.1063/1.1721711.

[98] Green M, Emery K. Solar cell efficiency tables (Version 45). Prog … 2015.

[99] Fujita H. A decade of MEMS and its future. Proc. IEEE Tenth Annu. Int. Work. Micro Electro Mech. Syst. An Investig. Micro Struct. Sensors, Actuators, Mach. Robot., IEEE; n.d., p. 1–7. doi:10.1109/MEMSYS.1997.581729.

[100] Arechederra RL, Minteer SD. Self-powered sensors. Anal Bioanal Chem 2011;400:1605–11. doi:10.1007/s00216-011-4782-0.

[101] Park JC, Bang DH, Park JY. Micro-Fabricated Electromagnetic Power Generator<newline/> to Scavenge Low Ambient Vibration. IEEE Trans Magn 2010;46:1937–42. doi:10.1109/TMAG.2010.2044757.

[102] Li Q, Naing V, Hoffer JA, Weber DJ, Kuo AD, Donelan JM. Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method. 2008 IEEE Int. Conf. Robot. Autom., IEEE; 2008, p. 3672–7. doi:10.1109/ROBOT.2008.4543774.

[103] Li Q, Naing V, Donelan JM. Development of a biomechanical energy harvester. J Neuroeng Rehabil 2009;6:22. doi:10.1186/1743-0003-6-22.

[104] Krupenkin T, Taylor JA. Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting. Nat Commun 2011;2:448. doi:10.1038/ncomms1454.

[105] Laurence Kemball-Cook PT. Energy harvesting. US8736088 B2, 2011.

[106] High-voltage generation. US2676273 A, 1954.

[107] Derwin J. Barium titanate crystals as a portable source of electric power. US2856564 A, 1958.

[108] Fleck R. Vibrational wave generator. US2806533 A, 1957.

[109] Scheinine L. Hand cranked electrical power source. US4227092 A, 1980.

[110] Schiavone EL. Electric power supply. US3350583 A, 1967.

[111] Craig M. Three phase piezoelectric generator. US3168660 A, 1965.

[112] Wang S, Lam KH, Sun CL, Kwok KW, Chan HLW, Guo M Sen, et al. Energy harvesting with piezoelectric drum transducer. Appl Phys Lett 2007;90:113506. doi:10.1063/1.2713357.

[113] Zhou D, Kamlah M, Munz D. Effects of uniaxial prestress on the ferroelectric hysteretic response of soft PZT. J Eur Ceram Soc 2005;25:425–32. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2004.01.016.

[114] Jain J. Design Considerations of Piezo-Electronic Spark Generators for gas Lighter Applications. IETE J Res 1980.

[115] Ciccone T. Piezo-electric detonation initiator system. US3320890 A, 1967.

[116] Buffington A, Crawford FS, Muller R. . . ., Schwemin AJ, Smits RG. <title>Active Image Restoration With A Flexible Mirror</title>. In: Wyant JC, editor. 1976 SPIE/SPSE Tech. Symp.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

East, International Society for Optics and Photonics; 1976, p. 90–6. doi:10.1117/12.954742.

[117] Newton I. Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light 1979.

[118] Feinleib J. Monolithic piezoelectric mirror for wavefront correction. Appl Phys Lett 1974;25:311. doi:10.1063/1.1655486.

[119] Ealey MA. <title>Active and adaptive optical components: the technology and future trends</title>. In: Ealey MA, editor. San Diego - DL Tentat., International Society for Optics and Photonics; 1992, p. 2–34. doi:10.1117/12.51166.

[120] Aldrich RE. Requirements for piezoelectric materials for deformable mirrors. Ferroelectrics 2011;27:19–25. doi:10.1080/00150198008226057.

[121] Aldrich RE. Requirements for piezoelectric materials for deformable mirrors. Ferroelectrics 2011;27:19–25. doi:10.1080/00150198008226057.

[122] Everson JH. <title>Discrete Actuator Deformable Mirror</title>. Opt Eng 1981;20:202316. doi:10.1117/12.7972710.

[123] Steinhaus E, Lipson SG. Bimorph piezoelectric flexible mirror. J Opt Soc Am 1979;69:478. doi:10.1364/JOSA.69.000478.

[124] Carpi F, Frediani G. Bioinspired Tunable Lens with Muscle-Like Electroactive Elastomers. Adv Funct … 2011.

[125] SUNDARARAJAN N, JOSHI SM, ARMSTRONG ES. Robust controller synthesis for a large flexible space antenna. J Guid Control Dyn 1987;10:201–8. doi:10.2514/3.20203.

[126] McInnes CR. Solar Sailing: Technology, Dynamics and Mission Applications. vol. 27. Springer Science & Business Media; 2013.

[127] Macdonald M. Solar Sailing: applications and technology advancement 2011.

[128] Wong Y, Pellegrino S, Park K. Prediction of wrinkle amplitudes in square solar sails. Proc 44th AIAA/ASME/ … 2003.

[129] Yonetoku D, Murakami T, Gunji S, Mihara T, Sakashita T, Morihara Y, et al. Gamma-Ray Burst Polarimeter (GAP) aboard the Small Solar Power Sail Demonstrator IKAROS. Publ Astron Soc Japan 2011;63:625–38. doi:10.1093/pasj/63.3.625.

[130] Rogers CA, Stutzman WL, Campbell TG, Hedgepeth JM. Technology Assessment and Development of Large Deployable Antennas. J Aerosp Eng 1993;6:34–54. doi:10.1061/(ASCE)0893-1321(1993)6:1(34).

[131] Martin J, Redmond J. Distributed sensing and shape control of piezoelectric bimorph mirrors. J Intell … 2000.

[132] Freeland RE, Bilyeu GD, Veal GR. Validation of a unique concept for a low-cost, lightweight space-deployable antenna structure. Acta Astronaut 1995;35:565–72. doi:10.1016/0094-5765(95)00018-U.

[133] Sommariva A. Solving the two capacitor paradox through a new asymptotic approach. IEE Proceedings-Circuits, Devices Syst 2003.

[134] Evzelman M, Ben-Yaakov S. Optimal switch resistances in Switched Capacitor Converters. 2010 IEEE 26-th Conv. Electr. Electron. Eng. Isr., IEEE; 2010, p. 000436–9. doi:10.1109/EEEI.2010.5662184.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

[135] Boykin T, Hite D, Singh N. The two-capacitor problem with radiation. Am J Phys 2002.

[136] Singal A. The Paradox of Two Charged Capacitors. arXiv Prepr arXiv13095034 2013.

[137] Choy T. Capacitors can radiate: Further results for the two-capacitor problem. Am J Phys 2004.

[138] Karbowiak AE, Freeman RH. Resolution of the Paradox Concerning Energy Flow on Nonlinear Transmission Lines (Short Papers). IEEE Trans Microw Theory Tech 1973;21:357–8. doi:10.1109/TMTT.1973.1127997.

[139] Burger B, Kranzer D. Extreme high efficiency PV-power converters n.d.:1–13.

[140] Wai R-J, Lin C-Y, Duan R-Y, Chang Y-R. High-Efficiency DC-DC Converter With High Voltage Gain and Reduced Switch Stress. IEEE Trans Ind Electron 2007;54:354–64. doi:10.1109/TIE.2006.888794.

[141] Marchesoni M, Vacca C. New DC–DC Converter for Energy Storage System Interfacing in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. IEEE Trans Power Electron 2007;22:301–8. doi:10.1109/TPEL.2006.886650.

[142] Zhao Q, Lee F. High-efficiency, high step-up DC-DC converters. Power Electron IEEE Trans 2003.

[143] Sagan H. Introduction to the Calculus of Variations. Courier Corporation; 1969.

[144] Gelfand IM, Fomin S V. Calculus of Variations. Courier Corporation; 2012.

[145] Ottman GK, Hofmann HF, Lesieutre GA. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. IEEE Trans Power Electron 2003;18:696–703. doi:10.1109/TPEL.2003.809379.

[146] Lefeuvre E. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. J Intell Mater Syst Struct 2005;16:865–76. doi:10.1177/1045389X05056859.

[147] Shen D. Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Low Frequency Vibration Applications. ProQuest; 2009.

[148] Pelrine R, Kornbluh RD, Eckerle J, Jeuck P, Oh S, Pei Q, et al. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications. In: Bar-Cohen Y, editor. SPIE's 8th Annu. Int. Symp. Smart Struct. Mater., International Society for Optics and Photonics; 2001, p. 148–56. doi:10.1117/12.432640.

[149] Vu-Cong T, Nguyen-Thi N, Jean-Mistral C, Sylvestre A. How does static stretching decrease the dielectric constant of VHB 4910 elastomer? In: Bar-Cohen Y, editor. SPIE Smart Struct. Mater. + Nondestruct. Eval. Heal. Monit., International Society for Optics and Photonics; 2014, p. 90561P. doi:10.1117/12.2045042.

[150] Sukwisute P, Koyvanitch K. Electrostrictive Energy Conversion of Polyurethane with Different Hard Segment Aggregations. Adv Mater … 2013.

[151] Sheng J, Chen H, Li B, Chang L. Temperature dependence of the dielectric constant of acrylic dielectric elastomer. Appl Phys A 2012;110:511–5. doi:10.1007/s00339-012-7254-2.

[152] Zhao X, Suo Z. Electrostriction in elastic dielectrics undergoing large deformation. J Appl Phys 2008.

[153] Jean-Mistral C, Basrour S, Chaillout J-J. Modelling of dielectric polymers for energy

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

scavenging applications. Smart Mater Struct 2010;19:105006. doi:10.1088/0964-1726/19/10/105006.

[154] Hoffstadt T, Graf C, Maas J. Optimization of the energy harvesting control for dielectric elastomer generators. Smart Mater Struct 2013;22:094028. doi:10.1088/0964-1726/22/9/094028.

[155] Koh S, Zhao X, Suo Z. Maximal energy that can be converted by a dielectric elastomer generator. Appl Phys Lett 2009.

[156] van Kessel R, Czech B, Bauer P, Ferreira JA. Optimizing the dielectric elastomer energy harvesting cycles. IECON 2010 - 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., IEEE; 2010, p. 1281–6. doi:10.1109/IECON.2010.5675554.

[157] Velayutham T. Electrical behavior of polyurethane derived from polyols synthesized with glycerol, phthalic anhydride, and oleic acid. J Appl … 2011.

[158] Galineau J, Capsal J, Cottinet P, Lallart M. Scale-like compliant gold electrode: Towards high strain capacitive devices for energy harvesting. Sensors Actuators A … 2014.

[159] Rosset S, Shea HR. Flexible and stretchable electrodes for dielectric elastomer actuators. Appl Phys A 2012;110:281–307. doi:10.1007/s00339-012-7402-8.

[160] Corbelli G, Ghisleri C, Marelli M, Milani P, Ravagnan L. Highly deformable nanostructured elastomeric electrodes with improving conductivity upon cyclical stretching. Adv Mater 2011;23:4504–8. doi:10.1002/adma.201102463.

[161] Sadiku M. Elements of electromagnetics (the oxford series in electrical and computer engineering). 2014.

[162] Graf C, Maas J. Evaluation and optimization of energy harvesting cycles using dielectric elastomers. In: Bar-Cohen Y, Carpi F, editors. SPIE Smart Struct. Mater. + Nondestruct. Eval. Heal. Monit., International Society for Optics and Photonics; 2011, p. 79760H. doi:10.1117/12.879936.

[163] Graf C, Maas J, Schapeler D. Optimized energy harvesting based on electro active polymers. 2010 10th IEEE Int. Conf. Solid Dielectr., IEEE; 2010, p. 1–5. doi:10.1109/ICSD.2010.5568255.

[164] Carpi F, Rossi D De, Kornbluh R. Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer. 2011.

[165] Chiang Foo C, Cai S, Jin Adrian Koh S, Bauer S, Suo Z. Model of dissipative dielectric elastomers. J Appl Phys 2012;111:034102. doi:10.1063/1.3680878.

[166] Koh S, Keplinger C, Li T. Dielectric elastomer generators: How much energy can be converted? … /ASME Trans 2011.

[167] Cottinet P-J, Guyomar D, Lallart M, Guiffard B, Lebrun L. Investigation of electrostrictive polymer efficiency for mechanical energy harvesting. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 2011;58:1842–51. doi:10.1109/TUFFC.2011.2022.

[168] Pierre-Jean Cottinet DGBGLL and CP. Piezoelectric Ceramics. Sciyo; 2010. doi:10.5772/241.

[169] TASHIRO R, KABEI N, KATAYAMA K, ISHIZUKA Y, TSUBOI F, TSUCHIYA K. Development of an Electrostatic Generator that Harnesses the Motion of a Living Body. Use of a Resonant Phenomenon. JSME Int J Ser C 2000;43:916–22. doi:10.1299/jsmec.43.916.

[170] Brochu P, Li H, Niu X, Pei Q. Factors influencing the performance of dielectric elastomer

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

energy harvesters. In: Bar-Cohen Y, editor. SPIE Smart Struct. Mater. + Nondestruct. Eval. Heal. Monit., International Society for Optics and Photonics; 2010, p. 76422J – 76422J – 12. doi:10.1117/12.847736.

[171] Huang J, Shian S. Maximizing the Energy Density of Dielectric Elastomer Generators Using Equi-Biaxial Loading. Adv Funct … 2013.

[172] Tutcuoglu A, Majidi C. Energy harvesting with stacked dielectric elastomer transducers: Nonlinear theory, optimization, and linearized scaling law. Appl Phys Lett 2014;105:241905. doi:10.1063/1.4904473.

[173] Liu Y, Liu L, Zhang Z, Jiao Y, Sun S, Leng J. Analysis and manufacture of an energy harvester based on a Mooney-Rivlin–type dielectric elastomer. EPL (Europhysics Lett 2010;90:36004. doi:10.1209/0295-5075/90/36004.

[174] Jean P, Wattez A, Ardoise G, Melis C, Van Kessel R, Fourmon A, et al. Standing wave tube electro active polymer wave energy converter. In: Bar-Cohen Y, editor. SPIE Smart Struct. Mater. + Nondestruct. Eval. Heal. Monit., International Society for Optics and Photonics; 2012, p. 83400C. doi:10.1117/12.934222.

[175] Rajamani A, Grissom MD, Rahn CD, Zhang Q. Wound Roll Dielectric Elastomer Actuators: Fabrication, Analysis, and Experiments. IEEE/ASME Trans Mechatronics 2008;13:117–24. doi:10.1109/TMECH.2008.915825.

[176] Huang J, Shian S. Dielectric elastomer generator with equi-biaxial mechanical loading for energy harvesting. SPIE Smart … 2013.

[177] Zhang Q, Bharti V, Zhao X. Giant electrostriction and relaxor ferroelectric behavior in electron-irradiated poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) copolymer. Science (80-) 1998.

[178] Li B, Chen H, Qiang J, Hu S, Zhu Z, Wang Y. Effect of mechanical pre-stretch on the stabilization of dielectric elastomer actuation. J Phys D Appl Phys 2011;44:155301. doi:10.1088/0022-3727/44/15/155301.

[179] Cook-Chennault K. Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting. Smart Mater … 2008.

[180] Sodano H, Inman D, Park G. Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries. J Intell Mater … 2005.

[181] Priya S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. J Electroceramics 2007.

[182] Goldfarb M, Celanovic N. A lumped parameter electromechanical model for describing the nonlinear behavior of piezoelectric actuators. J … 1997.

[183] Renaud M, Sterken T. Piezoelectric harvesters and MEMS technology: fabrication, modeling and measurements. Solid-State Sensors, … 2007.

[184] Ajitsaria J, Choe S. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. Smart Mater … 2007.

[185] Priya S, Inman D. Energy harvesting technologies. 2009.

[186] Johnston BG. Column Buckling Theory: Historic Highlights. J Struct Eng 1983;109:2086–96. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1983)109:9(2086).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

[187] Yang G, Liu S. Uniaxial stress dependence of the piezoelectric properties of lead zirconate titanate ceramics. SPIE's 7th … 2000.

[188] Ewart L, McLaughlin E, Gittings K. Investigation of the Compressive Material Properties of PZT and PMN 1999.

[189] Yap P. Truck tire types and road contact pressures. … Symp Heavy Veh Weight … 1989.

[190] Grosso M. Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model. Energy Build 1992;18:101–31. doi:10.1016/0378-7788(92)90041-E.

[191] Santos F, Jr A dos S. Evaluation of subsurface contact stresses in railroad wheels using an elastic half-space model. J Brazilian … 2004.

[192] Mueller MJ. Application of plantar pressure assessment in footwear and insert design. J Orthop Sports Phys Ther 1999;29:747–55. doi:10.2519/jospt.1999.29.12.747.

[193] Eitzen L, Graf C, Maas J. Bidirectional HV DC-DC converters for energy harvesting with dielectric elastomer generators. 2011 IEEE Energy Convers. Congr. Expo., IEEE; 2011, p. 897–901. doi:10.1109/ECCE.2011.6063866.

[194] McKay TG, O'Brien BM, Calius EP, Anderson IA. Soft generators using dielectric elastomers. Appl Phys Lett 2011;98:142903. doi:10.1063/1.3572338.

[195] McKay T, O'Brien B, Calius E, Anderson I. Self-priming dielectric elastomer generators. Smart Mater Struct 2010;19:055025. doi:10.1088/0964-1726/19/5/055025.

[196] Jean-Mistral C, Vu Cong T, Sylvestre A. Advances for dielectric elastomer generators: Replacement of high voltage supply by electret. Appl Phys Lett 2012;101:162901. doi:10.1063/1.4761949.

[197] Belhora F, Cottinet P, Guyomar D. Hybridization of electrostrictive polymers and electrets for mechanical energy harvesting. Sensors Actuators A … 2012.

[198] Boisseau S. Optimization of an electret-based energy harvester. Smart Mater … 2010.

[199] Jean-Mistral C. Pressure power recovery device, 2014.

[200] Rocha JG, Goncalves LM, Rocha PF, Silva MP, Lanceros-Mendez S. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. IEEE Trans Ind Electron 2010;57:813–9. doi:10.1109/TIE.2009.2028360.

[201] Khbeis M, McGee J. Design of a hybrid ambient low frequency, low intensity vibration energy scavenger. Proc PowerMEMS' … 2006.

[202] Beeby SP, Tudor MJ, White NM. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. Meas Sci Technol 2006;17:R175–95. doi:10.1088/0957-0233/17/12/R01.

[203] Liu Y. Active energy harvesting 2006.

[204] Wongtimnoi K. Polyuréthanes électrostrictifs et nanocomposites: caractérisation et analyse des mécanismes de couplages électromécaniques. 2011.

[205] Diani J, Fayolle B, Gilormini P. A review on the Mullins effect. Eur Polym J 2009;45:601–12. doi:10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017.

[206] Govindjee S, Simo JC. Mullins effect and the strain amplitude dependence of the storage modulus. Int J Solids Struct 1992;29:1737–51. doi:10.1016/0020-7683(92)90167-R.

[207] Lindley PB. Relation between hysteresis and the dynamic crack growth resistance of natural

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

rubber. Int J Fract n.d.;9:449–62. doi:10.1007/BF00036325.

[208] Kofod G. The static actuation of dielectric elastomer actuators: how does pre-stretch improve actuation? J Phys D Appl Phys 2008.

[209] Brissaud M. Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration. 2007.

[210] Marckmann G, Verron E. Comparison of Hyperelastic Models for Rubber-Like Materials. Rubber Chem Technol 2006;79:835–58. doi:10.5254/1.3547969.

[211] Julio García Ruíz M, Yarime Suárez González L. Comparison of hyperelastic material models in the analysis of fabrics. Int J Cloth Sci Technol 2006;18:314–25. doi:10.1108/09556220610685249.

[212] Ogden RW, Saccomandi G, Sgura I. Fitting hyperelastic models to experimental data. Comput Mech 2004;34:484–502. doi:10.1007/s00466-004-0593-y.

[213] Timoshenko S. Theory of plates and shells. 1959.

[214] Timoshenko S, Goodier J. Theory of elasticity. … J Bulk Solids Storage Silos 2014.

[215] Bower D. An introduction to polymer physics. 2002.

[216] Ogden R. Non-linear elastic deformations. 1997.

[217] Natali AN, Carniel EL, Pavan PG, Dario P, Izzo I. Hyperelastic models for the analysis of soft tissue mechanics: definition of constitutive parameters. First IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomed. Robot. Biomechatronics, 2006. BioRob 2006., IEEE; n.d., p. 188–91. doi:10.1109/BIOROB.2006.1639082.

[218] Kim B, Lee SB, Lee J, Cho S, Park H, Yeom S, et al. A comparison among Neo-Hookean model, Mooney-Rivlin model, and Ogden model for chloroprene rubber. Int J Precis Eng Manuf 2012;13:759–64. doi:10.1007/s12541-012-0099-y.

[219] Mott P, Dorgan J, Roland C. The bulk modulus and Poisson's ratio of "incompressible" materials. J Sound Vib 2008.

[220] Wong F, Shield R. Large plane deformations of thin elastic sheets of neo-Hookean material. Zeitschrift Für Angew Math Und Phys … 1969.

[221] Arruda E, Boyce M. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials. J Mech Phys Solids 1993.

[222] Ali A, Hosseini M, Sahari B. A review and comparison on some rubber elasticity models. J Sci Ind … 2010.

[223] Horgan CO. The remarkable Gent constitutive model for hyperelastic materials. Int J Non Linear Mech 2015;68:9–16. doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2014.05.010.

[224] Newcomb CV, Flinn I. Improving the linearity of piezoelectric ceramic actuators. Electron Lett 1982;18:442. doi:10.1049/el:19820301.

[225] Uchino K. Materials issues in design and performance of piezoelectric actuators: an overview. Acta Mater 1998;46:3745–53. doi:10.1016/S1359-6454(98)00102-5.

[226] Vu DK, Steinmann P, Possart G. Numerical modelling of non-linear electroelasticity. Int J Numer Methods Eng 2007;70:685–704. doi:10.1002/nme.1902.

[227] Pelrine RE, Kornbluh RD, Joseph JP. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation. Sensors Actuators A Phys 1998;64:77–85.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

doi:10.1016/S0924-4247(97)01657-9.

[228] Wissler M, Mazza E. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers. Sensors Actuators A Phys 2005;120:184–92. doi:10.1016/j.sna.2004.11.015.

[229] Carpi F, Salaris C, Rossi D De. Folded dielectric elastomer actuators. Smart Mater Struct 2007.

[230] Shkel YM, Klingenberg DJ. Material parameters for electrostriction. J Appl Phys 1996;80:4566. doi:10.1063/1.363439.

[231] Wang CM. Timoshenko Beam-Bending Solutions in Terms of Euler-Bernoulli Solutions. J Eng Mech 1995;121:763–5. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:6(763).

[232] Erturk A, Renno JM, Inman DJ. Modeling of Piezoelectric Energy Harvesting from an L-shaped Beam-mass Structure with an Application to UAVs. J Intell Mater Syst Struct 2008;20:529–44. doi:10.1177/1045389X08098096.

[233] Sodano HA, Park G, Inman DJ. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. Strain 2004;40:49–58. doi:10.1111/j.1475-1305.2004.00120.x.

[234] Cheng H-M, Ewe MTS, Chiu GT-C, Bashir R. Modeling and control of piezoelectric cantilever beam micro-mirror and micro-laser arrays to reduce image banding in electrophotographic processes. J Micromechanics Microengineering 2001;11:487–98. doi:10.1088/0960-1317/11/5/307.

[235] DeVoe D, Pisano A. Modeling and optimal design of piezoelectric cantilever microactuators. J Microelectromechanical Syst 1997.

[236] Frecker MI, Aguilera WM. Analytical modeling of a segmented unimorph actuator using electrostrictive P(VDF-TrFE) copolymer. Smart Mater Struct 2004;13:82–91. doi:10.1088/0964-1726/13/1/010.

[237] Akdogan EK, Allahverdi M, Safari A. Piezoelectric composites for sensor and actuator applications. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control 2005;52:746–75. doi:10.1109/TUFFC.2005.1503962.

[238] Mead J. Electric lamp. US618706 A, 1899.

[239] Willard I. Electric light for surgical purposes. US608109 A, 1898.

[240] Grohoski T. Solar cell recharging means for a battery operated watch. US3448575 A, 1969.

[241] Hudgin R, Lipson SG. Analysis of a monolithic piezoelectric mirror. J Appl Phys 1975;46:510. doi:10.1063/1.321674.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe A : Matériel et montages utilisés

A.1. Montage utilisé pour la caractérisation et l'excitation mécanique des éléments piézoélectriques

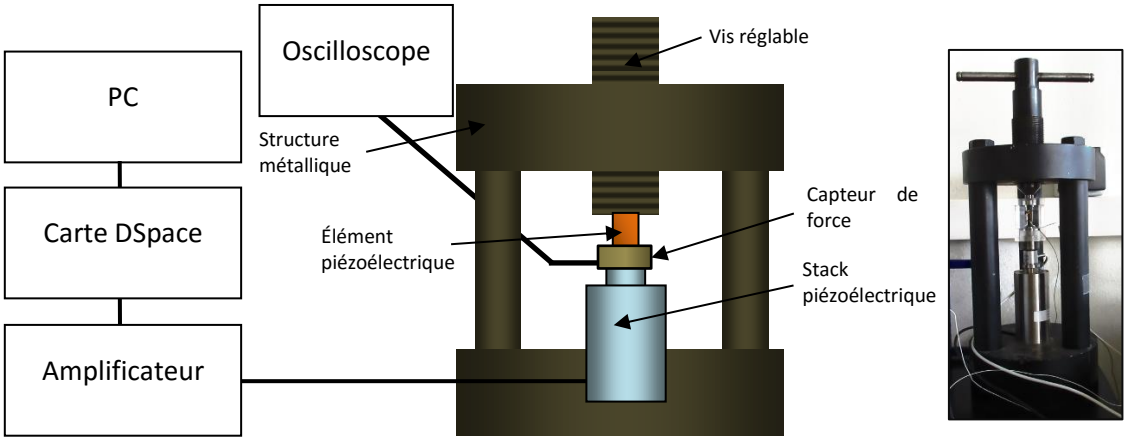


Figure 217 : Montage expérimental pour l'excitation mécanique des éléments piézoélectriques

Le montage est constitué d'une structure métallique robuste supposée indéformable intégrant un stack piézoélectrique est intégré (P-246.50[6]). La force qui agit sur l'ensemble peut être rendu variable en alimentant le stack par l'intermédiaire d'un amplificateur (PI, HVPZT-power Amplifier) et une carte dSPACE (carte ds1104, logiciel ControlDesk) associée à un ordinateur. Cela permet de fabriquer des signaux temporaires complexes et même assurer le contrôle du système.

A.2. Montage pour la caractérisation et l'excitation mécanique des films diélectriques

Pour l'excitation mécanique et la caractérisation du comportement élastique des films polymères le montage de la a été utilisé. Celui comporte un actionneur linéaire de précision (Newport XSM50) commandé en déplacement par l'intermédiaire d'une carte dSPACE (ds1104).

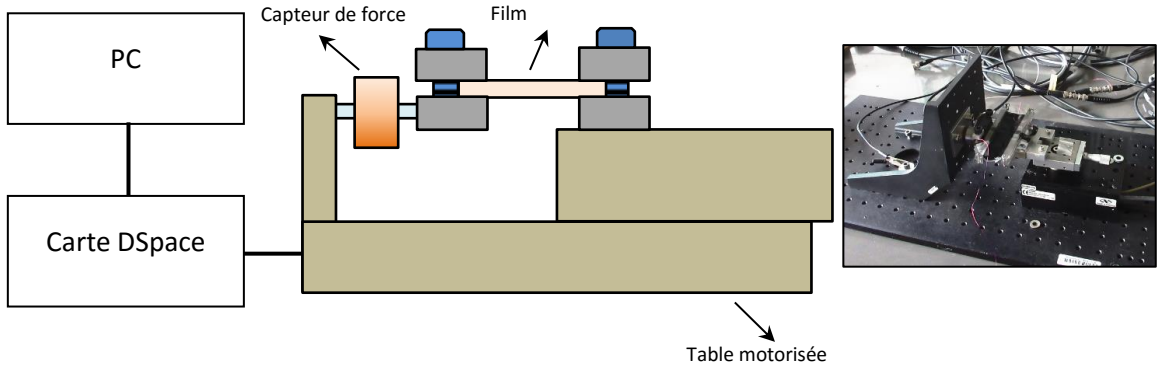


Figure 218: Montage utilisé pour la déformation des films polymère

[6] http://www.physikinstrumente.com/home.html, 11/10/2015

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

A.3. Montage utilisé pour l'excitation mécanique axiale en compression des polymères

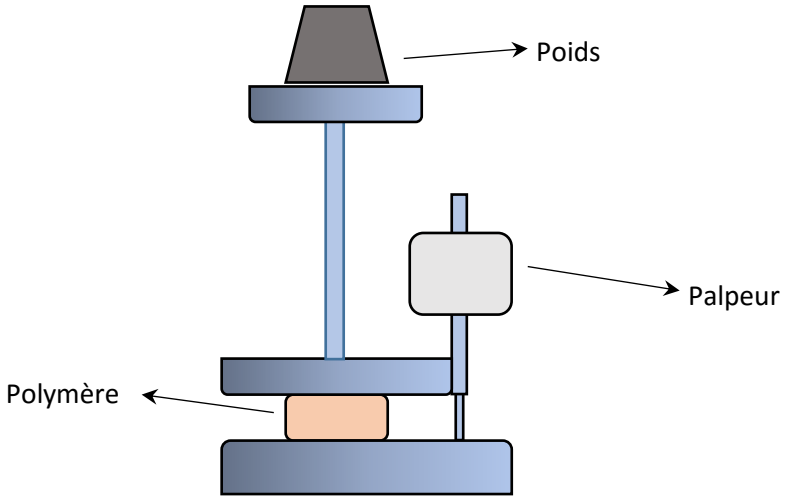


Figure 219 : Montage utilisé pour l'excitation mécanique axiale en compression des polymères

Le montage décrit dans A.1 ne permet pas d'avoir des déplacements importants car le déplacement maximale imposé par le stack piézoélectrique reste très faible (≈ 100 µm). Comme les polymères diélectriques sont par contre beaucoup plus flexibles les déplacements nécessaires peuvent être beaucoup plus importants (>1 mm). Pour cela la structure représentée dans la Figure 219 a été utilisée. Celle-ci est constituée d'une partie fixe et un piston mobile actionné par des poids. Le déplacement est mesuré à l'aide d'un palpeur.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

A.4. Montages pour le positionnement précis d'un film et son déformation axiale et axisymétrique

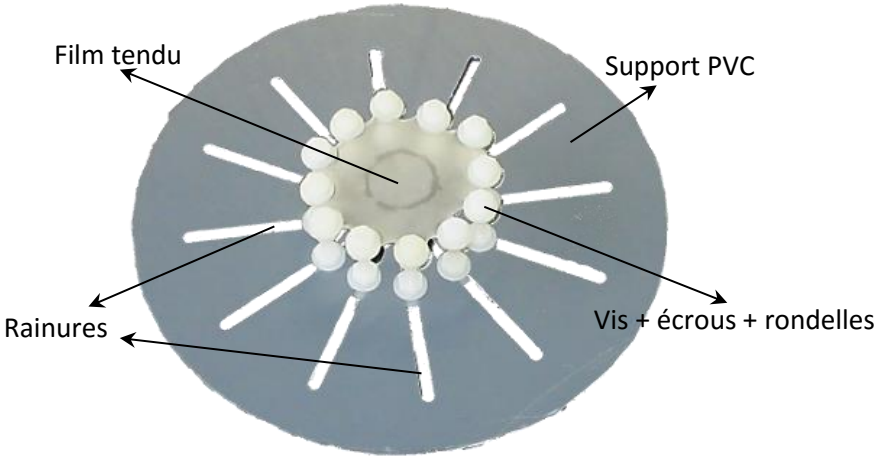


Figure 220 : Montage pour l'extension axisymétrique des films

Le montage représenté dans la Figure 220 est utilisé pour tendre les films de manière axisymétrique. Celui-ci est constitué d'une plaque en plastique contenant des rainures sur lesquelles des vis peuvent être glissés et être fixés. La partie supérieure des vis comporte aussi deux écrous et des rondelles entre lesquelles le film peut être fixé.

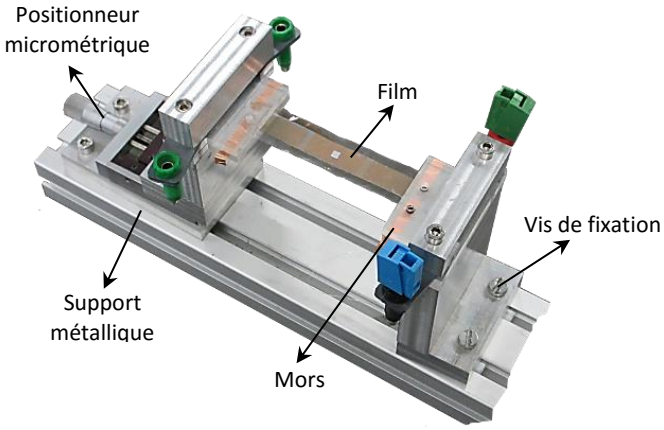


Figure 221 : Banc de positionnement des films rectangulaires

Pour la fixation et le positionnement des films de forme rectangulaire, le banc de positionnement illustré dans la Figure 221 a été utilisé. Celui-ci comporte une vis micrométrique qui permet de faire des réglages fins et un mors qui est mobile et qui peut être fixé par des vis à la structure principale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe B : Méthodes et techniques de fabrication des polymères

B.1. Préparation des films de polyuréthane

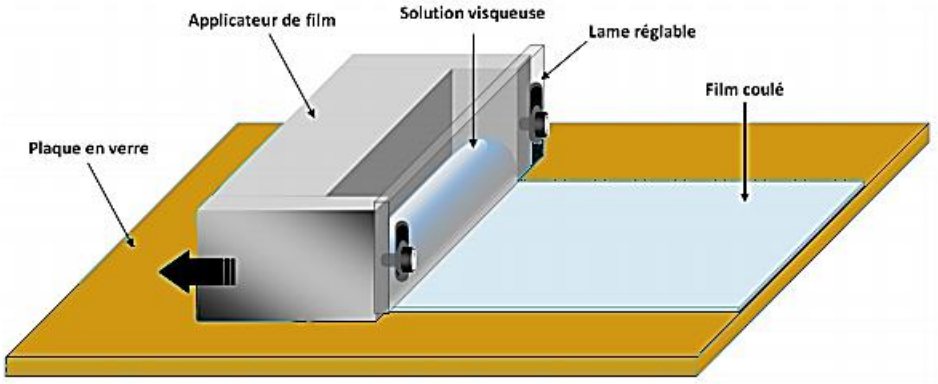


Figure 222 : Application de la solution sur un support en verre avec l'applicateur de film à lame réglable d'Elcometer® 3700/3 [204]

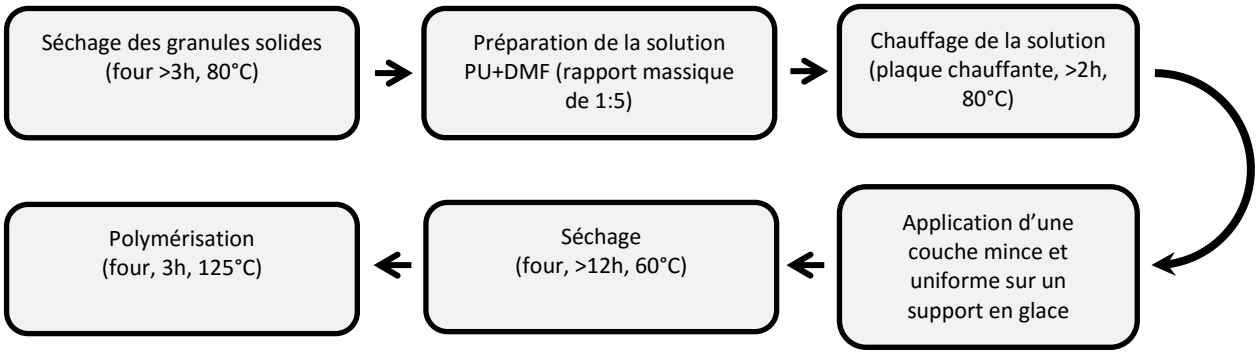


Figure 223 : Méthode de fabrication des films de polyuréthane

Les films de polyuréthane sont fabriqués par la méthode de la voie solvant. Pour cela des granules de polyuréthane solide commerciales sont utilisées. Tout d'abord celles-ci sont laissées sécher pendant au minimum 3h au four à 80°C. Ensuite, une solution est préparée en utilisant du DMF (N,N-Dimethylmethanamide) comme solvant pour un rapport massique d'environs 1:5 (approximativement 10 g de PU pour 50 ml de DMF (d_{DMF} = 1.1 g/cm^3)).

La solution ainsi obtenue est placée dans un bécher et chauffée sur une plaque chauffante pendant au minimum 2h à une température d'environs 80°C, avec agitation. Si des bulles d'air sont présentes, le mieux c'est de laisser la solution pendant un certain temps avant de l'utiliser pour que celles-ci soient éliminées. Pour préparer des films une couche mince et uniforme de la solution est appliquée sur un support plan par l'intermédiaire d'un applicateur réglable (Elcometer 3700/3) tel qu'illustré dans la Figure 222. L'épaisseur finale du film est approximativement proportionnelle à la hauteur de la solution déposée. Le séchage se fait dans un four chauffé à 60°C pendant une durée d'au minimum 12h et la polymérisation à une température de 125°C pendant 3h. La procédure utilisée est aussi représentée dans la Figure 223.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des figures

Figure 1 : Illustration du phénomène de piézoélectricité dans des cristaux hypothétiques à deux dimensions [51] a) réseau carré non piézoélectrique b) réseau hexagonal piézoélectrique .....
Figure 2 : Un de premiers modèles des oscillateurs à quartz .....
Figure 3 : Céramiques piézoélectriques de différentes dimensions et formes.....
Figure 4 : Circuit intégré d'une montre électronique moderne utilisant un cristal de quartz .....
Figure 5 : Quelques applications courantes des céramiques piézoélectriques (de gauche à droite : briquet, buzzer piézo, sonotrode ultrasonore chirurgicale, buse d'imprimante à jet d'encre).....
Figure 6 : Structure des polymères piézoélectriques amorphes (gauche) et semi-cristallins (droite) [51] .....
Figure 7 : Alignement des domaines cristallins dans un polymère piézoélectrique sous l'action d'un champ électrique externe .....
Figure 8 : Comparaison des performances des composites et des matériaux purs [237] .....
Figure 9 : Illustration d'un mécanisme possible du phénomène d'électrostriction .....
Figure 10 : Elastomères diélectriques souvent utilisés. De gauche à droite : Silicone, Latex, Acrylique..
Figure 11 : Différentes sources possibles naturelles et artificielles d'énergie mécanique .....
Figure 12 : Gauche : modèle d'une lampe à torche [238] et une lampe frontale [239] de 1898 Droite : récepteur radio autoalimenté à cristal.....
Figure 13 : Evolution du rendement des cellules solaires dans le temps (d'après [240]).....
Figure 14 : Système de récupération d'énergie sur la marche (Power Walk).....
Figure 15: Principe de récupération d'énergie en utilisant le phénomène d'électro-mouillage inverse [104] .....
Figure 16 : Panneaux de récupération d'énergie sur la marche des piétons PaveGen et exemple de leur utilisation dans le siège de la compagnie SNCF (France) .....
Figure 17 : Système de récupération d'énergie cinétique sur les mouvements du corps (AMPY) .....
Figure 18 : Exemples de systèmes pouvant être utilisés pour la récupération d'énergie utilisant un matériau électroactif (excitation par chocs, vibrations, fonctionnement quasi-statique) .....
Figure 19 : Impact des aberrations optiques dues à des perturbations atmosphériques sur l'image finale d'un télescope : la partie du faisceau perturbé est déphasée ce qui peut diminuer l'intensité totale reçue par le capteur.....
Figure 20 : Deux configurations possibles de miroirs déformables utilisant des matériaux piézoélectriques (d'après [118] et [241]) a) mode piston b) mode flexion .....
Figure 21 : De gauche à droite : la navette spatiale Discovery qui a transporté le télescope Hubble, le télescope Hubble, le télescope terrestre APEX (un de plus grands) .....
Figure 22 : Exemple d'un mini satellite utilisant des voiles solaires développé par « The Planetary Society » (projet LightSail™ 2014) à gauche : dimensions du satellite par rapport à une personne; à droite : vue des voiles déployées dans l'espace.....
Figure 23 : Structures gonflables. Gauche : Echo le satellite ballon réflecteur; droite : exemple d'antenne gonflable d'un vrai satellite .....
Figure 24 : Exemple simple illustrant différentes manières d'effectuer un transfert d'énergie mécanique : par projection (gauche) en utilisant une liaison pivot (droite).....
Figure 25 : Deux possibilités d'injecter de l'énergie mécanique dans un ressort en utilisant une masse : b) en déposant la masse et en attendant l'équilibre c) en déposant la masse et en bloquant le ressort lorsque celui-ci se trouve comprimé au maximum.....
Figure 26 : Exemple d'un système réel (gauche) et un système simplifié utilisant le concept de dipôle (droite).....
Figure 27 : Transfert d'énergie d'un condensateur à l'autre en utilisant une bobine .....
Figure 28 : Le transfert d'énergie dans le système peut être amélioré en insérant des systèmes supplémentaires intermédiaires jouant le rôle d'un routeur d'énergie .....
Figure 29 : Système possible d'adaptation de transfert d'énergie pour des systèmes électriques .....
Figure 30 : Système constitué d'une source de tension et une résistance connectées en série.....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 31 : Système résistance-capacité .....
Figure 32 : Énergie maximale qui peut être transférée au condensateur sur une durée τ .....
Figure 33 : Système linéaire échangeant de l'énergie avec l'extérieur .....
Figure 34 : Schéma simplifié d'un système de récupération d'énergie .....
Figure 35 : Algorithme général de la méthode du calcul variationnel .....
Figure 36 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre bloquée-libre actionnée par une force .....
Figure 37 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre sismique .....
Figure 38 : Modèle à constantes localisées simplifié d'une poutre piézoélectrique .....
Figure 39 : Schéma équivalent d'un système piézoélectrique en régime quasi-statique.....
Figure 40 : Élément piézoélectrique avec commande SSHI parallèle et extraction synchronisée de l'énergie.....
Figure 41 : Variation temporelle possible de la force appliquée sur l'élément piézoélectrique .....
Figure 42 : Valeur maximale de Ɛ en fonction du coefficient d'inversion et le nombre d'inversions le mieux adapté.....
Figure 43 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.75) .....
Figure 44 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.875) .....
Figure 45 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.625) .....
Figure 46 : Quantité d'énergie optimale récupérée pour différentes quantités de charges normalisées pour chaque transition (α = 0.5) .....
Figure 47 : Evolution de la force présentant trois intervalles de variations; Notation par un nombre en base 3 de la séquence de la commande du transfert d'énergie en sortie .....
Figure 48 : Capacité variable .....
Figure 49 : Variation de la capacité d'un système électrostatique .....
Figure 50 : Variation complexe de la capacité d'un système électrostatique .....
Figure 51 : Circuit électrique équivalent d'un polymère diélectrique .....
Figure 52 : Variation possible de la capacité du polymère .....
Figure 53 : Rendement maximal du transfert d'énergie sur une période T de temps vers un condensateur connecté en série avec une résistance R_s et en parallèle avec une résistance R_p .....
Figure 54 : Variation de la capacité d'un système électrostatique .....
Figure 55 : Schéma électrique simplifiée d'un polymère diélectrique.....
Figure 56 : Système électrostatique idéal .....
Figure 57 : Modélisation de la propagation du champ électrique dans un film polymère par une ligne de transmission (ρ : résistivité, ε : permittivité).....
Figure 58 : Variation de l'admittance du film avec la fréquence, pour un modèle à ligne de transmission et circuit RC.....
Figure 59 : Cycle à charge constante limité par le champ électrique de claquage. La capacité du film (C) est inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur de celui-ci (H). .....
Figure 60 : Circuit simple de récupération avec tous les éléments connectés en série .....
Figure 61 : Connexion série avec interrupteur.....
Figure 62 : Equivalence d'un polymère utilisé en régime de faibles déformations avec un élément piézoélectrique.....
Figure 63 : Pont redresseurs a) 4 diodes b) 2 diodes .....
Figure 64 : Variation de la tension aux bornes du polymère pour les trois types de ponts redresseurs utilisés.....
Figure 65 : Circuit à transfert unidirectionnel d'énergie.....
Figure 66 : Partie élémentaire d'un film polymère avant et après déformation .....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 67 : Variation de la capacité pour une structure en polymère (module d'Young Y) pour une contrainte σ_0 imposée (gauche) pour les trois configurations principales et la déformation axiale respective (droite) .....
Figure 68 : Schéma électrique équivalente d'un élément piézoélectrique .....
Figure 69 : Modèle à constantes localisées (schéma électrique) d'une poutre bloquée-libre actionnée par une force .....
Figure 70 : Illustration du phénomène d'instabilité mécanique pour des éléments piézoélectriques actionnés en compression.....
Figure 71 : Charge critique pour différentes conditions aux limites (E : module d'Young, I : moment de la section, P_{cr} : force critique, L: longueur de la colonne) .....
Figure 72 : Variation de la force critique avec la hauteur et le rayon de la section pour un cylindre en P194.....
Figure 73 : Variation du facteur de mérite ($d_{33}g_{33}$) des céramiques P188 et P189 en fonction de la contrainte axiale appliquée.....
Figure 74 : Configuration hybride possible .....
Figure 75 : Energie récupérée en sortie du système normalisée en fonction de l'énergie disponible avec l'élément piézoélectrique seul en fonction du rapport des capacités.....
Figure 76 : Configuration hybride avec transfert d'énergie directe et unidirectionnel.....
Figure 77 : Configuration unidirectionnelle avec condensateur intermédiaire.....
Figure 78 : Variation de la puissance récupérée en fonction du déphasage entre les deux excitations..
Figure 79 : Circuit préservant la charge électrique en utilisant un condensateur supplémentaire.....
Figure 80 : Circuit préservant la charge électrique utilisant un condensateur supplémentaire et sortie redressée.....
Figure 81 : Puissance maximale normalisée, obtenue avec les trois types de ponts redresseurs en fonction de la variation de la capacité du polymère.....
Figure 82 : Circuit hybride avec conservation des charges électriques .....
Figure 83 : Structure hybride à transfert bidirectionnel avec capacité de stockage intermédiaire .....
Figure 84 : Valeur optimale de C_b normalisée pour une variation de la capacité du polymère donnée (pont 2 diodes -) .....
Figure 85 : Contrainte axiale (de Cauchy) en fonction de l'extension axiale du film déformé de manière uniaxiale (en régime quasi-statique) .....
Figure 86 : Evolution du module d'Young du Terpolymère en fonction de la fréquence d'excitation (déformation = 1%) .....
Figure 87 : Modélisation du comportement hyperélastique du silicone en utilisant le modèle de Mooney-Rivlin optimisé pour deux intervalles de déformations différentes.....
Figure 88 : Réponse de la contrainte à une déformation imposée de 5% pour un film en acrylique (1 mm en épaisseur, 5 mm en largeur préétiré 2 fois la longueur initiale) pour différentes fréquences (gauche) et la même chose pour un film en silicone (400µm en épaisseur, 1 cm en largeur) (droite) ....
Figure 89 : Permittivité électrique relative de différents polymères en fonction de la fréquence (à faible champ électrique) .....
Figure 91 : Décharge en circuit ouvert de différents polymères (Terpolymère : 75µm, ø = 1.5 cm| PU : 85 µm, ø = 1.5 cm| Silicone : 100µm, , ø = 3 cm).....
Figure 90 : Décharge statique des éléments piézoélectriques sous l'action d'une force constante (briquets P189, P188).....
Figure 92 : Variation de la capacité d'un film en silicone soumis à une déformation uniaxiale .....
Figure 93 : Variation de la capacité d'un film en PU soumis à une déformation uniaxiale.....
Figure 94 : Variation de la conductance d'un film de PU avec la déformation axiale.....
Figure 95 : Variation de la résistance normalisée de l'électrode en fonction de la déformation (pour un film utilisant de la graisse conductrice).....
Figure 96 : Film polymère avec des électrodes en graisse de carbone.....
Figure 97 : Film acrylique avec électrode en poudre de graphite.....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 99 : Les électrodes en silicone conducteur surtout, lorsqu'on utilise du solvant, ont tendance à ne pas recouvrir entièrement la surface du film .....
Figure 98 : Influence de la couche de polymère conducteur sur la rigidité du film et variation de la résistance de l'électrode entre ses deux extrémités en fonction de la déformation (film de silicone 400µm x 1cm x 5cm + électrode en silicone sur une seule face) .....
Figure 100 : Allure discontinue de la couche d'or sur un film en silicone .....
Figure 101 : Variation de la résistance d'une couche d'or sur un film en silicone pour différentes durées d'exposition (courant utilisé pour la métallisation de 40mA, film de 1cm de longueur et 3mm de largeur) .....
Figure 102 : Courant de charge d'un polymère utilisant de la graisse conductrice (220 pF) lorsqu'une tension carrée (-1kV, 1kV) est appliquée .....
Figure 103 : Tension en circuit ouvert pour différents éléments piézoélectriques en fonction de la force appliquée (quasi-statique) .....
Figure 104 : Courant en court-circuit pour différents éléments piézoélectriques en fonction de la force sinusoïdale appliquée (1Hz) .....
Figure 105 : Tension de sortie d'un élément piézoélectrique (FUJI) en fonction de la force sinusoïdale appliquée pour différentes fréquences .....
Figure 106 : Courant de court-circuit normalisé par rapport à la fréquence pour un élément piézoélectrique (FUJI) en fonction de la force sinusoïdale appliquée pour différentes fréquences .....
Figure 107 : Montage simple utilisé pour l'estimation de l'énergie électrique récupérée avec les éléments piézoélectriques .....
Figure 108 : Puissance élément P194 (1Hz) .....
Figure 109 : Puissance élément FUJI (1Hz) .....
Figure 110 : Puissance élément P716 (1Hz) .....
Figure 111 : Puissance 3 x rondelles P189 en // (1Hz) .....
Figure 112 : Comparaison entre modèle (—) et mesure (•) pour un élément de type P194, pour trois forces de 80N, 128N, 200N d'amplitude, à 1Hz .....
Figure 113 : Tension aux bornes d'un buzzer piézoélectrique excité périodiquement .....
Figure 114 : Tension aux bornes de la résistance pendant la décharge pour différents retards (figure) et l'énergie récupérée pour chaque retard (tableau) .....
Figure 115 : Courant inverse dans deux diodes utilisées en fonction de la tension inverse appliquée ...
Figure 116 : Circuit avec sortie redressée utilisé pour la récupération d'énergie avec un élément piézoélectrique (rondelle P189) .....
Figure 117 : Structure possible d'une dalle piézoélectrique qui pourrait être utilisée pour la récupération d'énergie sur le passage des voitures et piétons .....
Figure 118 : Prototype d'une structure piézoélectrique utilisée pour la récupération d'énergie sur la marche .....
Figure 119 : Tension en circuit ouvert de la dalle piézoélectrique en fonction de la masse qu'elle supporte .....
Figure 120 : Réponse du capteur de force à l'action de pression du pied pendant la marche normale ..
Figure 121 : Montage utilisé pour l'estimation de l'énergie récupérée avec les polymères lorsqu'ils sont alimentés par une source de tension .....
Figure 122 : Dépendance de la capacité du film en silicone du déplacement imposé .....
Figure 123 : Puissance moyenne récupérée pour différentes tensions de polarisation (film silicone, 10% de déformation axiale) .....
Figure 124 : Puissance théorique moyenne obtenue avec un film en silicone (≈ 10% déformation, 2Hz) pour différentes valeurs de résistances et tensions .....
Figure 125 : Puissance extraite pour différentes déformations du film en latex et différentes résistances alimentées en sortie .....
Figure 126 : Variation de la tension de sortie (crête) en fonction de sa valeur et l'amplitude de la déformation axiale (modèle et mesure, film en latex) .....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 127 : Variation de la puissance récupérée (R=0.5 GΩ, 1Hz, 40% déformation, C_p = 367pF →504pF, film latex) en fonction de la tension continue appliquée .....
Figure 128 : Film en silicone (100 µm) utilisé pour la récupération d'énergie .....
Figure 129 : Variation de la tension aux bornes du film en circuit ouvert lorsque celui-ci est déformé ..
Figure 130 : Tension aux bornes de la résistance de 40MΩ pendant la décharge du film dans celle-ci ..
Figure 131 : Pour voir l'importance des électrodes flexibles deux stacks en acryliques ont été utilisés : un constitué de 10 films (de 1 mm d'épaisseur) collés de manière directe et un autre de mêmes dimensions mais en utilisant une couche mince de scotch entre chaque deux films d'acrylique.....
Figure 132 : Variation de l'épaisseur du stack en fonction du poids appliqué .....
Figure 133 : Déformation du polymère de manière localisée.....
Figure 134 : Variation de la capacité du stack en fonction de la force appliquée et la surface d'appui...
Figure 135 : Stack en silicone avec des électrodes en silicone conducteur .....
Figure 136 : Différents surfaces utilisées pour la déformation du stack droite : éléments hémisphériques en teflon (ø ≈ 6mm) gauche : éléments hémisphériques en plexiglass (ø ≈ 1cm) .....
Figure 137 : Circuit hybride (configuration parallèle) .....
Figure 138 : Puissance moyenne obtenue avec l'élément piézoélectrique seul et avec le circuit hybride (100 N).....
Figure 139 : Puissance moyenne obtenue avec l'élément piézoélectrique seul et avec le circuit hybride (150 N).....
Figure 140 : Circuit utilisé pour le chargement du polymère.....
Figure 141 : Chargement d'un condensateur en utilisant un élément piézoélectrique .....
Figure 142 : Chargement d'un film de silicone avec élément piézoélectrique .....
Figure 143 : Film en silicone et élément piézoélectrique utilisé pour son chargement .....
Figure 144 : Hélice solide tournant autour d'un axe.....
Figure 145 : La relation entre les contraintes et les déformations peut devenir non-linéaire à cause de s variations géométriques .....
Figure 146 : Exemple de vue en coupe d'un film électroactif.....
Figure 147 : Distribution de la déflection verticale d'un film électroactif uniforme alimenté en tension sur toute sa surface pour différentes conditions aux limites ($\mathbf{M0 > 0}$).....
Figure 148 : Un film électroactif (en régime de faibles déplacements) est équivalent à un simple film dans lequel on applique des moments et forces aux bords des zones actives actives.....
Figure 149 : Déflection verticale pour différentes zones alimentées (20 V/µm) : Alimentation de a) zone 2; b) zone 1+3; c) zone 1 .....
Figure 150 : Distribution de la déflection verticale normalisée pour différentes positions de la zone active (la position peut être identifiée par le changement rapide de pente) pour un film bloqué-bloqué (gauche) et appuyé-appuyé (droite) .....
Figure 151 : Rapport des épaisseurs optimal pour un rapport des rigidités donné (pour une structure unimorphe et bimorphe).....
Figure 152 : Rapport M_0/I_{zz} normalisé par rapport à l'épaisseur et rigidité du substrat et la contrainte électrique (σ_0) en fonction du rapport des épaisseurs pour différents rapports des raideurs (g = G_1/G_0) (film unimorphe) .....
Figure 153 : Rapport M_0/I_{zz} normalisé par rapport à l'épaisseur et rigidité du substrat et la contrainte électrique (σ_0) en fonction du rapport des épaisseurs pour différents rapports des raideurs (g = G_1/G_0) (film unimorphe, bimorphe) .....
Figure 154 : Structure possible d'un miroir électroactif (utilisant des couches électrostrictives).....
Figure 155 : Épaisseur optimale normalisé de la couche active extrême en fonction des raideurs des couches et l'épaisseur de la couche active intermédiaire normalisée ($\mathbf{h1 = H1H0}$).....
Figure 156 : Moments des forces électriques normalisés générées par chaque couche électroactive pour différents rapport des épaisseurs.....
Figure 157 : Pour rendre le film plus flexible on peut utiliser un substrat avec des ''trous'' .....
Figure 158 : Déflection en bout d'un film bloqué-libre unimorphe avec substrat segmenté.....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 159 : Déflection en bout d'un film électroactif avec substrat segmenté de différentes épaisseurs (droite), en fonction de l'épaisseur du substrat (Ansys) .....
Figure 160 : Excitation impulsionnelle du film .....
Figure 161 : Film de mylar utilisé pour les mesures de rigidité.....
Figure 162 : Impact non-négligeable de la force de pesanteur sur différentes structures.....
Figure 164 : Position de l'extrémité du film pour différentes valeur de Γ avec (X_L,Y_L) position de l'extrémité du film .....
Figure 163 : Forme d'un film de longueur normalisée pour différentes valeur de Γ (132).....
Figure 165 : Film déformé par son propre poids (photo).....
Figure 166 : Forme du film (simulation) pour différents coefficients de Poisson (0.3, 0.4, 0.5).....
Figure 167 : Film unimorphe utilisant du silicone comme matériau électroactif .....
Figure 168 : Dépendance de l'amplitude de la déflection en extrémité de l'amplitude crête de la tension appliquée.....
Figure 169 : Due aux faibles courants de fuite le film arrive à maintenir sa forme courbé même après la déconnexion de la source de tension principale pour de longues durées de temps (6 kV).....
Figure 170 : Variation de l'amplitude de la déflection en bout du film en fonction de la fréquence de la tension appliquée (Tension crête de 2kV).....
Figure 171 : Comparaison entre la déflection du même film utilisant une électrode solide ou de la graisse conductrice et pour différentes positions (FV : film vertical, FH : film horizontal).....
Figure 172 : Film unimorphe : acrylique + substrat en acier.....
Figure 173 : Évolution de l'amplitude de la déflection du film en fonction de la tension appliquée .....
Figure 174 : Variation de la déflection en bout du film avec la fréquence (pour une tension de 4kV) ....
Figure 175 : Déflection à l'extrémité du film en fonction de la tension appliquée (acrylique + substrat plastique souple) .....
Figure 176 : Variation de la puissance moyenne consommée par le film en fonction de la fréquence d'excitation (tension crête de 4 kV .....
Figure 177 : Dimensions du film électroactif utilisant de l'acrylique et un substrat en film plastique métallisé .....
Figure 178 : Déflection d'un film bloqué – libre simple, avec 2 fils rigides et avec 4 fils rigides (limitant sa courbure latérale) en fonction de la tension appliquée .....
Figure 179 : Déflection d'un film bloqué-libre (film plastique métallisé + acrylique) pour différentes périodes de la tension (en dehors d'une résonnance).....
Figure 180 : Déformation du film acrylique + plastique sous l'action des tensions élevées .....
Figure 181 : Déflection à l'extrémité du film en fonction de la tension appliquée (film substrat plastique + PU) .....
Figure 182 : Déflection d'un unimorphe utilisant du terpolymère en fonction de la tension appliquée .
Figure 183 : Variation de la déflection du film lorsque celui-ci est maintenu en circuit ouvert (tension initiale 1.6 kV).....
Figure 184 : Film électroactif segmenté bloqué-bloqué (PU) mis en place (gauche) dimensions du film (droite).....
Figure 185 : Amplitude du déplacement en alimentant les patchs latéraux du film en fonction de la tension appliquée.....
Figure 186 : Amplitude du déplacement en alimentant le patch central du film en fonction de la tension appliquée.....
Figure 187 : Différence entre la déflection au centre obtenue par simulation avec un modèle 3D ou 2D (éléments finis, alimentation des zones latérales) .....
Figure 188 : Différence entre la déflection au centre obtenue par simulation avec un modèle 3D ou 2D (éléments finis, alimentation de la zone centrale) .....
Figure 189 : Déflection verticale, alimentation de deux dernières zones (1.6 kV) .....
Figure 190 : Déflection verticale, alimentation de la zone centrale (1.6 kV) .....
Figure 191 : Déflection verticale, alimentation des deux zones latérales (1.6 kV) .....
Figure 192 : Déflection verticale, alimentation de toutes les zones (1.6 kV).....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Figure 193 : Forme du film après changement de la distance entre les mors (traitement d'image) .....
Figure 194 : Déflection du centre du film en fonction de la diminution de la distance entre les extrémités du film (L = 7 cm).....
Figure 195 : Film électroactif en silicone avec des électrodes en silicone conducteur .....
Figure 196 : Film électroactif unimorphe circulaire avec les bords bloqués (plastique + silicone) avec électrodes segmentés en silicone conducteur (électrodes espacées de 3 mm).....
Figure 197 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.1, 2.1, 3.1, 4.1) sont alimentées avec 5 kV.....
Figure 198 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.3, 2.3, 3.3, 4.3) sont alimentées avec 5 kV.....
Figure 202 : Déflection (m) du film lorsque la zone (1.2) est alimentée avec 5 kV.....
Figure 201 : Déflection (m) du film lorsque la zone (1.3) est alimentée avec 5 kV.....
Figure 199 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.1, 1.2, 1.3) sont alimentées avec 5 kV.....
Figure 200 : Déflection (m) du film lorsque les zones (1.2, 3.2) sont alimentées avec 5 kV.....
Figure 203 : Pivot fabriqué pour coupler des films électroactifs (à droite photo du pivot réalisé).....
Figure 204 : Couplage entre deux films en utilisant une seule liaison pivot placée à l'extrémité des deux films .....
Figure 205 : Films couplées utilisant deux couches actives (gauche : film bimorphe, droite : deux unimorphes) .....
Figure 206 : Poutre piézoélectrique utilisée pour la validation du concept des films couplés.....
Figure 207 : Déflection de l'extrémité en fonction de la tension appliquée pour une poutre piézoélectrique seule et avec un film métallique supplémentaire couplé .....
Figure 208 : Film mince avec des forces et moments appliquées au niveau de ses extrémités.....
Figure 209 : Polymère tendu avec plusieurs zones actives.....
Figure 210 : Pré-déformation du film en Acrylique.....
Figure 212 : Mode de fonctionnement de l'actionneur.....
Figure 211 : Actionneur membrane avec des films couplés en flexion.....
Figure 215: Dimensions de l'actionneur.....
Figure 213 : Amplitude du déplacement en fonction de l'amplitude de la tension .....
Figure 214: Mode membrane uniaxiale utilisant une force fixe .....
Figure 216: Membrane avec film externe ; Déplacement du centre du film courbé en fonction de la tension appliquée.....
Figure 217 : Montage expérimental pour l'excitation mécanique des éléments piézoélectriques.....
Figure 218: Montage utilisé pour la déformation des films polymère .....
Figure 219 : Montage utilisé pour l'excitation mécanique axiale en compression des polymères .....
Figure 220 : Montage pour l'extension axisymétrique des films .....
Figure 221 : Banc de positionnement des films rectangulaires .....
Figure 222 : Application de la solution sur un support en verre avec l'applicateur de film à lame réglable d'Elcometer® 3700/3 [204] .....
Figure 223 : Méthode de fabrication des films de polyuréthane.....

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des paramètres de différents matériaux piézoélectriques 20
Tableau 2 : Paramètres caractéristiques indicatifs de quelques élastomères diélectriques 22
Tableau 3 : Paramètres caractéristiques indicatifs de quelques polymères semi-cristallins 23
Tableau 4 : Comparaison entre différentes technologies utilisées pour le stockage d'énergie électrique 26
Tableau 5 : Nécessités énergétiques de certains dispositifs couramment utilisés 26
Tableau 6 : Autonomie de certain dispositifs [94] 26
Tableau 7 : Comparaison entre les deux types de miroirs piézoélectriques 36
Tableau 8 : Gain d'énergie électrique normalisé obtenu avec les trois cycles proposés, pour la même énergie électrique injectée[154] 69
Tableau 9 : Performance optimale du circuit série avec sortie redressée 71
Tableau 10 : Variation de la capacité pour différentes configurations utilisant un film polymère 73
Tableau 11 : Expression de la variation de la capacité d'un film pour différents types d'excitations mécanique (Y : module d'Young, σ_0 : contraite appliquée) 74
Tableau 12 : Pressions et contraintes générées lors des interactions ordinaires [189–192] 79
Tableau 13 : Paramètres optimaux de la configuration à transfert direct et unidirectionnel de l'énergie 81
Tableau 14 : Performances optimales pour la configuration à transfert unidirectionnel avec stockage intermédiaire d'énergie 83
Tableau 15 : Puissance et charge optimale pour le circuit à recyclage des charges et avec condensateur série 85
Tableau 16 : Valeur optimale de C_b en fonction du pont redresseur utilisé 86
Tableau 17 : Déformation uniaxiale et biaxiale maximale réversible de différents polymères 91
Tableau 18 : Module d'Young des polymères défini pour un régime de grandes et faibles déformations 91
Tableau 19 : Champ de claquage de différents polymères 96
Tableau 20 : Différents types d'électrodes utilisées 99
Tableau 21 : Paramètres des éléments piézoélectriques utilisés 101
Tableau 22 : Autres propriétés mesurées et déduites des céramiques piézoélectriques **Erreur ! Signet non défini.**
Tableau 23 : Différentes diodes commercialisées présentant des faibles courants de fuite 107
Tableau 24 : Variation de la tension de sortie en fonction du nombre de diodes utilisé 108
Tableau 25 : Dépendance entre la densité d'énergie élastique et les déformations, pour différents modèles hyperélastiques [222,223] 130
Tableau 26 : Énergie mécanique maximale qu'un film électroactif peut fournir pour différentes configurations 140
Tableau 27 : Distribution de la déflection verticale d'un film plan pour différentes conditions aux limites (forme intégrale) 144
Tableau 28 : Valeur du module d'Young d'un film déterminé en utilisant la déformation et la force appliquée dans une configuration uniaxiale (Y : module d'Young réel du film, coefficient de Poisson 0.4, l : largeur du film, épaisseur de 100 µm) 152
Tableau 29 : Position de l'extrémité d'un film en plastique sous l'action de son poids (calculée et mesurée) 155
Tableau 30 : Déflection des différentes parties du film lorsque celui-ci est courbé de manière intentionnée en rapprochant les bords 168
Tableau 31 : Capacité électrique des différentes électrodes du film électroactif circulaire segmenté 171

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2016LYSEI030/these.pdf
© [A. Cornogolub], [2016], INSA Lyon, tous droits réservés