



**HAL**  
open science

# Modélisation des couplages multiphysiques et application aux systèmes électroactifs de faibles dimensions

Mickaël Lallart

## ► To cite this version:

Mickaël Lallart. Modélisation des couplages multiphysiques et application aux systèmes électroactifs de faibles dimensions. Energie électrique. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA Lyon); Université Claude Bernard Lyon I, 2016. tel-01404820

**HAL Id: tel-01404820**

**<https://hal.science/tel-01404820>**

Submitted on 29 Nov 2016

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mémoire présenté devant  
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon  
et l'Université Claude Bernard Lyon I  
pour obtenir

## L'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

par  
Mickaël LALLART  
Ingénieur INSA Lyon  
Docteur INSA Lyon  
Maître de Conférences au LGEF / Dpt. GE - INSA Lyon

École doctorale : Électronique, Électrotechnique et Automatique de Lyon  
Spécialité : Énergie et Systèmes

Section CNU : 63 (Génie électrique, électronique, photonique et systèmes )

*Soutenue le 06 Septembre 2016 devant la Commission d'examen*

## Modélisation des couplages multiphysiques et application aux systèmes électroactifs de faibles dimensions

---

Membres du Jury :

Pr. Bruno	ALLARD	Professeur à l'INSA de Lyon	Rapporteur
Pr. Skandar	BASROUR	Professeur à l'Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Pr. Jean-François	DEÛ	Professeur au CNAM	Rapporteur
Pr. Colette	LACABANNE	Professeure à l'Université Paul Sabatier	Présidente
Pr. Elie	LEFEUVRE	Professeur à l'Université Paris-Sud 11	Examineur
Dr. Boudjemaa	REMAKI	Maître de Conférences HdR à l'UCBL	Examineur
Pr. Daniel	GUYOMAR	Professeur au LGEF	
Pr. Laurent	LEBRUN	Professeur et Directeur du LGEF	

---



“Quand on ne sait pas où l’on va, il faut  
y aller... Et le plus vite possible.”

Proverbe Shadok  
(*Jacques Rouxel*)





# Remerciements

Le travail exposé dans ce manuscrit, et celui effectué tout au long de la carrière, n'aurait pu se faire sans le soutien, à la fois scientifique et personnel, de nombreuses personnes.

Tout d'abord je remercie vivement les Membres du Jury de m'avoir fait l'honneur d'examiner le travail exposé ici. C'est une réelle fierté que de pouvoir présenter ses modestes contributions à des experts reconnus dans les domaines et thématiques abordés ici. Je remercie ainsi le Professeur Bruno ALLARD d'avoir accepté d'examiner et de rapporter les travaux exposés ici. J'en profite pour le remercier doublement pour son soutien et sa confiance témoignés depuis des années, notamment en enseignement, et à cet égard lui suis infiniment reconnaissant de m'avoir confié, dès 2010, la responsabilité d'un module d'électronique et le cours magistral associé. Mes remerciements sincères vont également au Professeur Skandar BASROUR, qui, en plus de m'avoir suivi et toujours encouragé depuis des années, m'a également fait le plaisir d'accepté de rapporter ce manuscrit. Je remercie vivement le Professeur Jean-François DEÛ, également rapporteur de ce document, d'avoir très aimablement accepté cette charge.

Ma gratitude la plus sincère va à la Professeure Colette LACABANNE, Présidente du Jury, à qui je suis réellement honoré de pouvoir exposer mes travaux. Je remercie également chaleureusement le Professeur Elie LEFEUVRE, dont les conseils avisés m'ont toujours énormément apporté, d'avoir aimablement accepté de faire partie du Jury. Mes remerciements profonds vont aussi au Docteur Boudjemaa REMAKI, qui m'a fait le plaisir d'examiner ce travail.

Enfin, je remercie très sincèrement les Professeurs Daniel GUYOMAR et Laurent LEBRUN, Directeur du LGEF, de m'avoir fait le plaisir de faire partie de ce Jury, témoignant de leur support quotidien.

Je remercie également tous les membres du LGEF, actuels ou passés, pour leur aide et bonne humeur qui font de ce travail un moment toujours agréable et très sympathique. En particulier ma reconnaissance sincère va au Professeur Daniel GUYOMAR, pour sa confiance et son amitié sans faille, et qui a su me donner ce goût particulier pour la recherche. J'adresse également mon affection la plus profonde à Pierre-Jean, Jean-Fabien, Benjamin et Gaël pour leur amitié inébranlable qui a pu nous conduire dans de folles soirées mais également vers un travail efficace et pertinent (quelquefois en même temps que le premier point). Je ne saurais oublier ici Laurent, pour sa vision de la recherche et ses conseils qui m'ont toujours énormément apporté, ainsi que Lionel pour sa bonne humeur éternelle et son soutien de tous

les jours et Claude pour le partage de son expérience scientifique et pédagogique. Je remercie également Frédéric, qui a toujours trouvé la patience de me supporter, dans des moments où je n'aurais pas pu me supporter moi-même. Je tiens également à remercier Evelyne pour son efficacité et son amabilité rayonnante. Ma reconnaissance va également aux doctorants que j'ai pu encadrer, qui ont su m'apporter au moins autant que je n'ai pu le faire. Enfin, j'adresse également ma reconnaissance aux enseignants du département Génie Electrique (en particulier Lulu, Shiqin, Claudine et Florin) et du Premier Cycle, pour leur amitié et la confiance qu'ils ont toujours eue en moi, avec une mention spéciale à Lulu pour son amitié extraordinaire et sa tolérance hors du commun face à mes plaisanteries et jeux de mots souvent douteux. J'en profite ici pour remercier également l'équipe du programme des Doubles Diplômes avec la Chine (Jean-Claude, Ben, Yuemin et Paolo), pour leur accueil chaleureux et les moments inoubliables passés avec eux notamment lors des missions de recrutement.

Enfin et non des moindres, je tiens ici à remercier profondément mes amis hors contexte professionnel et ma famille (en particulier mes parents et mon frère) pour leur soutien de tous les jours. Notamment, je dédie ce manuscrit à mon adorable épouse et notre tout aussi adorable petite Meylis, ma plus belle création et dont la naissance m'a permis de trouver un prétexte d'absence pour compléter la majeure partie de ce mémoire !

Et un grand pardon à tous ceux que j'aurai pu oublier !

# Résumé

Les avancées, plus ou moins récentes, dans le domaine des matériaux et dispositifs de conversion d'énergie à petite échelle ont permis un essor formidable des "systèmes et matériaux intelligents" (*smart materials and systems*), notamment dans les communautés académiques et scientifiques. Cependant, la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ces matériaux, ainsi que leur utilisation dans des applications réalistes suscitent toujours un grand nombre de questionnements. D'un point de vue purement scientifique, appréhender les phénomènes physiques permettant le lien entre un domaine physique et le domaine électrique permet de dégager des possibilités d'amélioration de la conversion, voire même de percevoir de nouvelles thématiques de recherche. D'un point de vue industriel, démontrer les capacités de ces matériaux dans différents domaines (contrôle de vibrations, récupération d'énergie, dispositifs auto-alimentés, contrôle de santé structurale...) est hautement nécessaire afin d'assurer un transfert et une utilité technologiques couronnés de succès, permettant de ne pas rendre stérile des années d'efforts scientifiques. En effet, malgré un engouement scientifique voire quelquefois médiatique sur ces types de matériaux et systèmes, les applications industrielles sont encore à l'état embryonnaires, malgré le montage de plusieurs *start-ups* (Arveni, Enerbee...) et la mise en place de projets dans les grands groupes sur cette thématique. Ainsi, comme analysé par le Professeur Lionel PETIT, l'avenir des matériaux et systèmes intelligents, dans de nombreux domaines, risque de prendre le même chemin que les moteurs piézoélectriques, avec un engouement scientifique important mais très peu de retombées industrielles au final<sup>i.1</sup>. Dès lors, afin d'éviter un tel scénario de se produire, il convient concernant ce type de matériaux et systèmes d'assurer une synergie entre recherche scientifique appliquée et problèmes industriels, en dégageant de grands questionnements scientifiques de ces derniers afin de faire à la fois avancer les connaissances scientifiques et en faire émerger de nouveaux concepts, et d'assurer que ces recherches ne soit pas vaines et servent le bien-être général.

C'est dans ce cadre que s'inscrivent mes travaux entrepris en tant que Maître de Conférences à l'Institut National des Sciences Appliquées de l'INSA de Lyon (INSA Lyon), et plus particulièrement dans le Laboratoire de Génie Electrique et Ferro-électricité (LGEF) pour l'aspect recherche, et au Département de Génie Electrique (GE) pour la partie enseignement.

C'est au sein de ce laboratoire qu'a également été effectuée ma thèse de doctorat, de Novembre 2006 à Novembre 2008, sur le domaine du contrôle de santé structu-

---

i.1. On pourra toutefois noter un récent regain d'intérêt pour la technologie piézoélectrique appliquée aux moteurs, notamment pour les systèmes miniaturisés tels que les systèmes de focus d'appareils photographiques dans les téléphones portables.

rale auto-alimenté en aéronautique, dans le cadre du projet Européen *FP6 ADVICE*, suivie d'un poste d'ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche), toujours au LGEF (avec des enseignement au département GE), jusqu'en Mars 2009. Ensuite, de Mars 2009 à Août 2009, j'ai pu travailler sur une thématique similaire (mais appliquée au Génie Civil) dans le cadre d'un post-doctorat effectué au *Center for Intelligent Materials, Systems and Structures (CIMMS)* à l'Ecole Polytechnique de Virgnie (Virginia Tech.) aux Etats-Unis. Enfin, depuis 2009, j'exerce une activité d'enseignant-chercheur en tant que Maître de Conférences à l'INSA, incluant toujours les thématiques de systèmes intelligents, mais élargissant ces derniers aux polymères électroactifs et aux couplages électrothermiques. De plus, l'aspect modélisation des phénomènes physiques permettant de décrire les lois de comportement des matériaux électroactifs et devenu une activité à part entière du travail de recherche.

Ainsi, ce manuscrit propose, modestement, un état de mes activités de recherche (et, plus modestement encore, des activités pédagogiques et diverses responsabilités jusqu'à ce jour). Après curriculum vitae présentant un résumé des activités de recherche et d'enseignement ainsi que des différentes responsabilités prises au cours de ce début de carrière, le Chapitre I se propose de faire un court état de l'art sur les matériaux et systèmes électroactifs, à la fois d'un point de vue matériaux et systèmes. Après ce chapitre introductif, les parties suivantes ont été découpées selon le type couplage étudié, plutôt que de l'application, afin de montrer les différentes possibilités d'une seule et même famille de matériaux. Cette approche permet également une progression selon le niveau de maturité de l'effet de conversion. Ainsi, le Chapitre II s'attardera sur la modélisation et l'utilisation de matériaux piézo-électriques, dont le sujet est relativement avancé, avec une partie de modélisation des éléments ferroélectriques (et plus particulièrement le caractère hystérétique et le comportement dynamique de ces derniers), puis leur application au contrôle vibratoire et à la récupération d'énergie. Le Chapitre III s'intéressera quant à lui aux polymères électrostrictifs, constituant à l'heure actuelle un domaine émergent ; ces derniers, de part leur flexibilité, étant mieux adaptés aux structures présentant de fortes déformations à basse fréquence. La modélisation de l'effet électrostrictif direct et inverse, et plus particulièrement l'exposition des principes physiques gouvernant le mécanisme d'électrostriction permettant de lier les grandeurs et paramètres microscopiques à ceux locaux puis macroscopiques, sera suivie de l'application de ces matériaux à la récupération d'énergie. Le Chapitre IV, plus prospectif, exposera des champs de recherche connexes dans le cadre des dispositifs de récupération d'énergie, considérant des couplages différents que ceux exposés précédemment. En particulier ce chapitre considérera l'amélioration des capacités de conversion et de récupération d'énergie d'éléments électrostatiques et l'étude de nouvelles voies de conversion électrothermique via l'utilisation de polymères électrostrictifs ou de matériaux ferromagnétiques. Enfin, après une conclusion exposée au Chapitre V retraçant les avancées scientifiques durant la période considérée et leur potentialité d'application, le Chapitre VI propose de discuter des avens des activités scientifiques dans le domaine ainsi que de dégager quelques pistes d'études futures et de prises de responsabilités. On notera également la présence des Annexes A et B qui exposeront le choix des sources et des effets de conversion pour la conception d'un dispositif de récupération d'énergie, ainsi que de son intégration dans un système auto-alimenté.

# Curriculum vitae - Activités scientifiques, pédagogiques et administratives

*Cette partie propose une vue d'ensemble des différentes activités, qu'elles soient de recherche, d'encadrement, pédagogiques ou administratives, ainsi que du parcours et des thématiques abordées depuis l'obtention du doctorat.*

# 1 Curriculum vitae

## Mickaël LALLART

### Etat Civil

Né le 18 septembre 1983 (32 ans)  
Nationalité française  
Marié, 1 enfant

### Coordonnées personnelles

8, rue Edouard VAILLANT  
69100 VILLEURBANNE  
Tél. : +33 (0)6 84 19 62 15

### Coordonnées professionnelles

LGEF INSA Lyon  
8, rue de la Physique  
69621 VILLEURBANNE Cedex  
Tél. : +33 (0)4 72 43 74 28  
E-mail : mickael.lallart@insa-lyon.fr

## MAÎTRE DE CONFERENCES

Qualifié dans les sections CNU 28, 60, 62 et 63

### Situation actuelle

---

#### Maître de Conférences à l'INSA de Lyon

*Département de rattachement :* **Génie Electrique - Enseignements :** Electronique analogique et non-linéaire, conversion électro-active, modélisation Matlab, Physique (au Département du Premier cycle).

*Laboratoire de rattachement :* **Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité - Thématiques abordées :** conversion électro-active, récupération d'énergie ambiante, contrôle vibratoire, dispositifs auto-alimentés, modélisation de lois de comportements.

### Formation

---

#### 2006-2008 : Thèse de doctorat en Génie Electrique

*Intitulé :* Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie - Application au contrôle de santé structurale auto-alimenté

*Domaine :* Electronique, Electrotechnique et Automatique (spécialité Energie et Systèmes)

*Ecole :* INSA de Lyon

*Laboratoires d'accueil :* Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF), EA 682 / Laboratoire MATÉriaux : Ingénierie et Science (MATEIS), UMR 5510

*Encadrants :* Pr. Daniel GUYOMAR (Professeur à l'INSA de Lyon), Dr. Thomas MONNIER (Maître de Conférences à l'INSA de Lyon)

*Composition du Jury :*

Rapporteurs Pr. Bertrand NOGAREDE - Professeur à l'ENSEEIH de Toulouse

Pr. Daniel ROYER - Professeur à l'Université Paris 7

Président Pr. Roger OHAYON - Professeur au CNAM de Paris

Examineurs Pr. Skandar BASROUR - Professeur à l'Université J. Fourier de Grenoble

Dr. Stéphane MENIO - Responsable R&T à Goodrich Actuation Systems

Directeur et co-directeur Pr. Daniel GUYOMAR - Professeur à l'INSA de Lyon

Dr. Thomas MONNIER - Maître de Conférences à l'INSA de Lyon

Invités Dr. Adrien BADEL - Maître de Conférences à l'Université de Savoie

Ir. David DUMAS - Ingénieur de recherche à CENAERO

**2001-2006 : Etudes d'ingénieur** à l'INSA de Lyon (diplômé avec les félicitations du Jury) - *Département de spécialité (2003-2006) :* Génie Electrique - 5<sup>ème</sup> année en échange académique à Trinity College Dublin (Irlande)

### Expériences professionnelles

---

**Depuis septembre 2009 : Maître de Conférences** à l'INSA de Lyon

**2009 : Post-doctorat** (assistant de recherche) au Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech. - USA) sur le contrôle de santé structurale auto-alimenté d'infrastructures civiles.

**2008-2009 : ATER complet** (6 mois) à l'INSA de Lyon (Dpt. Génie Electrique - Laboratoire LGEF)

**2006-2008 : Vacations** au Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon : Travaux Dirigés et Travaux Pratiques d'électronique (niveau L3) ; Projets de Réalisation Technique (niveau M1)

**2006-2008 : Doctorat** à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

**2006 :** Poste d'**assistant de recherche** (2 mois) au CTVR de Trinity College Dublin

**2005-2006 : Enseignement** (soutiens), niveau L3 et M1 (Dpt. Génie Electrique - INSA de Lyon) - Encadrement de Projets de Réalisation Technique (niveau M1)

**2000-2005 :** Emplois intérimaires, stages ouvrier (2002) et ingénieur (2005 - au laboratoire LGEF)

# CURRICULUM VITAE - ACTIVITES SCIENTIFIQUES, PEDAGOGIQUES ET ADMINISTRATIVES

---

## Activités scientifiques et d'encadrement

---

- **Production scientifique (depuis 2006)** : 67 publications dans des revues à comité de lecture, 51 communications dans des conférences internationales avec actes (dont 7 invitées à titre personnel incluant 2 plénières), 1 livre, 8 éditions d'ouvrage, 9 sections d'ouvrage, 3 brevets. *h-index* : 16 (*Web of knowledge*) / 20 (*Google Scholar*)
- **Bénéficiaire de la Prime d'Excellence Scientifique** depuis 2013.
- **Encadrement de 5 étudiants en Doctorat** :
  - Yi-Chieh WU (2010-2013), *Energy Harvesting and Conversion Optimization from a Practical Perspective*
  - Linjuan YAN (2010-2013), *Broadband Vibration Control using Nonlinearly Interfaced Piezoelectric Elements and structures*
  - Liuqing WANG (2011-2014), *Development of energy harvesting systems based on new electroactive materials and structures*
  - Bin BAO (débutée en 2013), *Distributed, Broadband Vibration Control Devices using Nonlinear Approaches*
  - Thomas HUGUET (débutée en 2016), *Systèmes et techniques innovants pour la récupération d'énergie vibratoire non-linéaire large bande*
- **Encadrements de 4 étudiants en Master et 3 stagiaires doctoraux**
- **Membre de 8 Jurys de thèse (dont 1 en tant que rapporteur en Italie) et 2 Jurys de mi-thèse** (dont 1 aux USA).
- **Membre du comité consultatif de rédaction** des revues Recent Patents on Electrical Engineering (Bentham Science Publisher), Journal of Engineering (Hindawi), Shock and Vibrations (Hindawi), Energy Harvesting Systems (De Gruyter).
- **Editeur invité** d'un numéro spécial sur la conférence IWPMA 2012 de la revue "Sensors and Actuators A : Physical" (Elsevier).
- **Editeur invité** d'un numéro spécial sur les circuits de récupération d'énergie de la revue "Energy Harvesting Systems" (De Gruyter).
- **Relecteur de plus de 150 manuscrits pour plus de 15 journaux** (édités par AIP, Bentham, De Gruyter, Elsevier, IEEE, IOP, MDPI et SAGE).
- **Auteur d'un ouvrage** sur le contrôle de vibrations, la récupération d'énergie et le contrôle de santé structurale, édité par Les Editions Universitaires Européennes.
- **Editeur technique** de deux ouvrages sur le contrôle de vibrations (Sciyo) et la récupération d'énergie (Intech), et d'une collection d'ouvrages (4 volumes) sur les matériaux ferroélectriques, publiée par Intech.
- **Co-organisateur** de la conférence AMPSECA 2012 (1<sup>ère</sup> édition), sur la photonique et la conversion d'énergie.
- **Co-organisateur** de la Conférence JNRSE 2012, sur la récupération et le stockage de l'énergie.
- **Organisateur** de la "PowerMEMS School 2016", sur les dispositifs de conversion d'énergie.
- **Membre du comité d'organisation** des conférences "Energy Harvesting Workshop" depuis 2015.
- **Président de sessions** dans 4 conférences internationales (IWPMA 2012, AMPSECA 2012, IWPMA 2014, EHW 2015) et 2 conférences nationales (JNRSE 2014, JNRSE 2015).
- **Chercheur invité pour 2 présentations** (2012 et 2013) au centre INTEL de la National Taiwan University.
- **Membre élu du vivier d'experts de l'INSA (63<sup>ème</sup> section)** (depuis 2012), et participation dans ce cadre à des commissions de recrutement de Maîtres de Conférences.
- **Membre élu du conseil de laboratoire.**
- **Expert pour le recrutement aux concours des personnels Ingénieurs et personnels Techniques de Recherche et de Formation (ITRF).**
- **Expert pour l'Observatoire des Micro et Nano Technologies (OMNT).**
- **Responsable des Doubles Diplômes** au Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon (depuis 2014).
- **Responsable des Missions à l'Etranger** de la filière Apprentissage du Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon (depuis 2014).
- **Responsable de l'option "Conversion de l'Energie Electrique"** au Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon (depuis 2015).
- **Responsabilités de modules d'enseignements** au Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon.
- **Porteur (côté français) d'un projet ANR/MOST international France/Taiwan (PRCI)** sur la récupération d'énergie et les dispositifs auto-alimentés (2016-2019).
- **Porteur d'un projet INSA BQR** sur des dispositifs de suivi médical auto-alimentés (2016-2018).
- **Responsable (côté français) d'un Partenariat Hubert Curien (PHC)** avec l'université NTU à Taiwan dans le cadre du programme Orchid (2012/2013).
- **Responsable scientifique de projets industriels** (2014/2015 et 2015-2016).
- **Participation et responsabilités de tâches dans 6 projets industriels et 8 projets de recherche.**
- **Evaluateur de projets ANR et DOE-BES (Basic Energy Science)** du Département de l'Energie (USA).

## Distinctions reçues

---

- Finaliste de **The Siemens Innovative Engineer of the Year Award** (2006)
- Obtention du **Collen prize** de Trinity College Dublin (récompensant le meilleur projet de fin d'études - 2006)

## Divers

---

- **Langues** : Anglais (courant), allemand (niveau scolaire).
- **Informatique** : Matlab, Simulink, Latex, MS Office, PSpice, DSpace, programmation (C, Java, Basic).



## 2 Vue d'ensemble des activités

Le déroulement de la carrière d'un point de vue général, incluant les aspects de domaines de recherche, responsabilités (dont notamment les projets), encadrement et enseignements, est représenté en Figure CV.1. On notera notamment une extension du domaine de la recherche aux polymères électrostrictifs, suite à l'addition de cette thématique dans la stratégie de recherche du laboratoire, se déclinant en la récupération d'énergie vibratoire utilisant ces matériaux, axe débuté dans le cadre de la thèse de Pierre-Jean COTTINET (2008-2009), et en la modélisation des lois de comportement des polymères électrostrictifs, en collaboration avec Jean-Fabien CAPSAL, Maître de Conférences au laboratoire depuis 2010.

Concernant les responsabilités scientifiques, outre les différentes expertises (63<sup>ème</sup> section, OMNT, ITRF, évaluateur de projets...) et responsabilités en tant qu'éditeur et membre du comité consultatif de rédaction de journaux, ainsi que de parties de projets, il peut être noter la responsabilité en tant que porteur d'un Partenariat Hubert Curien (PHC) avec la National Taiwan University. Ce partenariat a par la suite débouché sur un projet commun dans le cadre d'appel ANR/MOST<sup>CV.1</sup> (LGEF : 167,5 k€ ; ANR : 313 k€ ; total : 533 k€), pour lequel je suis porteur côté français (partenaires : LGEF (académique - France), NTU (académique - Taïwan), LTDS (académique - France), NTHU (académique - Taïwan), SimTrans (industriel - Taïwan), SKF (industriel - France)). Ce dernier projet vise en l'élaboration d'un microgénérateur complet, incluant une optimisation globale du système allant de l'aspect matériaux (fabrication d'un transducteur millimétrique performant à partir de techniques MEMS) à l'aspect électronique (interface de récupération non-linéaire), en passant par le domaine mécanique, pour lequel l'inclusion et l'étude de non-linéarités dans l'optique d'augmenter la bande passante du système sont envisagées. Le projet inclut également une démonstration de dispositifs auto-alimentés, avec le développement d'un capteur de pression auto-alimenté et de roulements intelligents. Un projet INSA BQR<sup>CV.2</sup> en tant que porteur sur le suivi médical à distance auto-alimenté a également été obtenu et a débuté en 2016, en collaboration avec les laboratoires INL (Institut des Nanotechnologies de Lyon), CITI (Centre of Innovation in Telecommunications and Integration of service) et Ampère.

Enfin, l'activité se compose également de recherches plus centrées sur le transfert technologique avec la responsabilité des projets industriels Shak Moov' (19,2 k€) et SKF (20 k€) dans le cadre de contrats de collaboration. La grande majorité des projets ont trait à la récupération d'énergie vibratoire et aux dispositifs auto-alimentés.

D'un point de vue encadrement, jusqu'à 3 thèses ont été encadrées simultanément, chacune ayant produit au moins 3 articles de recherche scientifique dans des Revues Internationales à Comités de Lecture. On pourra également noter qu'une bourse région ARC Energie a été obtenue, en collaboration avec M. Adrien BADEL, Maître de Conférences au laboratoire SYMME de l'Université Savoie-Mont-Blanc, qui débouche sur un financement de thèse (Thomas HUGUET) couvrant la période Octobre 2015 - Septembre 2018 (thèse débutée en Janvier 2016). Ainsi, cela porte au

---

CV.1. agence de recherche taïwanaise

CV.2. Bonus Qualité Recherche

# CURRICULUM VITAE - ACTIVITES SCIENTIFIQUES, PEDAGOGIQUES ET ADMINISTRATIVES

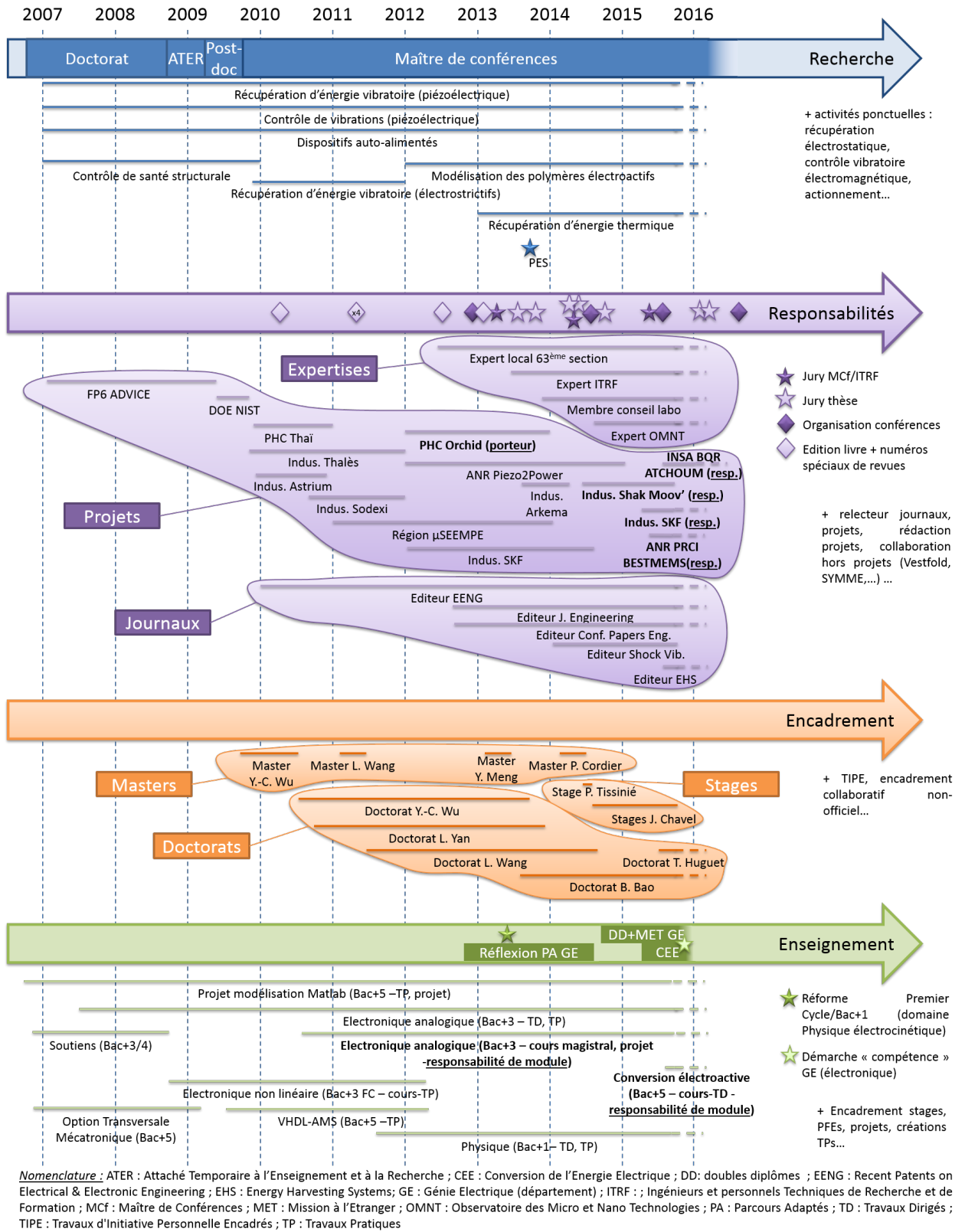


Figure CV.1 – Vue d'ensemble des activités.

nombre de 5 thèses encadrées. A ceci devrait s'ajouter, à partir de Septembre 2016, l'arrivée de M<sup>me</sup> Kritsadi THETPRAPHI, dont le projet s'articulera sur l'étude des couplages et applications des polymères électroactifs, et dont la thèse sera financée par le gouvernement thaïlandais à travers la bourse DPST (Development and Promotion of Science and Technology Talents Project) ainsi que Campus France via la bourse Franco-Thaï.

Enfin, d'un point de vue enseignement, en plus de la responsabilité du module "Electronique et Capteur 2" au sein du Département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon, on pourra noter des vacances au Premier Cycle de l'INSA (cycle préparatoire intégré de l'Institut - niveaux L1 et L2)<sup>CV.3</sup>. On notera une volonté forte d'investissement dans la vie pédagogique de l'Institut, avec la menée d'une réflexion sur la mise en place de Parcours Adaptés (désormais *P2I* - Parcours Pluridisciplinaires d'initiation à l'Ingénierie) faisant le lien entre Premier Cycle et Départements de spécialité ainsi que la participation à la démarche "compétence" (pour les modules d'électronique) du département Génie Electrique, ainsi que la prise de responsabilité au sein de ce département par la gestion des Doubles Diplômes (entrants et sortants) de la filière classique, des Missions à l'Etranger de la filière apprentissage, et de l'option de 5<sup>ème</sup> année "Conversion de l'Energie Electrique", cette dernière représentant un volume horaire de 180 heures de face-à-face, et incluant l'intervention d'acteurs industriels et scientifiques externes.

### 3 Activités de recherche

Les travaux de recherche menés depuis la thèse ont principalement porté sur l'utilisation de **couplages multiphysiques**, notamment des effets piézoélectriques, pyroélectriques et électrostrictifs, ainsi que le développement de méthodes simples et peu coûteuses d'**amélioration des capacités de conversion** de ces matériaux électroactifs et la modélisation de ces derniers. Quatre champs d'application principaux ont ainsi été étudiés :

**Récupération d'énergie ambiante :** le but de cet axe de recherche consiste à utiliser les matériaux électroactifs afin de pouvoir convertir l'énergie ambiante (vibrations, chaleur...) sous forme électrique, permettant de disposer d'un microgénérateur apte à alimenter des dispositifs électroniques. L'optimisation de ces microgénérateurs, que ce soit en termes de puissance récupérée ou d'indépendance à la charge ou à la fréquence, occupe une place prépondérante de cette thématique (thèses de Yi-Chieh WU et Thomas HUGUET par exemple), notamment par l'utilisation de techniques non-linéaires simples pouvant même être auto-alimentées. Initialement appliquée aux matériaux piézoélectriques, cette thématique a été élargie aux polymères électrostrictifs suite à une réorientation des activités matériaux du laboratoire en 2006 et dans le cadre de la thèse de Pierre-Jean COTTINET, ainsi que, dans une moindre mesure, aux systèmes électrostatiques et électromagnétiques, notamment dans le cadre de

---

CV.3. avec, dans le contexte de la réforme des lycées, la participation à la refonte du module de Physique

la thèse de Liuqing WANG.

**Contrôle vibratoire :** le principe consiste ici à utiliser les matériaux électroactifs convertissant l'énergie mécanique en énergie électrique afin de limiter les vibrations pouvant endommager la structure ou d'améliorer le confort des utilisateurs. D'autres méthodes, consistant à contrôler certains paramètres mécaniques comme la raideur, ont pu également être développées. Actuellement, un axe de recherche important (thèses de Linjuan YAN et Bin BAO) consiste à utiliser des réseaux de matériaux piézoélectriques, par exemple organisés en structures périodiques, pour pouvoir être capable de limiter les vibrations sur un large spectre. Là encore, cette thématique est teintée d'une volonté forte de simplicité et de bas coût énergétique des techniques (à l'aide d'approches non-linéaires), ainsi que de leur réalisme en termes d'applications industrielles. Ce dernier point explique notamment en partie la mise de côté de la recherche sur la récupération d'énergie à l'aide de polymères électrostrictifs ; la nécessité de polarisation de ces derniers étant un frein à leur application.

**Contrôle de santé structurale :** contrairement aux deux points précédents, cette thématique s'attarde plus sur le traitement du signal issu d'un capteur que des capacités de conversion des matériaux électroactifs à proprement parler. Néanmoins, l'aspect énergétique est également fortement présent de par la volonté de développer des algorithmes simples dans l'optique de systèmes auto-alimentés. L'axe de recherche en termes de contrôle de santé structurale se décompose en deux sous-thématiques. La première consiste à utiliser des ondes de Lamb émises volontairement par un autre transducteur. Un traitement simple de la signature de ces ondes permet par la suite d'avoir une image de l'évolution de l'état de la structure. Le second axe de cette thématique est l'élaboration de méthodes simples et peu coûteuses de détection et quantification d'impacts, par une estimation de l'énergie ayant transitée dans une zone particulière. Cependant, faute d'intérêt industriel fort et du fait du départ de Thomas MONNIER, chargé de cette thématique au sein du laboratoire, cet axe de recherche a été suspendu.

**Modélisation des polymères électrostrictifs et des matériaux ferroélectriques :** La réorientation de l'activité matériaux du laboratoire vers les polymères électrostrictifs en 2006, ainsi que l'arrivée de Jean-Fabien CAPSAL en tant que Maître de Conférences en 2010, ont orienté une partie de ma recherche vers la modélisation des phénomènes physiques à l'origine de l'électrostriction. Ainsi, une analyse utilisant le formalisme de Debye-Langevin couplée avec une approche statistique de Boltzmann a permis de mettre en évidence le lien entre les paramètres microscopiques et ceux locaux décrivant le couplage électrostrictif, en considérant que ce couplage se fait via des forces d'attraction de Maxwell. Cette analyse du couplage direct (électrique vers mécanique) a permis de mettre en avant des voies d'optimisation des polymères électrostrictifs, conduisant au développement d'actionneurs à forte déformation. Par la suite, la modélisation du couplage inverse (mécanique vers électrique), en considérant que l'effet électrostrictif est du dans ce cas à une rotation des seg-

ments de macromolécule permettant une meilleure polarisabilité, a confirmé l'approche précédemment prise, avec les mêmes expressions des coefficients d'électrostriction que ceux obtenus dans la modélisation du couplage direct. Actuellement, la recherche sur cette thématique consiste à modéliser le comportement hystérétique de certains polymères ferroélectriques et/ou ferromagnétiques, par l'utilisation d'approches dérivées de techniques utilisées pour les céramiques piézoélectriques (dérivées fractionnaires par exemple).

La combinaison des deux voire des trois premières thématiques a également été un champ de recherche prépondérant, notamment pour le développement de systèmes de contrôle non-destructifs utilisant les vibrations comme source d'énergie, dans le cadre du projet européen ADVICE, du projet industriel SKF ou d'un projet américain DOE-NIST <sup>CV.4</sup> par exemple.

La répartition des thématiques de recherche en termes de publication et de projets sur toute la carrière, est représentée en Figure CV.2. On remarque ainsi une large prépondérance de la thématique de récupération d'énergie en termes de publications, et, malgré la jeunesse de cette thématique, un certain nombre de publications sur la modélisation des éléments électrostrictifs. D'un point de vue des projets, on remarque que les dispositifs auto-alimentés occupent une place non négligeable, notamment dans le milieu industriel (d'un point de vue public, l'analyse de la conversion en amont est également très présente), montrant ainsi la volonté de transfert industriel (à la fois des acteurs scientifiques et industriels) et la volonté de démonstration de la faisabilité de tels systèmes.

L'activité scientifique se traduit de plus par l'encadrement officiel de 5 thèses, dont 3 terminées :

**Yi-Chieh WU** (co-encadrement à 50 % avec le Professeur Claude RICHARD - Financement ministériel - Ecole Doctorale MEGA <sup>CV.5</sup>), dont la thèse portait sur la récupération d'énergie large bande et sa modélisation. M<sup>me</sup> WU est actuellement en poste dans le groupe BASF en Allemagne. Publications :

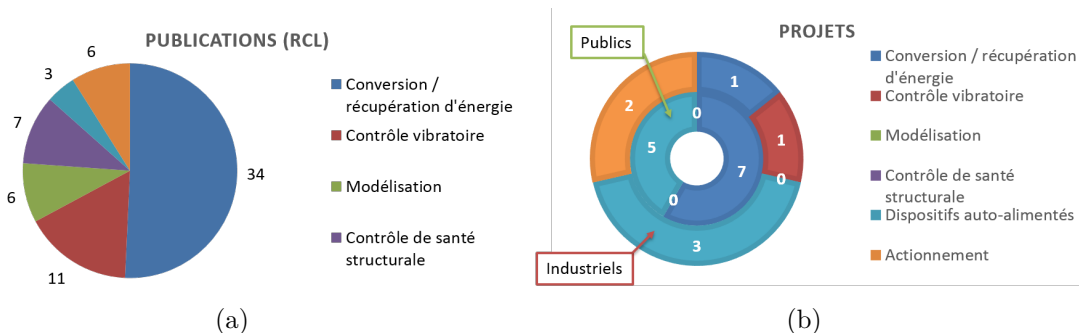


Figure CV.2 – Répartition des thématiques de recherche : (a) en nombre de publications dans des Revues Internationales à Comité de Lecture ; (b) en nombre de projets (industriels et de recherche publique).

CV.4. dans le cadre du post-doctorat

CV.5. Mécanique - Energétique - Génie civil - Acoustique

[RICL-45], [RICL-50], [RICL-51], [RICL-53], [RICL-59], [RICL-58], [CIA-45].

**Linjuan YAN** (co-encadrement à 50 % avec le Professeur Daniel GUYOMAR - Financement CSC<sup>CV.6</sup> - Ecole Doctorale EEA<sup>CV.7</sup>), dont la thèse portait sur le contrôle de vibrations large bande. M<sup>me</sup> YAN est actuellement en recherche d'emploi après un post-doctorat au laboratoire SYMME à l'Université Savoie-Mont-Blanc, en association avec l'UTC. Publications : [RICL-50], [RICL-51], [RICL-52], [RICL-62], [RICL-65], [RICL-67], [CIA-42], [CIA-45], [CIA-45].

**Liuqing WANG** (co-encadrement à 50 % avec le Professeur Lionel PETIT - Financement CSC<sup>CV.6</sup> - Ecole Doctorale EEA<sup>CV.7</sup>), dont la thèse portait sur de nouvelles sources et technique pour la récupération d'énergie. M<sup>me</sup> WANG est actuellement en reconversion académique en Angleterre. Publications : [RICL-56], [RICL-57], [CIA-43].

**Bin BAO** (co-encadrement à 50 % avec le Professeur Daniel GUYOMAR - Financement CSC<sup>CV.6</sup> - Ecole Doctorale EEA<sup>CV.7</sup>), dont la thèse porte sur le contrôle de vibrations large bande, dans la continuité des travaux initiés par Linjuan YAN. M. BAO est poursuit actuellement son doctorat au LGEF et sa soutenance est prévue en Septembre 2016. Publications : [RICL-67], [CIA-49] + 2 articles soumis.

**Thomas HUGUET** (co-encadrement à 50 % avec le Docteur Adrien BADEL (Laboratoire SYMME - Université de Savoie/Mont-Blanc) et le Professeur Lionel PETIT - Financement Région ADR / ARC 4 Energie - Ecole Doctorale EEA<sup>CV.7</sup>), débutée en Janvier 2016, dont le projet porte sur les systèmes de récupération d'énergie mécanique non-linéaires large bande.

A ceci s'ajoutent des encadrements ponctuels de doctorants et stagiaires doctoraux (Pierre-Jean COTTINET - [RICL-23], [RICL-29], [RICL-31], [RICL-34], [RICL-38], [CIA-23], [CNA-3] -, Prissana RAKBAMRUNG<sup>CV.8</sup> - [RICL-25] -, Pisan SUKWISUT<sup>CV.8</sup> - [RICL-42] - et Ya-Shan SHI<sup>CV.9</sup> - [CIA-46]) ainsi que d'étudiants Masters (Yi-Chieh WU dans le cadre d'une Bourse Erasmus Mundus - [RICL-56] -, Liuqing WANG dans le cadre d'une bourse CSC<sup>CV.6</sup> - [RICL-60] -, Ye MENG dans le cadre du contrat industriel SKF et Pierre CORDIER<sup>CV.10</sup> dans le cadre du projet ANR Piezo2Power). Enfin, j'ai également participé à plusieurs Jurys de thèse (3 en tant que co-encadrant pour M<sup>mes</sup> Yi-Chieh WU, Linjuan YAN et Liuqing WANG, 1 en tant que rapporteur pour M<sup>me</sup> Marta BERARDENGO (Politecnico di Milano)<sup>CV.11</sup>, 3 en tant qu'examinateur pour M<sup>me</sup> Dan WU (INSA Lyon), M. Weiqun LIU (Université de Savoie-Mont Blanc), M. Ollin Alan LUNA CORNEJO

---

CV.6. Chinese Scholarship Council

CV.7. Électronique, Électrotechnique et Automatique

CV.8. dans le cadre du PHC Thai avec la Prince of Songkla University

CV.9. dans le cadre du PHC Orchid avec la National Taiwan University

CV.10. Lauréat du prix AAUL doté par CENTRALP concernant son stage de Master

CV.11. Thèse de doctorat italien, ne nécessitant pas l'Habilitation à Diriger des Recherches pour être rapporteur.

(Université de Bordeaux) et 1 en tant qu'invité pour M. Yipeng WU).

## 4 Activités pédagogiques

*Nota : dans la suite, le niveau d'étude sera indexé par rapport au cursus INSA. Ainsi, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> années correspondent respectivement à la 1<sup>ère</sup>, 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> années du Département de Génie Electrique (niveau L3, M1 et M2).*

Les enseignements effectués durant la première période de la carrière se sont exclusivement déroulés au sein du département de Génie Electrique de l'INSA de Lyon, à l'exception de cours de formation continue INSACAST, ces derniers étant néanmoins gérés par l'équipe enseignante du département.

L'intervention pédagogique est fortement colorée par le module d'électronique, de part la prise en charge de Travaux Dirigés d'électronique analogique en 3<sup>ème</sup> année, l'intervention en Travaux Pratiques d'électronique analogique (3<sup>ème</sup> année), mini-projets (3<sup>ème</sup> année) et VHDL-AMS (5<sup>ème</sup> année) et l'enseignement de l'électronique non linéaire pour le cycle spécifique de la formation DUT+3 (correspondant à un niveau de 3<sup>ème</sup> année); ces deux derniers cours n'étant plus désormais enseignés du fait de l'arrêt de la filière DUT+3<sup>CV.12</sup> et de la refonte du module VHDL.

A ceci s'ajoute également la prise en charge d'un projet de modélisation MATLAB de systèmes électroactifs pour les étudiants de 5<sup>ème</sup> année suivant l'option CEE (Conversion de l'Energie Electrique), ainsi que le suivi de stagiaires de 4<sup>ème</sup> année et d'étudiants en PFE (Projet de Fin d'Etude).

Par la suite, une évolution naturelle vers la responsabilité du second module d'électronique analogique de 3<sup>ème</sup> ("Electronique et Capteurs 2") s'est opérée, expliquée par la prise en charge du cours magistral de ce module, en plus des mini-projets intégrés à celui-ci<sup>CV.13</sup>

Enfin, en 2011, suite à un manque d'enseignants titulaires au Premier Cycle, je me suis naturellement porté volontaire pour dispenser des TDs et TPs d'électrostatique et d'électrocinétique aux étudiants de 1<sup>ère</sup> année, ceci permettant de faire un lien intéressant avec le Département de Génie Electrique ainsi qu'avec la nouvelle thématique de recherche portée sur la modélisation des éléments électrostrictifs et le lien entre paramètres microscopiques et locaux. Ces interventions au Premier Cycle se sont également traduits par une participation active à la refonte des enseignements engendrée par la réforme des lycées, pour laquelle j'ai participé à la construction du nouveau programme, et ai rédigé un chapitre complet de cours. Du fait de cette réforme, l'enseignement au Premier Cycle s'est traduit par des TDs et TPs de mécanique et d'électromagnétisme. Cependant, du fait de la limitation des heures supplémentaires liée à l'obtention de la Prime d'Excellence Scientifique (désormais PEDR) imposée par l'INSA, je n'enseigne désormais plus que la partie électromagnétisme.

Enfin, depuis 2015, je suis également responsable de l'option de 5<sup>ème</sup> année "Conversion de l'Energie Electrique" (CEE), adressée à une groupe d'une vingtaine

---

CV.12. remplacée par la filière alternance

CV.13. Ce module était initialement enseigné au premier semestre, mais une réforme menée dans le cadre des modules d'électronique analogique de 3<sup>ème</sup>, préférant l'approche *bottom-up* (c'est-à-dire du composant au système) l'a rapidement déplacé au second semestre.

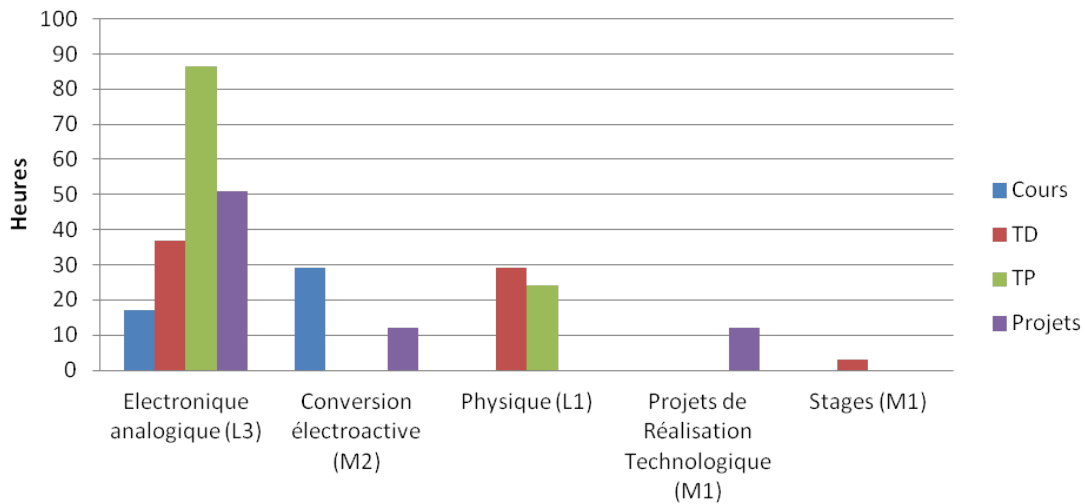


Figure CV.3 – Répartition actuelle des enseignements.

d'étudiants, issus des filières classique et alternance, pour un total de 180 heures de face-à-face annuel dont une moitié environ assurée par des intervenants extérieurs industriels. Cette prise de responsabilité s'est immédiatement accompagnée de la réforme d'un des trois modules de l'option, expliquée par le départ d'un des enseignants. En plus du projet de modélisation précédemment exposé, un cours sur les matériaux électroactifs d'une durée de 19 heures a été mis en place.

Ainsi, actuellement, le découpage des enseignements est représenté en Figure CV.3. On voit ainsi une prépondérance des enseignements d'électronique en 3<sup>ème</sup> année, suivi des interventions en Physique au Premier Cycle, puis dans l'option CEE en 5<sup>ème</sup> année.

En complément des enseignements purs, des responsabilités ont également été prises tout au long de la carrière. En plus de la responsabilité de modules et les participations et responsabilités pour des refontes de programmes précédemment évoquées, j'ai pris en 2014 la responsabilité de la gestion des Doubles Diplômes entrants et sortants du Département de Génie Electrique, avec par exemple, en plus de la gestion journalière des étudiants enrôlés dans les différents programmes, la participation au recrutement d'étudiants en Chine pour suivre un cursus en GE. Cet aspect international a été très vite conforté par la prise de responsabilité de la Mission à l'Etranger pour la filière alternance, consistant à un stage de 60 jours minimum pour les étudiants en alternance.

## 5 Autres activités et activités administratives

En plus des actions de recherche et d'enseignements et des responsabilités associées, d'autres activités ont également été exercées lors de la carrière. Dans un premier temps, des expertises, que ce soit en termes de relecture de manuscrits soumis à des Revues Internationales à Comité de Lecture (plus de 175 manuscrits



évalués pour 16 journaux) ou en termes de projets (ANR ou DOE-BES <sup>CV.14</sup>), ont été faites, notamment dans le cadre de l'Observatoire des Micro et Nano Technologies, organisme assurant une veille scientifique à l'échelle internationale à l'attention des chercheurs français. Dans ce cadre également, un exposé invité lors de la synthèse annuelle de 2014 de cet organisme a également été présenté. La participation à des comités de sélection de Maître de Conférences (suite à l'élection en tant qu'expert du vivier interne de la 63<sup>ème</sup> section CNU) ainsi que de personnels techniques et administratifs (ITRF) a également fait partie des tâches administratives accomplies lors de la carrière. Le rôle de Président du Jury sanctionnant l'obtention du baccalauréat a également été assumé en 2010. Enfin, je suis également membre élu du Conseil du Laboratoire depuis 2013.

Des responsabilités scientifiques hors des thématiques de recherche (ces dernières incluant par exemple l'encadrement de doctorants ou de stagiaires dans le cadre de la formation par la recherche) incluent aussi la participation à des comités consultatifs de rédaction (*Editorial Boards*) de 5 journaux internationaux à comité de lecture principalement axés sur les vibrations, l'électronique et la récupération d'énergie, ainsi que la prise de fonction d'éditeur pour 6 ouvrages. Enfin, j'ai également participé à l'organisation de 3 conférences (2 internationales et 1 nationales) et est actuellement en charge de l'organisation de la "PowerMEMS School 2016", qui se déroulera en complément de la conférence PowerMEMS en Décembre 2016. J'ai également pris le rôle de président de sessions dans différentes conférences nationales et internationales.

## 6 Liste des publications

### Revue Internationale à Comité de Lecture

---

- [RICL-1] A. Badel, G. Sebald, D. Guyomar, M. Lallart, E. Lefeuvre, C. Richard and J. Qiu, Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources : Towards wideband semi-active damping, *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5) : 2815-2825, 2006. doi : 10.1121/1.2184149
- [RICL-2] D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, C. Richard and M. Lallart, Synchronized Switch Harvesting applied to Self-Powered Smart Systems : Piezoactive Microgenerators for Autonomous Wireless Transmitters, *Sensors and Actuators A : Physical*, 138(1) : 151-160, 2007. doi : 10.1016/j.sna.2007.04.009
- [RICL-3] M. Lallart, E. Lefeuvre, C. Richard and D. Guyomar, Self-Powered Circuit for Broadband, Multimodal Piezoelectric Vibration Control, *Sensors and Actuators A : Physical*, 143(2) : 277-382, 2008. doi : 10.1016/j.sna.2007.11.017
- [RICL-4] M. Lallart, C. Magnet, C. Richard, E. Lefeuvre, L. Petit, D. Guyomar and F. Bouillault, New Synchronized Switch Damping Methods Using Dual Transformations, *Sensors and Actuators A : Physical*, 143(2) : 302-314, 2008. doi : 10.1016/j.sna.2007.12.001
- [RICL-5] M. Lallart and D. Guyomar, Optimized Self-Powered Switching Circuit for

---

CV.14. Département de l'Energie des Etats-Unis d'Amérique

- Non-Linear Energy Harvesting with Low Voltage Output, *Smart Materials and Structures*, 17 : 035030, 2008. doi : 10.1088/0964-1726/17/3/035030 (ranked among the top 30 read papers in 2008)
- [RICL-6] M. Lallart, D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, P. Guy, C. Richard, Synchronized Switch Harvesting applied to Selfpowered Smart Systems : Piezoactive Microgenerators for Autonomous Wireless Receiver, *Sensors and Actuators A : Physical*, 147(1) : 263-272, 2008. doi : 10.1016/j.sna.2008.04.006
- [RICL-7] T. Monnier, P. Guy, M. Lallart, L. Petit, D. Guyomar and C. Richard, Optimization of signal pre-processing for the integration of cost-effective local intelligence in wireless self-powered Structural Health Monitoring, *Advances in Science and Technology*, 56 : 459-468, 2008.
- [RICL-8] M. Lallart, A. Badel and D. Guyomar, Non-Linear Semi-Active Damping Using Constant Or Adaptive Voltage Sources : A Stability Analysis, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 19(10) : 1131-1142, 2008. doi : 10.1177/1045389X07083612
- [RICL-9] M. Lallart, L. Garbuio, L. Petit, C. Richard and D. Guyomar, Double Synchronized Switch Harvesting (DSSH) : A New Energy Harvesting Scheme for Efficient Energy Extraction, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 55(10) : 2119-2130, 2008.
- [RICL-10] D. Guyomar, M. Lallart and T. Monnier, Stiffness Tuning Using a Low-Cost Semi-Active NonLinear Technique, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13(5) : 604-607, 2008.
- [RICL-11] E. Lefeuvre, G. Sebald, D. Guyomar, M. Lallart and C. Richard, Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting, *Journal of Electroceramics*, 22(1-3) : 171-179, 2009. doi : 10.1007/s10832-007-9361-6
- [RICL-12] D. Guyomar, G. Sebald, S. Pruvost, M. Lallart, A. Khodayari and C. Richard, Energy Harvesting From Ambient Vibrations and Heat, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(5) : 609-624, 2009. doi : 10.1177/1045389X08096888
- [RICL-13] L. Garbuio, M. Lallart, D. Guyomar and C. Richard, Mechanical Energy Harvester with Ultra-Low Threshold Rectification Based on SSHI Non-Linear Technique, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(4) : 048-1056, 2009.
- [RICL-14] D. Guyomar, M. Lallart, T. Monnier, X.-J. Wang and L. Petit, Passive Impact Location Estimation Using Piezoelectric Sensors, *Journal of Structural Health Monitoring*, 8(5) : 357-367, 2009. DOI : 10.1177/1475921709102090
- [RICL-15] M. Lallart, S. Harari, L. Petit, D. Guyomar, T. Richard, C. Richard and L. Gaudiller, Blind Switch Damping (BSD) : A Self-Adaptive Semi-Active Damping Technique, *Journal of Sound and Vibration*, 329(1-2) : 29-41, 2009.
- [RICL-16] M. Lallart, T. Monnier and D. Guyomar, Energy Efficient Method for Embedded In-Situ Structural Health Monitoring, *Journal of Structural Health Monitoring*, 9 : 87-98, 2010.
- [RICL-17] M. Lallart, L. Garbuio, C. Richard and D. Guyomar, High Efficiency, Low-Cost Capacitor Voltage Inverter for Outstanding Performances in Piezoelec-

- tric Energy Harvesting, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 57(2) : 281-291, 2010.
- [RICL-18] X.-J. Wang, D. Guyomar, K. Yuse, M. Lallart and L. Petit, Impact force detection using an energy flow estimator with piezoelectric sensors, *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 5(2) : 1673-3479, 2010.
- [RICL-19] D. Guyomar, M. Lallart, K. Li, J.-Y. Gauthier and T. Monnier, A Self-synchronizing and low-cost SHM scheme based on zero crossing detection, *Smart Materials and Structures*, 19(4) : 045017, 2010.
- [RICL-20] M. Lallart, S. R. Anton and D. J. Inman, Self-Tuned Electromechanical Resonator for Broadband Vibration Energy Harvesting, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(9) : 897-906, 2010.
- [RICL-21] M. Lallart and D. J. Inman, Low-Cost Integrable Tuning-free Converter for Piezoelectric Energy Harvesting Optimization, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25 (7) : 1811-1819, 2010.
- [RICL-22] M. Lallart and D. Guyomar, Piezoelectric conversion and energy harvesting enhancement by initial energy injection, *Applied Physics Letters*, 97, 014104, 2010.
- [RICL-23] M. Lallart, P.-J. Cottinet, L. Lebrun, B. Guiffard and D. Guyomar, Evaluation of energy harvesting performance of electrostrictive polymer and carbon-filled terpolymer composites, *Journal of Applied Physics*, 108, 034901, 2010.
- [RICL-24] S. Bressers, D. Avirovik, C. Vernieri, J. Regan, S. Chappell, M. Hotze, S. Luhman, M. Lallart, D. Inman and S. Priya, Small-scale modular windmill, *American Ceramic Society Bulletin*, 89(8) : 34-40, 2010.
- [RICL-25] P. Rakbamrung, M. Lallart, D. Guyomar, N. Muensit, C. Thanachayanont, C. Lucat, B. Guiffard, L. Petit and P. Sukwisut, Performance Comparison of PZT And PMN-PT Piezoceramics for Vibration Energy Harvesting, *Sensors and Actuators A : Physical*, 163 : 493-500, 2010. doi : 10.1016/j.sna.2010.08.028
- [RICL-26] M. Lallart, S. Priya, S. Bressers and D. J. Inman, Small-scale piezoelectric energy harvesting devices using low density sources, *Journal of the Korean Physical Society*, 57(4) : 947-951, 2010.
- [RICL-27] M. Lallart, D. Guyomar, C. Richard and L. Petit, Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices, *Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5) : 2739-2748, 2010.
- [RICL-28] M. Lallart, D. J. Inman and D. Guyomar, Transient Performance of Energy Harvesting Strategies under Constant Force Magnitude Excitation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 21(13) : 1279-1291, 2010.
- [RICL-29] D. Guyomar, M. Lallart and P.-J. Cottinet, Electrostrictive conversion enhancement of polymer composites using a nonlinear approach, *Physics Letters A*, 375(3), 260-264, 2011.
- [RICL-30] M. Lallart, C. Richard, L. Petit and D. Guyomar, High Efficiency, Wide Load Bandwidth Piezoelectric Energy Scavenging by a Hybrid Nonlinear Approach, *Sensors and Actuators A : Physical*, 165(2) : 294-302, 2011.
- [RICL-31] P.-J. Cottinet, M. Lallart, D. Guyomar, B. Guiffard, L. Lebrun, G. Sebald and C. Putson, Analysis of AC-DC conversion for energy harvesting using an electrostrictive polymer P(VDF-TrFE-CFE), *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 58(1) : 30-42, 2011.

- [RICL-32] D. Guyomar and M. Lallart, Switching loss reduction in Nonlinear Piezoelectric Conversion under Pulsed Loading, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 58(3) : 494-502, 2011.
- [RICL-33] D. Guyomar, M. Lallart, L. Petit and X.-J. Wang, Impact localization and energy quantification based on the power flow : A low-power requirement approach, *Journal of Sound and Vibration*, 330(13), 3270-3283, 2011.
- [RICL-34] P.-J. Cottinet, D. Guyomar, M. Lallart, B. Guiffard and L. Lebrun, Investigation of electrostrictive polymer efficiency for mechanical energy harvesting, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 58(9) : 1842-1851, 2011.
- [RICL-35] D. Guyomar and M. Lallart, Recent progresses in piezoelectric nonlinear energy harvesting and issues in small scale implementation, *Micromachines*, 2(2) : 274-294, 2011.
- [RICL-36] D. Guyomar, X.-J. Wang, L. Petit, M. Lallart, T. Monnier, K. Yuse and D. Audigier, Modeling of transient bending wave in an infinite plate and its coupling to arbitrary shaped piezoelements, *Sensors and Actuators A : Physical*, 171(2) : 93-101, 2011.
- [RICL-37] M. Lallart, S. Pruvost and D. Guyomar, Electrostatic Energy Harvesting Enhancement Using Variable Equivalent Permittivity, *Physics Letters A*, 375(45) : 3921-3924, 2011.
- [RICL-38] P.-J. Cottinet, D. Guyomar and M. Lallart, Electrostrictive polymer harvesting using a nonlinear approach, *Sensors and Actuators A : Physical*, 172(2) : 497-503, 2011.
- [RICL-39] M. Lallart, Y.-C. Wu and D. Guyomar, Switching Delay Effects on Nonlinear Piezoelectric Energy Harvesting Techniques, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(1) : 464-472, 2012.
- [RICL-40] M. Lallart, P.-J. Cottinet, L. Lebrun and D. Guyomar, Review : Electrostrictive polymer for mechanical energy harvesting, *Journal of Polymer Science : Polymer Physics*, 50(8) : 523-535, 2012.
- [RICL-41] M. Lallart, D. Guyomar and T. Monnier, Low-Power Computation Methods and Self-Powered Systems for Structural Health Monitoring Techniques Using Lamb Waves for Embedded Sensing, *Shock and Vibration*, 19 : 867-877, 2012.
- [RICL-42] M. Lallart, C. Richard, P. Sukwisut, L. Petit, D. Guyomar and N. Muensit, Electrostrictive Bending Actuators : Modeling and Experimental Investigation, *Sensors and Actuators A : Physical*, 179 : 169-177, 2012.
- [RICL-43] J.-F. Capsal, M. Lallart, P.-J. Cottinet, J. Galineau, G. Sébald and D. Guyomar, Evaluation of macroscopic polarization and actuation abilities of electrostrictive dipolar polymers using microscopic Debye/Langevin formalism, *Journal of Physics D. : Applied Physics*, 45(20) : 205401, 2012.
- [RICL-44] M. Lallart, J.-F. Capsal, M. Kanda, J. Galineau, D. Guyomar, K. Yuse and B. Guiffard, Modeling of thickness effect and polarization saturation in electrostrictive polymers, *Sensors and Actuators B : Chemical*, 171-172 : 739-746, 2012.
- [RICL-45] M. Lallart, Y.-C. Wu, C. Richard, D. Guyomar and E. Halvorsen, Broadband modeling of a nonlinear technique for energy harvesting, *Smart Materials and Structures*, 21 : 115006, 2012.

- [RICL-46] M. Lallart, J.-F. Capsal, A. K. Mossi Idrissa, J. Galineau, M. Kanda and D. Guyomar, Actuation abilities of multiphasic electroactive polymeric systems, *Journal of Applied Physics*, 112 : 094108, 2012.
- [RICL-47] B. Ducharne, L. Garbuio, M. Lallart, D. Guyomar, J.-Y. Gauthier and G. Sebald, Nonlinear technique for energy exchange optimization in piezoelectric actuators, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(8) : 3941-3948, 2013.
- [RICL-48] J. Galineau, B. Guiffard, L. Seveyrat, M. Lallart and D. Guyomar, Study and modeling of an electrostrictive polyurethane diaphragm loaded with conductive carbon black, *Sensors and Actuators A : Physical*, 189 : 117-124, 2013.
- [RICL-49] M. Lallart, J.-F. Capsal, G. Sebald, P.-J. Cottinet and D. Guyomar, Converse electrostrictive effect in dielectric polymers, *Sens. Act. B. : Chem.*, Vol. 190, pp. 259-264, 2014.
- [RICL-50] M. Lallart, Y.-C. Wu, L. Yan, C. Richard and D. Guyomar, Effect of Seismic Energy Scavenging on Host Structure and Harvesting Performance, *Smart Materials and Structures*, 22(3) : 035009, 2013.
- [RICL-51] M. Lallart, L. Yan, Y.-C. Wu and D. Guyomar, Electromechanical semi-passive nonlinear tuned mass damper for efficient vibration damping, *J. Sound Vib.*, Vol. 332(22), pp. 5696-5709, 2013.
- [RICL-52] L. Yan, M. Lallart and D. Guyomar, Multimodal Nonlinear Damping Technique Using Spatial Filtering, *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, Vol. 25(3), pp. 308-320, 2014.
- [RICL-53] Y.-C. Wu, M. Lallart, C. Richard and D. Guyomar, The effect of frequency detuning and seismic energy scavenging on host structure and harvesting performance under a broadband excitation, *Smart Materials and Structures*, Vol. 22(12), 125033, 2013.
- [RICL-54] J.-F. Capsal, J. Galineau, M. Lallart, P.-J. Cottinet and D. Guyomar, Plasticized relaxor ferroelectric terpolymer : Toward giant electrostriction, high mechanical energy and low electric field actuators, *Sens. Act. A. : Phys.*, Vol. 207, pp. 25-31, 2014.
- [RICL-55] J. Galineau, J.-F. Capsal, P.-J. Cottinet and M. Lallart, Scale-like compliant gold electrode : towards high strain capacitive devices for energy harvesting, *Sens. Act. A. : Phys.*, vol. 211, pp. 1-7 (2014).
- [RICL-56] M. Lallart, L. Wang, G. Sebald, L. Petit and D. Guyomar, Analysis of thermal energy harvesting using ferromagnetic materials, *Phys. Lett. A.*, Vol. 378 (43), pp. 3151-3154 (2014).
- [RICL-57] M. Lallart, L. Wang, C. Richard, L. Petit and D. Guyomar, Lumped Model of Bending Electrostrictive Transducers for Energy Harvesting, *J. Appl. Phys.*, Vol. 116, 124106 (2014).
- [RICL-58] M. Lallart, C. Richard, Y. Li, Y.-C. Wu and D. Guyomar, Load-tolerant, high efficiency self-powered energy harvesting scheme using a nonlinear approach, *Energy Harvesting and Systems*, vol. 1 (3-4) (2014).
- [RICL-59] Y.-C. Wu, E. Halvorsen, M. Lallart, C. Richard and D. Guyomar, Stochastic modeling in the frequency domain for energy harvester with switching electronic interface, *IEEE Trans. Mechatronics*, vol. 20 (1) , pp. 50-60 (2015)
- [RICL-60] L. Wang, M. Lallart, L. Petit, L. Lebrun, P.-J. Cottinet And D. Guyomar, Low-Cost Charge of Electrostrictive Polymers for Efficient Energy Harvesting,

- Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 26 (16), pp. 2123-2136, 2015.
- [RICL-61] M. Q. Le, J.-F. Capsal, M. Lallart, Y. Hebrard, A. Van Der Ham, N. Reffe, L. Geynet and P. J. Cottinet, Review on Energy Harvesting for Structural Health Monitoring in Aeronautical Applications, Progress in Aerospace Sciences, vol. 79, pp. 147-157, 2015.
- [RICL-62] L. Yan, M. Lallart, C. Richard and D. Guyomar, Hybrid Time-Domain and Spatial Filtering Nonlinear Damping Strategy for Efficient Broadband Vibration Control, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 27(2), pp. 261-277, 2016.
- [RICL-63] M. Lallart, G. Sebald, J.-F. Capsal, B. Ducharne and D. Guyomar, Modeling of Hysteretic Behavior in Ferroelectric Polymers, J. Pol. Sci. Part B : Pol. Phys., vol. 54, pp.499-508, 2016.
- [RICL-64] X. Yin, M. Lallart, P.-J. Cottinet, D. Guyomar and J.-F. Capsal, Mechanical energy harvesting via a plasticizer-modified electrostrictive polymer, Appl. Phys. Lett., Vol. 108 (4), 042901, 2016.
- [RICL-65] M. Lallart, L. Yan, C. Richard and D. Guyomar, Damping of periodic bending structures featuring nonlinearly interfaced piezoelectric elements, J. Vib. Cont., *in press*.
- [RICL-66] M. Lallart, L. Wang and L. Petit, Optimization of Electrostatic Energy Harvesting Using Self-Similar Capacitor Patterns, J. Intell. Mat. Syst. Struct., *accepté*.
- [RICL-67] L. Yan, B. Bao, D. Guyomar and M. Lallart, Periodic Structure with Interconnected Nonlinear Electrical Networks, J. Intell. Mat. Syst. Struct., *accepté*.

### Reuves Nationales à Comité de Lecture

---

- [RNCL-1] L. Petit, D. Guyomar, M. Lallart et T. Monnier, Matériaux piézoélectriques : Techniques non-linéaires semi-passives pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie, Matériaux et Techniques, 97 : 59-73, 2009. DOI : 10.1051/mat-tech/2009024

### Reuves Nationales sans Comité de Lecture

---

- [RN-1] M. Lallart, Dispositifs auto-alimentés de faibles dimensions, Synthèse annuelle de l'OMNT<sup>CV.15</sup> 2014, 2014.
- [RN-2] M. Lallart et A. Badel, Structures mécaniques linéaires et non-linéaires pour la récupération d'énergie vibratoire large bande, Synthèse annuelle de l'OMNT<sup>CV.15</sup> 2015, 2015.

### Ouvrages

---

- [Ouv-1] M. Lallart, Conversion électroactive et application aux systèmes auto-alimentés, Editions Universitaires Européennes, 2010.

## Sections d'Ouvrages

---

- [Sec-1] D. Guyomar, C. Richard, A. Badel, E. Lefeuvre and M. Lallart, Nonlinear approach to optimize the power flow of vibration-based piezoelectric energy harvesting devices, in S. Priya and D. Inman editors, *Advances in Energy Harvesting Technologies*, Springer, 2009.
- [Sec-2] E. Lefeuvre, M. Lallart, C. Richard and D. Guyomar, Piezoelectric Material-Based Energy Harvesting Devices : Advance of SSH Optimization Techniques (1999-2009), in E. Suaste-Gomez editor, *Piezoelectric Ceramics*, Sciyo/Intech. ISBN 978-953-307-122-0
- [Sec-3] M. Lallart and D. Guyomar, Self-powered and low-power piezoelectric vibration control using nonlinear approaches, in M. Lallart editor, *Vibration Control*, Sciyo/Intech. ISBN 978-953-307-117-6
- [Sec-4] L. Petit, D. Guyomar, M. Lallart et T. Monnier, Les micro-dispositifs électroniques énergétiquement autonomes : du concept à la réalité, *Les Controverses Technologiques de l'INSA de Lyon*, Lyon, 2007, (in press).
- [Sec-5] D. Guyomar M. Lallart, N. Muensit and C. Lucat, Conversion Enhancement for Energy Harvesting, in N. Muensit editor, *Energy Harvesting with Piezo- and Pyroelectric Materials*, Trans Tech Publications (TTPS), 2010, ISBN : 978-0-87849-159-9.
- [Sec-6] D. Guyomar and M. Lallart, Nonlinear conversion enhancement for efficient piezoelectric electrical generators, in *Ferroelectrics*, Sciyo/Intech, 2010, ISBN 978-953-307-439-9.
- [Sec-7] M. Lallart and D. Guyomar, Ferroelectric materials for small-scale energy harvesting devices and green energy products, in *Ferroelectrics - Applications*, Sciyo/Intech, 2010, ISBN 978-953-307-456-6.
- [Sec-8] M. Lallart, P.-J. Cottinet, J.-F. Capsal, L. Lebrun and D. Guyomar, Electrostrictive polymers for vibration energy harvesting, in *Small-Scale Energy Harvesting*, Sciyo/ Intech, 2012, ISBN 978-953-51-0826-9.
- [Sec-9] A. Badel, F. Formosa and M. Lallart, Electromechanical Transducers, in *Micro Energy Harvesting*, D. Briand, E. Yeatman and S. Roundy editors, *Micro Energy Harvesting*, Wiley, 2015. DOI : 10.1002/9783527672943.ch3

## Editions d'Ouvrages

---

- [Edi-1] M. Lallart editor, *Vibration Control*, Sciyo / Intech, 2010. ISBN 978-953-307-117-6.
- [Edi-2] M. Lallart editor, *Ferroelectrics - Materials*, Sciyo / Intech, 2010, ISBN 978-953-307-332-3.
- [Edi-3] M. Lallart editor, *Ferroelectrics - Physical effects*, Sciyo / Intech, 2010, ISBN 978-953-307-453-5.
- [Edi-4] M. Lallart editor, *Ferroelectrics - Characterization and Modeling*, Sciyo / Intech, 2010, ISBN 978-953-307-455-9.
- [Edi-5] M. Lallart editor, *Ferroelectrics - Applications*, Sciyo / Intech, 2010, ISBN 978-953-307-456-6.
- [Edi-6] M. Lallart editor, *Small-Scale Energy Harvesting*, Sciyo / Intech, 2012, ISBN

978-953-51-0826-9.

### **Conférences Internationales avec Actes**

---

- [CIA-1] M. Lallart, A. Badel, D. Guyomar and L. Lebrun, Non-linear Semi-Passive Damping Using Constant or Adaptive Voltage Sources : A Stability Analysis, Proc. of the 16th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST), Paris, France, 2005.
- [CIA-2] E. Lefeuvre, G. Sebald, D. Guyomar, M. Lallart and C. Richard, Materials, structures and power interfaces for efficient piezoelectric energy harvesting, International Conference on Electroceramics (ICE) 2007, Arusha, Tanzania, 2007 (invitée).
- [CIA-3] D. Guyomar, M. Lallart, Piezo-Transducer Modelling With A Switched Output Voltage : Application To Energy Harvesting And Self-Powered Vibration Control, Proc. of the 19th International Congress on Acoustics (ICA), Madrid, Spain, 2007 (invitée).
- [CIA-4] M. Lallart, T. Monnier, P. Guy, D. Guyomar, Y. Jayet, E. Lefeuvre, L. Petit and C. Richard, Self-Powered Structural Health Monitoring : Autonomous Wireless Sensors and Actuators featuring Piezoactive Microgenerators, Proc. of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford University, Stanford (CA), USA, 2007.
- [CIA-5] E. Lefeuvre, D. Guyomar, M. Lallart, L. Petit and C. Richard, Piezoelectric Energy Harvesting Strategies for Structural Health Monitoring Wireless Networks, Proc. of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford University, Stanford (CA), USA, 2007.
- [CIA-6] D. Guyomar, M. Lallart, X.-J. Wang, T. Monnier and L. Petit, Energy Extraction-Based Force Location Estimation, Proc. of the 6th International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM), Stanford University, Stanford (CA), USA, 2007.
- [CIA-7] M. Lallart, D. Guyomar, L. Petit, C. Richard, E. Lefeuvre and B. Guiffard, Effect Of Low Mechanical Quality Factor On Non-Linear Damping And Energy Harvesting Techniques, Proc. of the 18th International Conference on Adaptive Structures and Technologies (ICAST), Ottawa, Ontario, Canada, 2007.
- [CIA-8] D. Dumas, F. Lani, T. Monnier and M. Lallart, A mixed implicit-explicit method for Lamb Wave inspection applications, Abaqus Benelux User's Conference, Hoeven, The Netherlands, 2007.
- [CIA-9] D. Guyomar, G. Sebald, S. Pruvost and M. Lallart, Ambient energy harvesting using ferroelectric materials, SPIE SSMat. Conf., San Diego (CA), USA, 2008 (invitée).
- [CIA-10] D. Dumas, F. Lani, T. Monnier and M. Lallart, Coupling Implicit and Explicit Time Integration Methods for Non-Destructive Evaluation applications, 4th International Conference on Advanced COmputational Methods in ENgineering (ACOMEN), Liège, Belgium, 2008.
- [CIA-11] T. Monnier, P. Guy, M. Lallart, L. Petit, D. Guyomar and C. Richard, Optimization of signal pre-processing for the integration of cost-effective local intelligence in wireless self-powered Structural Health Monitoring, 3rd International



Conference Smart Materials, Structures and Systems (CIMTEC), Acireale, Sicily, Italy, 2008.

- [CIA-12] D. Guyomar, X.-J.Wang, L. Petit and M. Lallart, Transient bending response between an impact force and a piezo-element bonded on an infinite plate, International Joint Conference of SMSAE/SMEBA 2008, Nanjing, China, 2008.
- [CIA-13] D. Guyomar, L. Garbuio and M. Lallart, Low Voltage Energy Harvesting for MEMS Applications, PowerMEMS 2008, Sendai, Japan, 2008 (invitée).
- [CIA-14] D. Guyomar and M. Lallart, Energy Scavenging From Ambient Sources Based On Ferroelectric Materials, SPIE SSMat. Conf., San Diego (CA), USA, 2009 (invitée).
- [CIA-15] D. Guyomar and M. Lallart, Mechanical to Electrical Energy Conversion Enhancement and Selfpowered Wireless Applications, Smart Structures and Materials 2009 (SMART 09), Porto, Portugal, 2009 (invitée).
- [CIA-16] F. Lani, D. Dumas, S. Menio, T. Monnier and M. Lallart, Autonomous Damage and Vibration Control systems : Overview of the ADVICE Project and its Interest for Aeronautics, Smart Structures and Materials 2009 (SMART 09), Porto, Portugal, 2009.
- [CIA-17] M. Lallart, T. Monnier, C. Richard, P. Delatte, A. Saib, T. Kezai and P. Gérard, Efficient Piezoelectric Energy Harvesting and Management for Self Powered Sensors, Smart Structures and Materials 2009 (SMART 09), Porto, Portugal, 2009.
- [CIA-18] H. Boulkenafet, P. Gérard, T. Kezai, D. Flandre, M. Lallart and C. Richard, Communication and Networking Strategies for Autonomous Actuators and Sensors, Smart Structures and Materials 2009 (SMART 09), Porto, Portugal, 2009.
- [CIA-19] E. Castro, F. Martin de la Escalera, M. Lallart, C. Richard and T. Monnier, Semi-Passive Damping Solutions for Autonomous Vibration Control Systems on Aircrafts, Smart Structures and Materials 2009 (SMART 09), Porto, Portugal, 2009.
- [CIA-20] D. Guyomar and M. Lallart, Energy conversion improvement in ferroelectrics : application to energy harvesting and self-powered systems, 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Roma, Italy, September 2009 (invitée).
- [CIA-21] D. J. Inman and M. Lallart, Electronic interfaces for efficient vibration energy harvesting, International Symposium on Piezocomposite Applications (ISPA 2009), Dresden, Germany, September 2009 (invitée).
- [CIA-22] M. Lallart, S. Priya, S. Bressers and D. J. Inman, Small-scale piezoelectric energy harvesting devices using low density sources, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA) 2009, JeJu, Korea, November 2009 (invitée).
- [CIA-23] B. Guiffard, D. Guyomar, P.-J. Cottinet and M. Lallart, Energy harvesting with ferroelectrics and electrostrictive materials, International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators (IWPMA) 2009, JeJu, Korea, November 2009 (invitée).
- [CIA-24] M. Lallart, and D. J. Inman, Mechanical effect of combined piezoelectric and electromagnetic energy harvesting, IMAC XXVIII, Jacksonville (FL), USA, February 2010.

- [CIA-25] S. Bressers, M. Lallart, D. J. Inman, and S. Priya, Contact-less Windmill Utilizing Magnetically Driven, Vibrating Piezoelectric Bimorphs, IMAC XXVIII, Jacksonville (FL), USA, February 2010.
- [CIA-26] D. Guyomar, P.-J. Cottinet and M. Lallart, Improved mechanical to electrical conversion in electrostrictive polymers and its application to energy harvesting on ambient vibration, 10ème Conférence Internationale en Physique de la Matière Condensée et Physique Statistique. Béni-Mellal, Morocco, March 2010.
- [CIA-27] N. Binhayeeniyi, C. Castille, C. Lucat, H. Debeda, S. Muensit, D. Guyomar, M. Lallart and C. Thanachayanont, Feasibility of New Screen-Printed Piezoelectric Cantilever for Mems Applications, The 2nd French-Thai Workshop on Physics and Chemistry of Materials, April 24-25th, Phuket, Thailand, 2010.
- [CIA-28] D. Ozevin, V. F. Godinez, E. P. Lowenhar, M. F. Carlos, D. J. Inman, M. Lallart, P. H. Ziehl, A. Nanni, F. Matta, Self powered wireless acoustic emission sensor, SPIE SSMat. Conf., San Diego (CA), USA, 2010.
- [CIA-29] D. Guyomar and M. Lallart, Non-Linear Dynamics to Improve the Mechanical to Electrical Energy Conversion in Piezoelectric Materials : Application to Vibration Control and Energy Harvesting, Internoise 2010, Lisbon, Portugal, June 2010 (invitée).
- [CIA-30] D. Guyomar, P.-J. Cottinet, and M. Lallart, Improved mechanical to electrical conversion in ferroelectrics and electrostrictive polymers : application to energy harvesting and vibration damping, ISAF 2010, Edinburgh, Scotland, 2010 (invitée).
- [CIA-31] M. Lallart and D. Guyomar, Nonlinear energy harvesting techniques, 3rd International Congress in Ceramics, Osaka, Japan, November 2010 (invitée).
- [CIA-32] D. Guyomar, P.-J. Cottinet, M. Lallart, L. Lebrun, G. Sebald and K. Yuse, Nano-composite electrostrictive polymers and their application to energy harvesting on vibrations and heat, First International Conference on Composites and Nanocomposites (ICNC 2011), Kerala, India, January 2011 (invitée).
- [CIA-33] D. Guyomar, M. Lallart and P.-J. Cottinet, Energy harvesting in electroactive materials : a comparison between ferroelectrics and electrostrictive polymers, SPIE SSMat. Conf., San Diego (CA), USA, March 2011 (invitée).
- [CIA-34] M. Lallart, D. Guyomar and T. Monnier, Low-Power and Self-Powered Structural Health Monitoring Techniques using Lamb Waves for Embedded Sensing, International Conference on Structural Engineering Dynamics (ICEDyn) 2011, Tavira, Portugal, June 2011 (invitée).
- [CIA-35] D. Guyomar, P.-J. Cottinet, M. Lallart and L. Lebrun, Nano-composite electrostrictive polymers and their application to energy harvesting on vibrations, XX International Materials Research Congress 2011, Cancún, Mexico, Aout 2011 (invitée).
- [CIA-36] L. Lebrun, M. Lallart, P.-J. Cottinet, G. Sebald and D. Guyomar, Key issues to choose and to use an electroactive material in smart systems, Advanced Electromagnetics Symposium (AES 2012), Paris, France, April 2012 (invitée).
- [CIA-37] D. Guyomar, M. Lallart, G. Sebald, P.-J. Cottinet, J.-F. Capsal and J. Galineau, Electroactive materials for harvesting energy on temperature fluctuations and vibrations, International Workshop on Piezoelectric Materials and

- Applications in Actuators (IWPMA) 2012, Hirosaki, Japan, April 2012 (invitée).
- [CIA-38] D. Guyomar, , P.-J. Cottinet, M. Lallart, Energy harvesting on vibration : A performance comparison between ferroelectric and electrostrictive polymer material, CIMTEC-2012, Montecatini, Italy, 10th-14th June 2012(invitée).
- [CIA-39] D. Guyomar, P.J. Cottinet and M. Lallart, Energy Conversion in Electrostrictive Materials and its Application to Energy Harvesting, Vibration Control and Self-Powered Systems, International Symposium on Applications of Ferroelectrics 2012 (ISAF 2012), Aveiro, Portugal, July 9-13, 2012 (invitée).
- [CIA-40] D. Guyomar, P.-J. Cottinet, M. Lallart, Energy conversion in electrostrictive materials and its application to energy harvesting, vibration control and self-powered systems, ISAF-ECAPD 2012, Aveiro, Portugal, 16th July 2012 (invitée).
- [CIA-41] M. Lallart, P.-J. Cottinet, J-F. Capsal, L. Lebrun and D. Guyomar, Electrostrictive polymers for high strain actuation and energy harvesting, AMPSECA 2012, El Jadida, Morocco, 5-7th December, 2012 (invitée - plenary).
- [CIA-42] L. Yan, M. Lallart, D. Guyomar, Multimodal Nonlinear Damping Technique Using Spatial Filtering, AMPSECA 2012, El Jadida, Morocco, 5-7th December, 2012.
- [CIA-43] M. Lallart, L. Wang, L. Petit, L. Lebrun and D. Guyomar, Low-Cost Charge Of Electrostrictive Polymers For Efficient Energy Harvesting, AMPSECA 2012, El Jadida, Morocco, 5-7th December, 2012
- [CIA-44] X. Wang, D. Guyomar, M. Lallart and K. Yuse, Detection, localization and energy quantification of shocks on mechanical structures using elastic energy flow estimators from piezoelectric sensors bonded on the structure, SPIE Smart Structures/NDE 2013, San Diego, CA, USA, 10-14th March, 2013.
- [CIA-45] Y.-C. Wu, M. Lallart, L. Yan, D. Guyomar and C. Richard, On the self-powering of SHM techniques using seismic energy harvesting, SPIE Smart Structures/NDE 2013, San Diego, CA, USA, 10-14 March, 2013.
- [CIA-46] Y. S. Shih, S. C. Lin, M. Lallart, W.-J. Wu, Self-Powered Synchronized Switching Interfacing Circuits for Micro-Piezoelectric Energy Harvesters, ASME Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems 2013 (SMASIS 2013), September 16-18, 2013, Snowbird, Utah, USA, 2013.
- [CIA-47] M. Lallart, J.-F. Capsal, P.-J. Cottinet, L. Lebrun and D. Guyomar, Electrostrictive dielectric polymers for energy conversion : modeling, material enhancement and applications, International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials 2013 (THERMEC 2013), 2-6 December, Las Vegas, USA, 2013 (invitée).
- [CIA-48] M. Lallart, Self-powered smart systems : a dream or future reality? Challenges and perspectives, The 11<sup>th</sup> International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators & the 9<sup>th</sup> Energy Harvesting Workshop (IWPMA2014 & EH 2014), 22-25 September, Suzhou, China, 2014 (invitée plénière).
- [CIA-49] B. Bao, D. Guyomar and M. Lallart, Nonlinear vibration damping in mechanical/electrical periodic structures featuring switched piezoelectric elements, 5<sup>th</sup> International Conference Smart and Multifunctional Materials, Structures

and Systems, CIMTEC 2016, Perugia, Italy, June 5-9, 2016.

### **Conférences Européennes avec Actes**

---

- [CEA-1] M Lallart, K. E. Nolan, P Sutton, L. E. Doyle, On-The-Fly Synchronization Using Wavelet and Wavelet Packet OFDM, European Wireless Conference 2006, Paris, France, April 2006
- [CEA-2] D. Dumas, F. Lani, T. Monnier and M. Lallart, Simulation of Lamb Wave Propagation to Predict Damage Detection in Thin Walled Composite Structures, 4th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM), Cracow, Poland, 2008.
- [CEA-3] L. Lebrun, M. Lallart, P.-J. Cottinet, G. Sebald and D. Guyomar, Evaluation of the conversion capability of electroactive materials, 6th EWPM, 11th-13th July 2012, Montpellier, France
- [CEA-4] J.-F. Capsal, J. Galineau, P.-J. Cottinet, M. Lallart and D. Guyomar, Electrostrictive response of P(VDF-TrFE-CFE) terpolymer doped with (2-ethylhexyl) phthalate, Third international conference on Electromechanically Active Polymer (EAP) transducers & artificial muscles (EuroEAP), Dübendorf (Zürich), Switzerland, 25th-26th June 2013.

### **Conférences Nationales avec Actes**

---

- [CNA-1] M. Lallart, F.M. Boland, Source Localization Using Piezoelectric Ultrasonic Transducers, IET Irish Signals and Systems Conference 2006, Dublin, Ireland, June 2006.
- [CNA-2] T. Monnier, M. Lallart, P. Guy, L. Petit, D. Guyomar and C. Richard, Quelles stratégies énergétiques pour un contrôle d'intégrité structurelle auto-alimenté ?, 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, April 2010.
- [CNA-3] P.-J. Cottinet, D. Guyomar and M. Lallart, Récupération d'énergie mécanique à l'aide de polymères électrostrictifs, Journées nationales sur la récupération et le stockage d'énergie pour l'alimentation des microsystemes autonomes, October 2010.
- [CNA-4] T. Monnier, M. Lallart, P. Guy, L. Petit, C. Richard and D. Guyomar, Suivi de Sante Auto-Alimenté et Basse Consommation des Matériaux Composites par Ondes de Lamb, Journées Scientifique et Technique de l'AMAC Essais Non Destructifs et Durée de Vie des Composites, Lyon, France, October 2011.
- [CNA-5] M. Lallart, P.-J. Cottinet, L. Lebrun and D. Guyomar, Energy harvesting using electrostrictive polymers, 2ème Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Énergie pour l'alimentation des microsystemes autonomes, Grenoble, France, March 2012 (invitée)
- [CNA-6] M. Lallart, P.-J. Cottinet and D. Guyomar, Vibration energy harvesting using piezoelectric materials and electrostrictive polymers, Progress and Innovation of Smart Materials and Related Technology (PI-SMART), Hirosaki, Japan, April 2012 (invitée)
- [CNA-7] A. Danescu, R. Bachelet, B. Gautier, P. Lombard, C. Malhaire, J. Penuelas, L. Quiquerez, Y. Robach, G. Saint-Girons, B. Vilquin, M. Lallart, L. Petit,

J.-P. Cottinet, G. Le Rhun, E. Defaÿ. PIEZO2POWER Nouveaux microgénérateurs piézoélectriques à récupération d'énergie vibratoire à hautes performances pour applications en électronique nomade, Journées Nationales Nanosciences et Nanotechnologies (J3N) 2012, Bordeaux, 7-9 Novembre 2012.

[CNA-8] A. Danescu, R. Bachelet, B. Gautier, P. Lombard, C. Malhaire, J. Penuelas, L. Quiquerez, Y. Robach, P. Rojo Romeo, G. Saint-Girons, B. Vilquin, M. Lallart, L. Petit, J.-P. Cottinet, G. Le Rhun, E. Defaÿ, New high performance vibration energy harvesting piezoelectric microgenerators for mobile electronics applications, Workshop Oxydes fonctionnels pour l'intégration en micro- et nano-électronique, Autrans, 7-10 Avril 2013.

[CNA-9] M. Lallart, Analysis of sources and conversion effects for energy harvesting and their application in self-powered device – are self-powered devices a viable alternative?, 6<sup>ème</sup> Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage d'Énergie pour l'alimentation des microsystèmes autonomes, Bordeaux, France, 9-10 Mai 2016 (invité).

## Conférences Nationales sans Actes

---

[CN-1] M. Lallart, Interfaces électriques d'optimisation de la conversion d'énergie, Pôle STIC-INSA Journée thématique STIC-Énergie, Lyon, 2008.

[CN-2] M. Lallart and D. Guyomar, Amélioration de la récupération d'énergie piézoélectrique et contrôle de santé structurale bas coût, Réunion GDR - MNS, 18-20 Novembre 2009, Besançon

[CN-3] M. Lallart, Systèmes d'énergie pour les applications nomades, Séminaire Annuel de l'Observatoire des Micro et Nano Technologies, Paris, 3 Février 2015.

## Brevets

---

[Bre-1] M. Lallart, S. Priya and D. J. Inman, Contactless Piezoelectric Windmill, VTIP 10-017

[Bre-2] M. Lallart and D. J. Inman, Small-scale Piezoelectric Rainmill for Rain Energy Harvesting, VTIP 10-018

[Bre-3] J.-F. Capsal, J. Galineau, P.-J. Cottinet, M. Lallart and D. Guyomar, Procédé de fabrication de matériau composite polarisable sous l'action d'un faible champ électrique, FR-1353537

# Table des Matières

Page de Garde	Page de garde-1
Remerciements	iii
Résumé	v
Curriculum vitae - Activités scientifiques, pédagogiques et administratives	CV-1
1 Curriculum vitae . . . . .	CV-2
2 Vue d'ensemble des activités . . . . .	CV-4
3 Activités de recherche . . . . .	CV-6
4 Activités pédagogiques . . . . .	CV-10
5 Autres activités et activités administratives . . . . .	CV-11
6 Liste des publications . . . . .	CV-12
Revue Internationale à Comité de Lecture . . . . .	CV-12
Revue Nationale à Comité de Lecture . . . . .	CV-17
Revue Nationale sans Comité de Lecture . . . . .	CV-17
Ouvrages . . . . .	CV-17
Sections d'Ouvrages . . . . .	CV-17
Editions d'Ouvrages . . . . .	CV-18
Conférences Internationales avec Actes . . . . .	CV-19
Conférences Européennes avec Actes . . . . .	CV-23
Conférences Nationales avec Actes . . . . .	CV-23
Conférences Nationales sans Actes . . . . .	CV-24
Brevets . . . . .	CV-24
Table des Matières	1
<b>I Introduction - Les matériaux électroactifs et leurs applications : solution d'avenir ou effet de mode ?</b>	<b>5</b>
I.1 Les couplages électroactifs . . . . .	6
I.1.1 Conversion électromécanique . . . . .	6
I.1.2 Conversion électrothermique . . . . .	9
I.2 Applications des matériaux électroactifs . . . . .	10
I.3 Présentation du manuscrit . . . . .	11

<b>II</b>	<b>Modélisation et applications des matériaux piézoélectriques (2006-2016)</b>	<b>15</b>
II.1	De l'intérêt des matériaux piézoélectriques . . . . .	16
II.2	Modélisation des matériaux ferroélectriques . . . . .	16
II.2.1	Introduction : nécessités et solutions de modélisation . . . . .	16
II.2.2	Principes . . . . .	18
II.2.3	Application aux céramiques ferroélectriques . . . . .	21
II.2.4	Application aux polymères ferroélectriques . . . . .	23
II.2.5	Discussion . . . . .	30
II.3	Contrôle de vibrations . . . . .	30
II.3.1	Introduction et enjeux du contrôle de vibrations . . . . .	30
II.3.2	Systèmes à masse accordée à traitement non-linéaire . . . . .	36
II.3.3	Filtrage spatial et hybride . . . . .	42
II.3.4	Structures périodiques . . . . .	51
II.4	Récupération d'énergie vibratoire . . . . .	58
II.4.1	Introduction : place et enjeux de la récupération d'énergie par éléments piézoélectriques . . . . .	58
II.4.2	Modélisation des systèmes de récupération d'énergie vibratoire utilisant des éléments piézoélectriques . . . . .	60
II.4.3	Techniques d'optimisation de l'énergie extraite et récupérée . . . . .	74
II.4.4	Utilisation des éléments piézoélectriques pour conversion autre que vibratoire . . . . .	86
II.5	Conclusion : place des actions de recherche sur les matériaux piézoélectriques dans le monde scientifique et socio-économique et la formation . . . . .	90
<b>III</b>	<b>Modélisation et applications des matériaux électrostrictifs (2009-2016)</b>	<b>95</b>
III.1	Matériaux électrostrictifs <i>vs</i> piézoélectriques . . . . .	96
III.2	Modélisation physique . . . . .	97
III.2.1	Enjeux et motivations pour la modélisation . . . . .	97
III.2.2	Conversion directe . . . . .	97
III.2.3	Modèle multiphasique . . . . .	100
III.2.4	Conversion inverse . . . . .	102
III.2.5	Effet d'épaisseur . . . . .	104
III.3	Modélisation macroscopique de systèmes électrostrictifs . . . . .	108
III.3.1	Motivations pour la modélisation macroscopique . . . . .	108
III.3.2	Actionnement . . . . .	108
III.3.3	Modèle à constantes localisées . . . . .	113
III.4	Récupération d'énergie . . . . .	119
III.4.1	Application des polymères électrostrictifs à la récupération d'énergie . . . . .	119
III.4.2	Figure de mérite des matériaux électrostrictifs pour la conversion d'énergie . . . . .	121
III.4.3	Interfaces électriques et traitement non-linéaire de la tension de sortie des microgénérateurs électrostrictifs . . . . .	124

III.5 Conclusion : place des actions de recherche sur les matériaux électrostrictifs dans le monde scientifique et socio-économique et la formation	129
<b>IV Autres mécanismes de conversion (2009-2016)</b>	<b>133</b>
IV.1 Conversion électrostatique . . . . .	134
IV.1.1 Récupération d'énergie par dispositifs électrostatiques . . . . .	134
IV.1.2 Amélioration de la conversion par permittivité variable . . . . .	136
IV.1.3 Utilisation de motifs auto-similaires . . . . .	140
IV.2 Conversion électrothermique . . . . .	146
IV.2.1 Utilisation de matériaux électrostrictifs . . . . .	146
IV.2.2 Conversion par changement de phase de matériaux ferromagnétiques . . . . .	149
IV.3 Conclusion : place des autres actions de recherche dans le monde scientifique et socio-économique et la formation . . . . .	153
<b>V Conclusion - Les “smart systems” : vraiment si intelligents que ça ?</b>	<b>157</b>
<b>VI Avenir des thématiques et axes de recherche associés - Projet de recherche</b>	<b>163</b>
VI.1 Aspects scientifiques . . . . .	164
VI.2 Aspects industriels et socio-économiques . . . . .	165
VI.3 Perspectives personnelles . . . . .	166
VI.3.1 Thématiques futures . . . . .	166
VI.3.2 Animations et administrations . . . . .	173
<b>Références Bibliographiques</b>	<b>175</b>
<b>Liste des Figures</b>	<b>197</b>
<b>Liste des Tableaux</b>	<b>205</b>
<b>A Analyse des sources et effets de conversion pour la récupération d'énergie</b>	<b>A-1</b>
A.1 Introduction - De l'intérêt de la récupération d'énergie . . . . .	A-2
A.2 Sources d'énergie principales . . . . .	A-5
A.2.1 Source thermique . . . . .	A-5
A.2.2 Source vibratoire . . . . .	A-7
A.2.3 Sources radiatives . . . . .	A-8
A.2.4 Sources biologiques . . . . .	A-10
A.2.5 Figure de mérite des sources . . . . .	A-10
A.3 Effets de conversion . . . . .	A-11
A.3.1 Conversion thermique vers électrique . . . . .	A-13
A.3.2 Conversion mécanique vers électrique . . . . .	A-16
A.3.3 Conversion radiations vers électrique . . . . .	A-20
A.3.4 Conversion biologique vers électrique . . . . .	A-23
A.3.5 Figure de mérite des effets . . . . .	A-25
A.4 Analyse comparative et conclusions . . . . .	A-27



<b>B Généralités sur la conception d'un dispositif autonome</b>	<b>B-1</b>
B.1 Chaîne de conversion de l'énergie . . . . .	B-2
B.2 De la nécessité de connaître son environnement . . . . .	B-2
B.3 De la nécessité de connaître ses besoins réels - Bilan énergétique . . .	B-3
B.4 Implémentation des fonctions . . . . .	B-3
<b>Folio Administratif</b>	<b>Folio-1</b>

# Chapitre I

## Introduction - Les matériaux électroactifs et leurs applications : solution d'avenir ou effet de mode ?

*Ce chapitre introductif se propose de faire un état de l'art succinct des différentes thématiques traitées dans ce manuscrit. Volontairement concis et donc non exhaustif, un effort de mise en parallèle des avancées de la recherche vis-à-vis des applications industrielles sera néanmoins entrepris.*

## I.1 Les couplages électroactifs

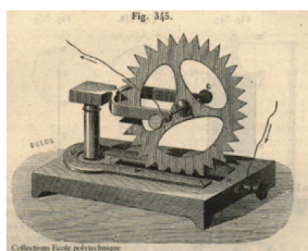
Les matériaux de conversion d'énergie, ainsi que leurs interfaces, se retrouvent dans des applications tant industrielles que de la vie quotidienne. Ainsi, nos voitures, par leur moteur thermique, nos téléphones, par leur liaisons radiofréquences, les alternateurs de centrales, etc... sont des applications parmi tant d'autres qui nous entourent dans la vie de tous les jours. Ces dispositifs intègrent tous un ou plusieurs élément(s) de conversion d'énergie ; cette dernière étant désormais devenue une denrée de première nécessité au même titre que la Santé. Les couplages entre les différents domaines de la Physique (Tableau I.1) jouent ainsi un rôle prépondérant dans notre vie. En particulier, avec l'explosion des systèmes électriques et (micro)électroniques, les éléments de transduction avec le domaine électriques, c'est-à-dire les systèmes électroactifs, ont connu un essor des plus importants sur les dernières décennies.

Les couplages électroactifs se décomposent en de nombreuses possibilités, qu'elles soient actives (variation d'une grandeur du système - tension, courant et charge dans le domaine électrique par exemple) ou passives (variation d'une caractéristique du système - impédance par exemple). Parmi les couplage électroactifs, nous nous intéresserons en particulier ici aux couplages électromécaniques et électrothermiques.

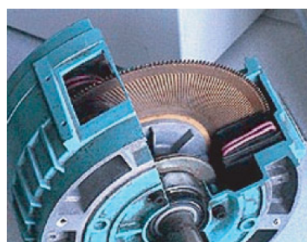
### I.1.1 Conversion électromécanique

Pouvoir convertir une activité mécanique dans le domaine électrique et vice-versa a toujours été d'une première nécessité, notamment dans le monde moderne où l'énergie électrique joue un rôle prépondérant (Figure I.1). Cependant, l'écrasante majorité des systèmes de conversion à grande échelle n'exploitent pas directement le couplage électromécanique, mais passe par l'intermédiaire du domaine magnétique via les systèmes électromagnétiques utilisant le phénomène d'induction, par exemple pour la génération d'électricité dans les centrales ou de mouvement dans le cas des moteurs électriques. Ainsi, dans ce type de conversion, l'énergie mécanique conduit à une variation de flux magnétique, lui-même conduisant à une variation d'énergie électrique (loi de Lenz), via par exemple l'induction motionnelle.

Néanmoins, à petite échelle (comme c'est le cas dans les thématiques de recherche présentées ici), l'intérêt du couplage électromagnétique décroît du fait des difficultés



Roue de Barlow (1822)



Moteur électromagnétique discoïdal  
<http://www.parvex.com>



Micropompe médicale à base d'actionneur piézoélectrique  
<http://www.thinxss.com>

Figure I.1 – La conversion électromécanique, intérêt de longue date ([NHR08]).

	Mécanique	Electrique	Magnétique	Thermique	Photonique
Mécanique	Elasticité	Piézoélectrique direct	Piezomagnétique	Piezocalorique	Photoélasticité
Electrique	Piézoélectrique inverse	Permittivité	Magnétoélectrique	Electrocalorique	Electrooptique
Magnétique	Piezomagnétique	Electromagnétique	Perméabilité	Magnétocalorique	Magnétooptique
Thermique	Dilatation thermique	Pyroélectrique	Pyromagnétique	Chaleur	
Photonique	Photostriction				

Tableau I.1 – Couplages entre les domaines de la physique (les couplages électroactifs sont surlignés).

d'intégration de cette technologie. Ainsi, l'utilisation du phénomène dual du magnétisme, c'est-à-dire l'électrostatique, devient de plus en plus attractif à mesure que les dimensions du système diminuent. Les systèmes de transduction électrostatiques permettent un couplage direct entre domaine électrique et mécanique, via par exemple les forces de Maxwell reliant la force mécanique exercée avec les charges présentes sur le système. Comme il sera expliqué par la suite, l'électrostriction peut être considérée comme électrostatique, avec, en supplément du phénomène l'électrostatique pur, l'utilisation de l'élasticité mécanique.

En extension du domaine électrostatique, les éléments ferroélectriques, et plus particulièrement piézoélectriques, sont également un aspect intéressant pour les systèmes de conversion électromécaniques. Parmi les premiers matériaux de conversion découverts par l'Homme<sup>I.1</sup>, l'effet piézoélectrique peut se manifester sous différentes formes (cristalline, moléculaire ou ionique par exemple), la plus courante résultant d'une dissymétrie forte de la maille cristalline résultant en une non-coïncidence des barycentres des charges positives et négatives. Du fait de cette nécessité de dissymétrie, seules quelques classes cristallines peuvent prétendre à une activité piézoélectrique (Figure I.2). De plus, il est à noter que la majorité des matériaux piézoélectriques, notamment ceux présentant la plus forte activité électromécanique, nécessitent une étape de polarisation.

Outre ces effets de conversions relativement répandus, citons également d'autres mécanismes<sup>I.2</sup> tels que les Alliages à Mémoire de Forme (dont le principe consiste à passer par le domaine thermique par l'échauffement par effet Joule obtenu par l'application d'un courant), la magnétostriction (effet Villari), les fluides magnéto- et électro-rhéologiques (orientation de dipôles par l'application d'un champ, résultant en une modification de la viscosité), la flexoélectricité (effet couplant gradient de

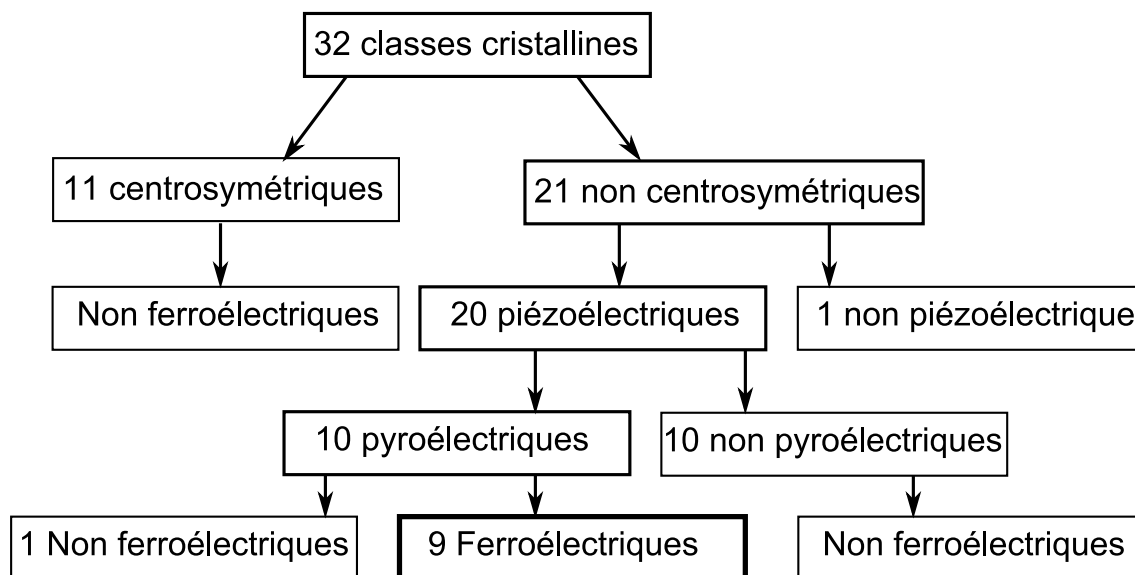


Figure I.2 – Classes cristallines et piézoélectricité.

---

I.1. Les Indiens de Ceylan dans l'Antiquité connaissaient déjà, de manière qualitative, les propriétés piézoélectriques des sels de tourmaline.

I.2. non détaillés ici du fait de leur éloignement avec l'activité de recherche présente

déformation et champ électrique) et les réactions chimiques (oxydo-réduction, très utilisées dans les batteries et piles).

### I.1.2 Conversion électrothermique

L'autre domaine d'intérêt, bien que moindre, consiste ici en la conversion de la chaleur sous forme électrique. La chaleur peut être vue comme l'énergie basique de tout système, régie par les lois de la thermodynamique. Pouvant se manifester sous la forme de gradients thermiques ou de variations temporelles de température, deux effets de conversion électrothermique sont typiquement associés (un pour chaque forme).

Le premier et le plus répandu consiste en l'effet thermoélectrique, qui tire son origine de l'effet Seebeck et son inverse l'effet Peltier<sup>1,3</sup>. En pratique un élément thermoélectrique est constitué de jonctions semi-conductrices PN (par exemple tellure de bismuth) permettant d'avoir de bonnes propriétés thermoélectriques (recombinaisons paires électrons/trous), avec les jonctions électriquement connectées en série et en parallèle thermiquement (Figure I.3).

Concernant la conversion de variations temporelles de température, les éléments pyroélectriques permettent au matériau de changer sa polarisation sous l'action d'une variation de température ou d'entropie. Les éléments pyroélectriques sont très similaires aux éléments piézoélectriques concernant le mécanisme de conversion (variation de la distance entre les barycentres des charges positives et négatives, conduisant à l'apparition de charges sur les électrodes)<sup>1,4</sup>, et sont également liés aux éléments ferroélectriques (Figure I.2), mais certaines différences fondamentales apparaissent, tels que l'utilisation de grandeurs scalaires dans le domaine thermique (celles-ci étant tensorielles dans le domaine mécanique) et le fonctionnement autour

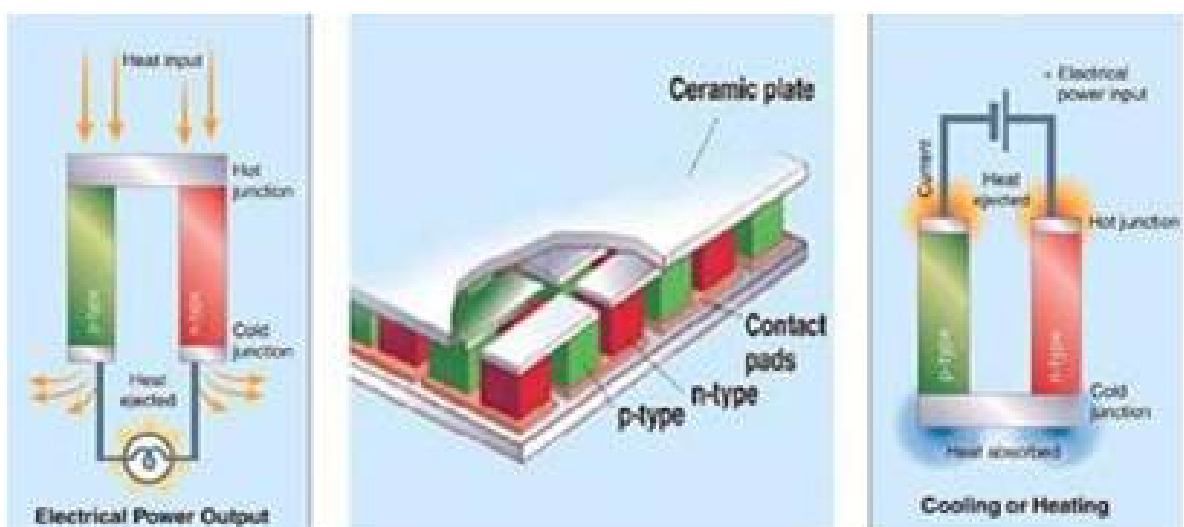


Figure I.3 – Élément thermoélectrique (<http://www.ecobase21.net>).

---

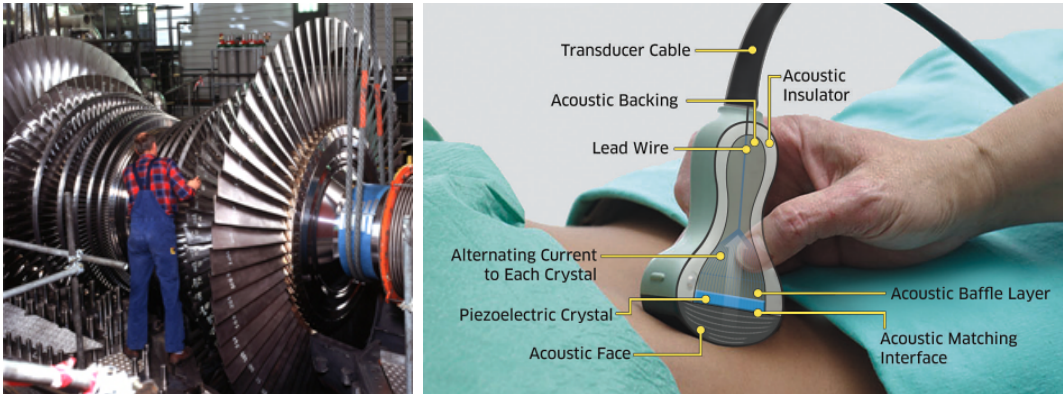
I.3. On pourrait ici aussi évoquer l'effet Thomson.

I.4. Une partie de l'effet pyroélectrique - plus précisément l'effet secondaire - passe d'ailleurs par la piézoélectricité, via la dilatation du matériau.

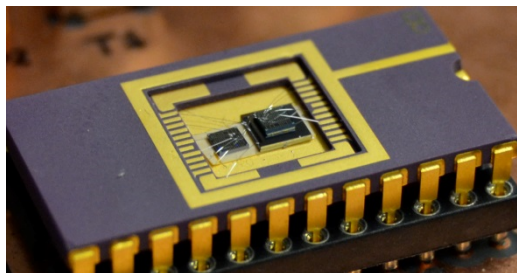
d'un point de repos différent de zéro (ce dernier étant le zéro absolu).

## I.2 Applications des matériaux électroactifs

Les applications des matériaux électroactifs sont nombreuses, couvrant notamment l'aspect actionnement (moteurs, outils...) et capteur (Figure I.4). Sur ce premier point, on retrouve d'un point de vue électromécanique la prépondérance des systèmes électromagnétiques pour les applications à grande échelle (turboalternateurs, moteurs électriques...), alors que les applications à petite échelle (éventuellement de forte puissance) font de plus en plus appel aux éléments piézoélectriques. Néanmoins, excepté quelques domaines dans lesquels l'effet piézoélectrique est solidement présent (sonar ou outils médicaux par exemple), nombre d'entre eux restent encore des niches (moteur pour le focus dans les appareils photos...), et, face à la domination électromagnétique, l'effet piézoélectrique a encore du mal à s'imposer, malgré une démocratisation qui s'amorce (notamment dans le domaine scientifique, et plus récemment dans le domaine industriel) mais pour laquelle il est trop tôt pour se prononcer sur le fait que cette généralisation vient d'un réel intérêt ou d'une recherche d'originalité sans réels fondements.



(a) Turboalternateur utilisant l'électromagnétisme (source : <http://www.sensormag.com>)  
(b) Echographe piézoélectrique (source : <http://www.kkg.ch>)



(c) Accéléromètre électrostatique MEMS (source : <http://risorse.dei.polimi.it>)

Figure I.4 – Actionneurs électromagnétique, piézoélectrique et électrostatique : du plus grand au plus petit.

L'application, d'un point de vue industriel, des éléments électrostatiques restent actuellement exclusivement dans le domaine des capteurs (accéléromètre MEMS par exemple), qui supplante les dispositifs électromagnétiques et piézoélectriques dans les microsystèmes, mais avec ces derniers prenant le dessus dès lors que le système devient milli- ou centi-métrique (piézoélectricité - capteur de force...) et au-delà pour les dispositifs électromagnétiques (actionneurs linéaires, pot vibrants... - Figure I.5). Citons également une nette différence applicative entre les systèmes piézoélectriques, fournissant des contraintes importantes mais avec des déplacements faibles, et électromagnétiques, dont les déplacements sont importants mais avec des forces plus réduites pour les mêmes dimensions (Figure I.6).

### I.3 Présentation du manuscrit

Les travaux rapportés dans ce mémoire s'intéressent avant tout à des activités non encore (totalement) déployées dans le monde industriel, et la recherche menée se pose comme étant surtout la proposition de nouvelles approches et techniques et leur validation par preuves de concept plutôt que de l'optimisation fine de systèmes déjà existants. De plus la compréhension des phénomènes et applications dans leur ensemble, d'un point de vue du système global (l'association de sous-systèmes optimisés ne conduisant pas à une système global optimal) est une volonté sous-jacente pilotant les actions de recherche, surtout récemment. Dans un but pédagogique, le découpage se fera ici selon le type de couplage envisagé, allant graduellement de la technologie la plus mature pour aller vers les recherches les plus prospectives.

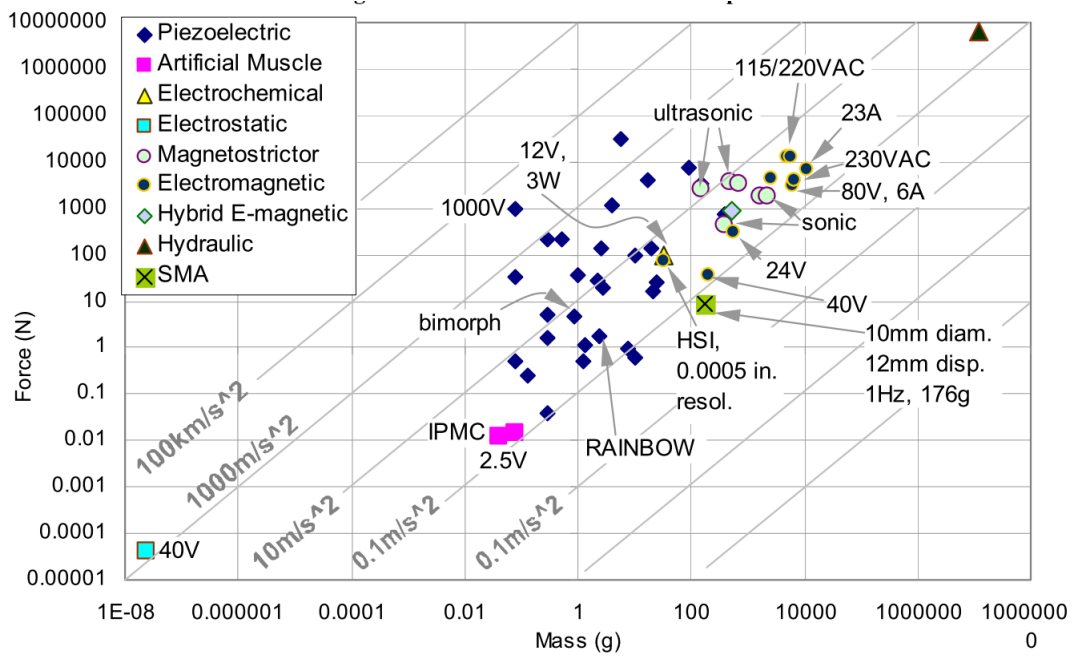
Ainsi, le Chapitre II s'intéresse au couplage piézoélectrique et à ses applications. Dans un premier temps, la modélisation du comportement de matériaux ferroélectriques, notamment l'étude de la relation entre polarisation et champ électrique sera menée à partir de considérations physiques (effet d'avalanche couplé à une saturation des dipôles - Paragraphe II.2). Ensuite, deux applications seront développées. La première consistera à la présentation de techniques de contrôle vibratoire, exploitant principalement des structures distribuées pour une contrôle large bande (via l'utilisation de filtrage spatial ou de structures périodiques - (Paragraphe II.3))<sup>I.5</sup>. Ensuite l'analyse de techniques non-linéaires pour la récupération d'énergie, notamment concernant l'aspect large bande, sera exposée, suivie par la conception de nouvelles interfaces électriques d'extraction simples mais efficaces (Paragraphe II.4).

Le Chapitre III exposera les recherches effectuées sur la thématique des polymères électrostrictifs, avec un découpage similaire au chapitre précédent, c'est-à-dire débutant par la modélisation de l'effet de conversion (via une approche utilisant le formalisme de Debye-Langevin) et l'analyse des performances électromécaniques au niveau local (Paragraphe III.2) pour aller à l'application, cette dernière se découplant en l'analyse des capacités d'actionnement en tant que dispositifs en flexion et la mise en place d'un modèle à constantes localisées (Paragraphe III.3) et en termes de récupération d'énergie (Paragraphe III.4). Cette dernière partie s'intéressera d'abord à l'analyse des capacités des matériaux électrostrictifs pour la récupération d'énergie

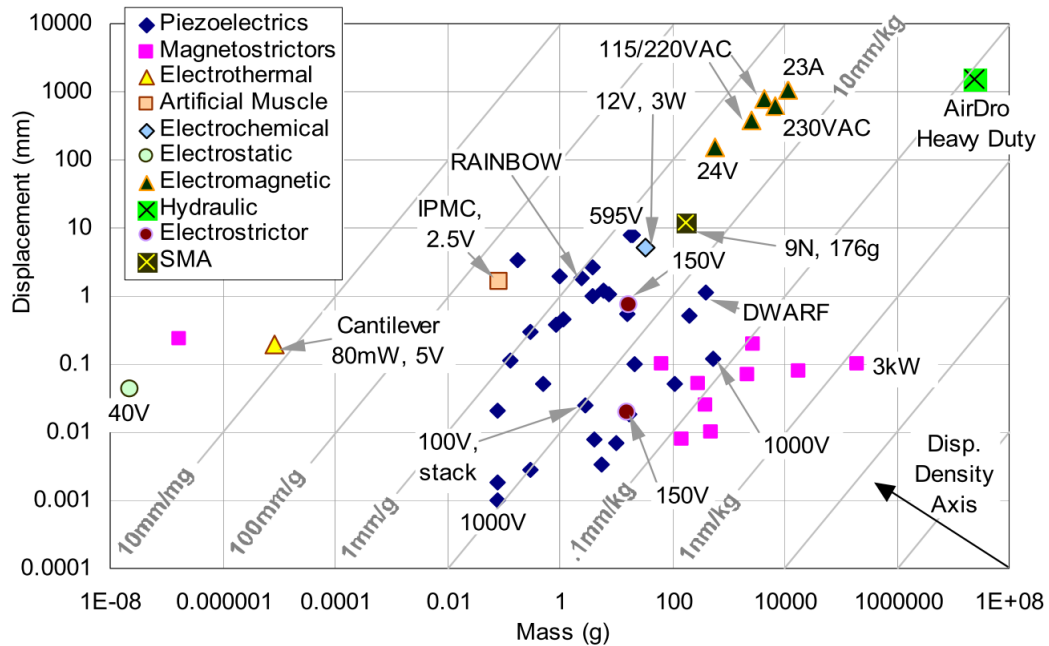
---

I.5. Une partie analysant les capacités de l'utilisation d'un couplage électromécanique pour les dispositifs à masse accordée sera également présenté.





(a) Force-poids



(b) Déplacement-poids

Figure I.5 – Répartition de différents actionneurs en fonction de leur poids ([Tre01]).

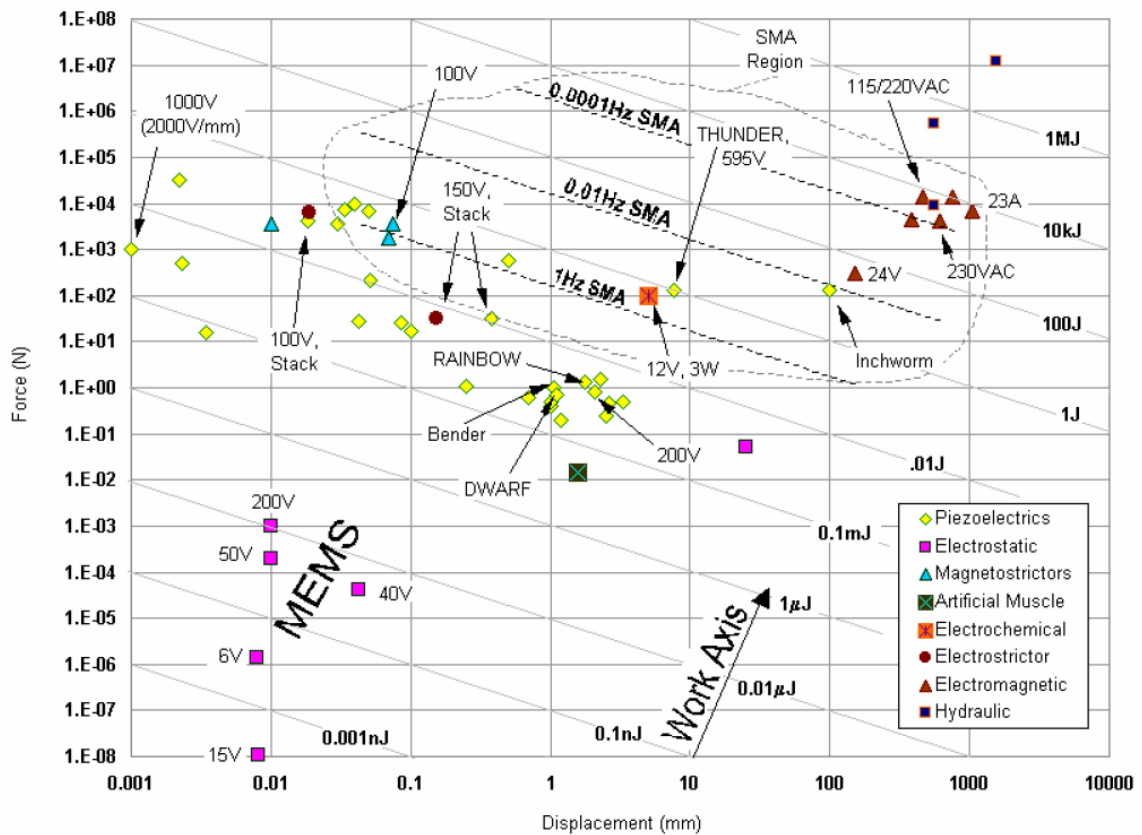


Figure I.6 – Relation déplacement-force de plusieurs familles d'actionneurs ([Tre01]).

pour ensuite proposer des interfaces efficaces pour accomplir cette tâche.

Enfin, le Chapitre IV exposera des travaux de recherche annexes sur la conversion d'énergie, exploitant d'abord les dispositifs électrostatiques électromécaniques (Paragraphe IV.1), avec le développement d'approches permettant l'augmentation des variations de capacité et donc d'amélioration des performances en termes de récupération d'énergie. Dans un deuxième temps l'exploration de nouveaux couplages pour la conversion électrothermique sera présentée (Paragraphe IV.2) exploitant la dépendance de la polarisation des polymères électrostrictifs avec la température ainsi que la variation de la perméabilité avec la température dans les matériaux ferromagnétiques.

En guise de conclusion, le Chapitre V propose de résumer les différents travaux et de discuter sur leur applicabilité et pertinence. Ce chapitre sera complété par le Chapitre VI discutant, de manière plus ou moins prospective, du futur des thématiques et recherches abordées, ainsi que de proposer différents axes de recherche potentiels et implication dans la vie scientifique de la communauté.

Du fait du découpage choisi (selon les couplages), les Annexes A et B se proposent de discuter, dans le cadre de la récupération d'énergie, de généralités concernant le choix des sources d'énergie (Paragraphe A.2) et des effets de conversion associés (Paragraphe A.3) ainsi que de la conception de dispositifs auto-alimentés (Annexe B). Bien qu'étant placés en Annexes, ces analyses font néanmoins partie intégrante du travail de recherche et sont à considérer comme des chapitres à part entière.



# Chapitre II

## Modélisation et applications des matériaux piézoélectriques (2006-2016)

*Ce chapitre se propose de traiter les principales actions de recherche entreprises dans le domaine de la modélisation et de l'application des matériaux piézoélectriques. Tout d'abord, l'aspect de compréhension des phénomènes physiques à l'origine du comportement ferroélectrique sera rapidement décrit ; cette axe de recherche étant relativement récent. Puis l'aspect applicatif sera principalement décliné dans les thématiques de contrôle de vibrations et de récupération d'énergie. Certaines actions de recherche isolées seront néanmoins rapidement abordées par la suite, suivie d'une conclusion sur la place de la recherche dans le contexte socio-économique et les différentes perspectives d'évolutions.*

Contributeurs principaux aux actions de recherche (par ordre alphabétique) : Steve ANTON (récupération d'énergie), Scott BRESERS (source éolienne et fluïdique), Jean-Fabien CAPSAL (modélisation), Benjamin DUCARNE (modélisation, actionnement), Alper ERTURK (source éolienne et fluïdique), Lauric GARBUIO (actionnement), Einar HALVORSEN (récupération d'énergie), Daniel GUYOMAR (contrôle de vibrations, récupération d'énergie, actionnement), Daniel INMAN (récupération d'énergie, source éolienne et fluïdique), Lionel PETIT (récupération d'énergie), Shashank PRIYA (source éolienne et fluïdique), Claude RICHARD (récupération d'énergie), Gaël SEBALD (modélisation), Wen-Jong WU (récupération d'énergie).

Thèses associées (par ordre chronologique) : Yi-Chieh WU (2010-2013 - récupération d'énergie large bande), Linjuan YAN (2010-2013 - contrôle de vibrations large bande), Bin BAO (depuis 2013 - contrôle de vibrations large bande), Thomas HUGUET (depuis 2016 - récupération d'énergie large bande).

## II.1 De l'intérêt des matériaux piézoélectriques

L'étude des matériaux piézoélectriques et de leurs applications s'est évidemment faite de par l'historique des laboratoires d'affectation. Néanmoins, cet historique, n'incluant pas que les éléments piézoélectriques, trouve bien entendu son origine dans les atouts applicatifs des matériaux piézoélectriques et dans leurs applications selon les différents contextes socio-économiques.

Ainsi, notamment dans les thématiques de recherche du LGEF, le développement des axes de recherche s'est tout d'abord fait avec des collaborations étroites avec la DGA et des sociétés comme Sagem, pour le développement de transducteurs à haute performance tels que les mono-cristaux et/ou de matériaux stables. Ainsi, les applications militaires étaient à l'époque de premier ordre, mais la fin du contexte politique particulier après la Guerre Froide a conduit à une nécessité de changement de direction pour les applications des matériaux, excepté pour certains domaines bien particuliers tel que le secteur biomédical. C'est ainsi que le développement de nouvelles applications, cette fois-ci plus orientées vers le domaine industriel, tels que les moteurs piézoélectriques, puis les systèmes de contrôle vibratoire et de récupération d'énergie, ont vu le jour. Ainsi, à l'heure actuelle, les matériaux piézoélectriques trouvent leur force dans leurs capacités de conversion électromécanique bidirectionnelle et leur intégrabilité. Cet atout a par ailleurs été énormément soutenu par les progrès en termes de micro-dispositifs et d'intégration (microélectronique par exemple), qui en font désormais un matériau de choix pour la conversion électromécanique à faibles dimensions, sous différentes formes allant de la céramique aux polymères.

Ainsi, les matériaux piézoélectriques, dont les connaissances et applications restaient relativement confidentielles jusqu'à récemment, ont connus lors des dernières décades un intérêt certain conduisant à leur démocratisation dans les communautés scientifiques et de recherche, poussés par les enjeux en termes de dispositifs de faibles dimensions voire intégrés.

## II.2 Modélisation des matériaux ferroélectriques

### II.2.1 Introduction : nécessités et solutions de modélisation

Savoir prédire le comportement d'actionneurs et de capteurs est primordial afin de disposer d'un système robuste et fiable, par exemple dans le domaine des injecteurs ([NTW03, PHB<sup>+</sup>14]), des sondes ultrasonores, des moteurs piézoélectriques ([LPG96, PG09]), des systèmes haptiques ([MZK03, SDNA12]), des muscles artificiels ([BC01, MMB07]), des techniques de contrôle de santé structurale ([GZW05, HG02]) ou des mémoires et transistors ferroélectriques ([Lal10, LPK10, NTB<sup>+</sup>05, Sco07, TBS12]). Néanmoins, précision, puissance et encombrement conduisent généralement à un compromis qui est difficilement maîtrisable. A ceci s'ajoute la dimension des coûts d'implémentation, qui peuvent rendre prohibitif l'utilisation de machines puissantes ou de capteurs supplémentaires pour un système bouclé.

La recherche exposée ici se situe, de manière homogène à l'activité de recherche globale depuis le début de la carrière, dans l'optique de systèmes peu consommateurs

à travers une loi de comportement simple mais aux bases physiques. Plus particulièrement, on s'intéressera ici au lien entre polarisation et champ électrique de manière directe.

De nombreux modèles ont pu être développés dans la communauté scientifique, le plus répandu étant le modèle de Preisach initialement dédié aux systèmes magnétiques ([Pre35]). Ce modèle propose de représenter l'état de polarisation d'un matériau à partir d'éléments hystérétiques élémentaires (appelés "hystérons"), arrangés schématiquement sous forme de triangle rectangle. Selon l'évolution positive ou négative du champ électrique, différents hystérons basculent (selon leur alignement en ligne ou en colonne). Ce modèle, relativement simple, permet de prendre en compte la première polarisation et les cycles mineurs. Cependant, il présente le désavantage de nécessiter un nombre important d'hystérons ( $\geq 1000$ ) pour retranscrire fidèlement la polarisation du matériau, ainsi que de stocker l'état de chaque hystéron de manière bidimensionnelle, conduisant à une importante capacité de stockage des informations. De plus, malgré des tentatives d'extensions de ce modèle ([KP89, TWS05]), le modèle de Preisach souffre d'un certain manque de signification physique, bien qu'on puisse, en faisant un lien avec le modèle qui sera développé par la suite, considérer que la propagation du changement de polarisation (par l'approche de changement de ligne/colonne) relate un effet d'avalanche, alors que la forme géométrique triangulaire (globale) dénote d'une saturation.

En plus de Preisach, de nombreux autres modèles ont pu être développés dans la littérature. Citons à titre d'exemple le modèle de Jiles-Atherton ([JA84, SH99]), qui requiert bien moins de paramètres que le modèle de Preisach, mais présente des difficultés à représenter le comportement de systèmes anisotropiques (des extensions ont cependant tenté de résoudre ces problèmes - [RJR96, Sze14]) ainsi que les cycles mineurs ([HKL05]). Le modèle de Bouc-Wien ([Bou67, Wen76]), initialement développé pour les systèmes mécaniques, consiste à introduire un terme de premier ordre non-linéaire dans l'équation différentielle régissant le système. Cependant, ce modèle souffre de problèmes d'instabilités, conduisant à des dérives dans la réponse ainsi qu'à des cycles ouverts. Enfin, le modèle de Maxwell-Slip ([ABLS05]), utilisant un opérateur de frottement sec, est également couramment utilisé, ce dernier opérateur permettant de bien refléter les mouvements de domaines.

Les recherches menées au LGEF sur la modélisation de l'état de polarisation de matériaux ferroélectriques se rapprochent de ce dernier modèle. Débutées en 2004 par les travaux de Gaël SEBALD et Daniel GUYOMAR ([SBG04]), elles permettent de modéliser simplement la polarisation statique d'éléments ferroélectriques à l'aide d'une approche traitant les mouvements de domaines sous la forme de frottements secs. Par la suite, Benjamin DUCHARNE, toujours en collaboration avec Gaël SEBALD et Daniel GUYOMAR, a étendu ce modèle au comportement dynamique par l'utilisation de dérivées fractionnaires permettant de mieux rendre compte du comportement en fréquence des céramiques ([DGS07, GDS07]). Les implications en termes de grandeurs mécaniques ont également pu être prises en compte par la suite, notamment par la thèse de Bin ZHANG ([DZGS13, ZDSG14]). Ce n'est qu'à partir de 2015 que je me suis personnellement investi dans cet axe de recherche au laboratoire, en m'intégrant aux recherches de B. DUCHARNE et G. SEBALD, tout en y apportant l'aspect des polymères électroactifs correspondant aux travaux effectués

en collaboration avec J.-F. CAPSAL (voir Paragraphe III.2). Le but affiché était de permettre une modélisation unifiée des comportements statiques et dynamiques, ainsi qu'une description par fonctions mathématiques pures et sans recourt à de l'algorithmie (l'approche par frottements secs nécessitant quelques opérations de ce genre - [DGS07]).

## II.2.2 Principes

Dans la lignée des travaux engagés au laboratoire, le modèle discuté ici propose de modéliser le comportement de matériaux ferroélectriques comme une somme de polarisation d'unités élémentaires. Chaque élément est basiquement composé de deux blocs relatant des effets physiques à l'origine de la ferroélectricité. La différence d'un élément à un autre tient à un champ coercitif différent, qui peut par exemple trouver son origine dans les hétérogénéités au sein du matériau (dues aux imperfections, à une distribution de contrainte non homogène ou encore à des distances inter-chaîne différentes dans le cas des polymères). Le premier effet constituant un élément consiste en un effet d'avalanche relatant l'effet coopératif de la rotation des domaines sous l'action d'un champ électrique, ceci du fait de l'interaction entre les dipôles lorsque ceux-ci sont alignés, conduisant à une dérivée de la polarisation qui devient de plus en plus prononcée avec le champ électrique. Ce bloc remplace ainsi avantageusement l'effet de frottement sec utilisé dans les modèles précédents, car il permet une évolution plus douce de la polarisation, permettant de prendre par exemple en compte des effets à long-terme comme la dépolarisation. Le second effet considéré tient à la saturation de la polarisation, due à l'orientation des dipôles et à la contrebalance de l'énergie d'interaction des dipôles avec l'énergie électrique et l'énergie thermique. La représentation schématique de cette approche est donnée en Figure II.1, où  $g$  et  $f$  représentent respectivement les fonctions d'avalanche et de saturation de la polarisation  $P_i$  de l'élément (et de sa dérivée temporelle) en fonction des champs électriques appliqués sur chaque bloc ( $(E_{av})_i$  pour l'effet d'avalanche et  $(E_p)_i$  pour la saturation).

Une telle approche par fonction permet donc d'obtenir une représentation mathématique de l'état de polarisation du matériau. En effet, le champ total  $E$  peut s'exprimer comme la somme des champs sur chaque bloc, qui par conséquent relie champ total et polarisation :

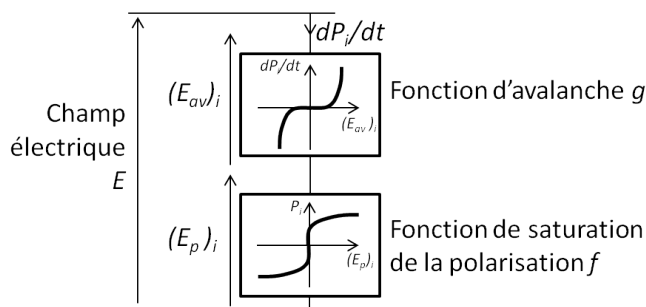


Figure II.1 – Principe d'un élément du modèle.

$$E(t) = (E_{av})_i(t) + (E_p)_i(t) = (E_c)_i g^{-1} \left( \left( \frac{\tau}{P_{av}} \right) \frac{dP_i}{dt}(t) \right) + E_{sat} f^{-1} \left( \frac{P_i(t)}{(P_{sat})_i} \right) \quad (\text{II.1})$$

où chaque fonction est normalisée par rapport à un pseudo-temps de relaxation normalisé à la polarisation  $\tau/P_{av}$  et à une polarisation de saturation  $(P_{sat})_i$ , permettant une adimensionnalisation des fonctions. Cette adimensionnalisation est également assurée par l'utilisation du champ électrique coercitif  $(E_c)_i$  et du champ de saturation  $E_{sat}$  <sup>II.1</sup>.

A partir de l'équation (II.1), il est ainsi possible d'obtenir l'expression de la dérivée de la polarisation de l'élément selon :

$$\frac{dP_i}{dt}(t) = \left( \frac{P_{av}}{\tau} \right) g \left( \frac{E(t) - E_{sat} f^{-1} \left( \frac{P_i(t)}{(P_{sat})_i} \right)}{(E_c)_i} \right) \quad (\text{II.2})$$

permettant une implémentation numérique aisée (par exemple via les méthodes de Newton ou Runge-Kutta 4).

A partir de l'obtention de la polarisation d'une unité élémentaire, il est alors possible d'obtenir la polarisation global du matériau en sommant les polarisations, et en y adjoignant une contribution linéaire (représentation par la susceptibilité  $\chi_{lin}$ , dénotant par exemple une phase saturant pour de très hauts champs électriques), ainsi que représenté en Figure II.2 :

$$P(t) = \chi_{lin} E + \sum_{i=1}^M P_i(t) \quad (\text{II.3})$$

avec  $M$  le nombre total d'éléments du modèle.

L'obtention des différents paramètres se fait de manière expérimentale. Particulièrement, la polarisation de saturation s'obtient à partir des mesures de la première polarisation et d'un cycle d'hystérésis. Pour la première polarisation, l'effet d'ava-

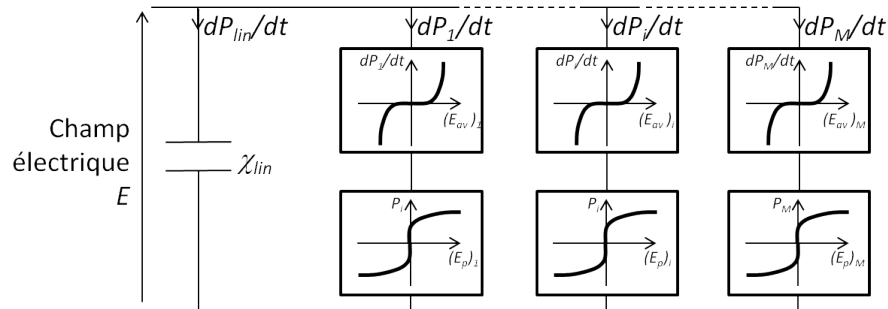


Figure II.2 – Modèle global.

---

II.1. Il convient de noter ici que  $E_{sat}$  ne correspond pas exactement au champ électrique pour lequel la polarisation devient quasi-constante, mais plutôt au champ au-delà duquel le comportement non-linéaire devient évident. De plus, l'application de la fonction d'avalanche conduit à l'apparition du comportement hystérique, et donc une translation de la fonction de saturation, décalant également le champ électrique dit "de saturation" par le champ coercitif.



lanche s'apparente à un décalage par le champ coercitif de l'élément, de telle sorte que cette première polarisation  $P_{prem}$  s'écrit de la manière suivante, en fonction du champ électrique  $E$  :

$$P_{prem}(E) - \chi_{lin}E = \sum_{i=1}^M (P_{sat})_i f\left(\frac{E - (E_c)_i}{(E_{sat})_i}\right) \quad (\text{II.4})$$

que l'on peut réécrire en fonction d'un spectre de distribution  $\sigma$  (fonction du champ coercitif de l'élément) de la polarisation de saturation globale  $(P_{sat})_{tot}$  :

$$P_{prem}(E) - \chi_{lin}E = \sum_{i=1}^M \sigma((E_c)_i) (P_{sat})_{tot} f\left(\frac{E - (E_c)_i}{(E_{sat})_i}\right) \quad (\text{II.5})$$

Une fois le matériau polarisé, la polarisation d'un élément peut être décrite comme la courbe anhystérétique décalée par le champ coercitif correspondant. Cette courbe est directement reliée à la fonction de saturation car elle peut être obtenue en quasi-statique où la dérivée temporelle de la polarisation est négligeable, de telle sorte que l'expression de la première polarisation devient :

$$P_{prem}(E) - \chi_{lin}E = \sum_{i=1}^M \sigma((E_c)_i) [P_{anhyst}(E - (E_c)_i) - \chi_{lin}(E - (E_c)_i)] \quad (\text{II.6})$$

On voit ainsi directement apparaître une opération de convolution entre le spectre et la courbe anhystérétique. Ainsi, par l'opération inverse, il est possible d'obtenir ce spectre en déconvoluant la courbe de première polarisation par la courbe anhystérétique<sup>II.2</sup> :

$$\sigma(E) = [P_{prem}(E) - \chi_{lin}E] *^{-1} [P_{anhyst}(E) - \chi_{lin}(E)] \quad (\text{II.7})$$

où  $*^{-1}$  dénote l'opération de déconvolution.

Ainsi, on voit que le modèle proposé est basé sur une décomposition unidimensionnelle des paramètres des éléments unitaires, le tout avec un formalisme mathématique abolissant le recours à des procédés algorithmiques. Ceci permet ainsi un allègement des moyens d'espace mémoire et de calculs, ce qui peut s'avérer crucial lorsque les capacités du calculateur sont limitées, comme dans le cas des systèmes embarqués ou lorsque l'aspect énergétique est important. De même, cette simplicité de calcul permet de répondre aux besoins des applications nécessitant des temps de réponse faibles. Bien évidemment, ce modèle n'a pas la prétention d'être aussi précis que des modèles basés par exemple sur la nucléation des domaines ([FM59]). Le principe proposé ici se situe plus, en complément des avantages précédemment cités, dans l'optique d'une application à une gamme de transducteurs dont les caractéristiques restent similaires d'un dispositif à un autre mais pouvant légèrement changer.

---

II.2. Cette dernière étant par exemple obtenue en faisant la demi-somme du champ électrique pour une valeur de polarisation donnée.

### II.2.3 Application aux céramiques ferroélectriques

Il est ici proposé d'évaluer les performances du modèle précédemment exposé dans le cas de céramiques ferroélectriques. Les céramiques considérées sont des céramiques douces de type Navy-II, de référence P1 – 88 fournies par Quartz et Silice, sous forme de briquets (cylindres à base circulaire) de hauteur 1 cm et de diamètre 0,5 cm, polarisés selon l'axe du cylindre. Les mesures de polarisation, fournies par M. DUCHARNE, ont été faites à l'aide d'un amplificateur haute tension dont la sortie était relevée en même temps que le courant via un dispositif de mesure de ce dernier. Le champ électrique a ensuite été déduit à partir de la tension (en supposant un champ uniforme) et la polarisation a été obtenue par intégration du courant mesuré (après suppression de la partie de pertes, supposées linéaires).

Afin de modéliser le comportement de la céramique, on choisira comme fonction d'avalanche une fonction typique de sinus hyperbolique, et comme fonction de saturation une fonction *arc tangente* relatant le modèle d'Ising, bien adapté aux structures anisotropes ([Isi24]) :

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{2}{\pi} \arctan(x) \\ g(x) &= \sinh(\beta x) \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

avec  $\beta$  une constante sans dimension relatant la vitesse de l'avalanche. Les paramètres supplémentaires utilisés dans la simulation sont donnés dans le Tableau II.1.

Le spectre obtenu, à partir de la première polarisation et de la courbe anhystérétique obtenue par la demi-somme de la polarisation à 0,1 Hz, est représenté en Figure II.3. On voit ainsi une gamme de champ électrique prépondérante, qui correspond à la plus grande variation de polarisation en fonction du champ électrique, qui se manifeste lorsque l'effet d'avalanche n'est pas totalement compensé par la saturation.

Les résultats en termes de polarisation, ainsi que la comparaison avec le modèle à frottement sec (incluant les aspects fractionnaires pour la prise en compte des effets dynamique)<sup>II.3</sup> sont représentés en Figure II.4. On voit ainsi que le modèle exposé précédemment permet de rendre compte de manière excellente la polarisation du matériau (les courbes de simulation et expérimentales étant pratiquement confondues), et ce sur une large gamme de fréquence (grâce à la fonction d'avalanche relatant de manière fidèle le comportement dynamique du matériau), alors que l'approche fractionnaire tend à surestimer la première polarisation et sous-estimer les courbes

Paramètre	Valeur
Susceptibilité linéaire relative $\chi_{lin}/\epsilon_0$	1800
Polarisation de saturation totale $(P_{sat})_{tot}$	0,35 C.m <sup>-2</sup>
Champ électrique de saturation $E_{sat}$	60 kV.m <sup>-1</sup>
Facteur d'avalanche $\frac{P_{av}}{\tau}$	$2 \times 10^{-7}$ C.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Coefficient d'avalanche $\beta$	10.5

Tableau II.1 – Paramètres de simulation de l'état de polarisation d'une céramique ferroélectrique.

---

II.3. Le calcul de la réponse du modèle à frottement sec a été fourni par M. DUCHARNE.

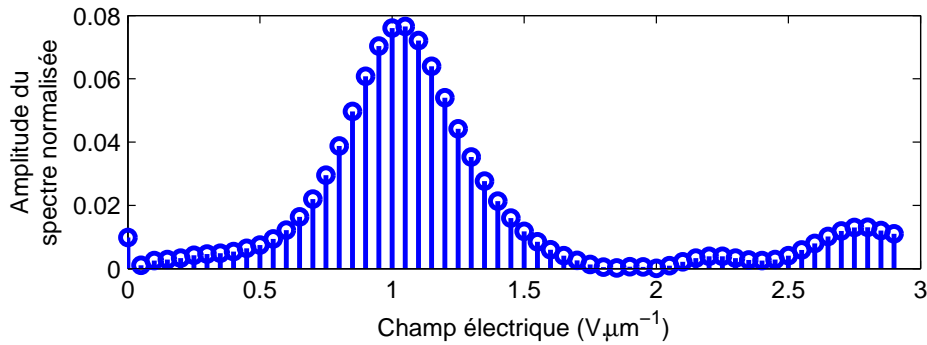


Figure II.3 – Spectre normalisé (à 1) de distribution de la polarisation en fonction du champ coercitif.

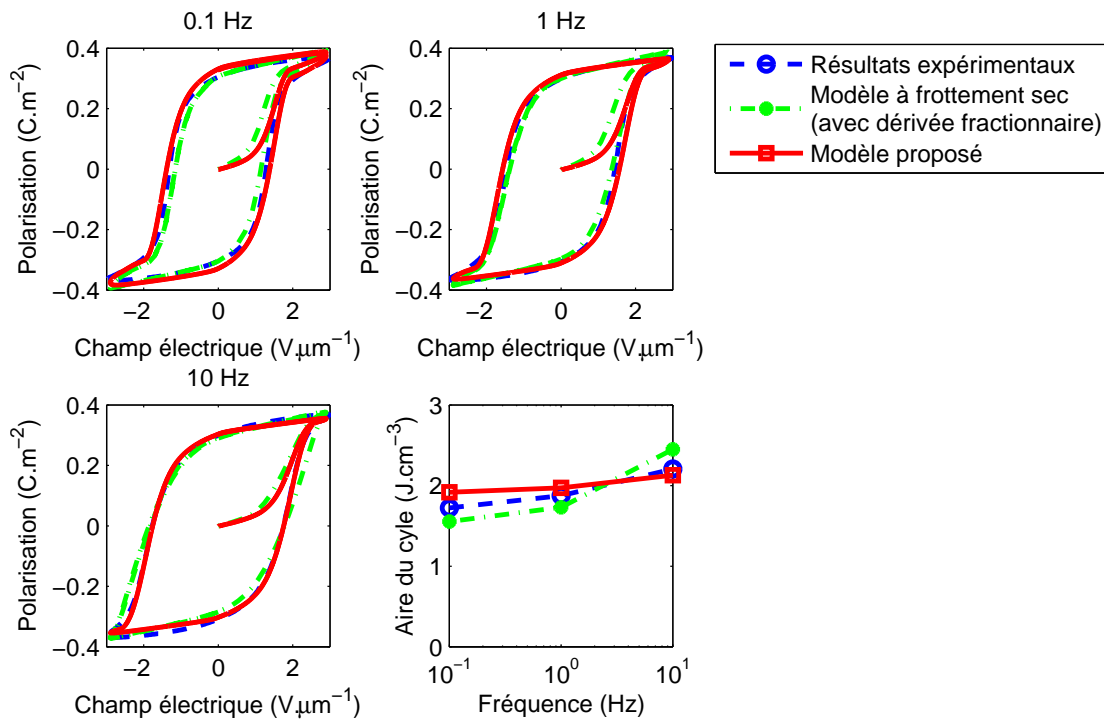


Figure II.4 – Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour une céramique.

hystérétiques. Ces résultats sont aussi validés par l'aire du cycle, où l'on voit que la modélisation proposée permet de mieux rendre compte de l'évolution fréquentielle, en ayant une pente plus proche de la pratique que l'approche fractionnaire, bien que cette assertion nécessiterait plus de mesures pour confirmer cette tendance (car seules trois fréquences différentes ont été mesurées).

## II.2.4 Application aux polymères ferroélectriques

Du fait de leur flexibilité, leur légèreté et leur conformabilité, les polymères sont actuellement très étudiés dans la communauté scientifique, notamment les polymères électroactifs dans le cadre d'actionneurs (micro-pompes, morphing etc. . . - [BC01, MZK03, NTW03, PHB<sup>+</sup>14, SDNA12]) ou de capteurs flexibles (contrôle de santé structurale. . . - [GZW05]). Plus particulièrement, les polymères ferroélectriques sont une gamme de matériaux de première importance dans ce domaine. Ce paragraphe propose ainsi l'application du modèle précédemment exposé au cas des polymères ferroélectriques, et plus particulièrement, pour la validation expérimentale, au cas du copolymère fluoré P(VDF-TrFE), qui permet une polarisation plus aisée que le PVDF (pas d'étirage nécessaire pour passer en phase  $\beta$ ) et donc une élaboration et une utilisation industrielles plus simples ([DCC05, TWS05, DSEBC06, Chu08, GNSLM10, CLQ<sup>+</sup>13]).

Contrairement aux céramiques ferroélectriques, on appliquera ici le modèle de Langevin, mieux adapté aux matériaux isotropes comme les polymères électroactifs. Ce modèle, qui sera explicité dans le Chapitre III, Partie III.2, décrit la polarisation de matériaux électrostrictifs non hystérétiques en utilisant la statistique de Boltzmann couplée à un formalisme de Debye-Langevin ([CLC<sup>+</sup>12, LCS<sup>+</sup>14]), conduisant à l'expression de la polarisation  $P$  en fonction du champ électrique  $E$  :

$$P = N_T \mu \mathcal{L} \left( \frac{E}{E_{sat}} \right) \quad (\text{II.9})$$

où  $N_T$  représente la densité de dipôle totale (c'est-à-dire pour tous les hystérons dans la modélisation proposée),  $\mu$  le moment dipolaire moyen,  $E_{sat}$  le champ de saturation<sup>II.4</sup> donné par  $E_{sat} = k_B T / \mu$  (avec  $k_B$  la constante de Boltzmann et  $T$  la température en Kelvin) et  $\mathcal{L}(x)$  la fonction de Langevin de la variable  $x$  ( $\mathcal{L}(x) = \coth(x) - 1/x$ ). Ainsi, la fonction de Langevin est utilisée en lieu et place de l'approche d'Ising pour la fonction de saturation, pour laquelle le paramètre  $N_T \mu$  joue le rôle de la polarisation de saturation totale.

En appliquant directement celui-ci avec les paramètres donnés dans le Tableau II.2, on remarque dans la Figure II.5 une relative bonne prédiction de l'évolution de la polarisation en fonction du champ électrique maximum appliqué, comme également indiqué par l'évolution de la polarisation rémanente en fonction du champ électrique

Paramètre	Valeur
Susceptibilité linéaire relative $\chi_{lin}/\epsilon_0$	14, 2
Polarisation de saturation totale $N_T \mu$	69 mC.m <sup>-2</sup>
Champ électrique de saturation $E_{sat}$	2 V.μm <sup>-1</sup>
Facteur d'avalanche $\frac{P_{av}}{\tau}$	$5 \times 10^{-17}$ C.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Coefficient d'avalanche $\beta$	30

Tableau II.2 – Paramètres de simulation de l'état de polarisation pour un échantillon de polymère ferroélectrique.

---

II.4. Là encore, ce paramètre rend plus compte du passage au comportement non-linéaire que du champ auquel la polarisation sature - voir Partie III.2.2.

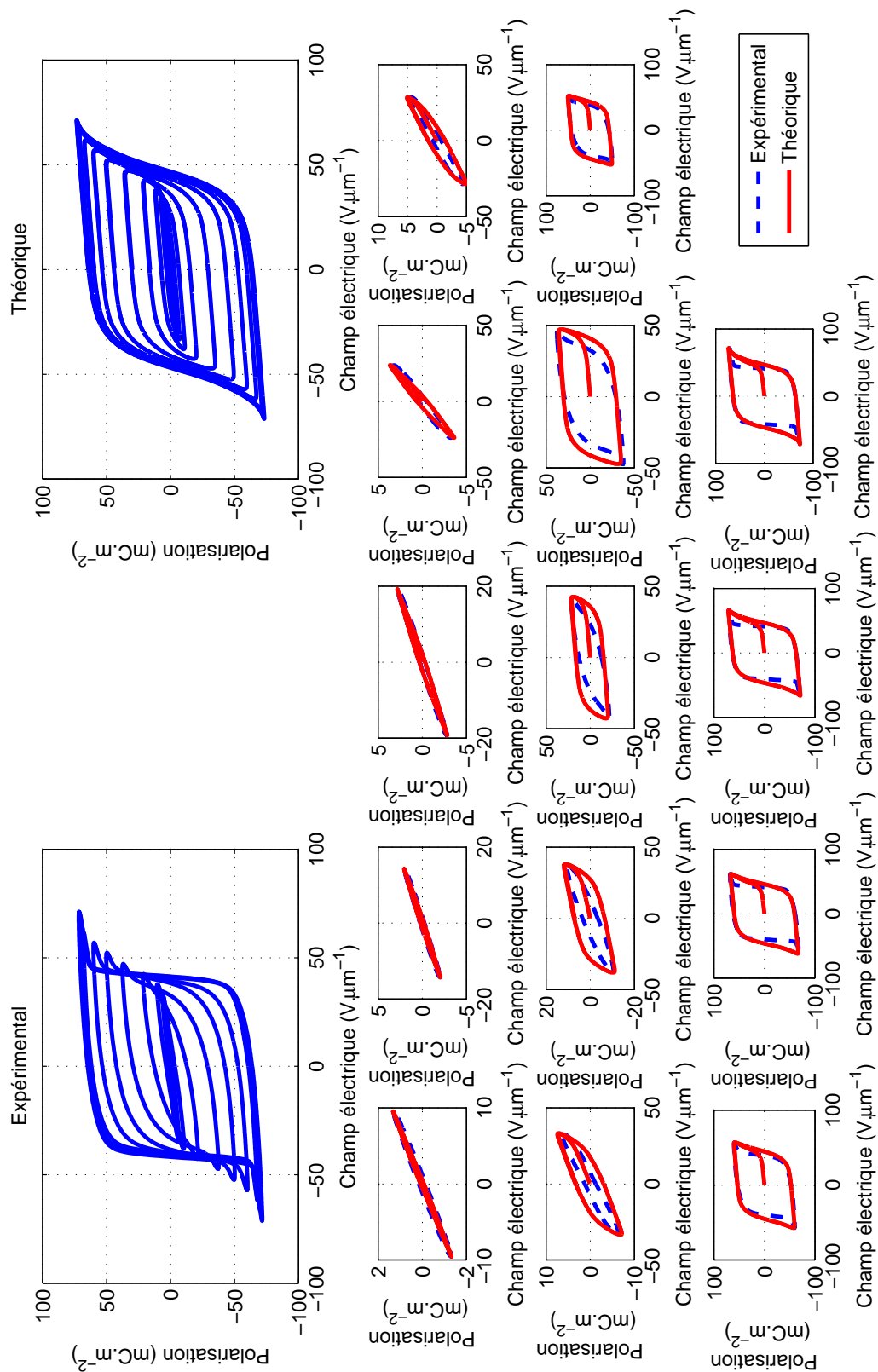


Figure II.5 – Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour un polymère.

maximum appliqué (Figure II.6). L'effet de la fréquence sur le cycle de polarisation, ainsi que les prédictions du modèle, est représenté en Figures II.7 et II.8, respectivement pour les cycles et pour la polarisation rémanente. On remarque ainsi que la pente lors du changement de polarisation est plus importante dans le cas expérimental, ce qui peut être attribué à des phénomènes dynamiques non pris en compte par l'approche proposée, telles que des pertes non-linéaires. Ce constat se ressent également sur le comportement en fréquence qui présente un maximum local de polarisation rémanente alors que le modèle prédit une diminution monotone de celle-ci. Néanmoins, en reprenant la Figure II.5, on remarque que l'une des différences notables concerne le "croisement" des cycles, dénotant un changement de la polarisation de saturation avec le champ électrique maximum. Ceci peut être attribué à une recristallisation sous champ du polymère, conduisant à une croissance de la phase cristalline et donc à un changement de la susceptibilité électrique du matériau.

### Prise en compte de la recristallisation sous champ

Comme noté précédemment, un effet de recristallisation sous champ électrique, notamment sous de fortes valeurs de ce dernier, peut conduire à une redistribution des phases cristallines et amorphes et ainsi à un changement du comportement ferroélectrique ([DMBR78, LPK09]). Cette partie propose ainsi une modification du modèle permettant de prendre en compte ce phénomène. Cette prise en compte est faite en faisant l'hypothèse que le spectre de distribution des hystérons ne change pas et que la recristallisation sous champ modifie avant tout la densité de dipôles associés à la phase cristalline<sup>II.5</sup>. A partir des mesures expérimentales, la suscepti-

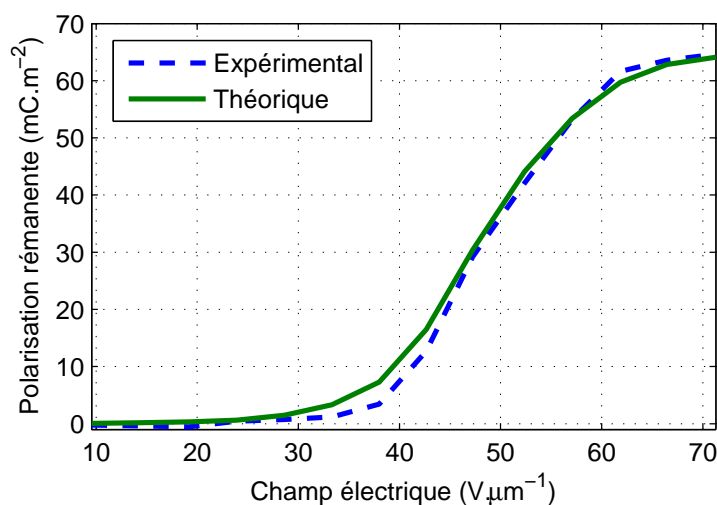


Figure II.6 – Evolution de la polarisation rémanente en fonction du champ électrique maximal appliqué pour un polymère.

II.5. Ceci conduit également à une diminution de la contribution de la phase amorphe ; cependant, cette dernière ayant un effet limité sur la polarisation, il sera estimé que la susceptibilité électrique associée est quasi constante.

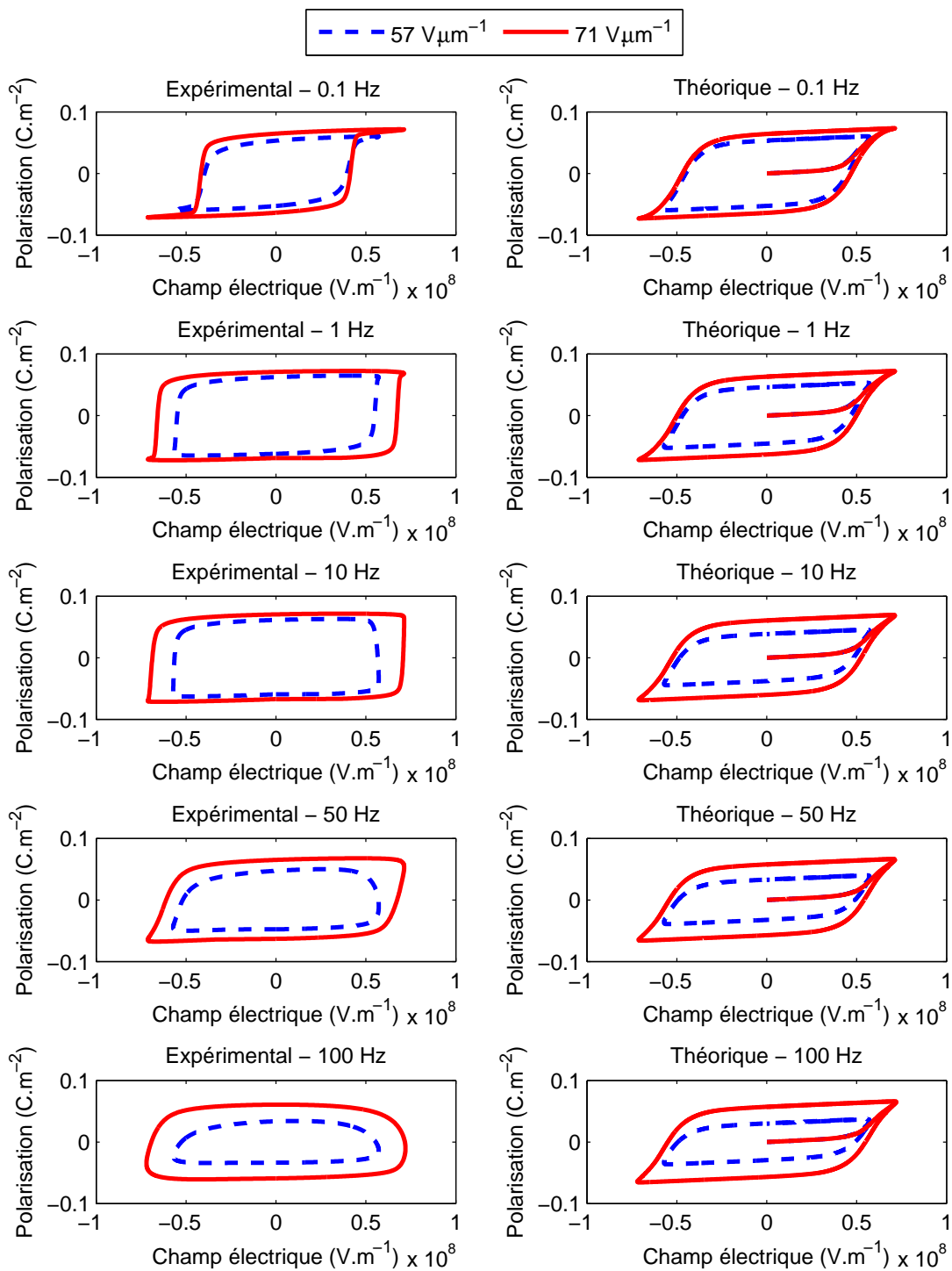


Figure II.7 – Effet de la fréquence sur les cycles de polarisation pour un polymère et deux valeurs de champ électrique maximal.

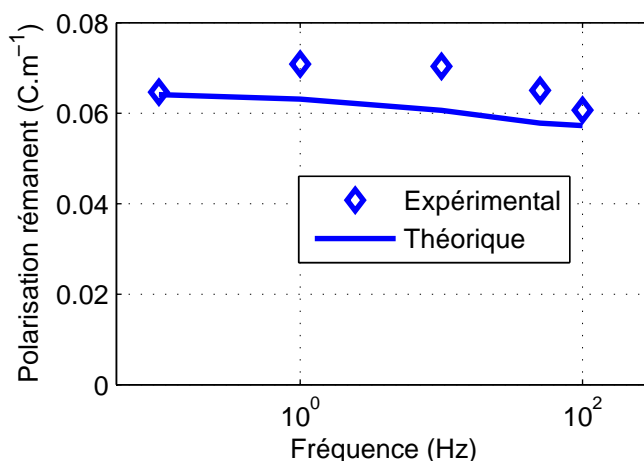


Figure II.8 – Effet de la fréquence sur la polarisation rémanente pour un polymère pour un champ électrique maximal de  $71 \text{ V } \mu\text{m}$ .

bilité relative à bas champ, obtenue à partir de la pente de la caractéristique champ électrique-polarisation près du champ coercitif en enlevant la contribution linéaire de la phase dipolaire, a été mesurée, et est représentée en Figure II.9. On observe ainsi un mécanisme d'activation qui apparaît dès lors que le champ électrique maximal atteint  $40 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ , confirmant l'existence de la recristallisation sous champ, avec une saturation de l'effet qui apparaît à  $60 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$  (correspondant à une recristallisation totale).

A partir de ces résultats, il est considéré afin de prendre en compte l'activation de la recristallisation ainsi que de sa saturation, un modèle hyperbolique pour relater de l'évolution de la susceptibilité de la phase cristalline  $\chi_{cryst}$  en fonction du champ maximal  $E_{max}$  appliqué :

$$\chi_{cryst} = \frac{1}{2} (\chi_{cryst})_{fin} \left[ \tanh \left( \frac{E_{max} - E_{crist}}{E_{vit}} \right) + 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

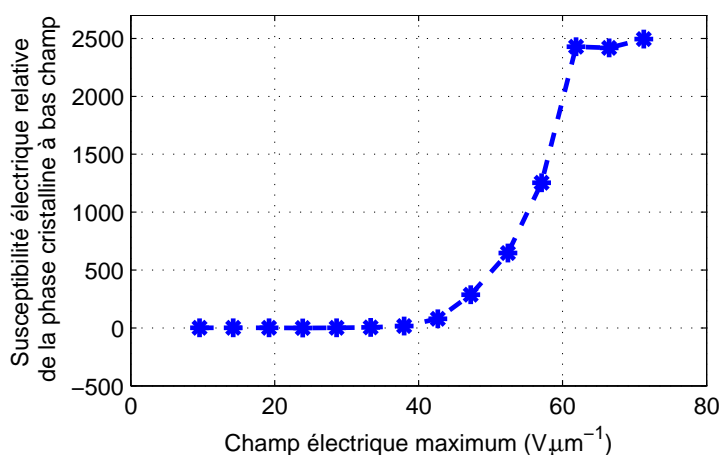


Figure II.9 – Susceptibilité relative à bas champ en fonction du champ électrique maximal appliqué.



avec  $(\chi_{cryst})_{fin}$  la susceptibilité finale (à saturation) de la phase cristalline,  $E_{crist}$  le champ d'activation du phénomène de recristallisation et  $E_{vit}$  le champ électrique dénotant de la vitesse de recristallisation.

A partir de cette susceptibilité, il est ainsi possible d'obtenir la densité totale de dipôles  $N_T$  de la phase cristalline en utilisant le modèle de Langevin précédemment considéré :

$$N_T = 3 \frac{k_b T \chi_{cryst}}{\mu^2} \quad (\text{II.11})$$

où le moment dipolaire moyen  $\mu$  est obtenu à partir du champ électrique de saturation (cf. Chapitre III, Partie III.2) :

$$\mu = \frac{k_b T}{E_{sat}} \quad (\text{II.12})$$

En appliquant ces modifications dans le modèle précédent, et en raffinant les paramètres (Tableau II.3<sup>II.6</sup>), on obtient les résultats représentés dans la Figure II.10. Ces résultats montrent, en plus de la relative bonne corrélation obtenue en combinant effets d'avalanche et de saturation pour obtenir un comportement hystérétique, que la modification de la densité de dipôles de la phase cristalline permet de rendre compte du changement des polarisations de saturation en fonction du champ électrique maximal appliqué, conduisant à l'effet de "croisement" des courbes concordant de manière assez fidèle aux relevés expérimentaux. Néanmoins, on pourra tout de même noter, comme précédemment, que les cycles théoriques sont légèrement plus resserrés que ceux expérimentaux.

Paramètre	Valeur
Susceptibilité linéaire relative $\chi_{lin}/\epsilon_0$	14, 2
Champ électrique de saturation $E_{sat}$	1 V. $\mu\text{m}^{-1}$
Facteur d'avalanche $\frac{P_{av}}{\tau}$	$5 \times 10^{-13}$ C.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>
Coefficient d'avalanche $\beta$	33
Valeur finale de la susceptibilité relative de la phase cristalline $(\chi_{cryst})_{fin}/\epsilon_0$	2500
Champ électrique d'activation de la cristallisation $E_{crist}$	48 V. $\mu\text{m}^{-1}$
Champ électrique relatant la vitesse de recristallisation $E_{vit}$	10 V. $\mu\text{m}^{-1}$

Tableau II.3 – Paramètres de simulation de l'état de polarisation pour un échantillon de polymère ferroélectrique en prenant en compte la recristallisation sous champ.

---

II.6. On remarquera que certaines valeurs de paramètres présentent un changement important par rapport au cas où la recristallisation sous champ n'est pas prise en compte - ceci s'explique par le fait que le changement de la densité de dipôles en fonction du champ électrique maximal est moyenné dans le cas précédent.

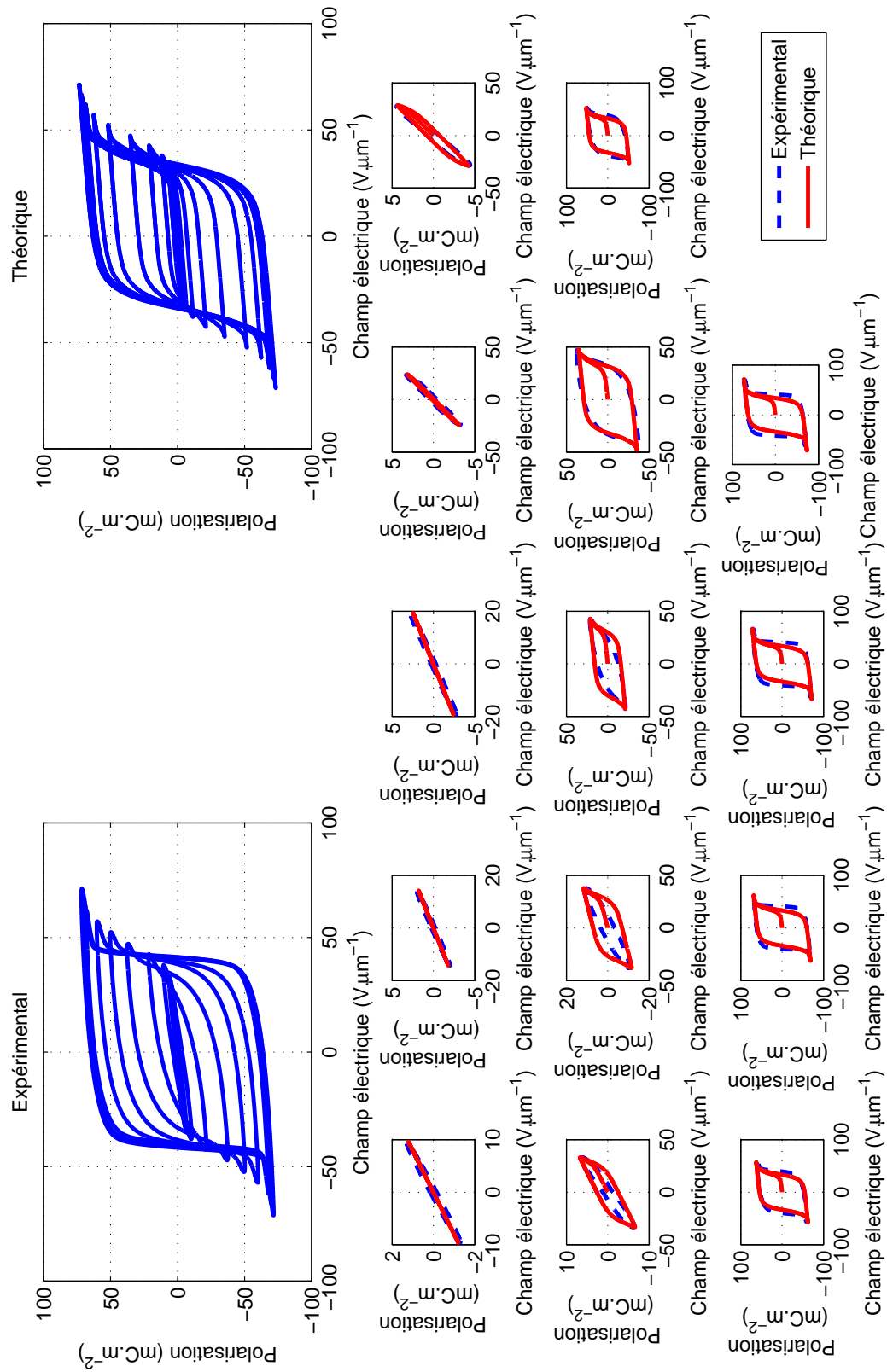


Figure II.10 – Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour un polymère en prenant en compte la recristallisation sous champ.

## II.2.5 Discussion

Le modèle précédemment établi, qui repose sur l'interprétation du comportement hystérétique de céramiques ou polymères ferroélectriques par l'association d'un effet d'avalanche (représentant le retournement des domaines et la coopérativité sous champ) et d'un effet de saturation de la polarisation, permet ainsi une retranscription assez fidèle de l'état de polarisation des matériaux considérés. Bien que n'étant pas aussi performant que d'autres méthodes telles que les approches de nucléation de domaines ou *ab initio* ([Res03]), l'objectif ici est de donner un modèle simple et ne nécessitant que peu de ressources en termes d'implémentation et d'algorithmie, permettant une intégration possible dans les contrôleurs d'actionneurs nécessitant une réponse rapide et/ou avec très peu de ressources calculatoires ou énergétiques (comme dans le cas de systèmes embarqués). Ainsi, alors que les modèles classiques nécessitent par exemple de stocker des données de manière bidimensionnelle (Preisach) ou font appel à des algorithmes plus ou moins complexes (Maxwell-Slip), le modèle exposé ici ne nécessite qu'un stockage unidimensionnel (spectre de distribution des hystérons) avec une formulation purement mathématique. De plus, plutôt que de souhaiter modéliser un échantillon particulier d'un matériau avec une extrême finesse, l'approche choisie ici, tout en ayant des fondements mathématiques couplés à des approches physiques, vise à décrire le fonctionnement d'une classe, ou d'une série, de matériaux, ayant des caractéristiques proches mais pas exactement identiques. Ainsi, à partir de la caractérisation d'un seul échantillon, il est possible d'appliquer ce modèle à toute une série de transducteurs utilisant des matériaux dont est dérivé cet échantillon.

Il apparaît néanmoins certains points perfectibles dans le modèle présenté. En particulier, le comportement en fréquence pourrait être raffiné en ajoutant des termes de pertes dépendant de la fréquence via l'utilisation d'opérateurs fractionnaires par exemple ([DZGS13]). De plus, une analyse détaillée des interdépendances entre les paramètres du modèle (par exemple le facteur d'avalanche et le coefficient d'avalanche) et le comportement physique (aire du cycle, dynamique de retournement des domaines...) pourrait permettre de mieux choisir les caractéristiques utilisées dans l'implémentation du modèle (ces paramètres ayant été choisis de manière semi-empirique dans les simulations précédentes). Néanmoins, le raffinement de ce modèle doit se faire en gardant en tête le compromis entre simplicité (formulation purement mathématique, nombre réduit de paramètres...) et précision.

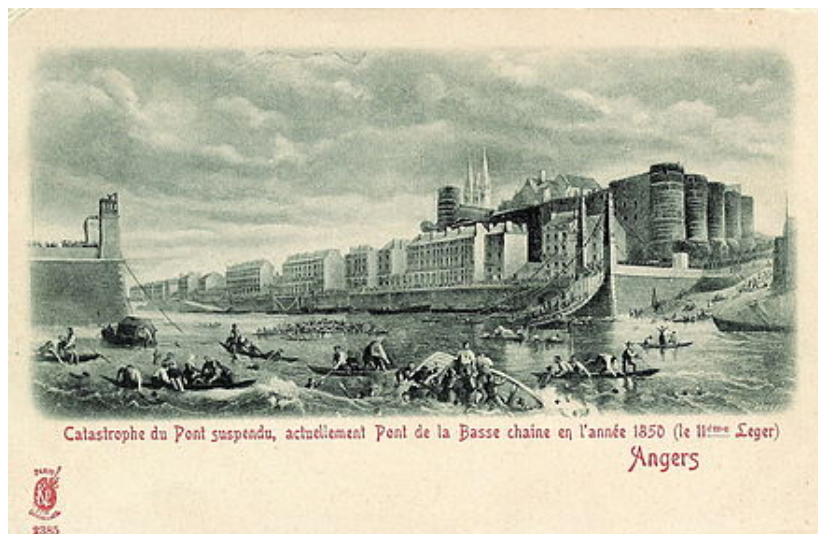
## II.3 Contrôle de vibrations

### II.3.1 Introduction et enjeux du contrôle de vibrations

Les vibrations mécaniques et acoustiques sont présentes dans de nombreux environnements. Alors que certaines sont bénéfiques au bien-être de l'Homme (parole, musique, massage, nettoyage...), d'autres sont plutôt néfastes voire complètement destructrices (nuisances sonores, vibrations des structures...). Citons à titre d'exemples de conséquences funestes le pont de la Basse-Chaîne à Angers, qui s'effondra après être entré en résonance suite au passage d'une troupe militaire marchant

au pas<sup>II.7</sup> ou sous l'effet du vent (selon les versions), ou encore le Pont de Tacoma Narrows aux États-Unis qui entra également en résonance sous l'effet du vent, ou enfin le vol Aloha 243 dont une partie du fuselage s'est arrachée suite à de nombreux atterrissages<sup>II.8</sup> (Figure II.11). Ainsi, la limitation des vibrations pour la préservation de l'intégrité structurelle ou du confort est un enjeu majeur dans l'ingénierie.

Plusieurs techniques de contrôle de vibrations ont été développées au cours des âges. Au vu du fil conducteur de la thématique de recherche, nous nous intéressons ici en priorité aux systèmes intégrables dans l'optique du contrôle de petites



(a) Pont de la Basse-Chaine à Angers après l'effondrement du au passage d'une troupe militaire marchant en cadence (source : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont\\_de\\_la\\_Basse-Chaine](https://fr.wikipedia.org/wiki/Pont_de_la_Basse-Chaine))



(b) Pont de Tacoma Narrows au moment de l'effondrement sous l'effet du vent (source : <http://www.egretsnest.files.wordpress.com>)



(c) Vol Aloha 243 après qu'une partie de son fuselage se soit arrachée sous l'effet des vibrations causées par les turbulences et les atterrissages répétés (source : <http://www.facstaff.bucknell.edu>)

Figure II.11 – Exemples d'endommagements sous l'effet de vibrations.

---

II.7. Depuis ce temps-là, il est explicitement inscrit dans le code militaire de rompre le pas au passage de ponts.

II.8. L'avion faisant des vols courts, l'inspection planifiée après un certain nombre d'heures de vols n'était pas d'actualité.

structures. L'exemple typique touche par exemple les cartes électroniques embarquées/rackées, soumises aux vibrations des véhicules dans lesquels elles sont présentes. Sous de telles conditions, des microcoupures voire le décollement de composants peuvent apparaître du fait des sollicitations mécaniques (Figure II.12) ; la probabilité d'un tel événement étant significatif dès lors que le déplacement de la carte est supérieur à seulement 3 ‰ de l'épaisseur de celle-ci ([Ste77]).

Les approches classiques pour le contrôle de vibrations se basent sur la dissipation de l'énergie mécanique par effet Joule. Ceci inclut les matériaux viscoélastiques (contraints ou non - [Nak98, Gal09]), les techniques d'amortissement particulières basées sur les chocs ([PM98, XWC05]), ou encore via un étage de conversion mécano-mécanique supplémentaire via les systèmes accordés (absorbeurs accordés ou amortisseurs à masse accordée - [MSGM08, ZN06] - ; l'un des exemples le plus démonstratifs étant celui de la tour 101 de Taipei - Figure II.13). Cependant, ces techniques sont généralement efficaces sur des gammes fréquentielles assez hautes, bien souvent incompatibles avec les déformations de flexion qui se situent bien souvent en-deçà de 100 Hz, ou alors les structures associées sont très imposantes pour cibler ces modes basse fréquence.

Néanmoins, avec le développement des "systèmes intelligents", ou plutôt avec la démocratisation des éléments de conversion d'énergie couplant différents domaines de la physique (Figure II.14), de nouvelles techniques ont été développées depuis

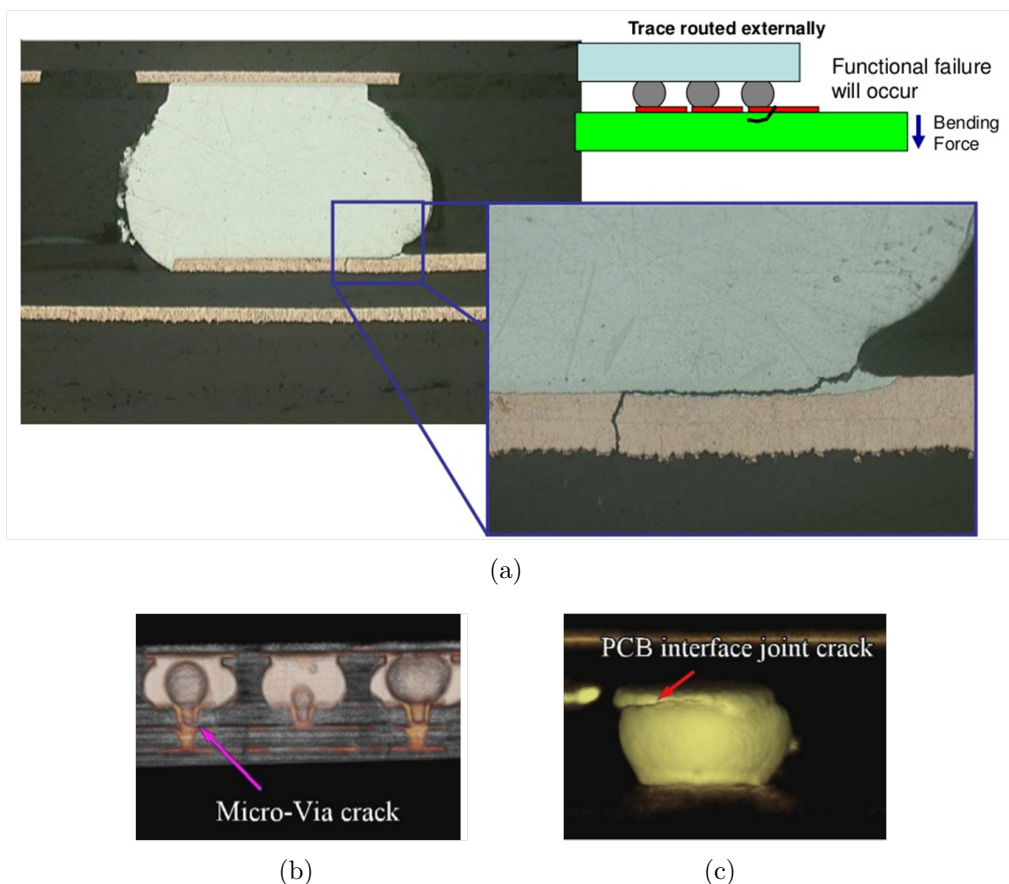


Figure II.12 – Exemples d'endommagements de cartes électroniques ([Tul13])



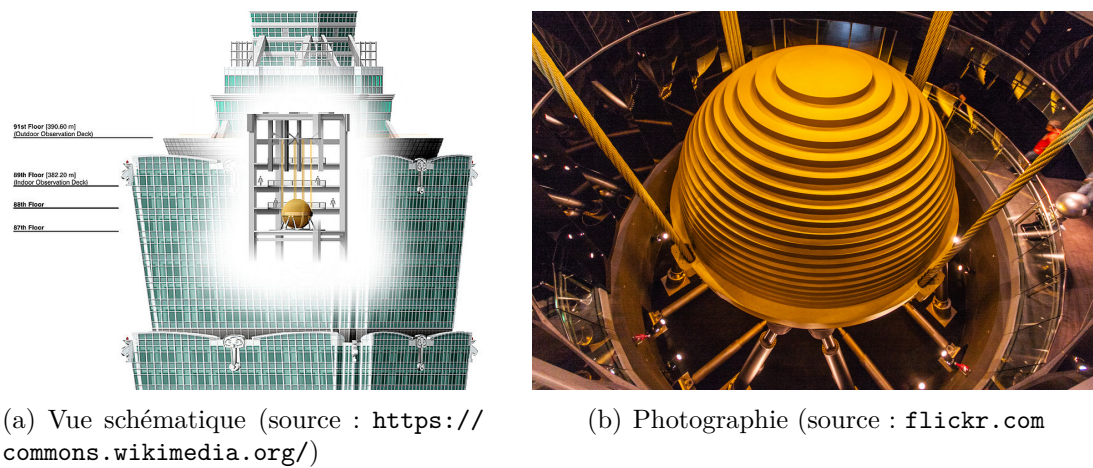


Figure II.13 – Amortisseur à masse accordée de la tout 101 de Taipei.

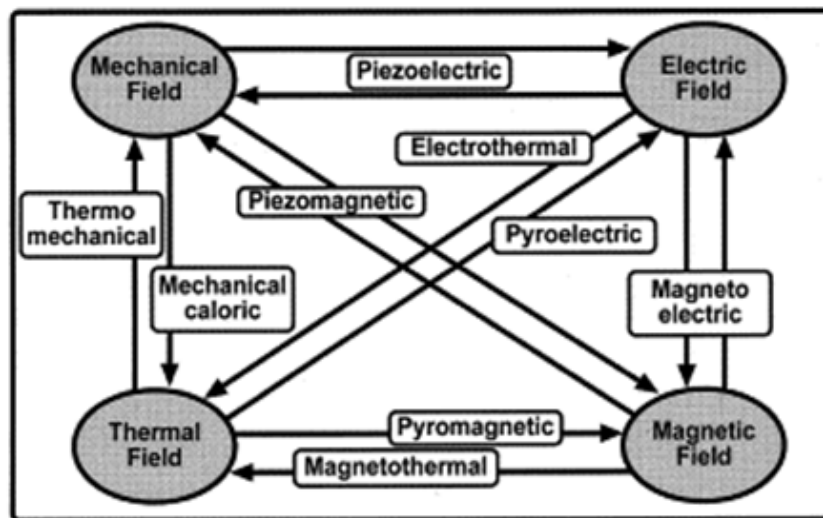


Figure II.14 – Couplages multi-physiques ([NVPH00]).

une vingtaine d'années. Le principe de ces techniques consiste à utiliser un étage de conversion supplémentaire (typiquement de la mécanique au magnétisme ou de la mécanique à l'électrique), permettant d'élargir les possibilités de contrôle ainsi que de cibler des modes de vibrations basse fréquence. Parmi les matériaux couramment utilisés dans les applications industrielles, citons par exemple les fluides magnéto- et électro-rhéologiques ([LL02,KG08]), les Alliages à Mémoires de Forme ([SA09,SK10]) et les systèmes inductifs.

Dans le cadre de systèmes de faibles dimensions cependant, les éléments piézoélectriques constituent un choix de premier ordre, grâce à leur intégrabilité, leur bonnes capacités de conversion d'énergie et leurs densités de puissance relativement importantes. De plus, contrairement aux systèmes magnétiques, les éléments piézoélectriques ne génèrent pas d'interférences électromagnétiques, ce qui est désirable dans de nombreux cas (telles que les applications aux cartes électroniques). Parmi les dispositifs de contrôle de vibrations utilisant des éléments piézoélectriques, il est

possible d'identifier trois familles. La première consiste à utiliser l'élément piézo-électrique comme un actionneur "classique" ([CRFN96]), contrôlé de manière active par toute une chaîne constituée d'un capteur (potentiellement piézoélectrique également), d'une interface d'acquisition, d'un étage de commande, d'un étage de puissance (amplification), et enfin de l'actionneur en lui-même (Figure II.15). L'étage de traitement peut inclure tout type de loi de commande, de la plus simple (PI par exemple) à la plus complexe (comme  $H_\infty$ ). Bien que de telles techniques présentent d'excellentes capacités d'amortissement sur une gamme fréquentielle très large, leurs demandes en termes de puissances sont énormes, et requiert bien souvent des amplificateurs avec des caractéristiques telles que leur intégration est impossible. Ceci s'explique notamment par une non-prise en compte de l'aspect de conversion d'énergie, conduisant par exemple à une nécessité d'échange de puissance réactive nécessitant un sur-dimensionnement de l'amplificateur.

A l'opposé des techniques de contrôle actif, les approches passives quant à elle ne nécessitent que très peu de composants afin d'accomplir la fonction de réduction des vibrations. Exploitant directement les principes de la conversion d'énergie pour dissiper celle mécanique convertie sous forme électrique, sans aucune énergie extérieure requise, ces techniques n'offrent cependant pas des performances spectaculaires dans le cas de systèmes faiblement couplés et/ou avec des facteurs de qualité mécaniques petits. La plus simple des techniques passives utilisant des matériaux piézoélectriques consiste à connecter une charge résistive à l'élément, dissipant ainsi l'énergie sous forme Joule ([HF91], Figure II.16). L'optimisation de cette dissipation se fait par une adaptation d'impédance en puissance, mais la nature des éléments piézoélectrique étant capacitive, l'ajout d'une inductance (en série ou en parallèle) permet d'optimiser l'énergie extraite. Néanmoins, à de faibles fréquences et du fait de la faible valeur de capacité bloquée des éléments piézoélectriques, les valeurs d'inductance optimale sont totalement irréalistes, pouvant facilement atteindre plusieurs centaines d'Henrys<sup>II.9</sup>. De plus, l'inductance n'est optimale qu'à une fréquence donnée, ne permettant pas un contrôle large bande, et une légère déviation de cette valeur (ce qui peut être du à des paramètres extérieurs telle que la température impactant la fréquence de résonance de la structure à considérer), conduit à une sévère dégradation des performances. On pourra noter la possibilité d'utiliser des réseaux d'impédances pour assurer un contrôle multimodal (où, dans le cas parallèle par exemple, seule une branche ne présente pas une impédance très grande pour la fréquence ciblée - [Hol94,BMF03]), ce qui ne résout cependant pas le problème de va-

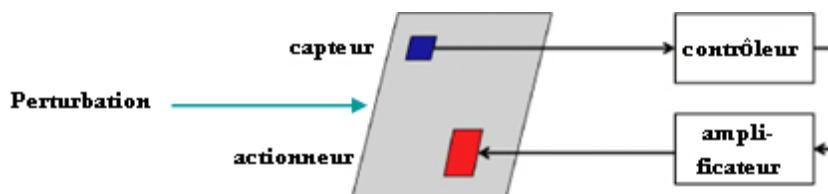


Figure II.15 – Synoptique d'une chaîne de contrôle actif.

---

II.9. Ceci nécessite d'avoir recours à des inductances synthétiques (gyrateur), compromettant ainsi l'autonomie énergétique du système.

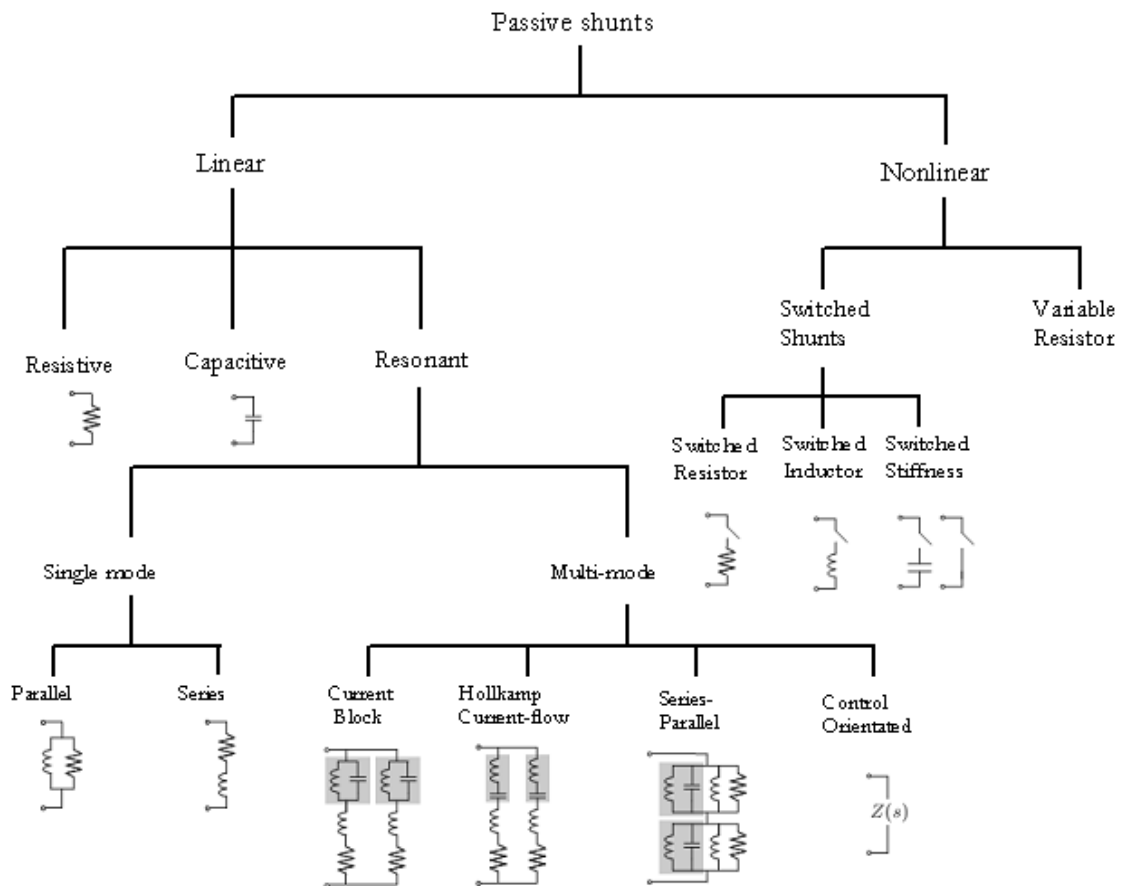


Figure II.16 – Techniques passives (à gauche) et semi-passives (à droite) de contrôle de vibrations ([MF06]).

leur irréaliste de composant, ou encore l'utilisation de capacité négatives ([TW01]), qui cette fois-ci nécessitent un apport d'énergie extérieur.

Afin de palier les inconvénients des systèmes actifs en termes de dimensions et d'énergie requise et ceux des techniques passives en termes de performances, de contrôle large bande et de valeurs de composants, des techniques hybrides, quasiment exclusivement non-linéaires, ont été proposées (Figure II.16). Le principe ici est d'utiliser des lois de commandes simples tout en exploitant efficacement les principes de conversion d'énergie. L'élément non-linéaire est généralement un commutateur (au sens général du terme) qui permet de changer brutalement l'impédance électrique ou mécanique du système. C'est grâce au contrôle de ce commutateur que les techniques semi-passives et semi-actives peuvent offrir un compromis intéressant entre systèmes actifs et approches purement passives. Différencions ici les approches dites semi-passives, dont aucun élément apportant de l'énergie extérieur n'est présent dans le circuit de puissance, de celle semi-actives, où une petite source d'énergie est utilisée dans cette branche<sup>II.10</sup>. Du fait de leur efficacité et leur intégrabilité, c'est cette famille de techniques de contrôle de vibrations qui seront considérées ici. En plus

II.10. On pourra également noter l'existence d'approches hybrides combinant techniques semi-passives pour le contrôle des premiers modes et actives pour le contrôle des modes hautes fréquences, ces derniers requérant peu d'énergie en général ([HRG09a])



des approches SSA (*State-Switched Absorber*) proposées par Clark ([Cla00]), dont le principe revient à contrôler la raideur du système de manière électromécanique, nous nous intéresserons avant tout ici aux approches SSD (*Synchronized Switch Damping*) initialement développées par Claude RICHARD et Daniel GUYOMAR, dont le principe consiste à annuler ou inverser rapidement la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique lorsque celle-ci est maximale, et de laisser le matériau en condition de circuit ouvert le reste du temps ([RGAC99, RGAB00]). Ceci permet ainsi une augmentation de la tension aux bornes de l'élément piézoélectrique par un processus cumulatif ainsi qu'une réduction du retard entre tension et vitesse, dénotant ainsi l'augmentation artificielle de la conversion d'énergie et ainsi du plus grand pouvoir d'amortissement. Les techniques SSD peuvent aussi être vues comme un moyen élégant de contrôler les échanges d'énergie entre la partie contrôle et transduction, limitant notamment l'énergie réactive et ainsi ne nécessitant pas d'amplificateurs encombrants. Les différentes variantes des techniques SSD se décomposent en SSDS (*Synchronized Switch Damping on Short-circuit* : annulation de la tension par court-circuit - [RGAC99]), SSDI (*Synchronized Switch Damping on Inductor* : utilisation d'une inductance pour inversion de la tension - [RGAB00]), SSDV (*Synchronized Switch Damping on Voltage sources* : adjonction d'une source de tension pour améliorer l'inversion - [LBP<sup>+</sup>06]) et SSDVa (*Synchronized Switch Damping on adaptive Voltage sources* : source de tension ajustable pour stabilisation de la commande et du système - [BSG<sup>+</sup>06]). Pour de plus amples informations, le lecteur pourra se reporter aux travaux de thèse d'Adrien BADEL ([Bad06]). Du fait de leur intégrabilité, autonomie énergétique<sup>II.11</sup> et bonnes performances, on s'intéressera ici avant tout à l'extension des techniques SSDI. Cependant, les concepts exposés par la suite sont utilisables avec tout type de contrôle SSD.

### II.3.2 Systèmes à masse accordée à traitement non-linéaire

Dans le cadre de la thèse de Linjuan YAN et en collaboration avec Yi-Chieh WU dont le doctorat s'est notamment intéressé à l'étude sur les récupérateurs d'énergie sismiques, l'adjonction d'un dispositif de conversion d'énergie mécano-électrique<sup>II.12</sup> utilisant des éléments piézoélectriques à des systèmes à masse accordée (TMD - *Tuned Mass Damper*) a été entrepris, avec une interface semi-passive de type SSDI pour le matériau actif (Figure II.17 - [LYWG22]). Ceci permet ainsi un étage de conversion supplémentaire, qu'il soit mécano-électrique lorsque l'on considère un TMD ou mécano-mécanique par rapport aux techniques utilisant la conversion d'énergie. Ceci permet ainsi de disposer de degrés de liberté supplémentaires pour l'optimisation du système, ainsi que de profiter de la résonance du système mécanique ajouté.

---

II.11. La commande pouvant même être directement alimentée par l'élément piézoélectrique lui-même ([RGL07, LLRG08]).

II.12. Ce terme n'est certes pas conventionnel, mais il est ici choisi d'utiliser la dénomination "électromécanique" pour une entrée électrique et "mécano-électrique" pour une sollicitation mécanique, même si le couplage est réellement bidirectionnel.

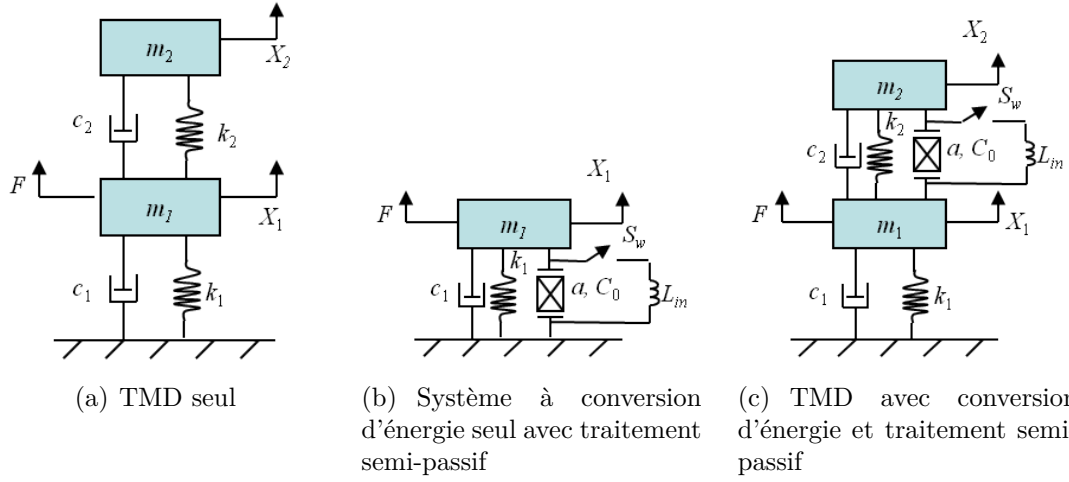


Figure II.17 – Principe de l'amortisseur à masse accordée avec système de conversion d'énergie.

### Modélisation

En notant  $m_i$ ,  $c_i$  et  $k_i$  la masse dynamique, le coefficient d'amortissement et la raideur (en court-circuit pour le système de conversion d'énergie) pour chaque résonateur mécanique  $i$ , ainsi que  $\alpha$  et  $C_0$  le facteur de force et la capacité bloquée des éléments piézoélectriques, on obtient ainsi le système reliant les déplacements  $X_i$ , la force d'application  $F$ , la tension  $V$  et le courant sortant  $I$  (le TMD purement mécanique s'obtient en considérant une tension nulle) :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -\alpha \\ \alpha \end{bmatrix} V = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$I = \alpha (\dot{X}_2 - \dot{X}_1) - C_0 \dot{V} \quad (\text{II.14})$$

Dans le cas d'une charge purement résistive  $R$  et optimale ( $R = 1/(C_0\omega)$ , avec  $\omega$  la pulsation) en utilisant le système de conversion d'énergie, on obtient l'équation de mouvement suivante, dans le domaine fréquentiel :

$$\left\{ -\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} + \frac{(1+j)\alpha^2}{2C_0} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \right\} \begin{Bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{F} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

En utilisant le contrôle SSDI, et en notant  $\gamma$  le coefficient d'inversion, il peut être montré que la tension se décompose en une partie proportionnelle au déplacement et une tension constante par morceaux dépendante du signe de la vitesse ([BSG<sup>+</sup>06]). En considérant une excitation monochromatique et en faisant l'approximation du premier harmonique, cette tension peut se mettre sous la forme :

$$\tilde{V} = \frac{\alpha}{C_0} \left( 1 + j \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

conduisant à l'équation du mouvement :

$$\begin{Bmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} c_1 + c_2 + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0\omega} & -c_2 - \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0\omega} \\ -c_2 - \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0\omega} & c_2 + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{\alpha^2}{C_0\omega} \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + \frac{\alpha^2}{C_0} & -k_2 - \frac{\alpha^2}{C_0} \\ -k_2 - \frac{\alpha^2}{C_0} & k_2 + \frac{\alpha^2}{C_0} \end{bmatrix} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{F} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Dans l'optique d'une comparaison générale, il est également possible d'adimensionnaliser le système, en utilisant la fréquence normalisée  $\Omega$ , le rapport de fréquence de résonance  $r_\omega$  entre la structure rapportée et la structure hôte, les rapports de masse  $r_m$  et d'amortissement  $r_\xi$  et le coefficient de couplage de l'élément piézoélectrique  $\kappa$ . Dès lors l'expression des déplacements normalisés sont donnés par (avec  $\xi_1$  le facteur d'amortissement de la structure hôte) :

$$\left( \frac{k_1 \tilde{X}_1}{F_1} \right)_{\text{uncont}} = \frac{1}{(-\Omega^2 + 2j\xi_1\Omega + 1)} \quad (\text{II.18})$$

pour la structure hôte seul (sans contrôle),

$$\left( \frac{k_1 \tilde{X}_1}{F_1} \right)_{\text{TMD}} = \frac{1}{(-\Omega^2 + 2j\xi_1\Omega + 1) + \frac{-\Omega^2 r_m r_\omega (2j\Omega r_\xi \xi_1 + r_\omega)}{(-\Omega^2 + 2j\Omega r_\xi \xi_1 r_\omega + r_\omega^2)}} \quad (\text{II.19})$$

dans le cas du TMD pur,

$$\left( \frac{k_1 \tilde{X}_1}{F_1} \right)_{\text{TMD-R}} = \frac{1}{(-\Omega^2 + 2j\xi_1\Omega + 1) + \frac{-\Omega^2 r_m r_\omega \left[ 2j\Omega r_\xi \xi_1 + \left( 1 + \frac{1+j}{2} \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \right) r_\omega \right]}{\left[ -\Omega^2 + 2j\Omega r_\xi \xi_1 r_\omega + \left( 1 + \frac{1+j}{2} \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \right) r_\omega^2 \right]}} \quad (\text{II.20})$$

en considérant le TMD électromécanique avec une résistance adaptée et

$$\left( \frac{k_1 \tilde{X}_1}{F_1} \right)_{\text{TMD-SSDI}} = \frac{1}{(-\Omega^2 + 2j\xi_1\Omega + 1) + \frac{-\Omega^2 r_m r_\omega \left\{ 2j\Omega r_\xi \xi_1 + \left[ 1 + \left( 1 + j \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \right] r_\omega \right\}}{\left\{ -\Omega^2 + 2j\Omega r_\xi \xi_1 r_\omega + \left[ 1 + \left( 1 + j \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) \frac{\kappa^2}{1-\kappa^2} \right] r_\omega^2 \right\}}} \quad (\text{II.21})$$

lorsque l'interface SSDI est utilisée.

## Comparaison théorique et validation expérimentale

Les Figures II.18 à II.21 présentent les atténuation obtenues (définies comme la valeur en décibels du déplacement du système contrôlé sur le déplacement de

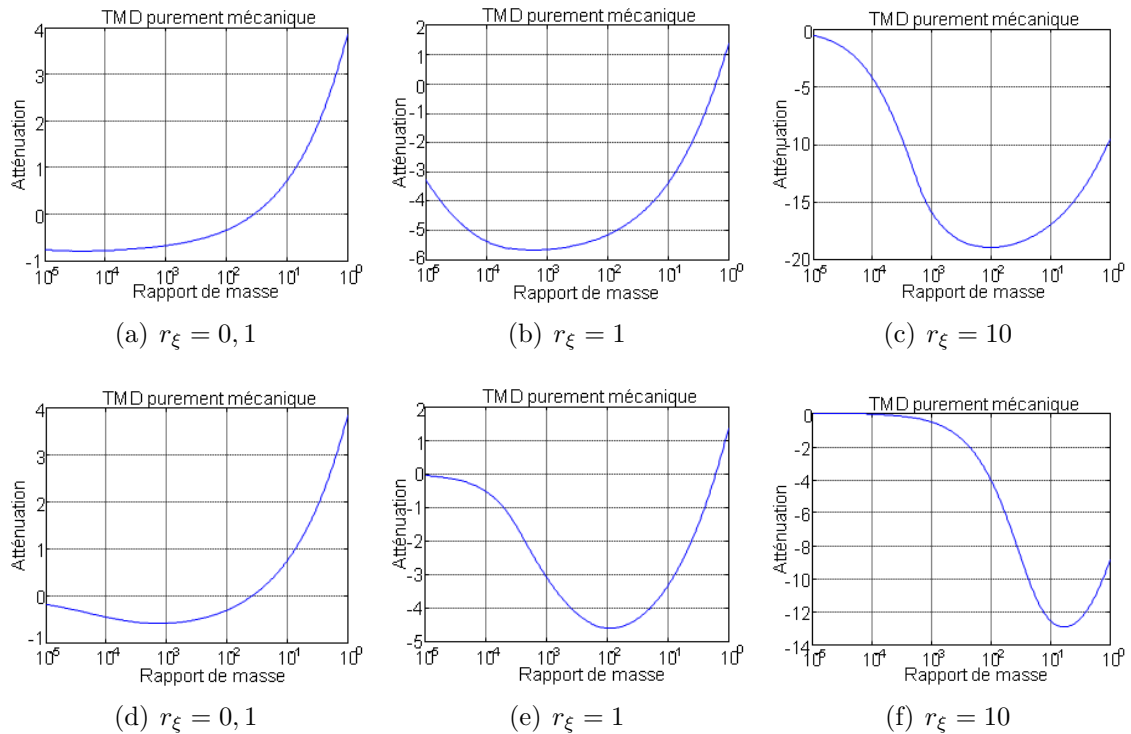


Figure II.18 – Atténuation en utilisant un dispositif TMD seul en fonction du rapport de masse pour (a-c)  $\xi_1 = 0,002$  ; (d-f)  $\xi_1 = 0,02$ .

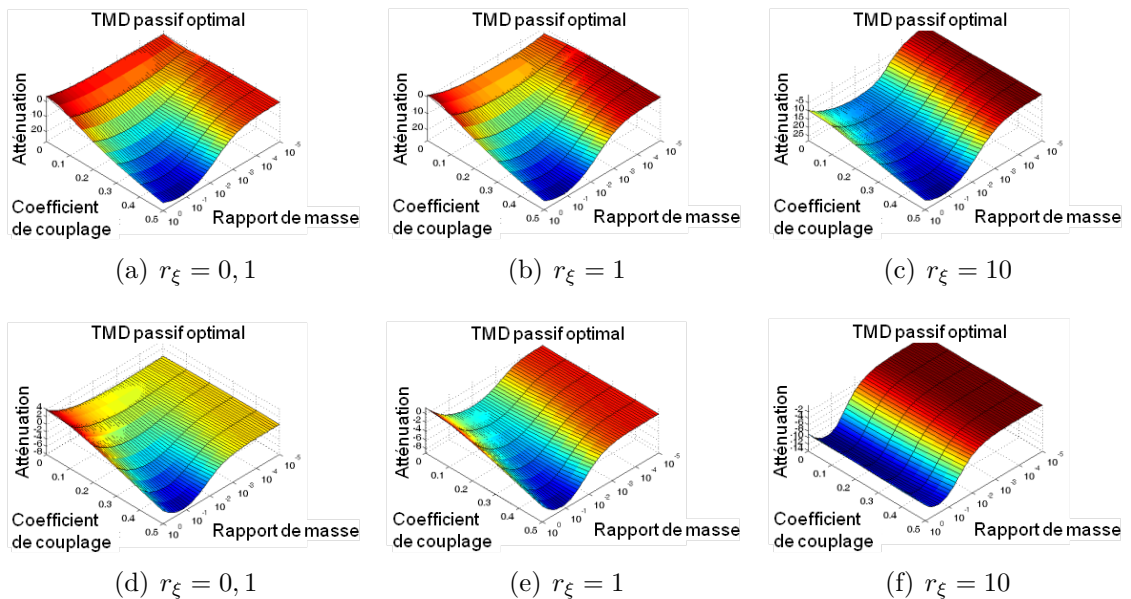


Figure II.19 – Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique résistif (avec résistance optimale) en fonction du rapport de masse pour (a-c)  $\xi_1 = 0,002$  ; (d-f)  $\xi_1 = 0,02$ .

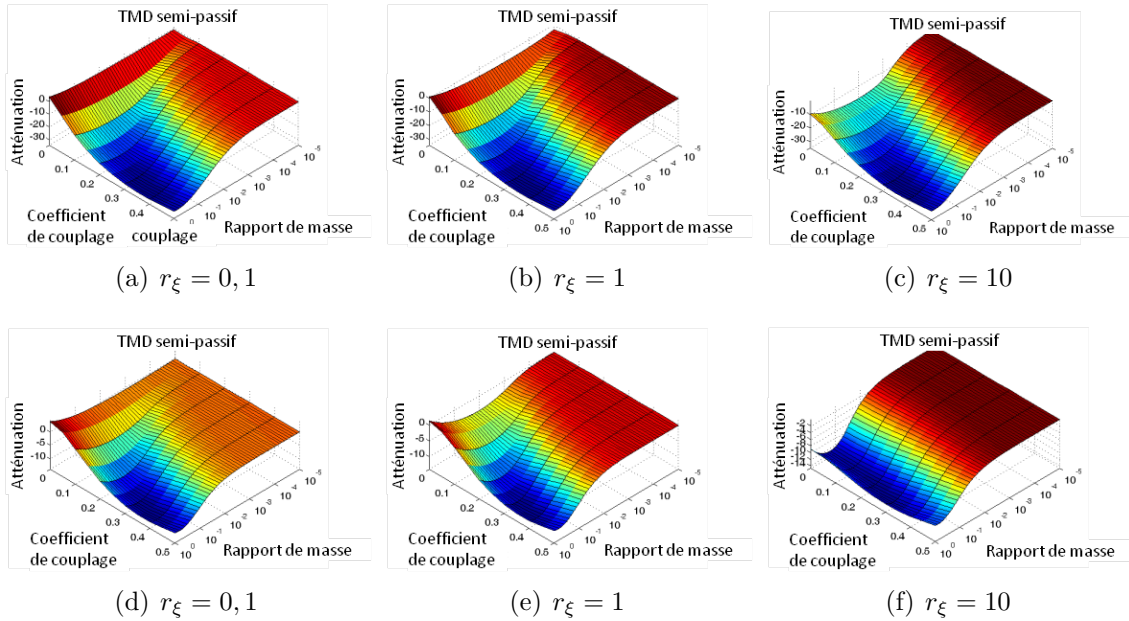


Figure II.20 – Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique semi-passif de type SSDI (avec  $\gamma = 0,6$ ) en fonction du rapport de masse pour (a-c)  $\xi_1 = 0,002$ ; (d-f)  $\xi_1 = 0,02$ .

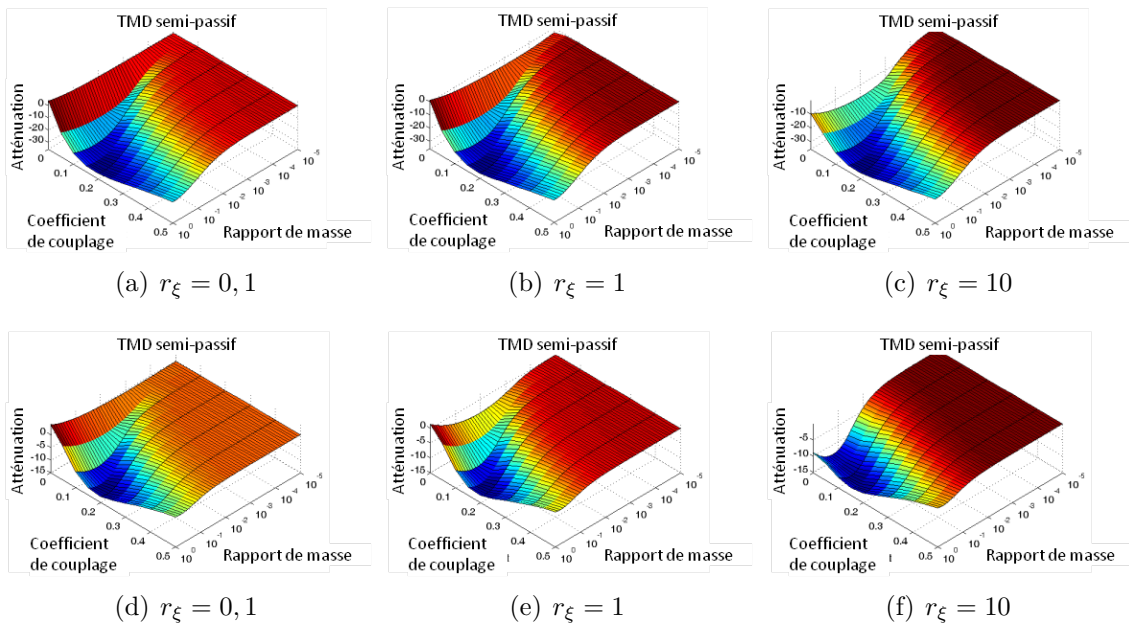


Figure II.21 – Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique semi-passif de type SSDI (avec  $\gamma = 0,9$ ) en fonction du rapport de masse pour (a-c)  $\xi_1 = 0,002$ ; (d-f)  $\xi_1 = 0,02$ .

la structure hôte seule - une valeur négative correspond donc à une réduction des vibrations) lorsque le système est accordée (fréquence de résonance de la structure rapportée égale à celle de la structure hôte)<sup>II.13</sup>, et pour plusieurs valeurs de facteurs de qualité mécanique de la structure hôte.

Les résultats obtenus dans les différents cas montrent qu'au-delà d'un rapport de masse qui dépend surtout du rapport d'amortissement, un effet d'amplification apparaît, allant à l'encontre de l'effet désiré. On remarque également, dans une moindre mesure, que cet effet est également dépendant du coefficient de couplage dans le cas des TMDs incluant un dispositif de conversion d'énergie et aussi, puisque ce facteur dénote de l'augmentation artificielle du couplage, du coefficient d'inversion lorsque la technique SSDI est employée.

Concernant ce dernier point, et du fait des échanges énergétiques particuliers faisant intervenir un échange purement mécanique entre la structure hôte et le résonateur secondaire ainsi qu'un échange mécanoélectrique entre cette dernière et l'interface électrique, on observe un comportement radicalement différent des dispositifs de contrôle "direct" classiques qui fait apparaître un coefficient d'inversion (et donc un couplage équivalent) optimal (alors que le pouvoir d'amortissement est strictement croissant dans les techniques SSDI "directes").

En termes de performances pures, on remarque que l'adjonction d'un dispositif de conversion d'énergie, permettant une meilleure dissipation de l'énergie mécanique du résonateur secondaire (énergie initialement fournie par la structure hôte), conduisent à de meilleurs résultats en termes d'amortissement. De plus, grâce à l'augmentation artificielle du couplage permise par les techniques SSD, la combinaison de cette étape de conversion supplémentaire avec une interface non-linéaire conduit à une augmentation spectaculaire des performances avec au minimum un gain de 3 (10 dB) en termes d'amortissement, et surtout dans le cas où la structure secondaire est peu amortie (passage d'un amortissement de 0,5 dB à 30 dB), du fait de l'amortissement équivalent permis par la conversion d'énergie.

Ces excellentes performances se confirment en pratique comme démontré par la Figure II.22, où les deux structures considérées sont de type poutres encastrées-libres mais avec la structure secondaire de dimensions bien plus faibles. Les résultats en éléments finis ont été obtenus par un code développé sous Matlab dans le cadre de la thèse de Linjuan YAN ([Yan13]). A partir de ces résultats, il apparaît de manière évidente les capacités de l'approche SSDI appliquée aux systèmes à masse accordée équipés de dispositif de conversion d'énergie pour limiter significativement les vibrations. Ceci s'explique notamment par le mécanisme de conversion secondaire qui permet ainsi de dissiper plus d'énergie (soit de manière réelle par effet Joule, soit de manière équivalente en stockant plus d'énergie sous forme électrique plutôt que mécanique); ce dernier étant encore amélioré par l'approche SSDI. Enfin, on pourra remarquer la bonne estimation de la réponse expérimentale par l'approche

---

II.13. Une étude de l'effet du désaccordage ([Yan13]), fréquent lors de l'application en environnement réaliste - ne serait-ce que par l'effet de la température - montre qu'une différence de  $\pm 20\%$  conduit à une dégradation significative de l'amortissement lorsque la structure mécanique supplémentaire a une fréquence de résonance plus élevée que la structure hôte, mais avec un impact bien moindre (voire dans certains cas un meilleur pouvoir amortissant) lorsque la fréquence de résonance du résonateur mécanique secondaire est inférieure. A partir de cette observation, il apparaît donc qu'il vaut mieux sous-dimensionner la fréquence de résonance de l'élément mécanique rapporté.

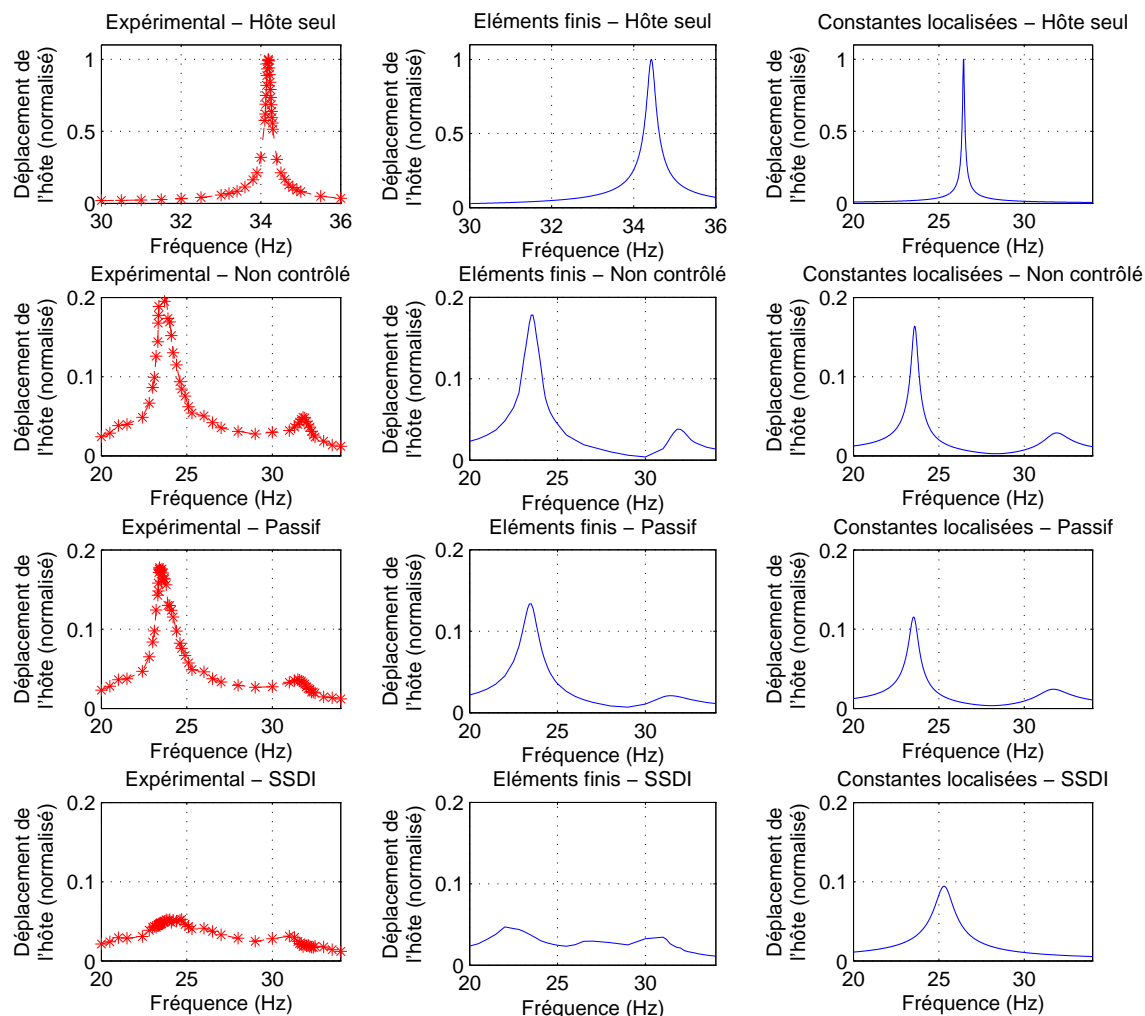


Figure II.22 – Résultats expérimentaux et comparaisons théorique et de simulation de l’amortissement.

théorique, même si l’hypothèse du premier harmonique ne permet pas de relier complètement la réponse fréquentielle ; surtout hors résonance du système<sup>II.14</sup>.

### II.3.3 Filtrage spatial et hybride

Les techniques SSD se montrent particulièrement efficaces lorsque la structure à contrôler est soumise à une excitation monochromatique. De plus, du fait du principe de détection d’extrema, ces approches sont également capables de “suivre” une dérive de la fréquence de la structure, permettant ainsi une adaptabilité intéressante (par rapport à un changement de fréquence de résonance due par exemple à une dérive ou un changement environnemental comme la température). Cependant, lorsque la structure à contrôler répond sur plusieurs bandes fréquentielles (du à une sollicita-

II.14. Cependant la réponse hors résonance n’est pas la partie la plus critique du contrôle car les faibles vibrations ne sont pas aussi préjudiciables pour la structure que l’amplification de celles-ci à la résonance.

tion large bande), les techniques SSD, par nature, se focalisent sur le plus haut mode détectable qui est bien souvent l'un des moins énergétiques. Ainsi, les performances sont dégradées ([GB06]). Afin de palier à cet inconvénient, une sélection des extrema globaux plutôt que locaux a été proposée, par l'analyse probabiliste ([GB06]), statistique ([GRM07, LLRG08, JQZ<sup>+</sup>09]) ou modale ([HRG09b]) de la réponse de la structure définissant un seuil de commutation en-deçà duquel la commutation est désactivée. Ce seuil est ainsi calculé à partir de l'historique du signal. Dans cette partie, une approche développée dans le cadre de la thèse de Linjuan YAN et basée sur un filtrage spatial plutôt que temporel (ce dernier cas correspondant aux approches précédentes) est proposée ([YLG14, YLRG16]).

### Filtrage spatial

Le principe du contrôle de vibrations large bande à partir d'un filtrage temporel consiste à utiliser une combinaison linéaire de la réponse d'un réseau d'éléments piézoélectriques disposés sur la structure, et de connecter ces derniers de manière opportune selon cette combinaison (Figure II.23).

Afin d'illustrer ce principe, il sera considéré dans la suite une structure de type poutre encastrée-encastrée équipée d'éléments piézoélectriques à chaque extrémité sur les deux faces. Ainsi, selon le mode de vibration considéré et du fait de la réponse de la structure à ces modes, la réponse des éléments piézoélectriques à chaque extrémité est différente (Figure II.24), autorisant des connexions particulières agissant

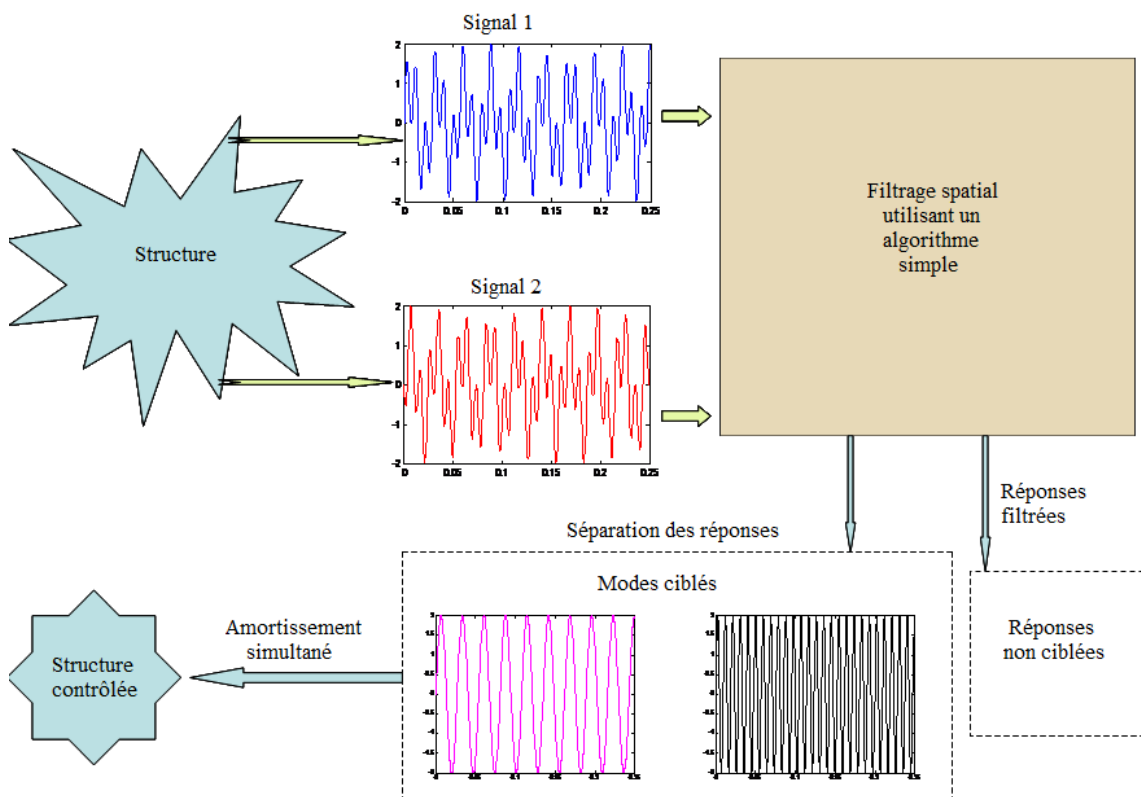


Figure II.23 – Principe du filtrage spatial.



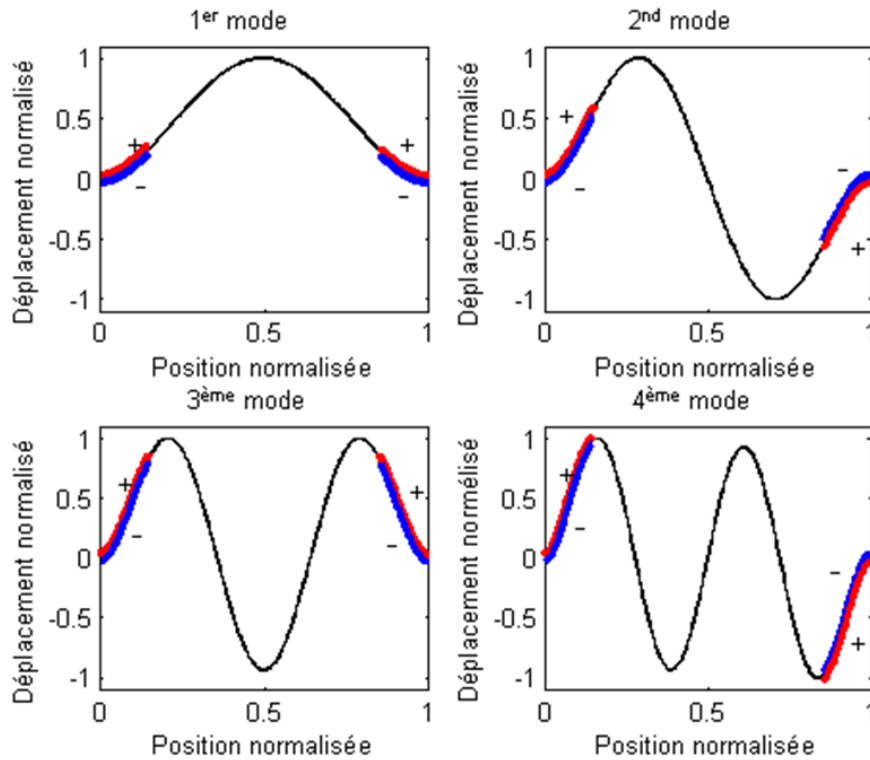


Figure II.24 – Exemple de réponse d’une structure de type poutre encastree-encastree et signe de la tension aux bornes des éléments piézoélectriques pour les quatre premiers modes de vibration.

sur ce mode sans influencer les autres. Ainsi, connecter des éléments piézoélectriques de la même face permet un contrôle des mode pairs, alors que les modes impairs sont contrôlés en connectant les éléments des faces opposées (Figure II.25), conduisant au système global représentée en Figure II.26. En accord avec les réponses représentées en Figure II.24, l’actionnement des commutateurs pour le contrôle des modes impairs se fait via la détection des extrema de la somme des réponses électriques, alors que celui des modes pairs par la détection des extrema de leur différence.

La réponse de la structure peut s’obtenir à partir d’une analyse éléments finie ([Yan13]) dont le jeu d’équations électromécaniques est donné par :

$$\begin{aligned} [M] \{ \ddot{d} \} + [C] \{ \dot{d} \} + [K] \{ d \} - [B_1] \{ Q \} &= \{ F(t) \} \\ \{ Q \} &= [B_2] \{ d \} + [B_3] \{ V_p \} \end{aligned} \quad (\text{II.22})$$

où  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  sont respectivement les matrices mécaniques de masse dynamique, de coefficient d’amortissement et de raideur en court-circuit,  $[B_1]$  et  $[B_2]$  les matrices de couplage électromécanique et mécanoélectrique, et  $[B_3]$  la matrice traduisant le comportement diélectrique des inserts piézoélectriques. Les grandeurs  $\{d\}$ ,  $\{F(t)\}$ ,  $\{Q\}$  et  $\{V_p\}$  représentent respectivement les vecteurs de déplacements et pentes, forces et moments, charges et tensions aux nœuds des éléments.

Lorsque les éléments piézoélectriques ne sont pas connectés (circuit ouvert), la

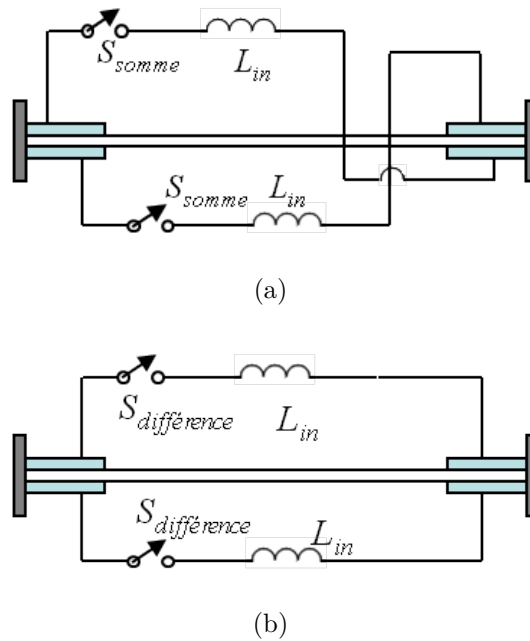


Figure II.25 – Connexions pour le contrôle (a) des modes impairs ; (b) des modes pairs.

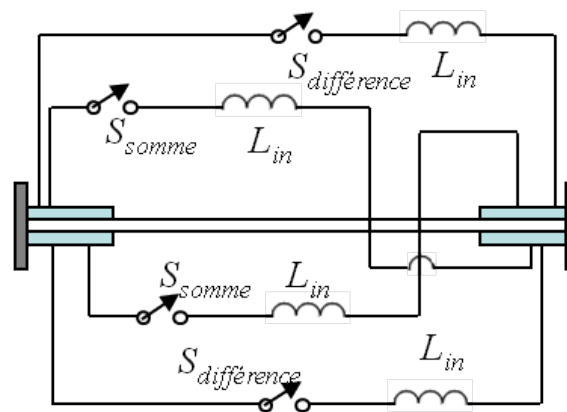


Figure II.26 – Structure de contrôle par filtrage spatial.

tension de chaque élément piézoélectrique varie avec le déplacement car la variation de charges (courant) est nulle :

$$\{\dot{V}_p\} = -[B_3]^{-1}[B_2]\{d\} \quad (\text{II.23})$$

alors que lorsque les éléments  $i$  et  $j$  sont connectés via une inductance  $L_{in}$  (et une résistance  $R$  modélisant les pertes dans le circuit de commutation), l'équation couplant les tensions de chacun de ces éléments ( $V_{pi}$  et  $V_{pj}$ ) est donnée par :

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ddot{V}_{pi} \\ \ddot{V}_{pj} \end{Bmatrix} &= \frac{1}{L_{in}C_0} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{pi} \\ V_{pj} \end{Bmatrix} - \frac{R}{L_{in}} \begin{Bmatrix} \dot{V}_{pi} \\ \dot{V}_{pj} \end{Bmatrix} \\ &\text{dans le cas d'une connexion pour les modes impairs} \\ &\text{(éléments sur des faces différentes et détection sur la somme des tensions)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \ddot{V}_{pi} \\ \ddot{V}_{pj} \end{Bmatrix} &= \frac{1}{L_{in}C_0} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{pi} \\ V_{pj} \end{Bmatrix} - \frac{R}{L_{in}} \begin{Bmatrix} \dot{V}_{pi} \\ \dot{V}_{pj} \end{Bmatrix} \\ &\text{dans le cas d'une connexion pour les modes pairs} \\ &\text{(éléments sur la même face et détection sur la différence des tensions)} \end{aligned} \quad (\text{II.24})$$

avec  $C_0$  la capacité bloquée de l'élément (contraire du coefficient correspondant à l'élément considéré dans la matrice  $[B_3]$ <sup>II.15</sup>). On pourra également noter que les éléments, lorsqu'ils sont connectés, étant en série, on obtient un coefficient d'inversion légèrement supérieur à celui du contrôle avec un seul élément (la capacité équivalente étant divisée par 2 lors de la connexion).

La validation expérimentale de cette technique de filtrage spatiale a été menée sur une structure semblable à celle considérée précédemment. L'amortissement obtenu sur les deux premiers modes est présenté dans le Tableau II.4, en prenant le déplacement RMS à environ un tiers de la poutre. Ces résultats confirment ainsi la capacité de l'approche par filtrage spatial d'amortir efficacement la réponse de la structure face à une excitation large bande, permettant une vibration plus de 2 fois plus faible que dans le cas SSDI classique (ce dernier se focalisant alors sur le mode

Excitation		Premier mode	Second mode	Bimodal <sup>II.16</sup>
SSDI classique	Simulation	-19,91 dB	-19,36 db	-12,6 dB
	Expérience	-17,19 dB	-15,89 db	-10,28 dB
SSDI avec filtrage spatial	Simulation	-21,13 dB	-19,81 db	-20,43 dB
	Expérience	-18,24 dB	-18,65 db	-17,63 dB

II.16. rapport 4 entre le second et le premier mode

Tableau II.4 – Résultats expérimentaux et de simulation pour la technique de filtrage spatial et comparaison avec la technique SSDI classique.

II.15. Ici les éléments piézoélectriques sont tous considérés avec des propriétés identiques.

le plus détectable qui n'est pas celui induisant la plus grande déformation dans la structure), tout en utilisant le même nombre de commutateurs. Ainsi, les capacités d'amortissement du SSDI sont quasiment inchangées en passant d'une excitation monomodale à une sollicitation bimodale, grâce à la séparation de mode permise par le filtrage spatial. On pourra également noter que l'amélioration du facteur d'inversion permet également un léger gain d'amortissement dans le cas monomodal. Bien qu'ayant ici considéré une excitation bimodale (qui peut sembler particulière voire volontaire du fait de la séparation des modes pairs et impairs), les capacités d'amortissement large bande de la technique de filtrage spatial se démontre également dans le cas d'une excitation par un bruit rose couvrant les trois premiers modes de résonance de la structure, comme montré en Figure II.27.

### Filtrage hybride spatial et temporel

La technique de filtrage spatial seule a démontré ses capacités d'amélioration d'amortissement large bande qui fait défaut aux approches SSDI classiques. Néanmoins, la limitation du nombre d'actionneurs limite l'observabilité de la structure et peut donc conduire à des sous-performances dans le cas d'un trop grand nombre de modes présents. Afin de palier à ce problème, la combinaison du filtrage spatial avec la technique de filtrage temporel est envisageable, permettant de bénéficier des avantages des deux techniques.

En utilisant dans le cas classique un seuil  $u_{seuil}$  basé sur l'intégrale de la valeur absolue du déplacement sur une période de temps  $\tau$  et pondéré par un facteur  $\beta$  tel que II.17 :

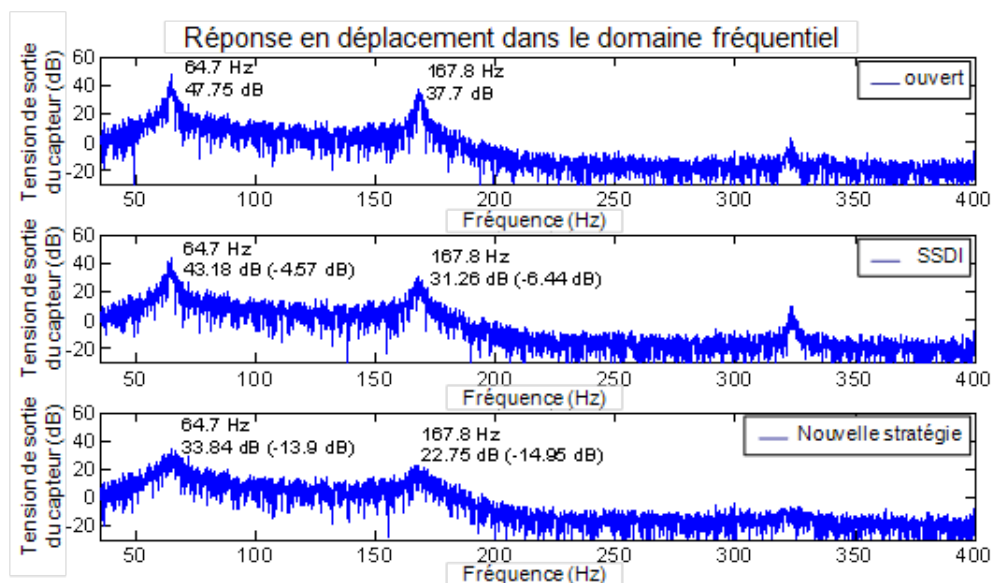


Figure II.27 – Résultat expérimentaux de la technique de filtrage spatial dans le cas d'un excitation par un bruit rose.

II.17. Bien entendu, il est également possible ici d'utiliser d'autres définitions de seuil, tels que probabiliste ou statistique, et de les étendre de manière similaire au filtrage spatial.

$$u_{seuil} = \frac{\beta}{\tau} \int_{t-\tau}^t |u(t)| dt \quad (\text{II.25})$$

il est possible de l'étendre pour le cas du filtrage spatial par deux seuils, un pour la somme et un pour la différence de déplacements  $u_1$  et  $u_2$  pris à des endroits différents<sup>II.18</sup> :

$$\begin{aligned} u_{seuil}|_{somme} &= \frac{\beta_{somme}}{\tau_{somme}} \int_{t-\tau_{somme}}^t |u_1(t) + u_2(t)| dt \\ u_{seuil}|_{diff} &= \frac{\beta_{diff}}{\tau_{diff}} \int_{t-\tau_{diff}}^t |u_1(t) - u_2(t)| dt \end{aligned} \quad (\text{II.26})$$

Les Figures II.28 et II.29 présentent les résultats de la technique hybride en termes d'atténuation dans le cas impulsionnel et bruit rose (en considérant la même structure que précédemment pour la simulation). On remarque ainsi que les capacités

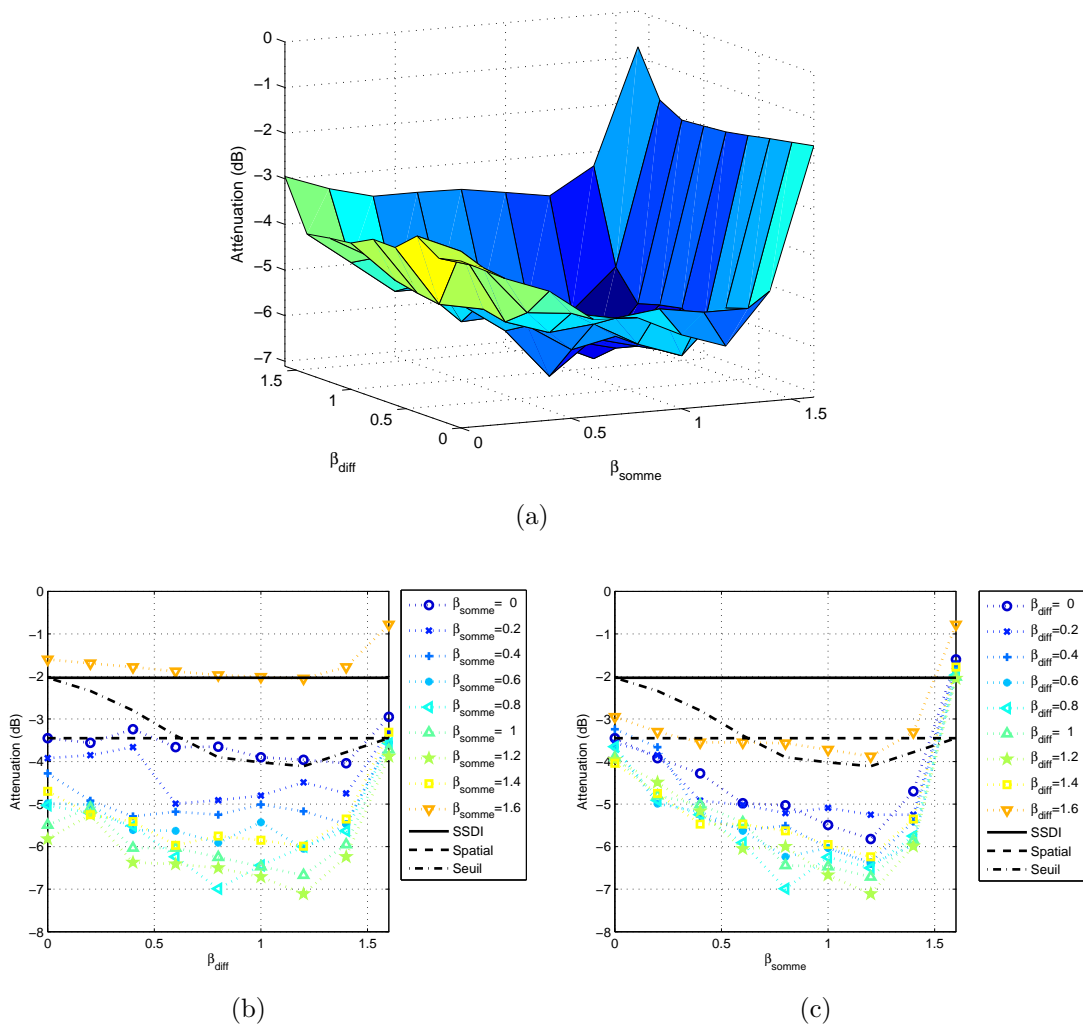


Figure II.28 – Amortissement de la technique de filtrage hybride dans le cas d'une excitation impulsionnelle.

II.18. Deux capteurs sont donc nécessaires ici, mais il en serait de même pour la technique de filtrage temporel appliquée à deux actionneurs indépendants.

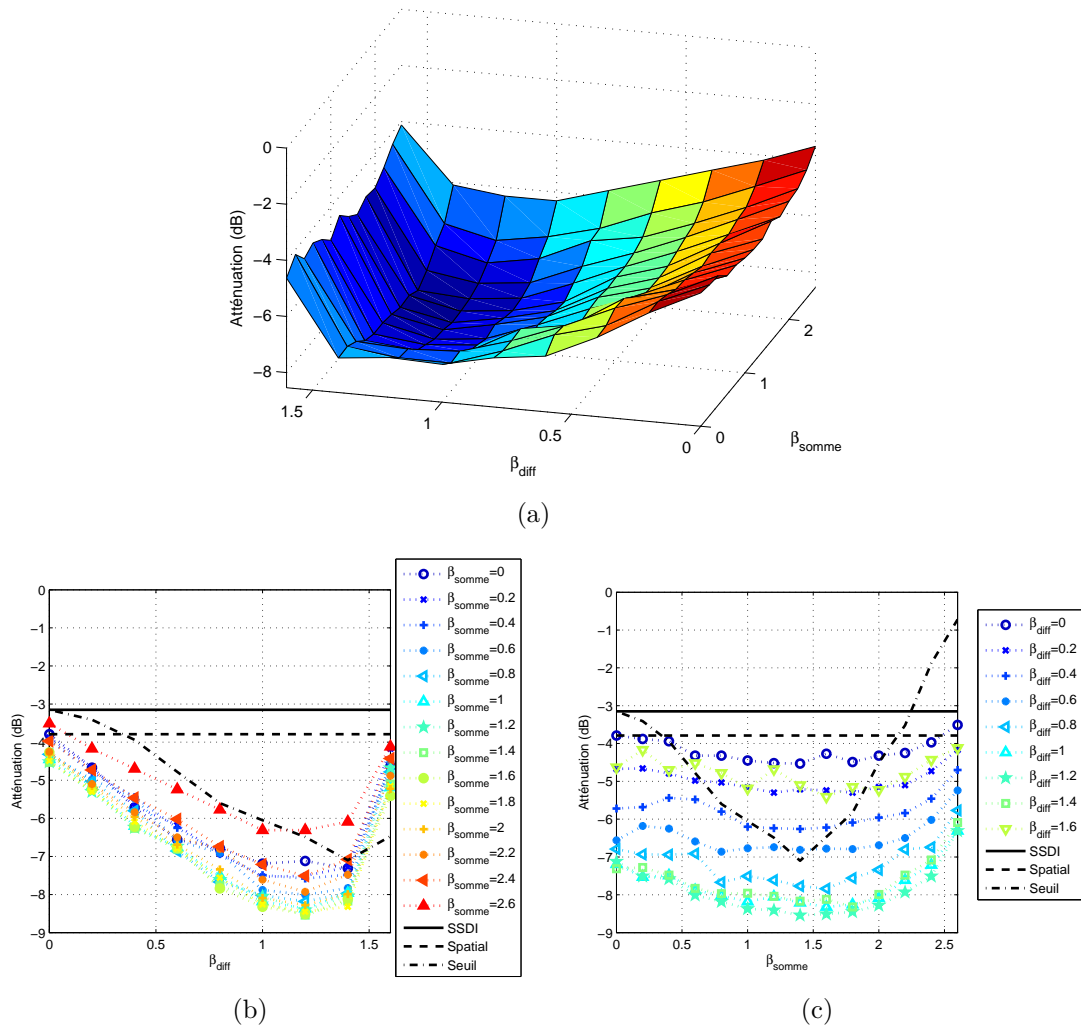


Figure II.29 – Amortissement de la technique de filtrage hybride dans le cas d'une excitation en bruit rose couvrant les quatre premiers modes.

d'amortissement lors de l'utilisation du filtrage temporel sont dépendant du facteur  $\beta$  fixé par l'utilisateur, ce qui est donc également le cas pour la technique hybride, surtout pour le signal de différence (qui cible les modes pairs). En comparant les techniques de filtrage spatial et temporel, on voit que cette dernière est plus efficace au coefficient de seuil optimal. Cependant, la combinaison de ces deux techniques pour obtenir l'approche hybride permet un gain significatif sur l'amortissement, avec des coefficients optimaux proches de ce soit dans le cas impulsionnel ou en bruit rose.

Les formes d'ondes associées au fonctionnement optimal sont données en Figure II.30 et II.31. Outre l'excellent amortissement obtenu avec la technique hybride comparé aux autres approches, les formes de tension de celle-ci sont particulièrement intéressantes à analyser. En effet, cette dernière montre une certaine ressemblance avec une modulation des modes pairs par ceux impairs, expliquant notamment les capacités d'amortissement supérieures dues à cette séparation de modes.

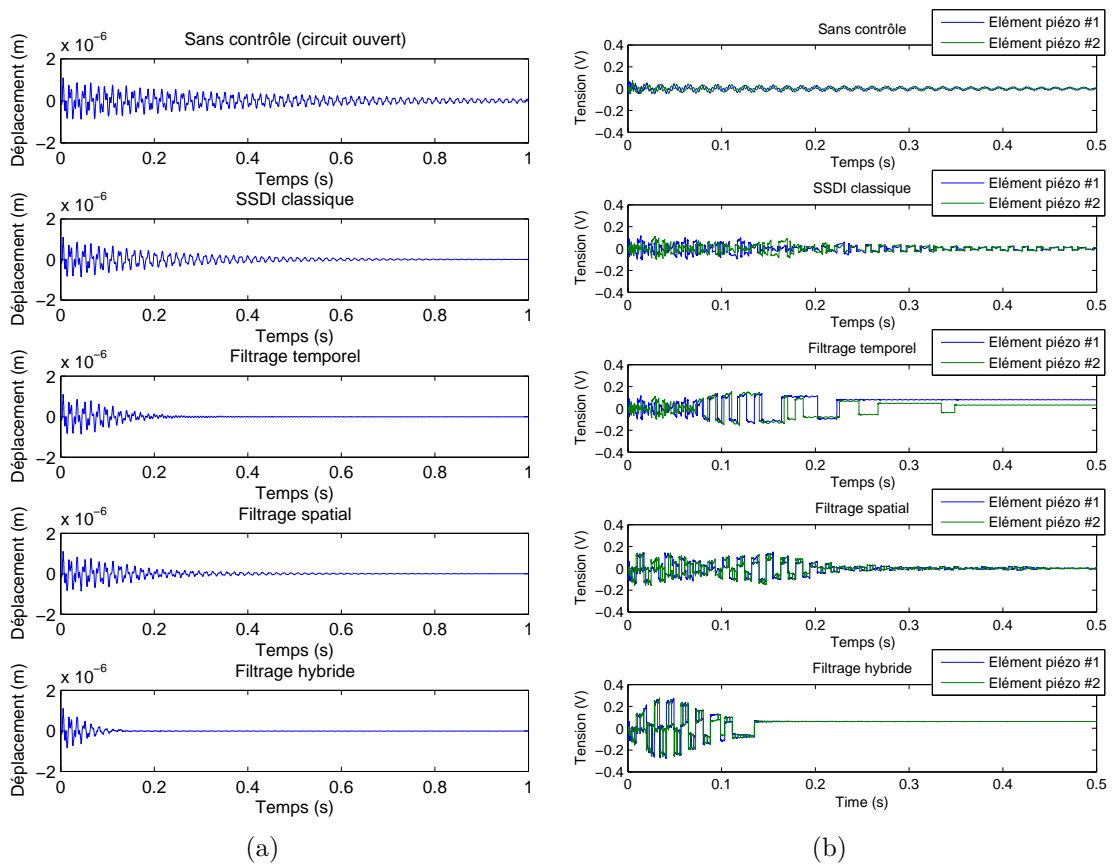


Figure II.30 – Formes d’ondes temporelles dans le cas d’une excitation impulsionnelle : (a) Déplacement ; (b) Tension.

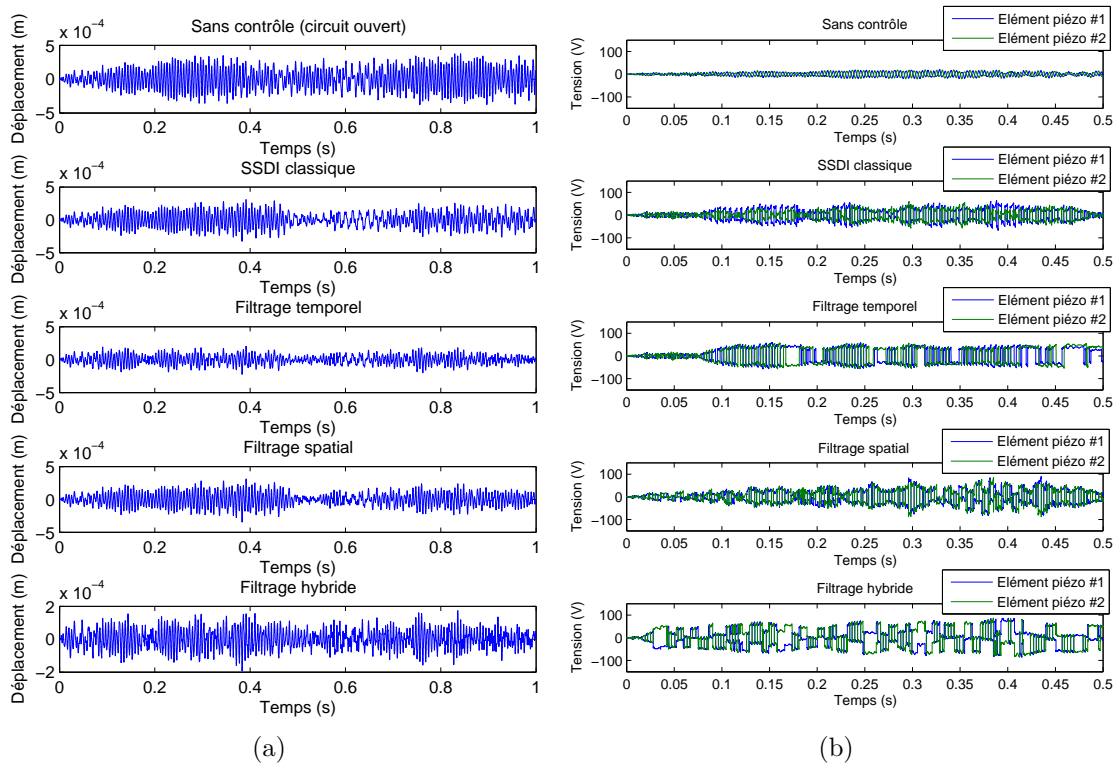


Figure II.31 – Formes d’ondes temporelles dans le cas d’une excitation en bruit rose : (a) Déplacement ; (b) Tension.

### II.3.4 Structures périodiques

Toujours dans l’optique de contrôle large bande utilisant des réseaux d’inserts piézoélectriques, cette partie expose un concept dérivé de la photonique utilisant des structures périodiques, qui possèdent des caractéristiques uniques permettant de bloquer des ondes sur une large gamme fréquentielle. Dans le cadre du contrôle de vibrations couplant ces structures périodiques avec des éléments piézoélectriques, on pourra à ce titre citer les travaux de Baz, de Thorp, de Collet et de Pang ([Baz01, TRB01, CCI09, PWLF10] - Figure II.32), ainsi que l’extension à deux dimensions de

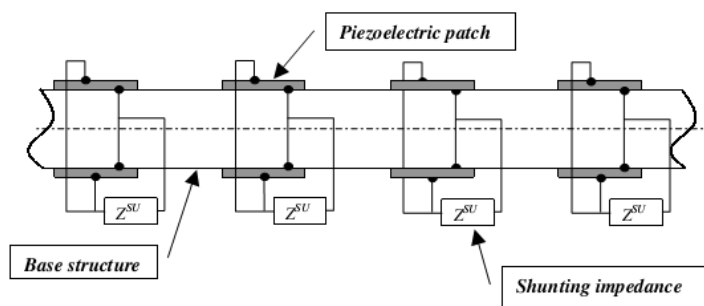


Figure II.32 – Exemple d’une structure périodique incluant des éléments piézoélectriques ([TRB01]).



Casadei ([CRDC10, CBCR12]).

Le principe ici est ainsi d'utiliser de telles structures en y ajoutant des interface SSDI aux éléments piézoélectriques. Initiés lors de la fin de la thèse de Linjuan YAN ([LYRGss]), ces travaux sont actuellement en cours d'approfondissement dans le cadre du doctorat de Bin BAO.

### Structures périodiques avec connexions électriques indépendantes

Dans un premier temps, il est considéré que chaque élément piézoélectrique est interfacé de manière indépendante par un circuit SSDI. Le principe de l'analyse consiste à découper chaque cellule unitaire de la structure périodique en  $n$  éléments finis (Figure II.33), permettant de lier, à l'intérieur d'une cellule  $i$ , vecteurs déplacement/pente  $\tilde{d}^i$ , force/moment  $\tilde{p}^i$  et tension  $\tilde{V}_i$  dans le domaine fréquentiel selon :

$$[A] \begin{Bmatrix} \tilde{d}_0^i \\ \vdots \\ \tilde{d}_j^i \\ \vdots \\ \tilde{d}_n^i \end{Bmatrix} - [B_1] \begin{Bmatrix} \tilde{V}_0^i \\ \vdots \\ \tilde{V}_j^i \\ \vdots \\ \tilde{V}_n^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{p}_0^i \\ \vdots \\ \tilde{p}_j^i \\ \vdots \\ \tilde{p}_n^i \end{Bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

où  $[A]$  est la matrice de raideur dynamique dans le domaine fréquentiel <sup>II.19</sup> et  $[B_1]$  la matrice de couplage électromécanique. En utilisant l'équation électrique obtenue par la modélisation en éléments finis ([Yan13]), il est possible d'exprimer une matrice de raideur dynamique équivalente  $[A_{\text{equiv}}]$  permettant d'exprimer l'équation de mouvement en faisant intervenir uniquement les grandeurs mécaniques (et, bien entendu, également les paramètres électriques et électromécaniques) :

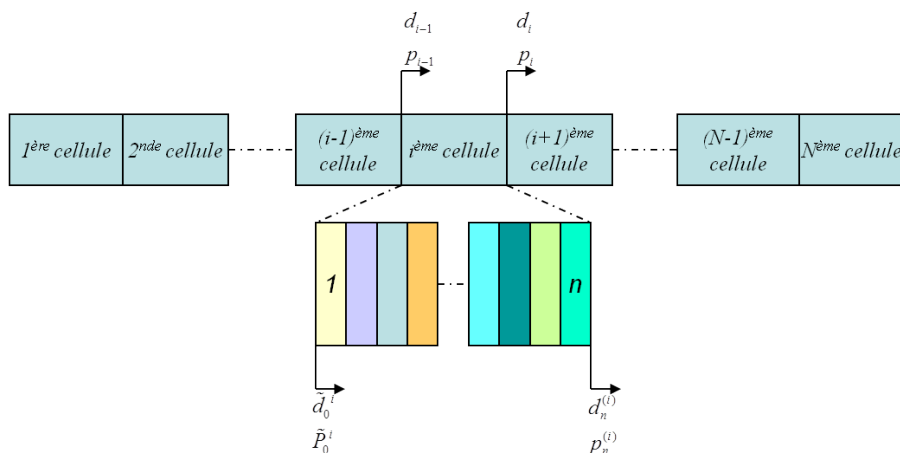


Figure II.33 – Décomposition de la structure périodique.

---

II.19. incluant les effets de masse et d'amortissement ;  $[A] = -\omega^2[M] + j\omega[C] + [K]$ , avec  $[M]$ ,  $[C]$  et  $[K]$  les matrices de masse dynamique, d'amortissement et de raideur en circuit ouvert.

$$[A_{\text{equiv}}] \begin{Bmatrix} \tilde{d}_0^i \\ \vdots \\ \tilde{d}_j^i \\ \vdots \\ \tilde{d}_n^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{p}_0^i \\ \vdots \\ \tilde{p}_j^i \\ \vdots \\ \tilde{p}_n^i \end{Bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

où l'expression de  $[A_{\text{equiv}}]$  est donnée par :

$$[A_{\text{equiv}}] = \begin{cases} [A] & \text{en court-circuit} \\ [A] + [B_1] [B_3]^{-1} [B_2] & \text{en circuit ouvert} \\ [A] + \frac{j}{1+j} [B_1] [B_3]^{-1} [B_2] & \text{dans le cas résistif optimal} \\ & \text{(résistance adaptée à chaque fréquence)} \\ [A] + \left[1 + j \frac{4}{\pi} \left(\frac{1+\gamma}{1-\gamma}\right)\right] [B_1] [B_3]^{-1} [B_2] & \text{avec l'interface SSDI} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

où l'expression de la matrice de raideur dynamique en SSDI a été obtenue en considérant une excitation monochromatique et en utilisant l'approximation du premier harmonique, de manière similaire à [BSG<sup>+</sup>06].

A partir de l'équation du mouvement exprimée à l'aide de la matrice de raideur dynamique équivalente, et en décomposant cette dernière sous la forme de sous-matrices extrêmes et internes :

$$[A_{\text{equiv}}] = \begin{bmatrix} [a_{00}] & [a_{0j}] & [a_{0n}] \\ [a_{j0}] & [a_{jj}] & [a_{jn}] \\ [a_{n0}] & [a_{nj}] & [a_{nn}] \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

il est possible d'obtenir la matrice de transfert  $[T]$  entre chaque cellule, en considérant aucune force ni moment internes à la cellule :

$$[T] = \begin{bmatrix} -[\alpha_{12}]^{-1} [\alpha_{11}] & [\alpha_{12}]^{-1} \\ -[\alpha_{21}] + [\alpha_{22}] [\alpha_{12}]^{-1} [\alpha_{11}] & -[\alpha_{22}] [\alpha_{12}]^{-1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

avec

$$\begin{aligned} [\alpha_{11}] &= [a_{00}] - [a_{0j}] [a_{jj}]^{-1} [a_{j0}] \\ [\alpha_{12}] &= [a_{0n}] - [a_{0j}] [a_{jj}]^{-1} [a_{jn}] \\ [\alpha_{21}] &= [a_{n0}] - [a_{nj}] [a_{jj}]^{-1} [a_{j0}] \\ [\alpha_{22}] &= [a_{nn}] - [a_{nj}] [a_{jj}]^{-1} [a_{jn}] \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Cette matrice de transfert permet ainsi d'analyser la propagation de l'onde à partir de ses valeurs propres  $\lambda_i$ , qui peuvent être exprimées sous forme exponentielle permettant de dégager le nombre d'onde  $\eta$  et le décrétement logarithmique  $\delta$  :

$$\lambda_i = e^{\eta+j\delta}, \quad i \in [1, 2, 3, 4] \quad (\text{II.33})$$

Un exemple des différents facteurs de transmission et d'atténuation est donné en Figure II.34, qui montre la présence classique de bandes interdites, mais surtout les capacités de la technique SSDI à offrir une atténuation significative des ondes de

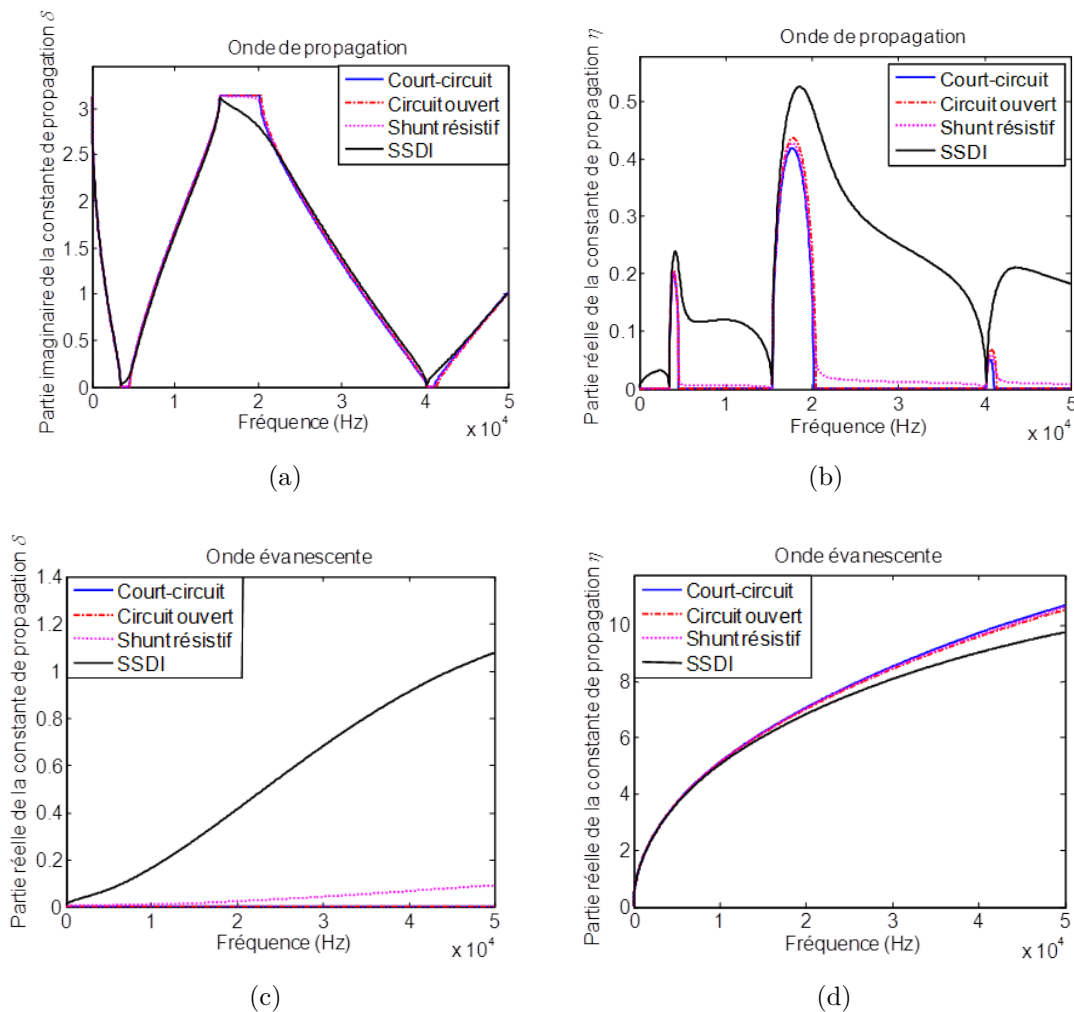


Figure II.34 – Constantes de propagation théoriques pour les structures périodiques.

propagation sur une très large bande fréquentielle, alors que les techniques passive pures ne présentent pas d'atténuation significative hors des bandes interdites. Ceci peut s'interpréter par la capacité du SSDI à artificiellement augmenter le couplage électromécanique, ainsi que de s'adapter à un changement de fréquence du fait du principe de détection d'extrema.

Ces capacités d'amortissement remarquables se traduisent également en considérant une application à des structures de type poutres encastées-encastées, dont la réponse peut être obtenue en superposant excitation et conditions aux limites dans l'expression par matrice de transfert, conduisant aux résultats présentés en Figure II.35.

### Structures périodiques avec interconnexions électriques

Dans la suite des travaux de Linjuan YAN, le sujet de doctorat de Bin BAO (en cours) s'intéresse à l'extension des structures électromécaniques périodiques utilisant l'interface non-linéaire SSDI en incluant également des interconnexions entre les éléments piézoélectriques.

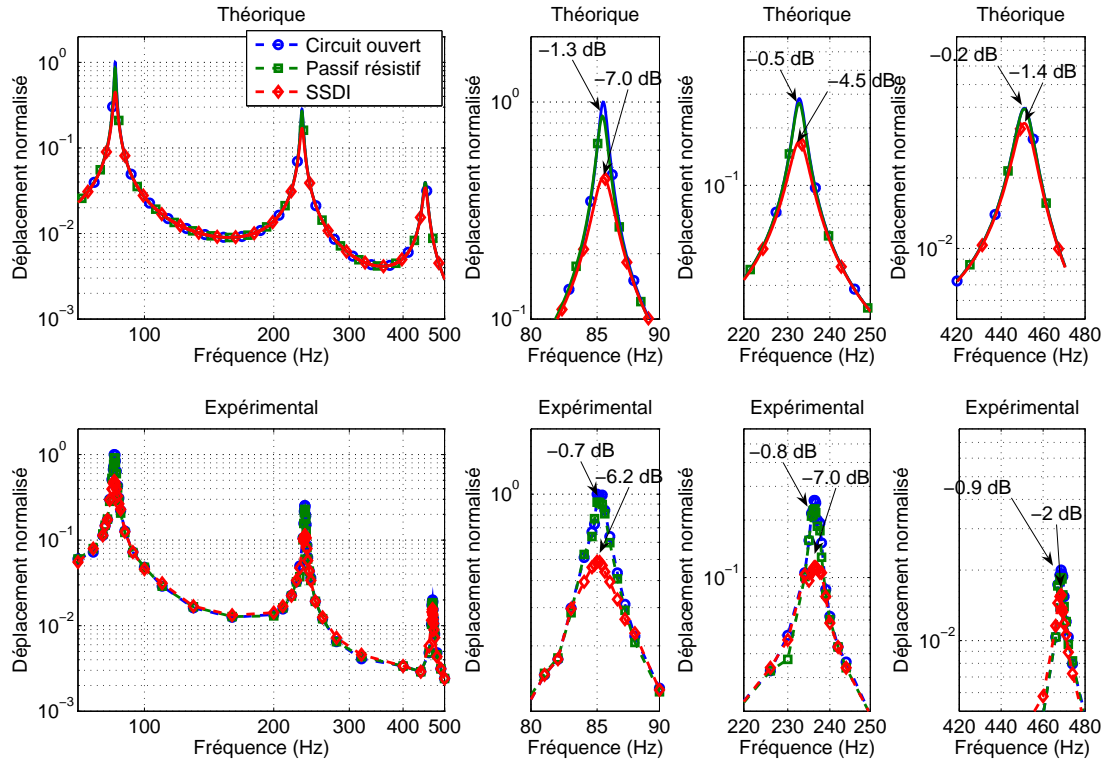


Figure II.35 – Application expérimentale des structures périodiques (poutre encastrée-encastrée).

En utilisant une démarche similaire à celle précédemment exposée, mais en considérant cette fois-ci que l'élément non-linéaire est connecté entre deux éléments piézoélectriques (Figure II.36), dont la modélisation se fait par son impédance linéaire équivalente  $Z_{SSDI}^{II.20}$  (où  $\gamma$  dénote le coefficient d'inversion de tension et  $C_0$  la capacité bloquée d'un élément piézoélectrique) :

$$Z_{SSDI} = \frac{\pi(1 - \gamma)}{2\omega(1 + \gamma)C_0} + \frac{2j}{\omega C_0} \quad (II.34)$$

il est ainsi possible d'obtenir une matrice de transfert incluant également les grandeurs électriques.

Cependant, l'étude d'une interconnexion de cellules deux-à-deux a montré que

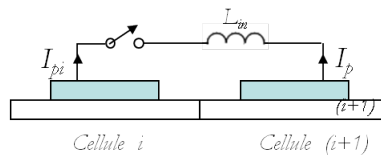


Figure II.36 – Structure périodique avec interconnexion électrique.

II.20. qui par ailleurs montre un terme imaginaire traduisant une adaptation automatique à l'impédance optimale (la capacité équivalente des deux éléments étant  $C_0/2$ )

cette approche n'apporte que peu d'amélioration (voire une dégradation des performances) par rapport à l'approche précédente où la technique SSDI est appliquée de manière indépendante à chaque élément piézoélectrique. Néanmoins, le principe de l'interconnexion peut être étendu à d'autres techniques hybrides, combinant des "méta-cellules" dans lesquelles des éléments sont interconnectés, induisant plusieurs niveaux de périodicité, comme par exemple les structures présentées en Figure II.37. Un tel arrangement permet ainsi des zones de meilleure atténuation que les structures utilisant des connexions électriques indépendantes (Figure II.38), notamment dans les basses fréquences où les systèmes électroactifs sont surtout sensés opérer.

Enfin, un autre axe d'étude intéressant consiste à utiliser une certaine apériodicité, permettant une amélioration des performances ([WP90, TRB01]), notamment en largeur de bande. Ici, cette apériodicité peut être obtenue en associant des méta-cellules telles qu'exposées précédemment avec des cellules indépendantes, permettant un gain d'amortissement significatif par rapport aux systèmes utilisant toujours les mêmes cellules ou méta-cellules (Figure II.39).

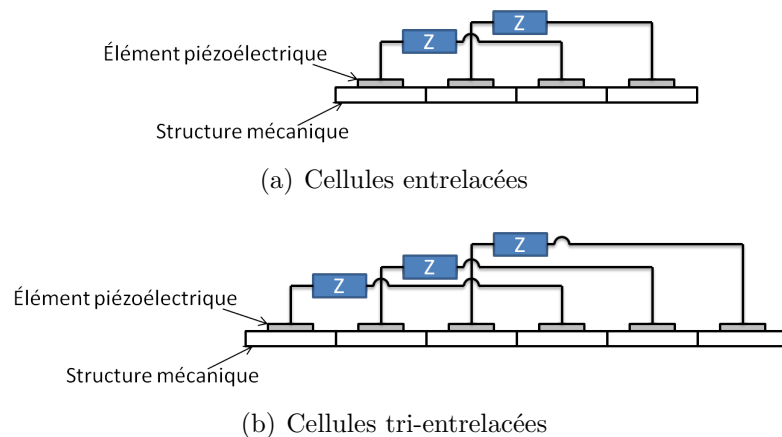


Figure II.37 – Exemple de "méta-cellules" utilisant des interconnexions électriques.

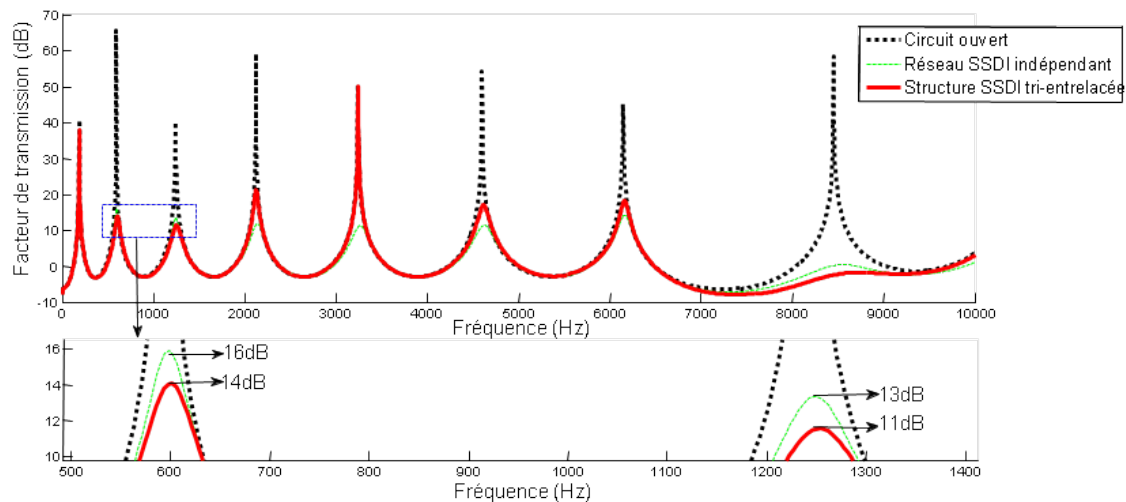


Figure II.38 – Facteur de transmission des structures tri-entrelacées et comparaison avec les structures électroniquement indépendantes.

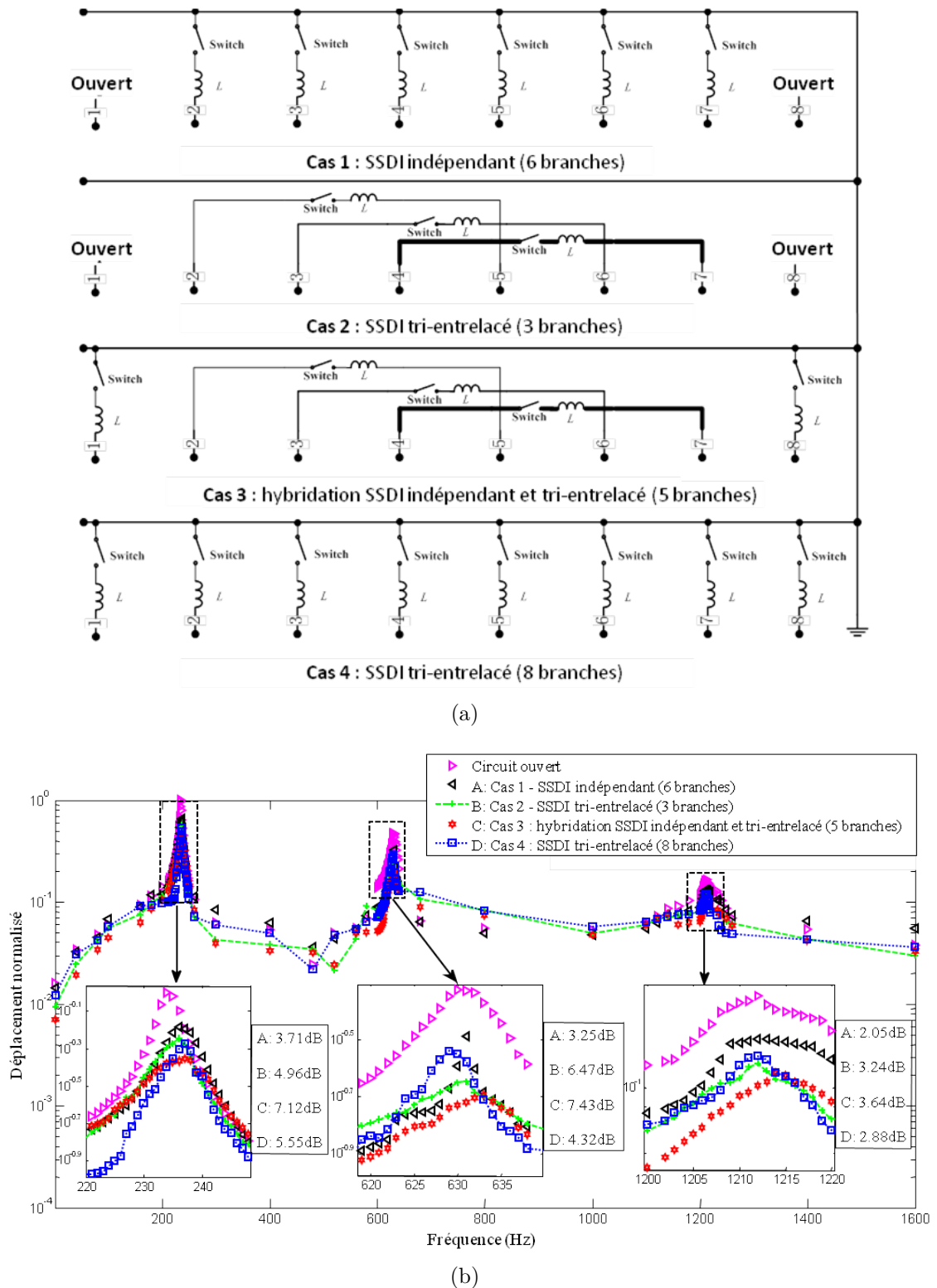


Figure II.39 – Principes et résultats expérimentaux sur une poutre encastree-encastree (composee de 6 cellules elementaires) de l'adjonction d'aperiodicite par l'association de cellules differentes.

## II.4 Récupération d'énergie vibratoire

### II.4.1 Introduction : place et enjeux de la récupération d'énergie par éléments piézoélectriques

La partie précédente s'est attachée à réduire les vibrations par des mécanismes de conversion et de dissipation de l'énergie mécanique. Cependant, plutôt que de dissiper l'énergie électrique ou de conserver cette dernière sous forme électrique au niveau de l'élément piézoélectrique, il est possible de la transférer à un étage de stockage pour un usage ultérieur, donnant ainsi naissance au concept de récupération d'énergie.

Avec la diminution drastique de la consommation des composants électriques (Figure II.40), l'accomplissement d'une fonction électronique est désormais possible avec une quantité d'énergie très faible. Ainsi, même avec le peu d'énergie récupérée de l'environnement immédiat, il est ainsi possible, par exemple, d'effectuer des inspections en contrôle de santé structurale ([EES01,EEC03,GJP<sup>+</sup>07,LGJ<sup>+</sup>08]), des mesures de températures ([SWD<sup>+</sup>14]) ou encore des interrupteurs sans fils ([PF01,arv,eno,mic]).

Ainsi, les dispositifs de récupération d'énergie vise à remplacer les batteries et piles dans les dispositifs autonomes sans fil, faisant de ceux-ci des dispositifs auto-alimentés sans fil. Le remplacement des batteries trouve des avantages dans de nombreuses applications, tel que des coûts de maintenance réduits (surtout lorsque le système est difficile d'accès - par exemple des capteurs dans des pneumatiques pour les transports - ou encore lorsque de nombreux systèmes sont à entretenir - tels les interrupteurs sans fils d'un bâtiment), d'autant plus que leur capacité n'a pas connu d'évolution exponentielle ([PS05]) contrairement à la grande majorité

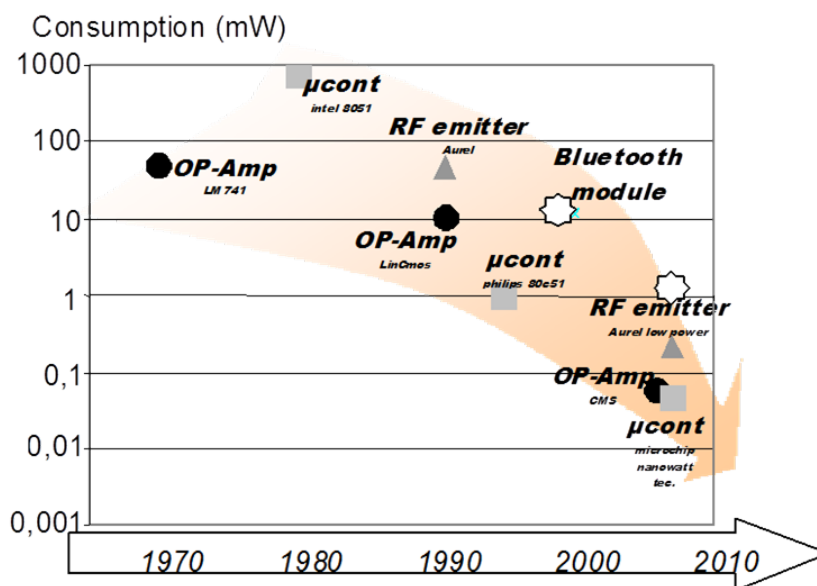


Figure II.40 – Evolution de la consommation électrique de composants typiques ([PGLMss]).

des propriétés des systèmes électroniques<sup>II.21</sup> (parmi lesquelles leur consommation - Figure II.40). Les dispositifs de récupération d'énergie peuvent également opérer dans des environnements plus sévères que les batteries, qui sont par exemple très sensibles à la température (Figure II.41). Enfin, on pourra noter que les batteries présentent des problèmes environnementaux notamment vis-à-vis du recyclage des matières qu'elles contiennent (Figure II.42), mais ceci est à pondérer par le fait que de nombreux matériaux de conversion d'énergie incluent également des constituants nocifs (cas des éléments piézoélectriques au plomb par exemple).

La récupération d'énergie peut se faire à partir de nombreuses sources et en utilisant de nombreux effets de conversion. On pourra se reporter à l'Annexe A dédiée à l'analyse de ces sources et effets<sup>II.22</sup>, qui montre la viabilité des sources solaires, thermiques et vibratoires, et, pour cette dernière, l'intérêt des effets actifs tels que

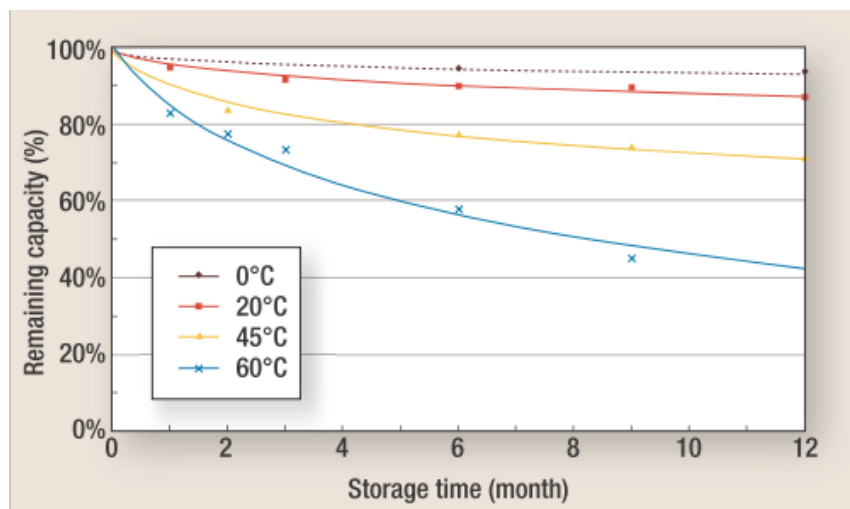


Figure II.41 – Auto-décharge de batteries Lithium-ion en fonction de la température d'utilisation ([Van06]).

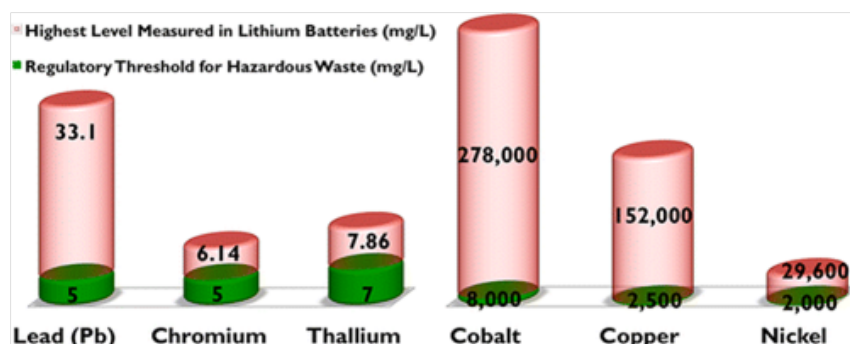


Figure II.42 – Composition en matériaux toxiques des batteries (<http://phys.org>).

II.21. Loi de Moore

II.22. Il convient de noter que dans l'absolu, cette Annexe fait partie intégrante du travail de recherche et constitue donc un chapitre à proprement parler. Le choix de situer ce travail en Annexe s'est fait par rapport à l'approche choisie quant à la structure du manuscrit, qui consiste à analyser les potentiels des principaux couplages étudiés. Il en va de même pour l'Annexe B.



l'électromagnétisme et la piézoélectricité. Dans le cadre des systèmes de faibles dimensions (millimétriques à centimétriques) sur lesquels sont centrés les travaux de recherche, les éléments piézoélectriques sont un choix de premier ordre en terme de puissance disponible (Figure II.43), rivalisant allègrement avec les systèmes électromagnétiques sans générer ni être sensibles aux perturbations électromagnétiques<sup>II.23</sup>.

Ainsi, la récupération d'énergie vibratoire utilisant des éléments piézoélectriques a connu un important essor depuis environ une décade, conduisant désormais à un solide socle scientifique, mais pour lequel des verrous existent encore. Le travail de recherche mené sur cette thématique s'est ainsi penché sur deux des principaux obstacles à l'application réaliste des microgénérateurs piézoélectriques, qui consistent d'une part en l'analyse du comportement sous des excitations complexes, et d'autre part en l'amélioration des capacités de récupération par une augmentation artificielle du couplage électromécanique via des traitements et des interfaces électroniques adaptées (inspirées par les techniques de contrôle vibratoire SSD). Alors que pour le premier cas le lien avec l'application dans des environnements réels est assez évident, les développements faits dans le cas du dernier axe se sont néanmoins attachés à développer des systèmes efficaces mais simples pour l'amélioration de la conversion, avec un effort particulier quant à la démonstration de l'applicabilité (circuits auto-alimentés).

## II.4.2 Modélisation des systèmes de récupération d'énergie vibratoire utilisant des éléments piézoélectriques

La première partie de ce sous-chapitre s'intéressera ainsi l'analyse de techniques de récupération d'énergie existantes sous des excitations non monochromatiques.

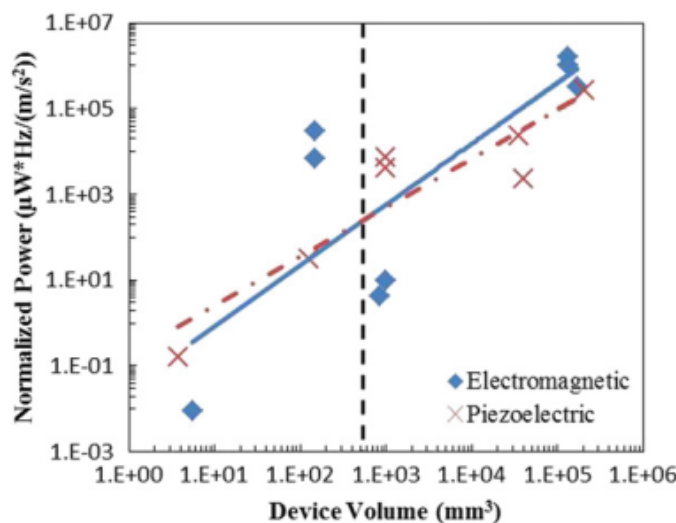


Figure II.43 – Comparaison des puissances typiques disponibles entre transducteurs électromagnétiques et piézoélectriques ([MBP11]).

---

II.23. La génération de perturbations électromagnétiques de l'actionneur peut être fortement pénalisante pour les systèmes de communications sans fil ou les dispositifs de régulation commutés - hacheurs - par exemple.

## Performances en régime transitoire de systèmes de récupération d'énergie non-linéaire

Dans premier temps, et lors du post-doctorat effectué au Center for Intelligent Materials, Systems and Structures (CIMSS) à l'université polytechnique de Virginie (Virginia Tech), l'étude transitoire des performances des techniques classiques (élément piézoélectrique directement connecté à une capacité de stockage via un pont de diode - Figure II.44(a), [Bad06, LBR<sup>+</sup>06]), SSHI<sup>II.24</sup> parallèle (technique classique avec interface SSD en parallèle avec l'élément piézoélectrique et le redresseur - Figure II.44(b), [GBLR05, Bad06, LBR<sup>+</sup>06]), SSHI série (technique classique avec interface SSD en série entre l'élément piézoélectrique et le redresseur - Figure II.44(c), [TBK<sup>+</sup>01, Bad06, LBR<sup>+</sup>06])<sup>II.25</sup> a été menée afin de déterminer les vitesses de récupération d'énergie et l'énergie totale récupérée lorsque la charge connectée est purement capacitive (pas de consommation d'énergie).

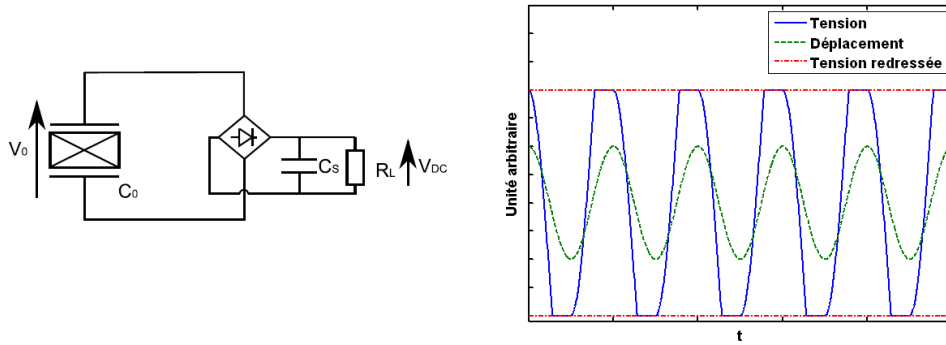
Cette étude s'est faite par une analyse énergétique durant une demi-période, permettant d'obtenir un algorithme rapide de calcul numérique ([LIG10]). Les résultats en termes d'énergie récupérée finale (et considérant une capacité de stockage 100 fois plus grande que celle de l'élément piézoélectrique), exposés en Figure II.45 montrent que le SSHI série ne permet pas une meilleure récupération d'énergie que le cas standard. En effet, sur une charge capacitive, le fait que la commutation se fasse par rapport à la tension redressée (au signe près selon l'inversion) conduit au fait qu'une fois la capacité chargée, aucune inversion ne peut se produire et le système reste en circuit ouvert. Par contre on pourra noter que pour des systèmes faiblement couplés (faible valeur du coefficient de couplage électromécanique global  $k$ ) et/ou peu surtendus (faible valeur du facteur de qualité mécanique  $Q_M$ ), le SSHI parallèle conduit à un gain très significatif en ce qui concerne l'énergie récupérée. Néanmoins, du fait de l'amortissement induit par cette technique (une fois l'énergie récupérée le système se situe dans un cas similaire à la technique de contrôle vibratoire SSDI), l'énergie récupérée commence à décroître à partir d'une certaine valeur du facteur  $k^2 Q_M$  pour au final devenir inférieure aux techniques standard et SSHI série<sup>II.26</sup>. En contrepartie de l'absence de gain en termes d'énergie récupérée, la vitesse de récupération du SSHI série est bien plus rapide que les autres techniques (2 fois plus rapide que la technique standard par exemple - Figure II.46), alors que la technique SSHI parallèle s'avère bien plus lente, malgré une diminution de la constante de temps avec le produit  $k^2 Q_M$  expliqué par une meilleure conversion de l'énergie du matériau.

---

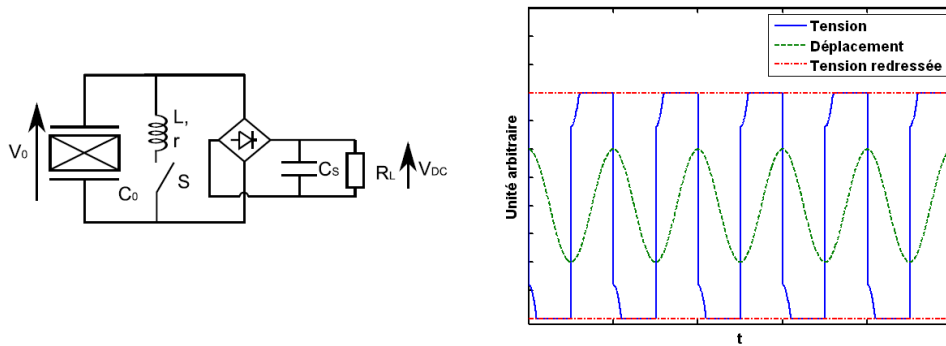
II.24. Synchronized Switch Harvesting on Inductor

II.25. La Figure II.44(d) expose également la technique SECE (Synchronized Electric Charge Extraction - semblable à une technique SSD avec arrêt de la commutation à tension nulle et récupération de l'énergie cinétique de l'inductance - [LBRG05, Bad06]) qui, même si elle n'a pas été considérée dans l'étude exposée ici, demeure une interface très intéressante pour la récupération d'énergie du fait de son indépendance à la charge connectée, tout en permettant également un gain significatif en terme d'énergie récupérée.

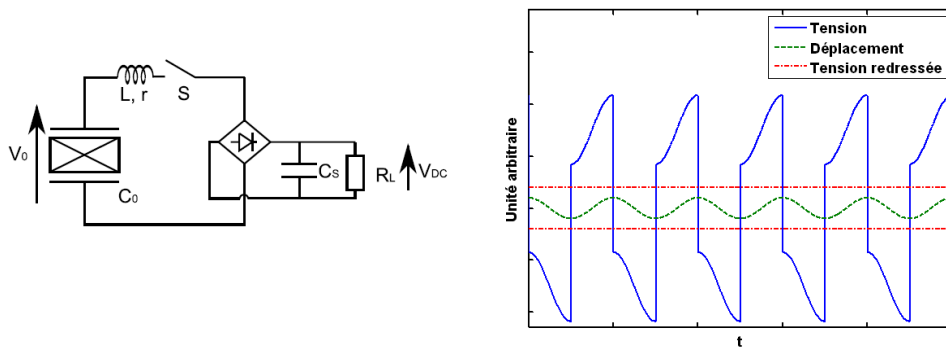
II.26. Une façon d'adresser ce problème sera exposée dans le Paragraphe II.4.3.



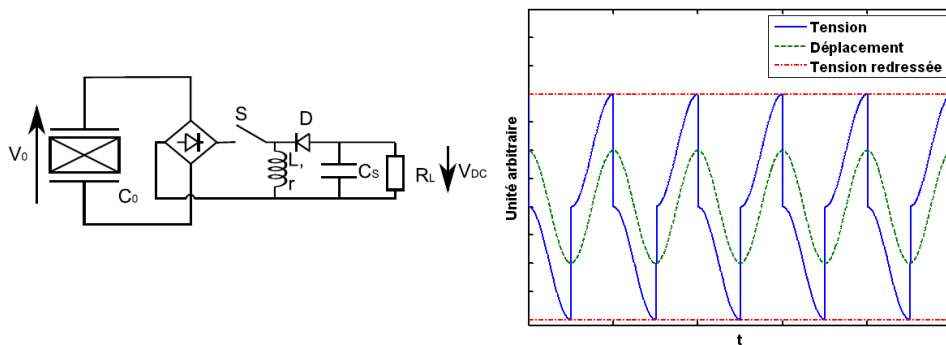
(a) Standard



(b) SSHI parallèle



(c) SSHI série



(d) SECE

Figure II.44 – Circuits de récupération d'énergie.

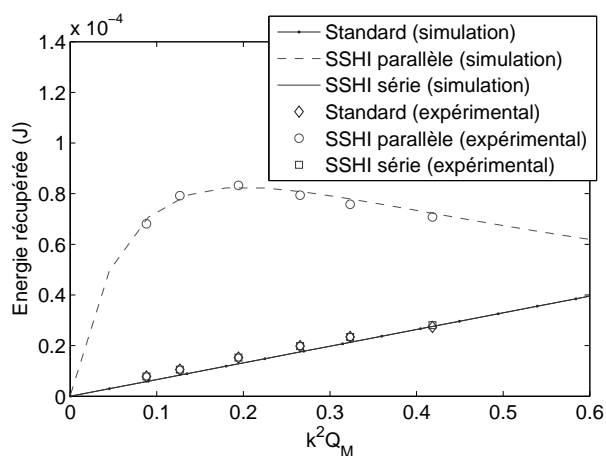


Figure II.45 – Energie récupérée finale sur une charge capacitive en fonction du produit du coefficient de couplage au carré  $k^2$  et du facteur de qualité mécanique  $Q_M$ .

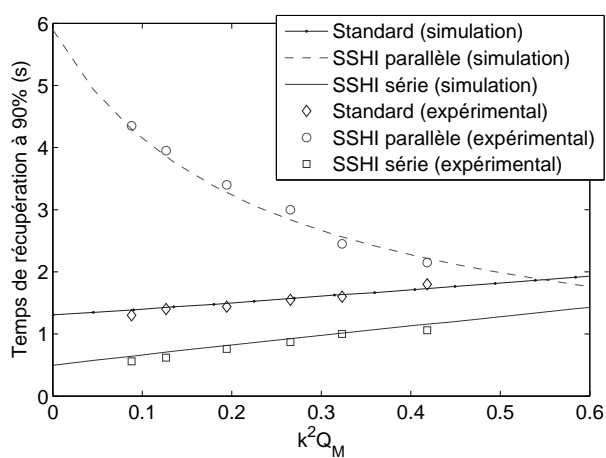


Figure II.46 – Temps de récupération de 90% de l'énergie finale sur une charge capacitive en fonction du produit du coefficient de couplage au carré  $k^2$  et du facteur de qualité mécanique  $Q_M$ .

## Performances de systèmes de récupération d'énergie non-linéaire en excitation proche de la résonance

En plus de ce comportement transitoire, la compréhension et l'analyse des systèmes de récupération d'énergie non-linéaire considère généralement deux cas extrêmes : soit le système est à la résonance et ainsi l'effet de conversion inverse (électrique vers mécanique) a son effet maximum, soit le dispositif se situe hors résonance et/ou est très faiblement couplé/surtendu de sorte que l'amplitude de vibration peut être considérée constante et égale au cas sans aucune récupération. Néanmoins, pour les systèmes fortement couplés et surtendus, il existe une plage fréquentielle intermédiaire entre ces deux cas. A partir de la modélisation du dispositif (cette fois-ci également connecté à une charge résistive) sous la forme d'un système à un degré de liberté de type masse-ressort-amortisseur électromécaniquement couplé :

$$\begin{cases} M\ddot{u} + C\dot{u} + K_E u = F - \alpha V \\ I = \alpha \dot{u} - C_0 \dot{V} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

avec  $M$ ,  $C$ ,  $K_E$ ,  $\alpha$  et  $C_0$  dénotant respectivement la masse dynamique, le facteur d'amortissement structurel, la raideur en court-circuit, le facteur de force électromécanique et la capacité bloquée, ainsi que  $u$ ,  $F$ ,  $I$  et  $V$  le déplacement, force, courant sortant de l'élément piézoélectrique et tension aux bornes de celui-ci, il est possible, en appliquant l'approximation du premier harmonique sur la tension piézoélectrique et sur la force équivalente  $(F_P)_{stand}$  exercée par ce dernier dans le cas de l'interface standard (Figure II.44(a)), d'exprimer cette dernière via l'angle de conduction du pont de diode  $\omega t_1$  ainsi que l'amplitude de vibration  $(u_M)_{stand}$  et la puissance récupérée  $P_{stand}$  selon ([LGRP10]) :

$$\begin{cases} (F_P)_{stand} \approx \frac{\alpha^2}{C_0} \frac{1}{\pi} \left[ \left( \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1) \right) + j \sin^2(\omega t_1) \right] U(\omega) \\ (u_M)_{stand} \approx \left| \frac{F_M}{-M\omega^2 + j \left[ C\omega + \frac{\alpha^2}{\pi C_0} \sin^2(\omega t_1) \right] + \left[ K_E + \frac{\alpha^2}{\pi C_0} \left( \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1) \right) \right]} \right| \\ P_{stand} = \frac{\alpha^2}{C_0} f_0 u_M^2 \sin^2(\omega t_1) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

avec  $U(\omega)$  le déplacement dans l'espace de Fourier et  $F_M$  l'amplitude de la force. De manière analogue, la même procédure appliquée au cas de la technique SSHI parallèle conduit à :

$$\begin{cases} (F_P)_{SSHI} \approx \frac{\alpha^2}{C_0} \frac{1}{\pi} \left[ \left( \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1) \right) + j \frac{1}{1-\gamma} \left( 3 + \gamma - 2(1+\gamma) \cos(\omega t_1) - (1-\gamma) \cos^2(\omega t_1) \right) \right] U(\omega) \\ (u_M)_{SSHI} \approx \left| \frac{(P_{tot})_M}{-M\omega^2 + j \left[ C\omega + \frac{\alpha^2}{\pi C_0} \frac{1}{1-\gamma} (3 + \gamma - 2(1+\gamma) \cos(\omega t_1) - (1-\gamma) \cos^2(\omega t_1)) \right] + \left[ K_E + \frac{\alpha^2}{\pi C_0} \left( \omega t_1 - \frac{1}{2} \sin(2\omega t_1) \right) \right]} \right| \\ P_{SSHI} = \frac{\alpha^2}{C_0} \frac{2}{1-\gamma} f_0 u_M^2 \sin^2(\omega t_1) \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

où  $\gamma$  représente le facteur d'inversion.

A partir de ces résultats, le tracé des réponses en puissance, représenté en Figure II.47, montre ainsi que, surtout pour des valeurs du produit  $k^2Q_M$  faibles (structure peu surtendue ou peu couplée), l'application du SSHI, notamment de par sa capacité à artificiellement augmenter le couplage électromécanique, permet non seulement une augmentation significative de la puissance récupérée, mais aussi un élargissement de la bande passante en terme de puissance. On pourra aussi remarquer un "glissement" de la résistance optimale de l'interface SSHI vers les faibles valeurs (la puissance avec la technique standard montrant un double pic en fonction de la résistance, centré de manière logarithmique autour de la résistance optimale sans amortissement). On pourra également noter que le modèle proposé permet également de prendre en compte le décalage de la fréquence de résonance induit par le processus de récupération.

L'évolution de la puissance maximale à la charge optimale en fonction du produit  $k^2Q_M$  et de la fréquence (normalisée de la même manière que précédemment) est représentée en Figure II.48. On voit ainsi une nette amélioration des capacités de récupération d'énergie et de la bande passante du SSHI pour de faibles valeurs de  $k^2Q_M$ . Lorsque ce produit devient important néanmoins, les capacités de récupération entre les deux techniques sont néanmoins similaires, et l'interface standard permet et récupération d'énergie sur une bande fréquentielle plus large (pour des valeurs de résistances de charge différentes cependant).

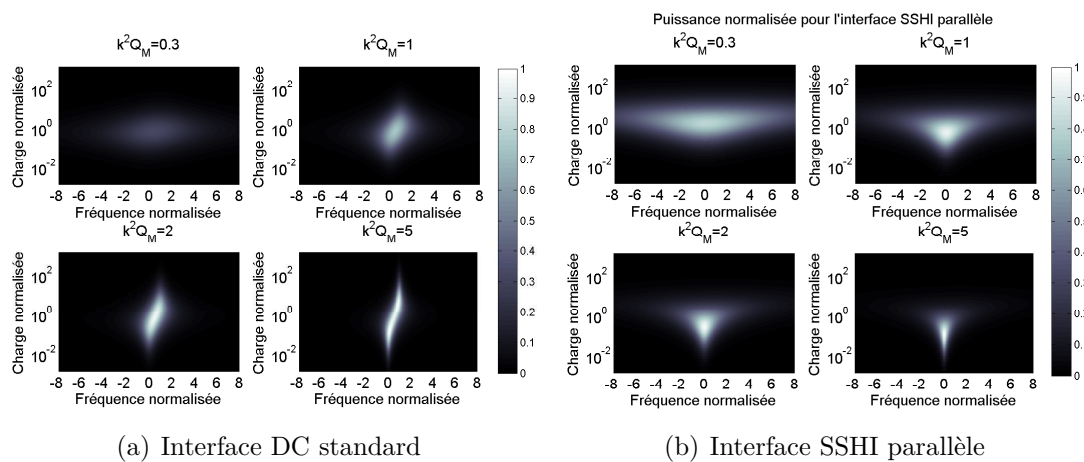


Figure II.47 – Réponse fréquentielle (normalisée de telle manière que 0 corresponde à la fréquence de résonance en court-circuit et 1 à celle en circuit ouvert) et en fonction de la charge (normalisée par rapport à la charge optimale dans le cas standard sans amortissement) pour plusieurs valeurs du produit  $k^2Q_M$  en termes de puissance normalisée à la puissance maximale récupérable ( $P_{max} = F_M^2/(8C)$ ), en considérant un facteur d'inversion  $\gamma = 0,8$ .

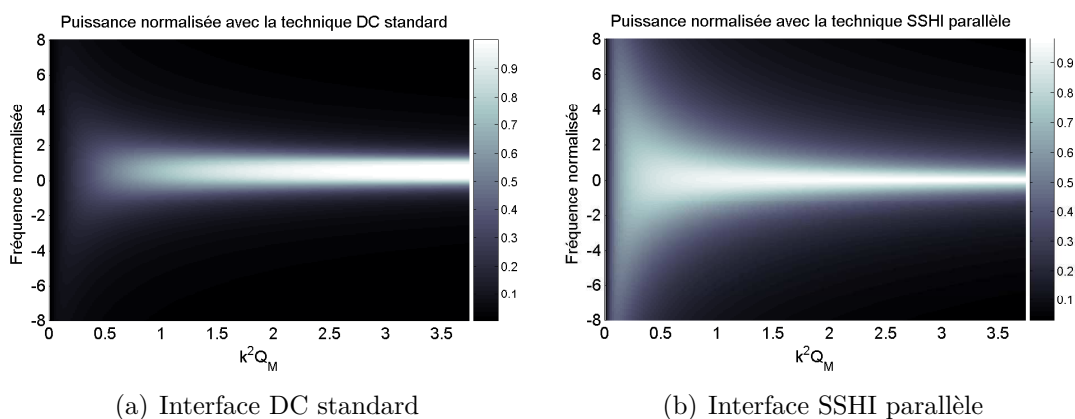


Figure II.48 – Puissance maximale (à charge optimale) normalisée à la puissance maximale récupérable en fonction du produit  $k^2 Q_M$  et de la fréquence normalisée ( $\gamma = 0, 8$ ).

### Effets des microgénérateurs sismiques sur la structure hôte et impact sur la récupération d'énergie

Ainsi que démontré lors de la thèse de Yi-Chieh WU (en collaboration avec Linjuan YAN dans le cadre du travail de celle-ci sur les amortisseurs à masse accordée), on pourra également noter, dans le cas de la récupération sismique<sup>II.27</sup> où le microgénérateur consiste en une structure mécanique supplémentaire rapportée sur la structure hôte, qu'un couplage "mécano-mécanique", analogue au cas exposé dans le Paragraphe II.3.2 apparaît, ce qui conduit donc non seulement à l'amortissement de la structure du microgénérateur en lui-même, mais aussi de la structure hôte (Figure II.49). En considérant la modélisation représentée en Figure II.50 et en notant  $M_i$ ,  $C_i$ ,  $K_i$ ,  $\alpha$  et  $C_0$  les masses dynamiques, coefficients d'amortissement structural, raideurs (en court-circuit pour la structure active), facteur de force et capacité bloquée, et  $u_i$ ,  $F$  et  $V$  les déplacements, la force appliquée sur la structure hôte et la tension de l'élément piézoélectrique, et en prenant comme indice  $i = 1$  pour la structure hôte et 2 pour le microgénérateur, l'équation macroscopique constitutive du système est donnée par :

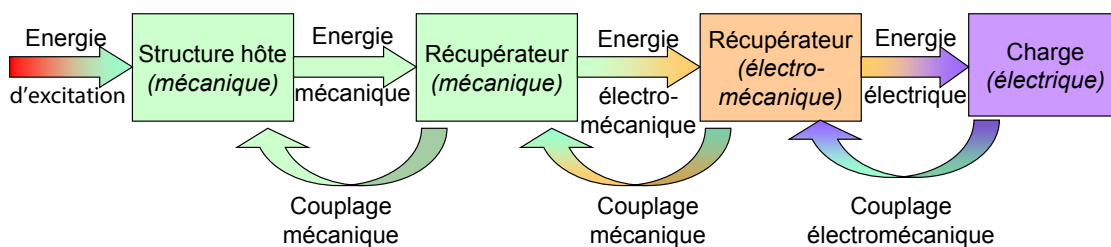


Figure II.49 – Chaîne de conversion d'énergie dans le cas d'un microgénérateur sismique.

II.27. ici sans considération de la commutation pour illustrer de manière simple les propos

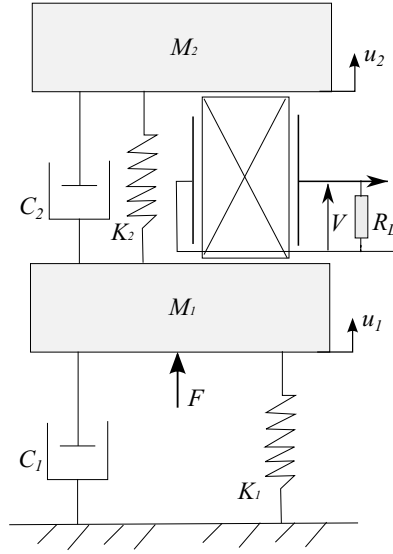


Figure II.50 – Modèle à deux degrés de liberté du système de récupération d'énergie.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) + \mathbf{A}V(t),$$

$$\mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}, \mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_2 \\ -C_2 & C_2 \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha \\ -\alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

La tension lorsqu'une charge purement résistive est connectée au système est quant à elle donnée par :

$$\tilde{V}(\omega) = \frac{\alpha R j \omega}{1 + C_0 R j \omega} (\tilde{U}_2(\omega) - \tilde{U}_1(\omega)) = g(\omega) \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{U}_1(\omega) \\ \tilde{U}_2(\omega) \end{Bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

$$\text{avec } g(\omega) = \frac{\alpha R j \omega}{1 + C_0 R j \omega} \quad (\text{II.40})$$

ce qui permet, en combinant les deux équations précédentes d'obtenir l'équation des déplacements :

$$\begin{Bmatrix} \tilde{U}_1(\omega) \\ \tilde{U}_2(\omega) \end{Bmatrix} = \mathbf{L}(\omega) \begin{Bmatrix} F_M \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

où :



$$\begin{aligned}
 \mathbf{L}(\omega) &= (\mathbf{I}_2 - \mathbf{G}(\omega))^{-1} \mathbf{T}(\omega) \\
 \mathbf{G}(\omega) &= \alpha g(\omega) \mathbf{T}(\omega) \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \\
 \mathbf{T}(\omega) &= \begin{bmatrix} -M_1\omega^2 + (C_1 + C_2)j\omega + (K_1 + K_2) & -C_2j\omega - K_2 \\ -C_2j\omega - K_2 & -M_2\omega^2 + C_2j\omega + K_2 \end{bmatrix}^{-1}
 \end{aligned} \tag{II.42}$$

avec  $\mathbf{I}_2$  la matrice identité de taille  $2 \times 2$ , ainsi que de la puissance récupérée :

$$P = \frac{1}{2} \frac{\tilde{V}(\omega)\tilde{V}^*(\omega)}{R_L} \tag{II.43}$$

Bien que généralement négligés, on observe que les effets, tant en termes d'amortissement que de décalage de la fréquence de résonance, se manifestent néanmoins pour des rapports de masses dynamiques entre récupérateur et structure hôte très faibles (Figures II.51 et II.52), nécessitant ainsi une optimisation minutieuse pour assurer un maximum d'énergie récupérée, laquelle apparaît notamment pour un rapport de masse bien particulier.

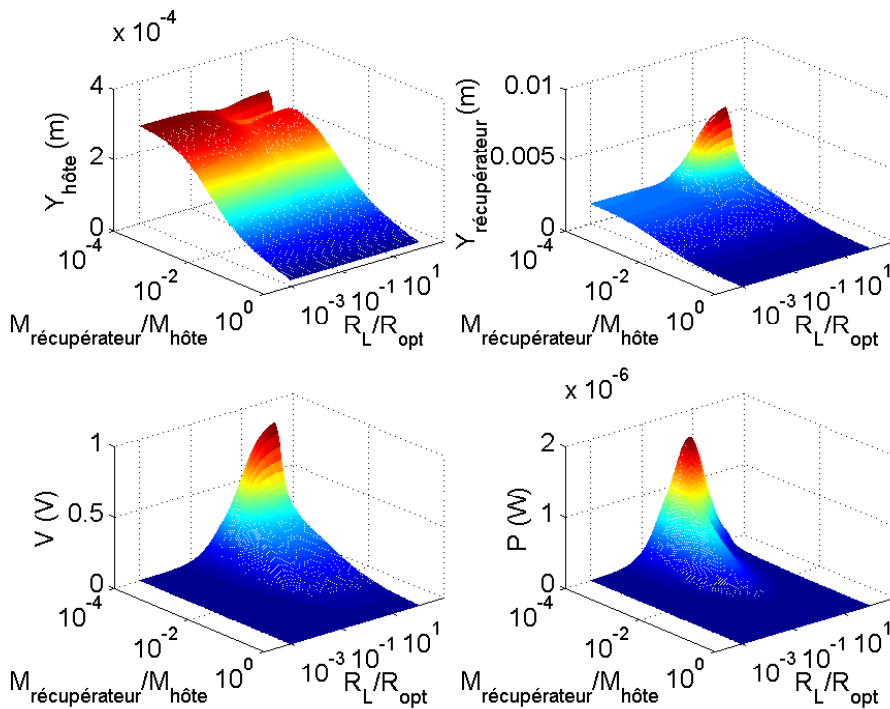


Figure II.51 – Réponses de la structure hôte et du microgénérateur pour différents rapports de masse et charge ; les performances sont optimisées par rapport à la fréquence et la charge résistive est normalisée par rapport à la valeur optimale dans le cas de la technique alternative standard ( $Y$  dénote la déflexion).

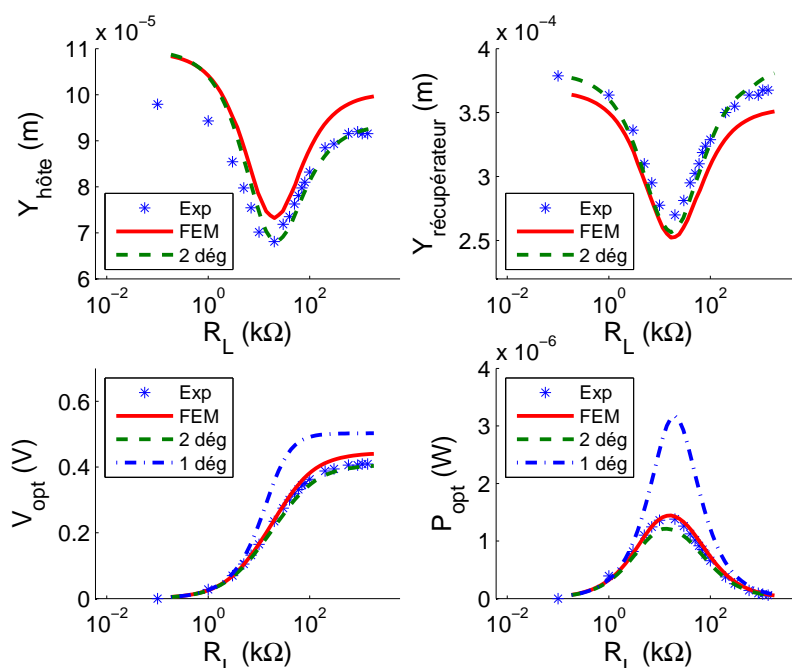


Figure II.52 – Exemple expérimental de la récupération sismique (rapport de masse = 0.0208 ;  $Y$  dénote la déflexion).

### Modélisation large bande de systèmes de récupération d'énergie non-linéaire

De manière progressive, la dernière action en date concernant la modélisation des systèmes de récupération d'énergie, et plus précisément des interfaces non-linéaires, s'est tournée vers la prise en compte de type d'excitation plus réaliste. Ainsi, une approche stochastique a été menée afin d'évaluer les capacités de conversion et récupération d'énergie des techniques non-linéaires. Cependant, l'analyse stochastique nécessitant un système linéaire, il sera considéré ici une technique un peu différente, qui consiste à commuter de manière périodique plutôt que de manière synchronisée avec le déplacement, conduisant ainsi à un système linéaire (mais non temporellement invariant) permettant d'appliquer l'approche considérée. Cette méthode sera ainsi dénommée PSHI (*“Periodic Switch Harvesting on Inductor”*).

Dans le cas d'une telle technique, le processus de commutation peut être interprété comme un échantillonnage de la tension de sortie rebouclée sur elle-même (Figure II.53), conduisant ainsi au concept d'“auto-échantillonnage”. A titre d'exemple, dans le cas d'une excitation monochromatique à fréquence  $f_0$ , l'“auto-échantillonnage” à une fréquence double conduit à un peigne de Dirac fréquentiel de fréquence  $2f_0$ . La superposition de ce peigne au signal original conduit ainsi à un processus cumulatif qui amplifie le signal (plus ou moins selon la phase entre le peigne et le signal) par un effet d'“auto-repliement”, comme illustré en Figure II.54.

En utilisant un modèle à un degré de liberté mécanique électromécaniquement couplé :

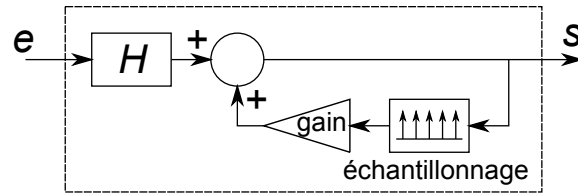


Figure II.53 – Principe de l’“auto-échantillonnage” pour l’étude de la réponse stochastique de la technique PSHI.

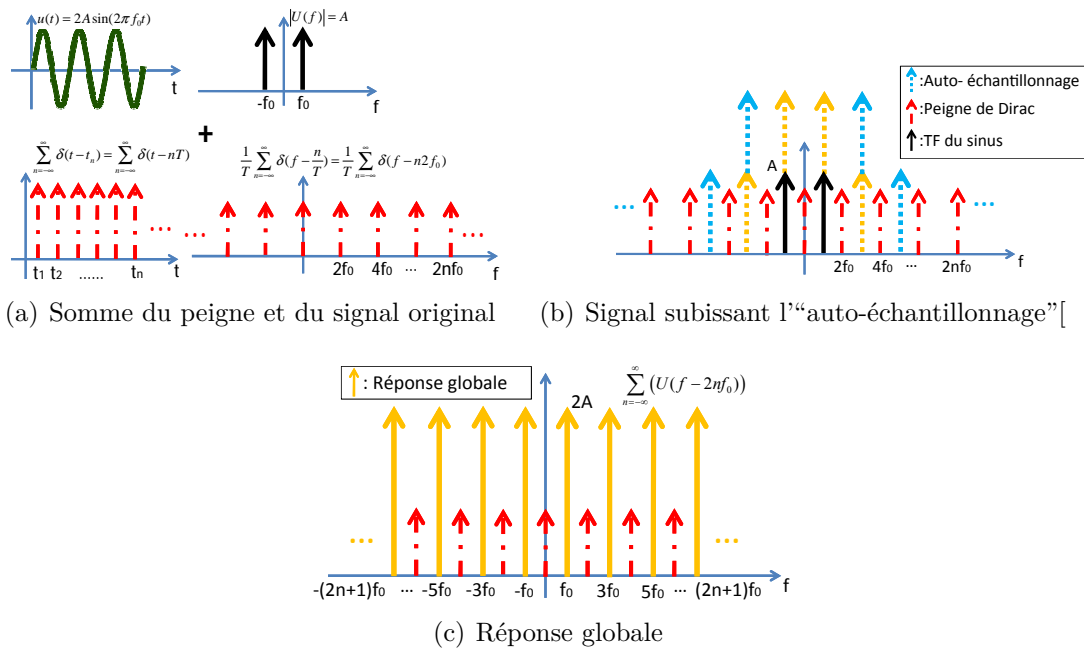


Figure II.54 – Illustration de l’“auto-échantillonnage” et de l’“auto-repliement” dans le cas d’un signal monochromatique avec commutation à une fréquence double.

$$\begin{aligned} M\ddot{u} &= F - K_E u - \alpha V - C\dot{u} \\ I &= \alpha\dot{u} - C_0\dot{V} \end{aligned} \quad , \quad (\text{II.44})$$

avec  $u$ ,  $F$ ,  $V$  et  $I$  indiquant respectivement le déplacement, la force appliquée, la tension et le courant sortant de l'élément piézoélectrique, ainsi que  $M$ ,  $C$ ,  $K_E$ ,  $\alpha$  et  $C_0$  la masse dynamique, coefficient d'amortissement structural, raideur en court-circuit, facteur de force et capacité bloquée, et en considérant une annulation périodique (de période  $T_s$  et d'origine  $t_0$ ) de la tension, on peut montrer que la tension sans charge connectée au système s'exprime dans le domaine fréquentiel sous la forme ([LWR<sup>+</sup>12]) :

$$V(\omega) = \frac{\alpha}{C_0} U(\omega) - \frac{1}{j\omega} \frac{a}{C_0} \frac{1}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ U\left(\omega - n\frac{2\pi}{T_s}\right) \left(1 - e^{-j(\omega - n\frac{2\pi}{T_s})T_s}\right) e^{-jn\frac{2\pi}{T_s}t_0} \right]. \quad (\text{II.45})$$

où le terme de sommation fait clairement apparaître l'effet de l'“auto-échantillonnage”.

Cependant, la technique de commutation, par l'utilisation d'une inductance, permet une inversion imparfaite de la tension, avec une relation entre la tension avant et après commutation donnée par le coefficient d'inversion  $\gamma$ . De plus, lorsque qu'une charge, considérée ici comme purement résistive, est connectée en parallèle afin de pouvoir récupérer l'énergie, une décharge exponentielle de l'élément piézoélectrique apparaît entre chaque commutation (cette dernière étant considérée comme instantanée). En notant  $h(t)$  la réponse impulsionnelle de cette décharge, on montre alors que l'expression de la tension est donnée par ([LWR<sup>+</sup>12]) :

$$\begin{aligned} V(\omega) &= j\omega U(\omega) h(\omega) \\ &- j(1 + \gamma) \frac{C_0}{\alpha} \frac{1}{T_s} \frac{\left(1 - e^{-T_s j\omega} e^{-\frac{T_s}{R_L C_0}}\right)}{\left(1 + \gamma e^{-T_s j\omega} e^{-\frac{T_s}{R_L C_0}}\right)} h(\omega) \left[ \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \left(\omega - \frac{n2\pi}{T_s}\right) U\left(\omega - \frac{n2\pi}{T_s}\right) h\left(\omega - \frac{n2\pi}{T_s}\right) \right] e^{-jn\frac{2\pi}{T_s}t_0} \right], \end{aligned} \quad (\text{II.46})$$

En injectant cette expression dans l'expression mécanique du jeu d'équations (II.44), il est alors possible d'obtenir l'expression fréquentielle du déplacement :

$$\begin{aligned} U(\omega) &= \lambda(\omega) F(\omega) + \frac{\eta(\omega)\lambda(\omega)S_F(\omega)}{1 - \eta(\omega)S_h(\omega)} \\ &= U_1(\omega) + U_2(\omega). \end{aligned} \quad (\text{II.47})$$

où :

$$\eta(\omega) = j \frac{(1 + \gamma) \left(1 - e^{-T_s j \omega} e^{-\frac{T_s}{RC_0}}\right) e^{-j \omega t_0} C_0}{\left(1 + \gamma e^{-T_s j \omega} e^{-\frac{T_s}{RC_0}}\right) T_s} h(\omega) \quad (\text{II.48})$$

$$\lambda(\omega) = \frac{1}{-M\omega^2 + jC\omega + K_E + j\omega\alpha h(\omega)}, \quad (\text{II.49})$$

$$S_F(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) \lambda \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) F \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) h \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) e^{j(\omega - n \frac{2\pi}{T_s})t_0} \right], \quad (\text{II.50})$$

$$S_h(\omega) = \frac{e^{j\omega t_0}}{h(\omega)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[ \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) \beta \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) h \left(\omega - n \frac{2\pi}{T_s}\right) e^{j(\omega - n \frac{2\pi}{T_s})t_0} \right], \quad (\text{II.51})$$

$$\beta(\omega) = h(\omega) e^{-j\omega t_0} \lambda(\omega). \quad (\text{II.52})$$

Alors que le terme  $U_1(\omega)$  dénote de la réponse du système de récupération d'énergie sans processus de commutation, on pourra remarquer que le terme  $U_2(\omega)$  fait apparaître l'effet de la récupération sur le comportement mécanique du système via un "contre-déplacement".

A partir des équations (II.46) et (II.47) et en utilisant le théorème de Parseval, il est alors possible d'exprimer la puissance moyenne récupérée sur une charge  $R_L$  :

$$P = \frac{1}{T_v} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V(\omega)V^*(\omega)}{R_L} d\omega \quad (\text{II.53})$$

avec \* représentant le conjugué.

Afin de s'affranchir de la nécessité de devoir parfaitement connaître le spectre d'excitation (incluant notamment la phase), il est possible d'utiliser les résultats précédents pour mener une approche stochastique ; cette dernière pouvant s'appliquer directement sur la densité de puissance de la force d'entrée. Cette méthode, basée sur une approche cyclostationnaire qui postule de la périodicité des caractéristiques d'un signal<sup>II.28</sup>, permet ainsi d'exprimer ces dernières sous la forme de série de Fourier. Ainsi, en notant  $K_{xy}$  la covariance entre les signaux  $x$  et  $y$  et  $h_{xy}$  la réponse impulsionnelle de  $x$  par rapport à l'entrée  $y$ , on peut ainsi établir l'expression de la puissance récupérée selon<sup>II.29</sup> :

---

II.28. C'est cette hypothèse qui nécessite un système linéaire, mais non nécessairement temporellement invariant.

II.29. Les différentes étapes de calcul ne sont pas présentées dans ce manuscrit par soucis de concision et de clarté, mais surtout du fait que ce travail théorique exposé ici a avant tout été réalisé par Yi-Chieh WU, dans le cadre de sa thèse, et Einar HALVORSEN, au cours d'une visite en tant que professeur invité, avec une interaction relativement limitée de la part de l'auteur. Le détail des calculs peut se retrouver dans [WHL<sup>+</sup>14, Wu13].

$$P = \frac{1}{R_L} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \sum_n \tilde{S}_{vv}^n(\omega) \left( \hat{h}^*(\omega) \hat{h}(\omega + \omega_s n) \right. \\ \left. \times \left( \delta_{n,0} + (1 + \gamma) \frac{1}{T_s} J(\omega) \right) \right), \quad (\text{II.54})$$

où :

$$J_n(\omega) = \frac{1}{\left(-j\omega - \frac{1}{\tau_e}\right)} \frac{1 - e^{(-j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}}{1 + \gamma e^{(-j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}} + \frac{1}{\left(j(\omega + \omega_s n) - \frac{1}{\tau_e}\right)} \frac{1 - e^{(j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}}{1 + \gamma e^{(j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}} \\ + \frac{\tau_e}{2} \frac{(1 + \gamma) \left(1 - e^{-\frac{2T_s}{\tau_e}}\right)}{\left(1 + \gamma e^{(j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}\right) \left(1 + \gamma e^{(-j\omega - \frac{1}{\tau_e})T_s}\right)}.$$

et avec  $S_{xy}^n$  l'harmonique  $n$  de la densité spectrale d'interaction entre les grandeurs  $x$  et  $y$  et  $\tau_e$  la constante de temps du circuit formé par la capacité bloquée de l'élément piézoélectrique  $C_0$  et la charge connectée  $R_L$  ( $\tau_e = R_L C_0$ ).

La Figure II.55 montre un exemple de réponse en termes de puissance récupérée en fonction de la pulsation de commutation (normalisée par rapport à la pulsation de vibration) pour plusieurs valeurs du coefficient de couplage. On remarque ainsi non seulement que la technique de commutation ne permet pas de gain lorsque la

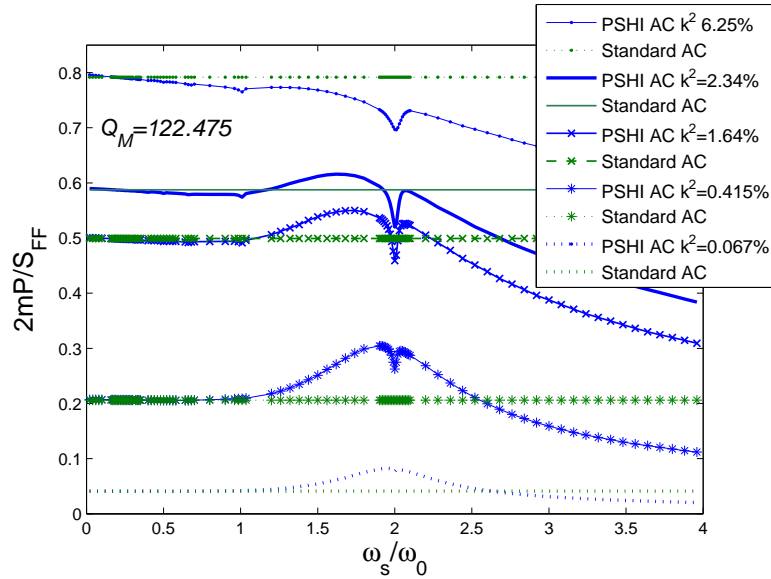


Figure II.55 – Puissance de sortie normalisée à la charge optimale en fonction de la fréquence de commutation avec le facteur de qualité mécanique  $Q_M = 122,475$  et différents coefficient de couplage au carré  $k^2$ . Les lignes horizontales correspondent aux puissances optimales dans le cas de l'interface alternative standard (sans commutation).

valeur du produit du facteur de qualité mécanique par le coefficient de couplage au carré est important (à l’instar des techniques SSHI), mais également, et de manière bien plus curieuse a priori, que la non synchronisation de la commutation conduit à un “creux” dans la puissance récupérée pour un rapport de fréquence exactement égale à 2 (alors que ce rapport en cas de synchronisation, et d’excitation monochromatique, est l’optimal dans le cas des techniques SSHI) ; cette effondrement subit de la puissance étant d’ailleurs de plus en plus prononcé à mesure que le coefficient de couplage augmente. Cependant, on peut avancer qu’une fréquence de commutation exactement deux fois plus élevée que celle de résonance ne permet pas d’obtenir un effet de battements typique de la modulation qui apparaîtrait pour des fréquences légèrement différentes, et donc ne pourrait compenser le manque de synchronisation, alors que cette effet de battements pourrait, pour une fréquence au voisinage de cette fréquence particulière, mais non strictement égale, assurer l’augmentation significative de la tension ainsi que son décalage, permettant ainsi une augmentation de l’énergie récupérée.

### II.4.3 Techniques d’optimisation de l’énergie extraite et récupérée

Alors que la partie précédente s’est attelée à modéliser les microgénérateurs piézoélectriques en utilisant des techniques déjà disponibles dans la littérature ou légèrement modifiées (comme par exemple la technique PSHI), les travaux sur cette thématique ont également abordé, de manière parallèle, le développement de nouvelles approches afin d’augmenter leurs performances, que ce soit en termes de puissance ou encore, par exemple, la dépendance à la charge connectée ou à la fréquence. En effet, alors qu’en termes de puissance les techniques SSHI permettent déjà de bénéficier d’un gain important, l’application des microgénérateurs de manière réaliste se heurte surtout et encore à des conditions de fonctionnement optimal quelque soit la fréquence (fonctionnement large bande) et la charge connectée. Concernant ce dernier point, on pourra par ailleurs noter que la grande majorité des applications auto-alimentées usant au mieux des modes de veille pour un fonctionnement de manière courte et intermittente, il n’est pas immédiat de parler de charge linéaire connectée au système ; l’état du système électronique pouvant par exemple varier entre veille, *idle* (traitement) et *transmit* (communication), pour lesquels la consommation électrique est très différente de l’un à l’autre.

#### Convertisseur DC-DC en mode discontinu avec adaptation automatique de point de fonctionnement optimal

Ainsi que précédemment exposé, la puissance extraite n’est maximale que pour une charge connectée bien précise, et il convient donc que l’élément piézoélectrique “voit” cette charge quel que soit l’état du système à alimenter. Dans cette optique, on peut noter, en plus des techniques de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) classiques ([OHBL02, KCH<sup>+</sup>10]) mais consommatrices d’énergie pour le traitement, que l’utilisation de convertisseurs commutés en mode de fonctionnement discontinu (décharge totale de l’inductance avant un nouveau cycle) permet de présenter une

impédance d'entrée très peu, voire pas du tout <sup>II.30</sup>, dépendante à la charge connectée en sortie ([OHL03,LARG07]). Ainsi, en dimensionnant correctement les constituants du convertisseur, on peut ainsi s'assurer que la charge équivalente connectée à l'élément actif (avec ou sans redressement et filtrage) égale celle optimale. Néanmoins, comme cette dernière dépend de la fréquence, un changement de celle-ci (correspondant par exemple à un changement des conditions environnementales ou tout simplement à une excitation sur un autre mode de vibration) conduit au désaccord de l'impédance d'entrée du convertisseur et donc à une puissance récupérée bien moindre que la puissance maximale.

Afin d'adresser ce problème, il a été proposé, au cours du post-doctorat, de tirer partie des propriétés de la récupération d'énergie utilisant des éléments piézoélectriques interfacés avec la technique DC standard (pont redresseur + capacité de filtrage). En effet, sous ces conditions, on peut montrer, en négligeant le couplage inverse électromécanique (c'est-à-dire sans amortissement) qu'en fonctionnement optimal (puissance récupérée maximale), la mise en conduction du redresseur se fait lors des passages par zéro du déplacement (l'arrêt de la conduction se faisant lors de l'annulation du courant). Dès lors, à partir de l'interface standard mais avec une structure de doubleur de tension, il est possible d'utiliser un convertisseur (assurant l'indépendance à la charge), mais opérant uniquement à partir du moment où la tension d'un élément piézoélectrique secondaire servant de capteur passe par zéro (et jusqu'à l'annulation du courant), comme représenté en Figure II.56. Plus particulièrement, avec cette architecture utilisant un doubleur, les pattes  $EN_1$  et  $EN_2$  contrôlent respectivement la conduction pour des tensions positives et négatives. Dès que la tension issue du capteur est positive,  $EN_1$  autorise la conduction, et l'énergie est transférée jusqu'à l'inversion du courant (un processus similaire est utilisé pour les tensions négatives avec  $EN_2$ ).

Les résultats obtenus avec cette technique pour différentes amplitudes de déplacement  $u_M$  sont représentées en Figure II.57, ainsi qu'une comparaison avec le cas standard. On voit ainsi une bonne indépendance à la tension de sortie (ou de manière équivalente à la charge), dès lors que la tension est supérieure à la tension optimale dans le cas standard, et avec une valeur très proche de la valeur maximale atteignable de ce cas. Il convient cependant de noter ici que la commande a été générée

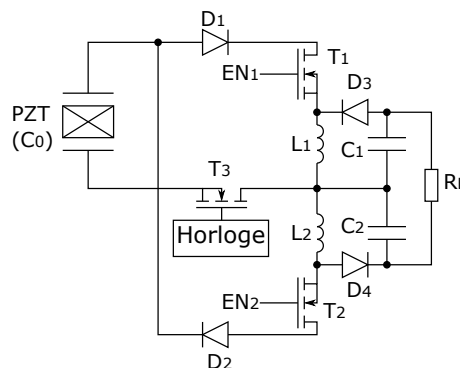


Figure II.56 – Schéma de principe du convertisseur DC-DC auto-adapté.

II.30. du moins théoriquement



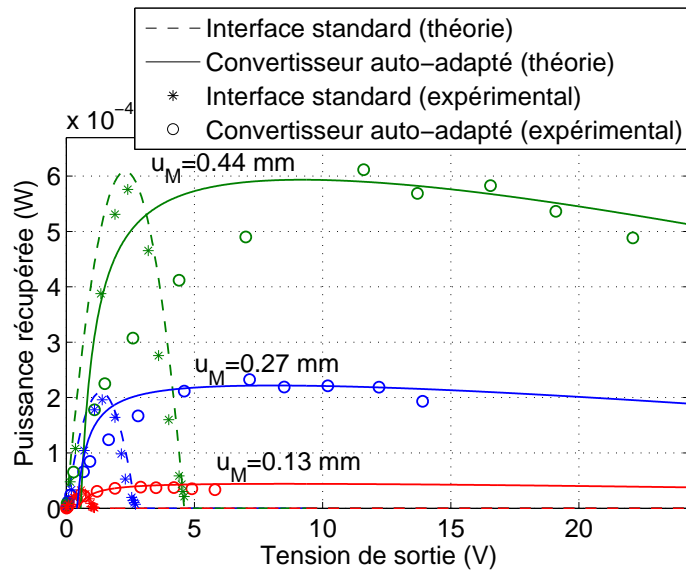


Figure II.57 – Résultats théoriques et expérimentaux du convertisseur DC DC auto-adapté.

à l'aide d'un système dSpace, bien que l'implémentation totalement autonome soit possible avec la commande des transistors d'activation (commandes  $EN_1$  et  $EN_2$ ) utilisant le circuit représenté en Figure II.58, dans lequel une partie de l'énergie du capteur est récupérée sur la capacité  $C_S$  (mais la consommation étant faible, le capteur reste presque en condition de circuit ouvert une fois le régime permanent atteint), qui permet d'appliquer une tension grille-source positive aux transistors d'activation dès que la tension du capteur  $V_P$  est positive (activation du transistor PNP  $PNP_2$ ).

### Technique de commutation synchronisée sur résistance (AC-SSHR)

La partie précédente a présenté la possibilité d'utiliser les propriétés de la récupération d'énergie piézoélectrique afin d'assurer un fonctionnement optimal vis-à-vis de la charge récupérée. Cependant, la technique SECE ([LBRG05]) est également intéressante dans cette optique, en déchargeant complètement l'élément piézoélectrique de manière synchronisée avec le déplacement (sur les extrema) afin de transférer

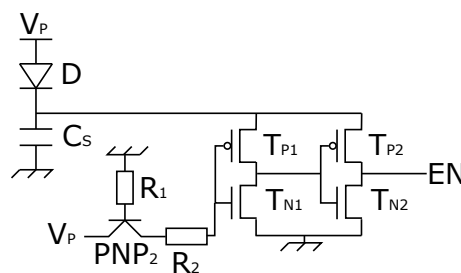


Figure II.58 – Schéma de principe de la commande autonome (et auto-alimentée) pour le convertisseur DC DC auto-adapté.

l'intégralité de l'énergie électrostatique sous forme magnétique à une inductance ; cette énergie étant ultérieurement transférée à un étage de stockage (typiquement sous forme électrostatique à une capacité de stockage - Figure II.44(d)). Néanmoins, la technique SECE, et plus particulièrement sa commande, est relativement délicate à implémenter, malgré une solution proposée par Wu dans [WBF<sup>+</sup>13] utilisant un transformateur avec un fort rapport de transformation. Cependant, bien que cette technique permet, en plus d'offrir une indépendance à la charge, de profiter d'un gain significatif en termes de puissance (jusqu'à un facteur 4 comparé au cas standard DC), l'utilisation d'un transformateur rend son intégration délicate, surtout lorsqu'un fort rapport de transformation est nécessaire.

Afin de pouvoir profiter de tous ces avantages (indépendance à la charge et gain en puissance) et permettre l'intégration, décharger l'élément piézoélectrique sur un simple résistance (par la suite remplacée par un convertisseur afin de pouvoir stocker l'énergie et de disposer d'une tension de sortie continue) a été envisagée (Figure II.59). Comme pour toutes les techniques de commutation de type SSH/SECE, l'interrupteur est fermé sur les extrema de tension (correspondant à une énergie électrostatique maximale au niveau de l'élément actif). Du fait de la non-présence dans le principe ni d'une inductance ni d'un redresseur, cette technique est dénommée *Alternative Current Synchronous Switch Harvesting on Resistance* (AC-SSHR).

Contrairement aux techniques utilisant une inductance, l'arrêt de la commutation ne peut se faire, du moins de manière purement théorique<sup>II.31</sup>, sur une annulation du courant, du fait de la décharge exponentielle de la capacité. C'est pourquoi le modèle théorique considère un temps imposé de décharge  $\tau$ , avec l'hypothèse que ce dernier reste négligeable par rapport aux périodes de vibration considérées. Sous ces conditions, la tension  $V_\tau$  après la décharge est donnée par, en notant respectivement  $C_0$  et  $R$  la capacité bloquée de l'élément piézoélectrique et la charge connectée :

$$V_\tau = V_0 e^{-\frac{\tau}{RC_0}} \quad (\text{II.55})$$

avec  $V_0$  la tension juste avant une commutation sur tension positive. Du fait du processus de commutation périodique dans le cas d'une excitation monochromatique (de fréquence  $f_0$ ) et en considérant le régime établi, la tension  $V_0$  est constante en valeur absolue (de signe positif pour une commutation sur un maximum de tension et négatif sur un minimum) et peut être obtenue en considérant l'évolution en circuit ouvert de la tension entre deux processus consécutifs de commutation ([LRL<sup>+</sup>14]) :

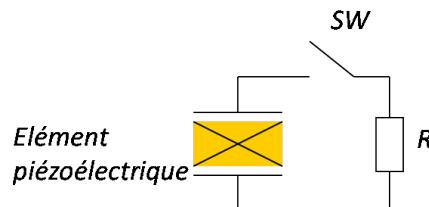


Figure II.59 – Schéma de principe de la technique AC-SSHR.

II.31. en pratique l'utilisation d'une diode permet d'arrêter la commutation

$$V_0 = \frac{2\alpha}{\left(1 + e^{-\frac{\tau}{RC_0}}\right) C_0} u_M \quad (\text{II.56})$$

où  $u_M$  dénote l'amplitude de la vibration. L'énergie récupérée sur la résistance pour une commutation peut s'obtenir en intégrant sur une période de temps  $\tau$  la tension au carrée divisée par la résistance, conduisant à l'expression de la puissance récupérée  $P$  :

$$P = 2 \sinh\left(\frac{\tau}{RC_0}\right) \left[\operatorname{sech}\left(\frac{\tau}{2RC_0}\right)\right]^2 \frac{\alpha^2}{C_0} f_0 u_M^2 \quad (\text{II.57})$$

où  $\operatorname{sech}(x)$  est la fonction sécante hyperbolique de  $x$ .

Cependant, la récupération d'énergie conduit également à un effet d'amortissement des vibrations (limitant ainsi l'énergie disponible et donc récupérée). Quand cet effet est considéré et en approchant la tension par son premier harmonique, l'expression de l'amplitude de déplacement  $u_M$  en fonction l'amplitude de la force appliquée  $F_M$  est donnée par :

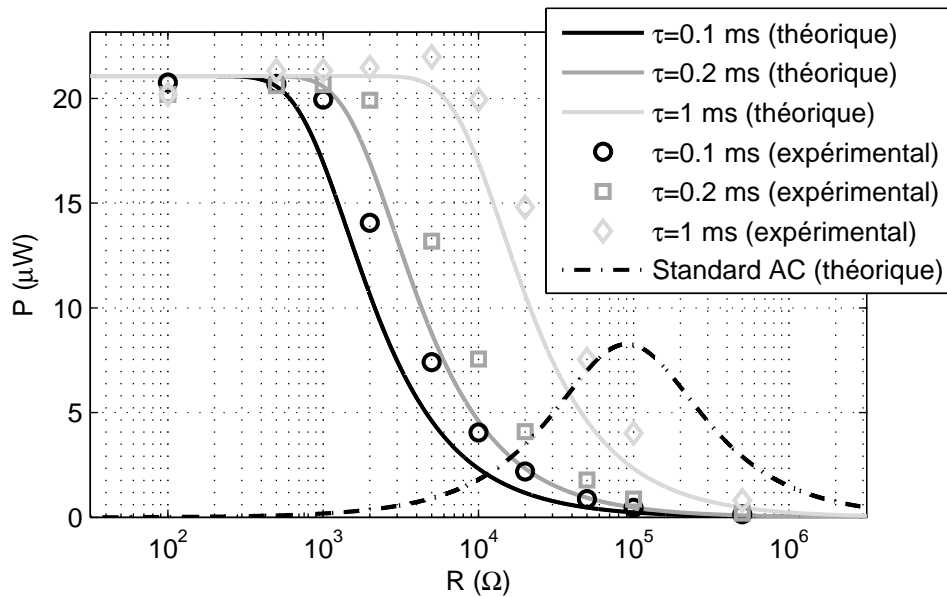
$$u_M = \frac{F_M}{C\omega_0 + \frac{4}{\pi} \frac{\alpha^2}{C_0} \tanh\left(\frac{\tau}{2RC_0}\right)} \quad (\text{II.58})$$

conduisant à l'expression de la puissance (en utilisant l'équation Eq. (II.57)) :

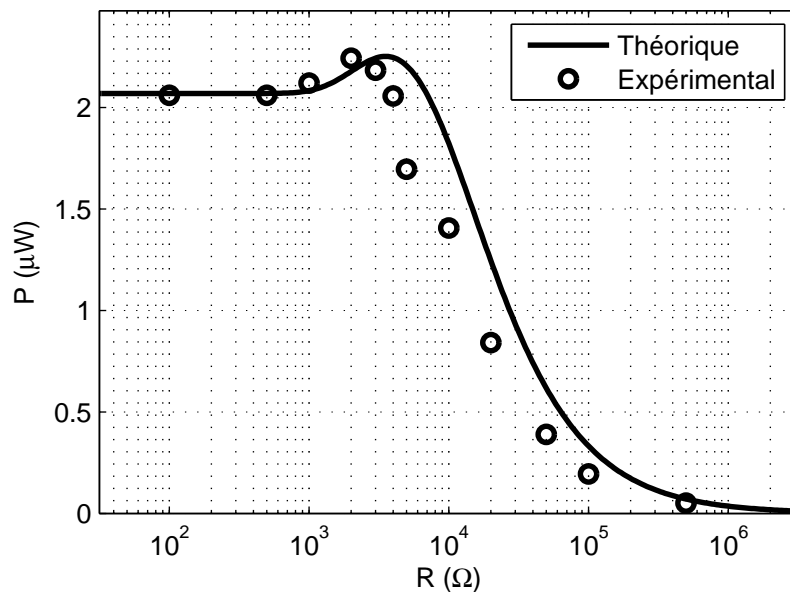
$$P = 2 \frac{\alpha^2}{C_0} \frac{\sinh\left(\frac{\tau}{RC_0}\right) \left[\operatorname{sech}\left(\frac{\tau}{2RC_0}\right)\right]^2}{\left[C\omega_0 + \frac{4}{\pi} \frac{\alpha^2}{C_0} \tanh\left(\frac{\tau}{2RC_0}\right)\right]^2} f_0 F_M^2 \quad (\text{II.59})$$

Les résultats expérimentaux et théoriques représentés en Figure II.60 montrent ainsi une puissance récupérée qui reste constante sur une large gamme de résistance, tout en étant significativement plus importante que celle de l'interface standard (2,5 fois plus que la technique standard alternative et 4 fois plus que la technique standard avec redressement dans le cas d'une amplitude de déplacement imposée). Cette tendance se confirme également dans le cas d'une excitation d'amplitude imposée, mais on pourra remarquer une légère augmentation de la puissance autour de la résistance donnée par le produit du temps de fermeture de l'interrupteur par l'inverse de la capacité bloquée de l'élément piézoélectrique ( $\tau/C_0$ ), qui s'explique par un compromis entre l'énergie entrante dans la structure (modifiée par l'effet d'amortissement) et la part de cette énergie extraite par la technique.

Ainsi, on voit que cette technique est relativement similaire à la technique SECE ([LBRG05, LBRG07]) car elle offre le même gain de puissance et permet une puissance constante sur une large gamme de résistance. Néanmoins, sa simplicité permet de l'implémenter plus facilement de manière auto-alimentée et de manière relativement intégrable, en utilisant le commutateur typique du SSHI ([RGL07, LLRG08, LG08]). La possibilité de tension de sortie continue peut être obtenue en remplaçant la résistance par un convertisseur DC/DC commuté fonctionnant en mode discontinu (par exemple de type buck-boost - [LARG07]), qui permet de présenter une impédance d'entrée indépendante de la tension redressée. Ceci conduit ainsi au circuit représenté en Figure II.61. Enfin, ce montage permet également une adaptation



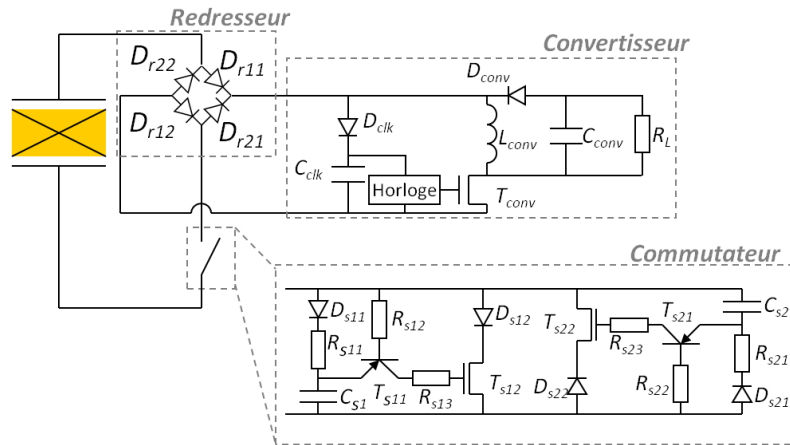
(a) Amplitude de déplacement constante



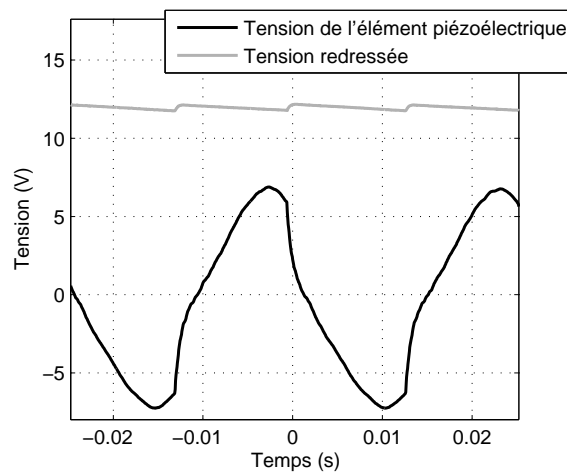
(b) Amplitude d'excitation constante ( $\tau = 0,2 \text{ ms}$ )

Figure II.60 – Résultats expérimentaux et théoriques de la technique AC-SSHR.

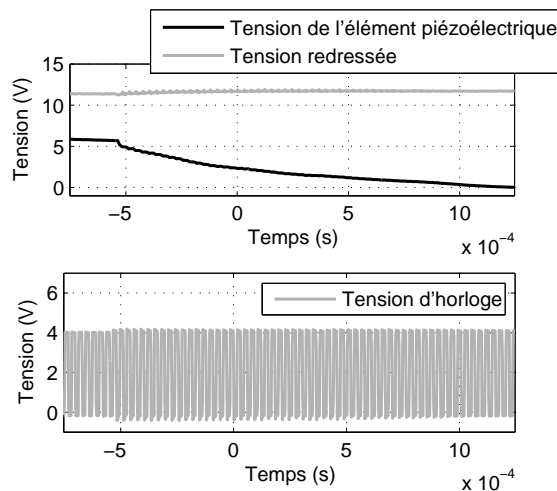
automatique du temps de commutation (celle-ci s'arrêtant automatiquement autour de zéro du fait de l'utilisation de diodes), assurant par là-même une puissance extraite optimale (c'est-à-dire sur le plateau dans la représentation de la puissance en fonction de la résistance).



(a) Circuit



(b) Forme d'ondes expérimentales



(c) Forme d'ondes expérimentales - zoom sur instant de commutation

Figure II.61 – Implémentation auto-alimentée de la technique AC-SSHR.

### **Augmentation de la bande passante de microgénérateurs par contrôle de raideur faible consommation**

Concernant cette fois-ci l'aspect large bande, juste avant la généralisation des systèmes non-linéaires exploitant des interactions magnétiques ([EHI09]) ou le flambage de la structure ([LBF<sup>+</sup>15])<sup>II.32</sup>, il a été montré au cours du post-doctorat ([LAI10]), et dans la continuité de la thèse, qu'un processus de commutation sur une source de tension mais sur des zéros de déplacement (contrairement aux techniques SSH/SECE où la commutation se fait sur des extrema de déplacement), modulant la raideur mais avec des demandes énergétiques faibles ([GLM08]), permet de réaliser un système capable de s'adapter aux changements d'excitation et augmenter la bande passante en termes de puissance, en prenant en considération l'énergie globale (c'est en dire en prenant en compte l'énergie utilisée pour l'actionnement<sup>II.33</sup>), comme démontré en Figure II.62(b) à II.62(d). Dans cette approche, une contrainte majeure réside dans l'estimation de la source de changement d'amplitude, qui peut être non seulement causée par un changement de fréquence d'excitation, mais aussi tout simplement par un changement de son amplitude; auquel cas aucune action n'est à effectuer sur le système lorsqu'il est accordé. De plus, lorsqu'une modification de la fréquence d'excitation apparaît, il convient de savoir si le changement d'amplitude de vibration est du à une augmentation ou une diminution de cette fréquence. Au vu de ces contraintes, une méthode simple mais efficace a été proposée, basée sur les signaux issus d'un capteur de déplacement et d'un capteur d'accélération (dans le cas de la récupération utilisant des microgénérateurs sismiques). L'accord entre fréquence d'excitation et fréquence de résonance du système conduit à une moyenne nulle du produit de ces signaux, de manière indépendante de l'amplitude d'excitation, et le signe de cette moyenne permet de remonter au signe du décalage de fréquence. Une fois rebouclé (Figure II.62(a)), on obtient ainsi un système capable de s'auto-adapter à un changement de fréquence extérieure.

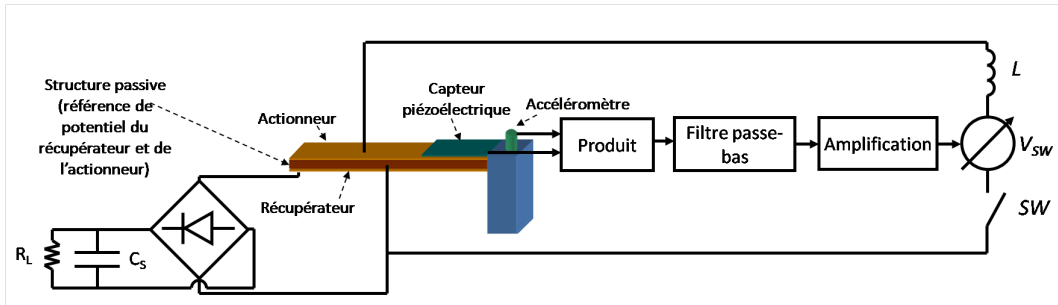
### **Technique de commutation synchronisée sur inductance avec détection de seuil**

La dernière technique exposée ici se situe également dans la conception d'interfaces électriques adaptées aux signaux large bande, mais aussi au cas de charge de capacité. Alors que ce cas représente de manière assez typique le fonctionnement de la majorité des systèmes auto-alimentés viables, dont le principe repose sur des opérations de courte durée avec une période de répétition relativement importante (rapport cyclique d'opération très faible), il a été montré dans le Paragraphe II.4.2 que la technique SSHI n'est pas forcément adaptée, notamment du fait de l'amortissement induit dans le cas de structures fortement couplées et surtendues. Afin de palier ce problème, Makihara a proposé, dans le cadre d'une excitation monochromatique, de n'autoriser la commutation qu'après un certain temps depuis la dernière (ce qui revient à ne commuter qu'une fois sur  $n$ ), réduisant ainsi l'effet d'amortissement

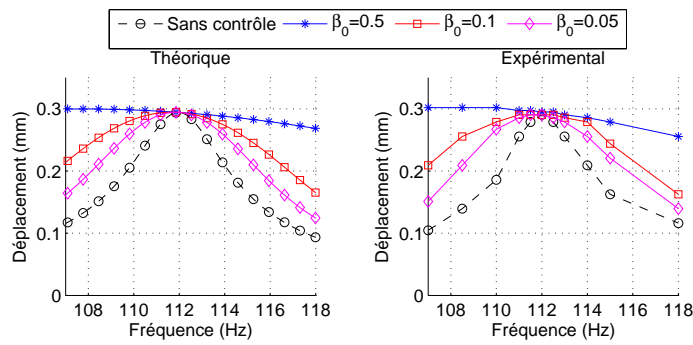
---

II.32. Ces approches sont surtout efficaces lorsque la fréquence d'excitation se situe en-deçà de la fréquence de résonance du système linéaire équivalent - [LBF<sup>+</sup>13].

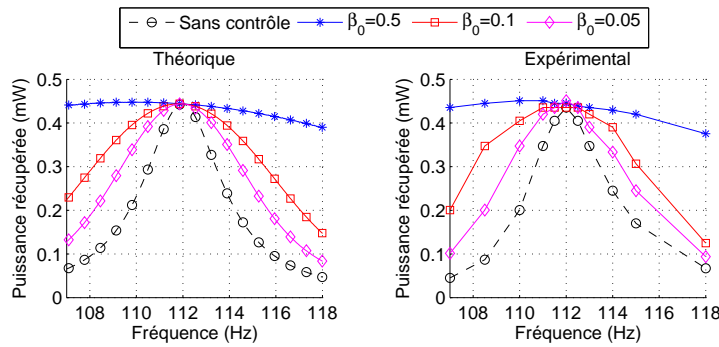
II.33. On pourra néanmoins noter que l'énergie de traitement des signaux est aussi à prendre en considération, ce qui n'était pas le cas ici.



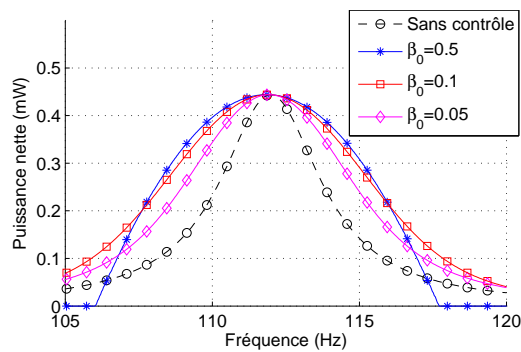
(a) Schéma de principe



(b) Déplacement



(c) Puissance récupérée



(d) Puissance nette (puissance d'actionnement soustraite à celle récupérée)

Figure II.62 – Schéma de principe et résultats théoriques et expérimentaux pour le système d'auto-adaptation aux changements de fréquence d'excitation.

ce qui permet de récupérer plus d'énergie sur un temps long. D'un point de vue de la récupération d'énergie multimodale, Shen a adapté les travaux sur l'amortissement ([SJQ<sup>+</sup>15]) au cas de la récupération d'énergie, en n'autorisant la commutation que sur les extrema globaux, par l'utilisation d'un seuil en-deçà duquel la commutation est désactivée ([MYH<sup>+</sup>14]).

La technique exposée ici se propose d'adresser ces deux points tout en proposant une loi de contrôle originale très simple, pouvant même être auto-alimentée. Le principe de la technique consiste ici à comparer la tension redressée à celle de l'élément piézoélectrique, et de désactiver la possibilité de commutation quand la valeur absolue de cette dernière est inférieure à la première, ou, de manière équivalente, à n'autoriser une commutation que si un processus de récupération d'énergie a eu lieu depuis la dernière commutation. Ceci permet de plus une interface ne nécessitant aucun autre capteur, contrairement à la technique de Shen et al..

Dans le cas monochromatique, cette technique permet, à termes, d'avoir un déplacement égal au déplacement sans commutation (cette dernière étant désactivée une fois la capacité totalement chargée) tout en profitant de l'augmentation significative de la tension permise par les commutations précédentes. Ainsi, en notant  $\Omega$  la fréquence adimensionnée par rapport à la fréquence de résonance en circuit ouvert,  $\gamma$  le coefficient d'inversion de la commutation,  $k^2$  le coefficient de couplage électromécanique global au carré et  $Q_M$  le facteur de qualité mécanique, on peut montrer que les énergies récupérées finales adimensionnées des techniques standard ( $\tilde{W}|_{\text{standard}}$ ), SSHI ( $\tilde{W}|_{\text{SSHI}}$ ) et de la technique SSHI avec seuil<sup>II.34</sup> ( $\tilde{W}|_{\text{SSHI-t}}$ ) sont données par :

$$\begin{aligned} \tilde{W}|_{\text{standard}} &= \frac{(k^2 Q_M)^2}{[Q_M(1-\Omega^2)]^2 + \Omega^2} \\ \tilde{W}|_{\text{SSHI}} &= \frac{4}{(1-\gamma)^2} \frac{(k^2 Q_M)^2}{[Q_M(1-\Omega^2)]^2 + \left(\Omega + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} k^2 Q_M\right)^2} \\ \tilde{W}|_{\text{SSHI-t}} &= \frac{4}{(1-\gamma)^2} \frac{(k^2 Q_M)^2}{[Q_M(1-\Omega^2)]^2 + \Omega^2} \end{aligned} \quad (\text{II.60})$$

à partir desquelles on pourra noter qu'à la résonance ( $\Omega = 1$ ), la technique SSHI est limitée par rapport à l'augmentation de  $k^2 Q_M$  à une énergie maximale (adimensionnée) de  $\pi^2 / [4(1+\gamma)^2]$ <sup>II.35</sup> du fait de l'effet d'amortissement induit par la technique<sup>II.36</sup> (second terme du dénominateur du second membre dans l'expression), alors que les techniques standard et SSHI-t ne sont pas limitées.

La possibilité de meilleure récupération en désactivant la commutation à moins qu'un transfert de charges vers la capacité de stockage n'ait eu précédemment lieu peut être illustrée par la Figure II.63. On peut même noter ici, du fait que la structure utilisée soit bien couplée, que les performances de la technique SSHI sont même inférieures à celles de la technique standard autour de la résonance. La technique

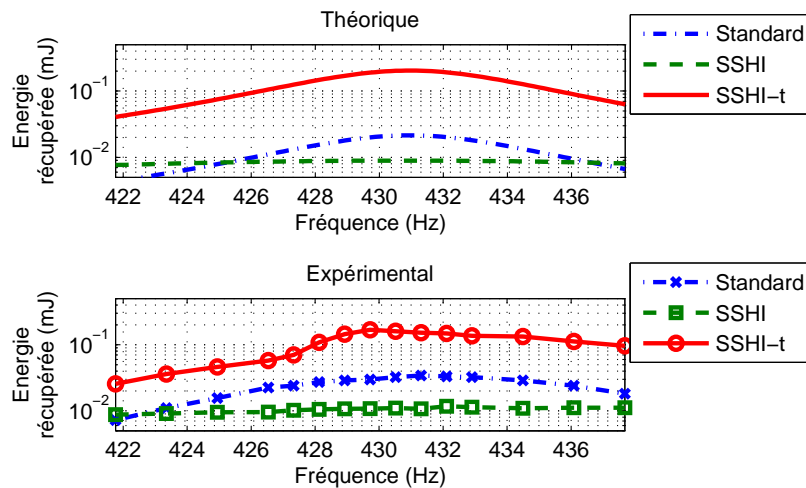
---

II.34. nommée *SSHI-t* pour *Synchronized Switch Harvesting on Inductor with threshold*

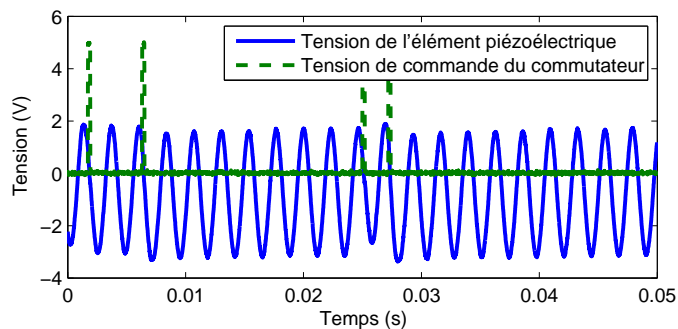
II.35. Il est intéressant de noter ici, dans le cas extrême considéré (structure fortement couplée et surtendue), que l'augmentation du facteur d'inversion  $\gamma$  conduit à une diminution de l'énergie récupérée, ce qui est contraire au cas avec une résistance de charge où la puissance augmente de manière monotone avec ce facteur.

II.36. Dans le cas de la charge d'une capacité, la technique SSHI est équivalente à la technique de contrôle vibratoire SSDI une fois le processus de charge terminé.





(a) Energies récupérées



(b) Formes d'ondes

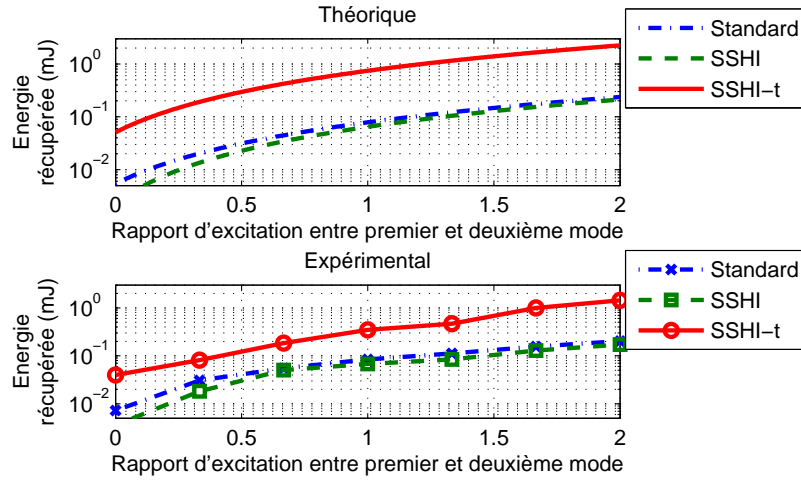
Figure II.63 – Comparaison des énergie récupérées sur une charge capacitive dans les cas standard, SSHI et SSHI-t en excitation monomodale.

SSHI-t, permettant d'adapter automatique les commutations pour efficacement récupérer l'énergie (ce qui se traduit par une meilleure maîtrise du compromis entre énergie entrante dans la structure et part de cette énergie convertie sous forme électrique), ainsi qu'illustré en Figure II.63(b), permet ainsi un gain significatif en termes d'énergie récupérée (environ 5 par rapport à la technique standard et 14 par rapport à la technique SSHI dans le cas considéré). Bien entendu, le temps de récupération de l'énergie par la technique SSHI-t est plus important, mais, au final, ceci n'a peu d'impact sur la viabilité de la méthode étant donné le mode de fonctionnement typique des systèmes auto-alimentés, ainsi qu'expliqué précédemment (longue période de charge - veille - pour un temps d'utilisation faible).

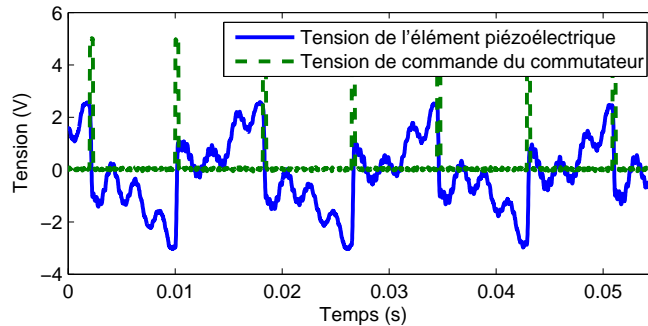
Une analyse similaire dans le cas bimodal, en supposant une indépendance entre les modes, montre que les énergies adimensionnalisées s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned}
 \tilde{W}|_{\text{standard}} &= (k_1^2 Q_{M1})^2 (1+r)^2 \\
 \tilde{W}|_{\text{SSHI}} &= \frac{4}{(1-\gamma)^2} (k_1^2 Q_{M1})^2 \left[ 1 + \frac{r}{1 + \frac{4}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} r_{k^2} r_{Q_M} k_1^2 Q_{M1}} \right]^2 \\
 \tilde{W}|_{\text{SSHI-t}} &= \frac{4}{(1-\gamma)^2} (k_1^2 Q_{M1})^2 (1+r)^2
 \end{aligned} \tag{II.61}$$

avec  $r = r_a r_\alpha r_{Q_M} / (r_{\omega_D})$  et avec  $r_a$ ,  $r_{k^2}$ ,  $r_\alpha$ ,  $r_{Q_M}$  et  $r_{\omega_D}$  dénotant respectivement les rapports d'excitations, de coefficients de couplage au carrée, de facteurs de force, de facteurs de qualité mécanique et de fréquences de résonance en circuit ouvert entre le second et le premier mode. Là encore, le second terme du dénominateur du second membre dans l'expression de l'énergie dans le cas du SSHI montre la limitation de la technique. Comme confirmé expérimentalement (Figure II.64), alors la commutation sur tous les extrema de la technique SSHI se focalise ainsi sur le second mode, ne permettant pas de gain significatif comparé à la technique standard, la sélectivité du SSHI-t, permettant de ne commuter que sur les extrema globaux (Figure II.64(b)),



(a) Energies récupérées



(b) Formes d'ondes

Figure II.64 – Comparaison des énergie récupérées sur une charge capacitive dans les cas standard, SSHI et SSHI-t en excitation bimodale (accélération de la base pour le second mode : 1,25 g).

conduit à une augmentation significative des performances en termes d'énergie récupérée, allant jusqu'à un gain de 10 comparé à la technique standard et 23 comparé à la méthode SSHI.

Enfin, la technique se basant sur la tension redressée elle-même, son implémentation ne nécessite aucun transducteur supplémentaire et reste relativement simple, de sorte qu'il est possible d'envisager une version auto-alimentée du dispositif, comme représenté en Figure II.65<sup>II.37</sup>, où la comparaison entre la tension redressée et celle piézoélectrique commande un transistor en série (signal "enp" pour la commutation sur tension positive et "enm" pour celle sur tension négative) avec le transistor d'inversion (signal "command"), formant une fonction logique "ET".

#### II.4.4 Utilisation des éléments piézoélectriques pour conversion autre que vibratoire

En plus des sources purement vibratoires, une partie du travail effectué lors du post-doctorat s'est intéressée à d'autres sources pouvant induire un mouvement par la suite convertie sous forme d'énergie électrique à l'aide d'éléments piézoélectriques. La première de ces sources se traduit par le vent, qui est un produit secondaire du soleil (qui par des réchauffements locaux induit le mouvement de masses d'air). Toujours dans l'optique de dispositifs de faibles dimensions, le développement de petites éoliennes, capables de démarrer à des vitesses de vent relativement faibles, a été envisagé. Partant des travaux de Priya sur le sujet ([PCFZ05, MVKP07]), l'éolienne piézoélectrique a été améliorée en induisant le mouvement des structures piézoélectriques sans contact par l'utilisation d'interactions magnétiques. Plus précisément, le couple mécanique résistant, directement lié à la vitesse de démarrage, a été considérablement réduit en s'assurant qu'une interaction magnétique attractive d'un côté était contre-balançée par une interaction répulsive de l'autre côté (Figure II.66). Sous ces conditions, les éléments piézoélectriques sont excités de manière impulsionnelle, de façon similaire aux techniques dites de "*frequency-up conversion*" ([HY15]). Considérant  $n$  paires de pôles magnétiques et une architecture de récupération d'énergie en doubleur de tension, l'expression de la puissance récupérée  $P$  et sa valeur maximale  $P_{max}$  pour un seul élément piézoélectrique sont données par :

$$\begin{aligned} P &= \frac{(n\Omega\alpha)^2 R_L}{(\pi + n\Omega R_L C_0)^2} u_0^2 \\ P_{max} &= \frac{n\Omega \alpha^2}{2\pi C_0} u_0^2 \end{aligned} \quad (\text{II.62})$$

avec  $\Omega$  la vitesse de rotation,  $R_L$  la charge connectée et  $u_0$  l'amplitude de la vibration<sup>II.38</sup>.

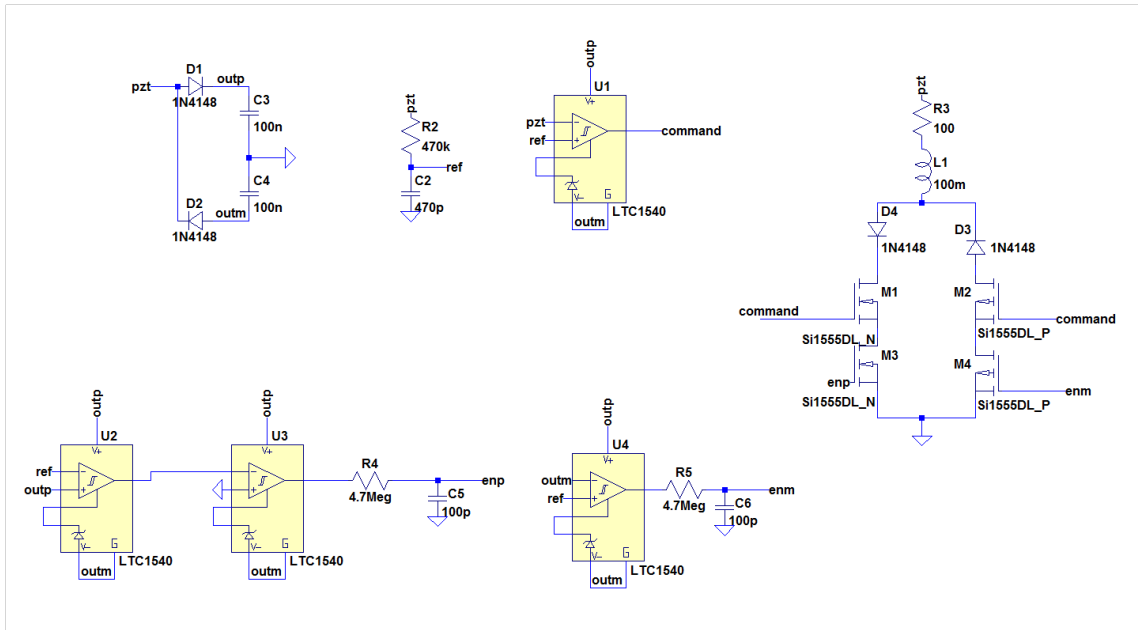
Les résultats expérimentaux (utilisant 6 éléments piézoélectriques) donnés en Figure II.67 montrent ainsi un démarrage du dispositif pour une vitesse de vent de 3,5 km.h<sup>-1</sup>, ce qui est significativement moindre que le cas où les forces sont toutes

---

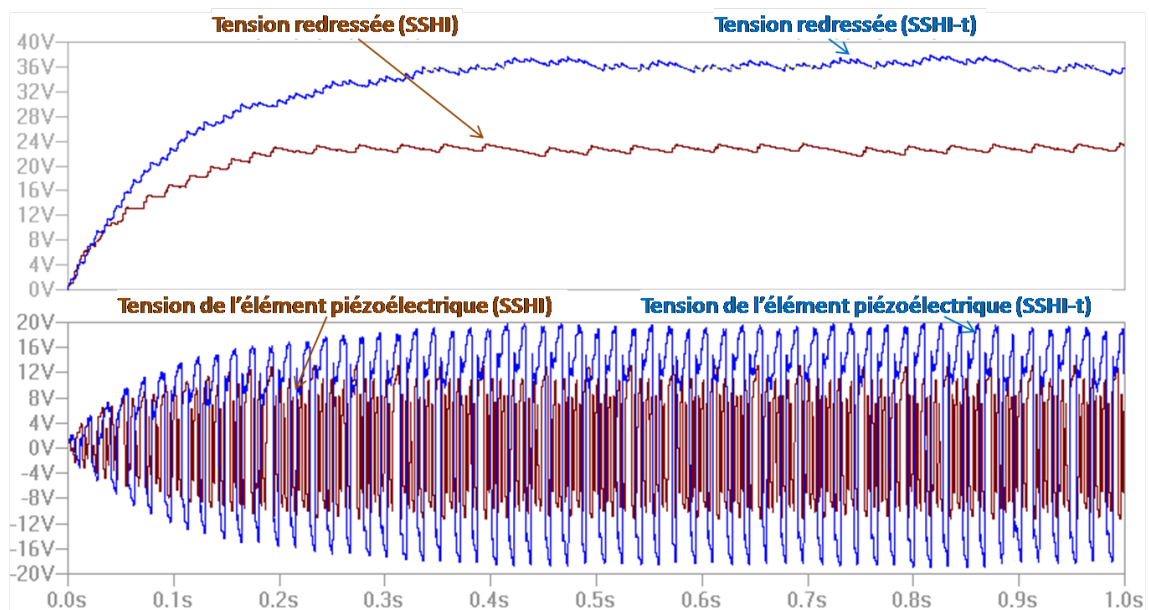
II.37. On pourra remarquer que la comparaison pour la détection d'extrema est ici faite avec un comparateur "nanopower", remplaçant avantageusement le transistor bipolaire du circuit classique.

II.38. L'interface DC standard est ici considérée, mais il est tout à fait possible d'inclure les techniques SSHI dans le système; la technique SSHI série étant par ailleurs intéressante pour pouvoir connecter tous les éléments piézoélectriques au même étage de stockage.

de même nature (attractives ou répulsives), comme le montre le cas d'aimants de même polarité où la vitesse minimale est de l'ordre de  $8,6 \text{ km}^{-1}$  II.39. De plus, la puissance pouvant être récupérée est également accrue, allant de  $22 \mu\text{W}$  à la vitesse de démarrage jusqu'à  $3,4 \text{ mW}$  pour une vitesse de vent de  $17,6 \text{ km}^{-1}$ , du fait de la diminution des pertes (notamment dues au couple résistant magnétique) et donc à



(a) Circuit (l'entrée est représentée par le noeud "pzt")



(b) Formes d'ondes de simulation dans le cas bimodal

Figure II.65 – Circuit auto-alimenté pour la technique SSHI-t et résultats de simulation du fonctionnement.

II.39. Ce cas étant assez similaire à l'utilisation de heurtoirs mécaniques.

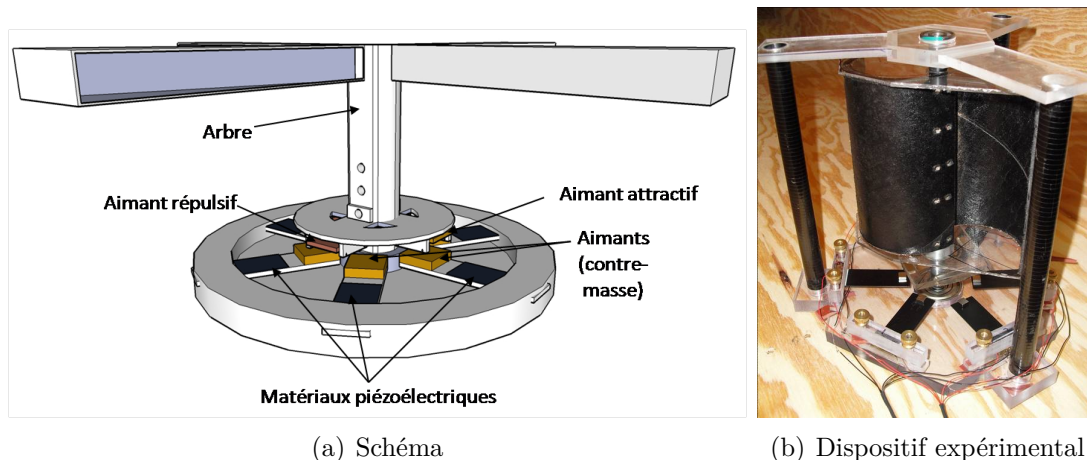


Figure II.66 – Principe de la mini-éolienne sans contact.

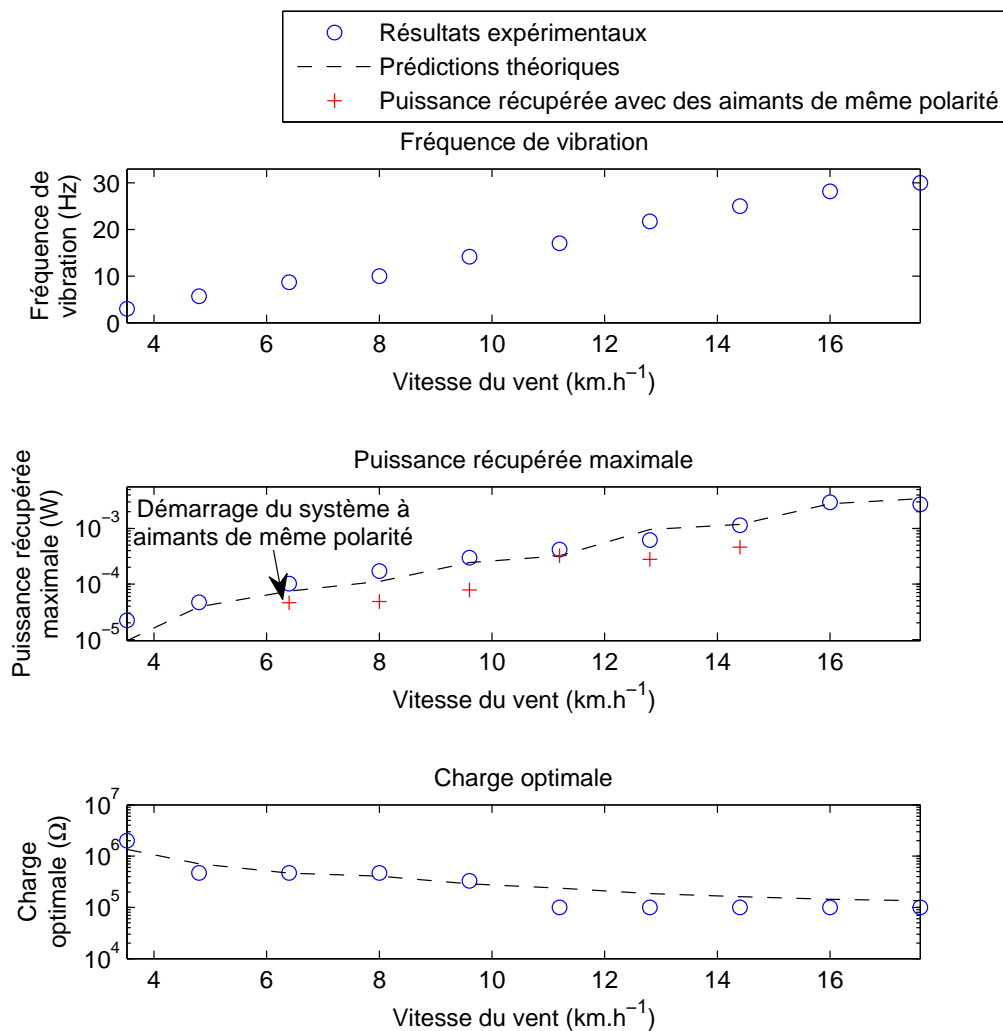


Figure II.67 – Résultats expérimentaux pour la mini-éolienne sans contact.

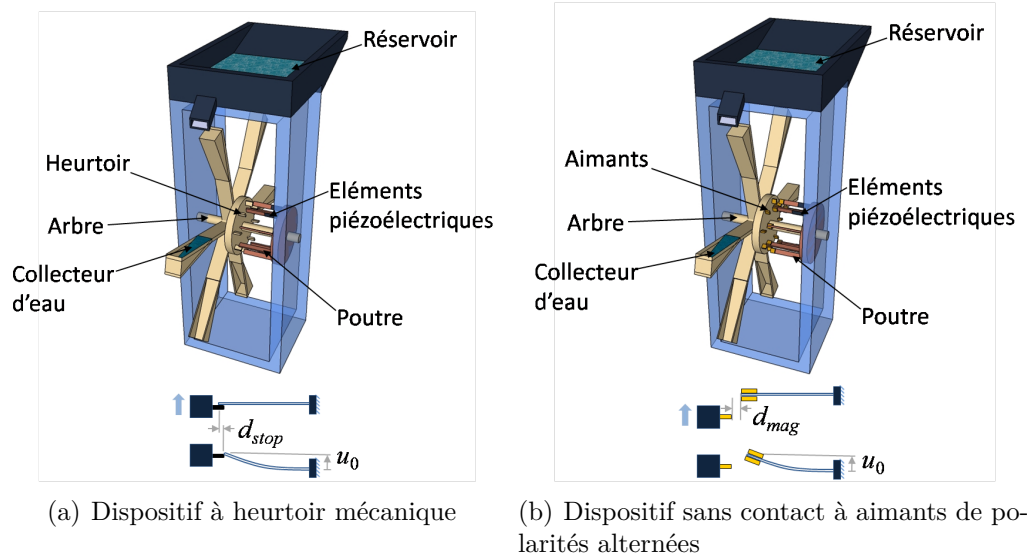


Figure II.68 – Principe du dispositif de récupération d'énergie exploitant l'eau.

une énergie entrant plus facilement dans le système.

Partant du principe de cette éolienne, l'extension à toute source fluide peut être considérée. Ainsi, la récupération via une sorte de moulin à eau peut être envisagée (Figure II.68). L'application d'une telle technique peut être par exemple utilisée pour exploiter la force des gouttes de pluie, avec une efficacité accrue par rapport à l'utilisation d'impulsions de force de ces dernières sur une membrane ([GCJD08b, GCJD08a]). Ainsi, en analysant les forces d'interaction par rapport au poids de l'eau à l'intérieur des collecteurs et en menant une analyse électrique similaire par rapport au cas de l'éolienne, il est possible d'obtenir la puissance en opération discontinue (mouvement de la roue au coup par coup du fait d'une arrivée d'un remplissage lent) et en opération continue (Figure II.69). On voit ainsi

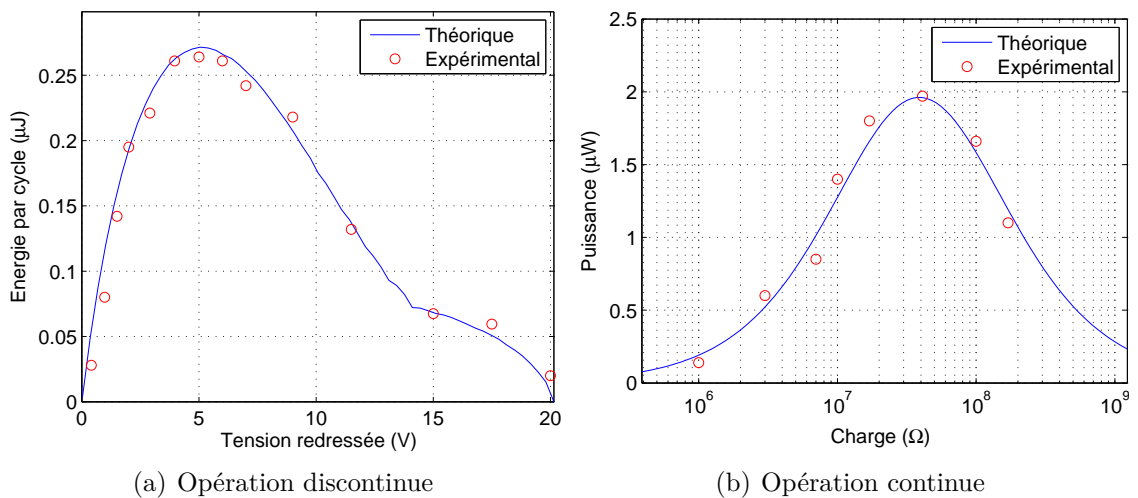


Figure II.69 – Résultats expérimentaux pour le dispositif de récupération d'énergie exploitant l'eau.

la possibilité de récupérer bien plus d'énergie que le dispositif présenté par Guigon dans [GCJD08a], avec en opération discontinue une énergie de 265 nJ par élément contre 1 nJ dans la référence précédente ; la taille de l'élément actif étant par ailleurs bien plus importante dans ce dernier cas (volume 8 fois plus important).

## **II.5 Conclusion : place des actions de recherche sur les matériaux piézoélectriques dans le monde scientifique et socio-économique et la formation**

Ce chapitre s'est attaché à décrire l'activité académique sur la modélisation et l'application des éléments piézoélectriques. Cette activité se décompose principalement en trois axes. Le premier, relativement récent, consiste en l'étude des propriétés des éléments ferroélectriques par une analyse physique des mécanismes mis en jeu dans ces matériaux. Cette activité, menée en collaboration avec de nombreux membres du laboratoire dont certaines parties de la thématique sont des travaux pratiqués depuis longtemps dans leurs activités de recherche, a consisté et consiste toujours à effectuer des ponts entre les matériaux ferroélectriques et électrostrictifs. Ainsi, l'un des enjeux du travail réalisé ici a consisté, en plus du travail purement scientifique, à rassembler les compétences de différentes personnes (par exemple en termes de matériaux électrostrictifs - comme il sera exposé dans le chapitre suivant - et en termes de modélisation des éléments ferroélectriques) qui, à terme, pourra conduire au développement d'une théorie unifiée pour les deux types de matériaux. A plus courte échéance, les bases de ces travaux pourront permettre l'étude des mécanismes de vieillissement et de dépolarisation, grâce à l'aspect quasi-statique que permet d'intégrer l'approche choisie. Néanmoins, il peut être noté que ces travaux restent relativement en amont de l'application, et de fortes chances subsistent que cette thématique demeure purement scientifique.

Le deuxième axe de recherche s'est attelé au développement et à l'étude de techniques de réduction des vibrations, dans l'optique de systèmes de faibles dimensions tels que les dispositifs embarqués. L'orientation actuelle se focalise sur les systèmes multi-transducteurs distribués avec des techniques de contrôle non-linéaires permettant d'exploiter au mieux les échanges énergétiques entre domaines physiques (en l'occurrence mécanique et électrique) ou au sein d'un même domaine, via par exemple une meilleure maîtrise des échanges électriques de puissances réactives qui font défaut aux techniques de contrôle actif. La majorité des travaux effectués dans ce cadre relève de l'encadrement de doctorants, dénotant d'un certain intérêt académique pour cette thématique. Néanmoins, cette volonté est à mettre en regard avec le peu de projets publics et/ou industriels effectués sur cette thématique. A l'heure actuelle, seul un projet industriel pour le compte de Thalès a été mené sur le contrôle de vibrations, et, malgré un certain nombre de dépôts, aucun projet public n'est actuellement mené sur cet axe. Des projets passés, pour le compte de la DGA par exemple, ont été initiés, mais sans suite. Au vu des projets publics et

industriels sur le contrôle de vibrations, on note ainsi un intérêt plutôt dans le cadre d'applications militaires. Cependant, les budgets actuels de cette branche conduisent au quasi- abandon de projets amonts. Néanmoins, il est probable que le peu de projets sur le sujet provienne également d'un manque de reconnaissance extérieure (au profit de la récupération d'énergie notamment) de cette thématique au sein du laboratoire. Ainsi, dans le contexte économique actuel, la poursuite de cette thématique d'un point de vue application reste relativement limité. Cependant, sur le plan académique, de nombreuses actions (comme le montage de la fédération METAVIBRO) dénote de l'intérêt scientifique pour le contrôle de vibrations, surtout utilisant des méta-matériaux et des réseaux de transducteurs. Par conséquent, la recherche sur la thématique de contrôle de vibrations se doit actuellement de passer par le milieu exclusivement académique et la formation ; les résultats obtenus dans ce cadre pouvant, espérons-le, convaincre de la potentialité applicative des techniques proposées dans le cadre industriel.

Enfin, la dernière thématique sur la récupération d'énergie est celle qui actuellement permet le plus de rayonnement, via les effervescences médiatiques et politiques sur le développement durable. Se plaçant toujours dans le cadre de systèmes de faibles dimensions, la recherche sur la récupération d'énergie ambiante utilisant des matériaux piézoélectriques se heurte néanmoins toujours à la concurrence rude des systèmes électromagnétiques, notamment à l'échelle centimétrique où les densités de puissances restent comparables, et avec une connaissance moindre des éléments piézoélectriques de la part du secteur industriel. Cependant, cette "nouveau" est également une force pour se démarquer. De nombreuses avancées sont néanmoins nécessaires afin de disposer d'un système convaincant. Ainsi, on peut remarquer que la plupart des projets industriels menés dans le cadre de la récupération d'énergie (Shak Moov' et SKF <sup>II.40</sup> par exemple) restent dans le domaine magnétique <sup>II.41</sup>, alors que le domaine piézoélectrique est plutôt présent dans les projets de recherche publiques (ANR Piezo2Power, ANR BESTMEMS, BQR ATCHOUM...), notant une imminence de la percée mais qui n'est cependant pas encore gagnée. Enfin, en mettant cela en regard avec le bilan énergétique, non encore évalué, de la récupération d'énergie piézoélectrique (énergie récupérée sur un cycle de vie par rapport à l'énergie dépensée pour la fabrication), l'avenir de cette thématique en termes applicatif reste totalement à faire et demeure plus que floue. Ainsi, à l'heure actuelle, malgré certaines avancées scientifiques et l'intérêt de la communauté pour ces systèmes, les vrais problèmes se doivent d'abord d'être résolus. L'un des principaux en ce sens demeure la nécessité de faire concorder les contenus vibratoires d'environnements réalistes avec les spécifications du récupérateur. Outre le fait de pouvoir récupérer de l'énergie sur des bandes de fréquence bien plus basses que celles du microgénérateur, la réelle problématique se situe sur la variabilité, notamment fréquentielle, de la source vis-à-vis du microgénérateur. Ainsi, ce dernier se doit de disposer d'une réponse couvrant un spectre vibratoire large. Ce défi, pris en compte dans la com-

---

II.40. L'un des projets menés avec cette entreprise a néanmoins considéré une récupération d'énergie hybride thermoélectrique-vibratoire, exploitant l'effet piézoélectrique pour cette dernière source.

II.41. Un exemple marquant est le retour aux systèmes à transduction magnétique de la part de la compagnie EnOcean qui produit des dispositifs de récupération d'énergie.



munauté depuis moins d'une dizaine d'années, reste encore un obstacle de taille à surmonter, comme l'en atteste par exemple le projet actuel ARC Energie finançant un doctorant co-encadré (T. HUGUET) dont la thèse a débuté en Janvier 2016. Une autre approche concernant cette aspect large bande consisterait à adapter les propriétés remarquables des éléments électroactifs distribuées (par exemple structures périodiques) et des méta-matériaux (notamment en termes de localisation d'énergie pour les structures périodiques présentant un certain degré d'apériodicité - [TRB01, LW04]) pour le contrôle vibratoire à la récupération d'énergie. Enfin, en plus de cet aspect large bande, la possibilité de récupérer assez d'énergie pour une fonction donnée est encore à développer. En ce sens, comme montré par les recherches actuelles (Paragraphe II.4.3 et II.4.3 par exemple), les techniques de récupération d'énergie par commutation, permettant une meilleure maîtrise des échanges énergétiques, ont encore de belles années devant elles. Ainsi, les efforts futurs en termes de récupération d'énergie pourront combiner à la fois la prise en compte de l'aspect large bande et l'optimisation de l'énergie extraite par des techniques non linéaires. Enfin, d'un point de vue général et pour l'application industrielle, il reste encore à convaincre les acteurs potentiels (industriels mais aussi académiques<sup>II.42</sup>) des possibilités mais surtout des limites des systèmes auto-alimentés, qui actuellement ne sont viables que pour des opérations de type capteurs fonctionnant de manière très intermittente<sup>II.43</sup>, faisant à la fois de cette thématique un enjeu scientifique et applicatif. Sur ce dernier point, il convient cependant de ne pas se montrer trop sectaire et cassant (sans pour autant "vendre du rêve") sur les limitations des systèmes de récupération d'énergie, car c'est justement cet effet de mode qui procure aux équipes de recherche les fonds nécessaires à la poursuite de leurs activités. Ainsi, en conclusion de ce paragraphe, les efforts à fournir sur la thématique de récupération d'énergie sont tout autant scientifiques que pédagogiques afin de laisser une chance de percée à cette thématique, et ne pas précipiter sa chute, tout en restant honnête quant au réel intérêt de ces systèmes, non encore totalement prouvé à l'heure actuelle.

Enfin, pour clore ce chapitre, il peut sembler que les actions de recherche menée depuis le début de carrière semblent énormément dispersées. Cependant, afin

---

II.42. Nombre d'entre eux étant captivés par le battage médiatique et politique ainsi que l'effet de mode sur les dispositifs "verts".

II.43. A titre d'exemple :

1. Dans le cadre d'un projet public, des partenaires en charge de la partie télécommunication avaient mis en place un système consommant plusieurs centaines de milliWatts, assurant qu'il s'agissait d'un système basse consommation (pour l'anecdote, ce système pouvait communiquer sur plusieurs centaines de mètres de distance, alors que l'application ne nécessitait que quelques mètres de séparation, et de nombreux protocoles de vérification de données étaient implémentés, conduisant à un système des plus robustes mais largement surdimensionné par rapport aux besoins réels de l'application visée).
2. Des demandes sur la possibilité de chauffer une chaussure de ski à partir des vibrations de ces derniers ou encore d'alimenter un téléphone portable de dernière génération nous sont parvenues de la part d'industriels. Cependant, d'un point de vue personnel, une prise de conscience récente de la part du secteur concernant les bilans énergétiques (énergie nécessaire par rapport à l'énergie pouvant être récupérée) et les limitations des systèmes de récupération d'énergie vis-à-vis de la fonction souhaitée a pu être noté.

d'éclaircir la cohérence des différentes actions, il convient de noter, d'un point de vue applicatif, que la réussite du développement d'un système est avant tout sur le plan du démonstrateur (il est inutile de perfectionner le système ; celui-ci étant par la suite repris et modifié par les acteurs industriels qui connaissent bien mieux les contraintes socio-économiques) et dépendent surtout d'une connaissance (plus ou moins approfondie) des différents domaines mis en jeu dans le dispositif et surtout de leurs interfaces (par exemple, c'est justement cette volonté de compréhension globale, transversale et transdisciplinaire qui est notamment saluée dans les projets de recherche tels que BESTMEMS ou ATCHOUM).



## Chapitre III

# Modélisation et applications des matériaux électrostrictifs (2009-2016)

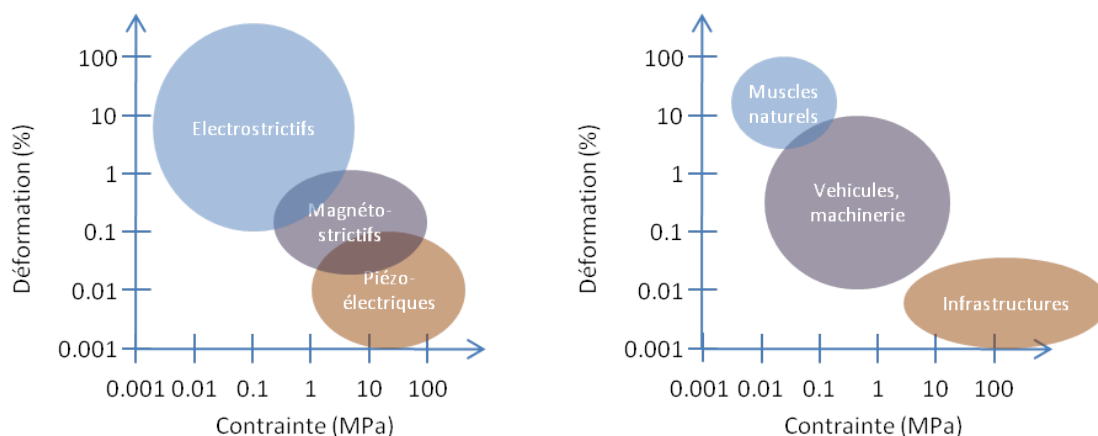
*Dans ce chapitre seront exposés les principaux travaux menés sur la modélisation et l'utilisation des matériaux électrostrictifs, principalement pour la récupération d'énergie dans ce dernier cas. Il sera ainsi dans un premier temps étudié la corrélation entre paramètres microscopiques et paramètres locaux, et ensuite les relations entre ces grandeurs locales et les grandeurs macroscopiques dans le cas particulier d'actionneurs en flexion puis général via la mise en place d'un modèle à constantes localisées, permettant ainsi l'optimisation globale d'un système. Enfin, des analyses et optimisations globales d'un point de vue macroscopique pour l'application à la récupération d'énergie, dont certaines adaptées des éléments piézoélectriques, seront exposées avant de conclure sur la place des matériaux électrostrictifs et leurs applications dans le milieu industriel.*

Contributeurs principaux aux actions de recherche (par ordre alphabétique) : Jean-Fabien CAPSAL (modélisation physique, récupération d'énergie), Pierre-Jean COTTINET (récupération d'énergie), Daniel GUYOMAR (récupération d'énergie), Claude RICHARD (modélisation macroscopique).

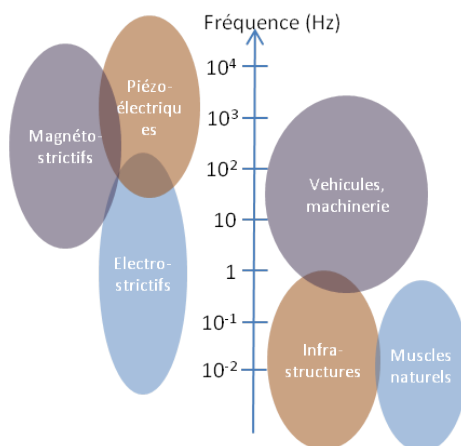
Thèse associée : Liuqing WANG (2011-2014 - modélisation macroscopique, récupération d'énergie).

### III.1 Matériaux électrostrictifs vs piézoélectriques

Ainsi qu'exposé dans le chapitre précédent, les matériaux piézoélectriques présentent de nombreux avantages en ce qui concerne les applications embarquées nécessitant une conversion électroactive. Néanmoins, ces matériaux souffrent de limitations dans certaines conditions. Plus particulièrement, ces matériaux présentent des modules d'Young relativement élevés, même sous leur forme polymérique (typiquement 1 GPa pour le PVDF). Associé à ce fort module d'Young, la déformation maximale admissible est également limitée. Ainsi, pour des applications sur supports souples et/ou nécessitant de fortes déformations à basse fréquence, il convient de se tourner vers d'autres matériaux mieux adaptés. Une possibilité dans ce cas est l'utilisation de polymères électrostrictifs, dont les gammes de déformation et de fréquence conviennent à de nombreuses applications (Figure III.1), tels que les muscles artificiels ([BC00, Ash03]), les systèmes haptiques ([GLC<sup>+</sup>15]) ou les micro-pompes



(a) Comparaison de courbes contrainte-déformation de plusieurs matériaux électroactifs et d'application typiques



(b) Comparaison de gammes de fréquence de plusieurs matériaux électroactifs et d'applications typiques

Figure III.1 – Place des éléments électrostrictifs.

([XTZ06, NAMT09]). Les polymères électrostrictifs se décomposent principalement en deux catégories selon la nature du mécanisme mis en œuvre : ionique ou diélectrique. C'est cette dernière classe qui nous intéressera ici du fait de leur bon compromis entre force et déplacement, tout en ayant des conductivités électriques assez limitées.

## III.2 Modélisation physique

### III.2.1 Enjeux et motivations pour la modélisation

Ainsi qu'exposé dans le cadre de la modélisation du comportements des matériaux ferroélectriques dans le chapitre précédent, la compréhension du comportement, avec une bonne maîtrise du compromis entre représentativité et simplicité, est primordiale pour une application réaliste des matériaux. De plus, dans le cadre des matériaux électrostrictifs, les mécanismes de conversion suscitent encore des dissensions au sein de la communauté scientifique. Alors que la démonstration classique de l'électrostriction repose sur une analyse phénoménologique faisant abstraction des mécanismes physiques ([EYS<sup>+</sup>99, MRC05, HZZS08]) ou sur des représentations alternatives telles que l'hyperélasticité ([RO10]), le peu de lois dégagées jusqu'à présent reste très empirique. Citons à titre d'exemple la loi d'Eury reliant la permittivité au coefficient d'électrostriction ([EYS<sup>+</sup>99]) ou encore l'étude de Zorn utilisant des moments de relaxation ([Zor99, Zor02]). Néanmoins un lien entre les caractéristiques microscopiques, locales et macroscopiques est essentiel afin de pouvoir correctement choisir un matériau, ou développer des pistes d'amélioration pour ce dernier. Ainsi cette section propose une modélisation permettant de lier ces différents aspects dans l'optique d'une meilleure compréhension du phénomène pour la conception de transducteurs optimisés.

### III.2.2 Conversion directe

*NB : cette partie est avant tout l'œuvre du Dr. Jean-Fabien CAPSAL ([CLC<sup>+</sup> 12]). Elle est néanmoins ici exposée du fait de son lien avec les parties suivantes de cette section, dont elle constitue par ailleurs l'origine de la recherche.*

Le principe de l'analyse présentée ici consiste à lier le domaine microscopique avec les paramètres locaux, en établissant une expression de la déformation en fonction du champ électrique. Plus particulièrement, il est considéré ici le moment dipolaire moyen  $\langle \vec{\mu} \rangle$ , qui, en utilisant la statistique de Boltzmann, est donné par l'équilibre entre l'énergie d'interaction du dipôle et son agitation thermique, conduisant à son expression faisant ressortir une fonction de Langevin  $\mathcal{L}(x) = \coth(x) - 1/x$  en fonction du moment de la chaîne dipolaire  $\mu$ , du champ électrique appliqué  $E$  (considéré égal au champ électrique local), de la température  $T$  et de la constante de Boltzmann  $k_B$  :

$$\langle \mu \rangle = \mu \mathcal{L} \left( \frac{\mu E}{k_B T} \right) \quad (\text{III.1})$$

Ainsi, en injectant cette expression dans celle de la polarisation macroscopique  $P$  d'un matériau diélectrique<sup>III.1</sup> :

$$P = N\mu = N\mu\mathcal{L}\left(\frac{\mu E}{k_B T}\right) \quad (\text{III.2})$$

avec  $N$  la densité de dipôles, on obtient ainsi le lien entre paramètres électriques microscopiques ( $N$  et  $\mu$ ) et grandeurs locales ( $P$  et  $E$ ). A partir cette expression, il est ainsi possible, à bas champs pour lesquels la fonction de Langevin peut s'approcher par  $\mathcal{L}(x) \underset{x \ll 1}{\approx} x/3$ , d'exprimer la susceptibilité diélectrique linéaire bas champ  $\chi_{lin}$  du matériau à partir des paramètres microscopiques :

$$\chi_{lin} = \frac{N\mu^2}{3k_B T} \quad (\text{III.3})$$

Permettant ainsi de représenter la polarisation en fonction de cette susceptibilité et d'un champ de saturation  $E_{sat} = k_B T / \mu$  :

$$P = 3\chi_{lin}E_{sat}\mathcal{L}\left(\frac{E}{E_{sat}}\right) \quad (\text{III.4})$$

avec ce champ de saturation représentant, de manière analogue à la définition du Paragraphe II.2 le passage du comportement linéaire au comportement non linéaire (Figure III.2).

Cependant, l'un des intérêts de la modélisation présentée ici, en plus du lien entre paramètres microscopiques et locaux, est sa prise en compte d'un effet de saturation du champ électrique (Figure III.3), qui peut être également traduit en termes de susceptibilité dynamique  $\chi$ , qui décroît à fort champ :

$$\chi = \frac{dP}{dE} = 3\chi_{lin} \left[ \left(\frac{E_{sat}}{E}\right)^2 - \text{csch}^2\left(\frac{E}{E_{sat}}\right) \right] \quad (\text{III.5})$$

avec  $\text{csch}(x)$  la cosécante hyperbolique de la variable  $x$ . L'identification des paramètres du modèle à partir des mesures expérimentales (Figure III.3) donne ainsi un moment dipolaire de 24 D pour un terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$ , qui

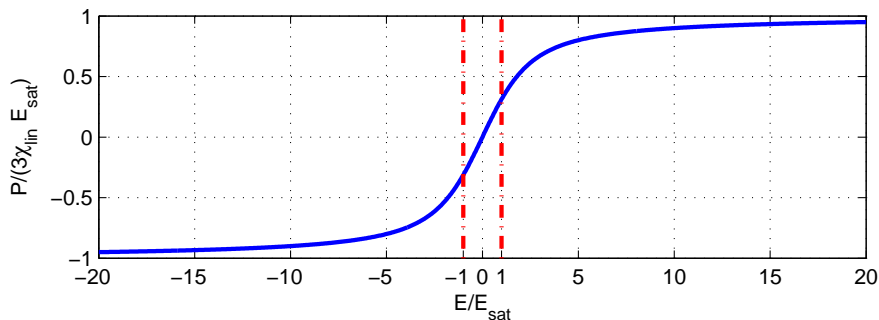


Figure III.2 – Réponse normalisée de la polarisation en fonction du champ électrique normalisé.

---

III.1. cette dernière étant considérée comme uniquement induite par des effets dipolaires

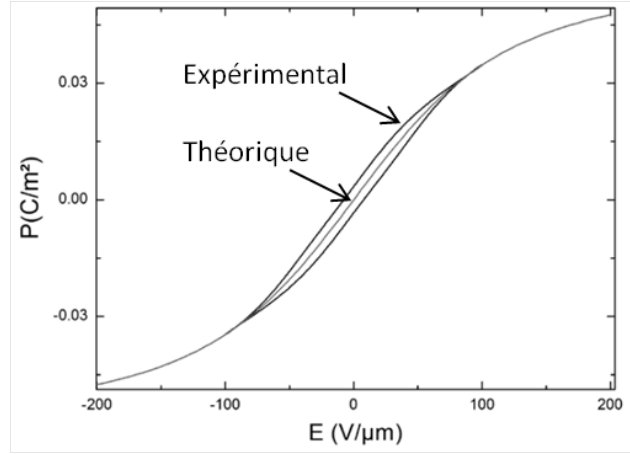


Figure III.3 – Polarisation expérimentale et théorique en fonction du champ électrique pour un terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$  ([CLC<sup>+</sup>12]).

est en accord avec les suppositions présentées dans [ZZH<sup>+</sup>05, CZR<sup>+</sup>06] concernant l'augmentation significative du moment dipolaire par rapport à celui du  $VDF$  seul (2, 2 D).

A partir de ces relations électriques, il est également possible, en supposant l'effet d'électrostriction diélectrique comme résultant des forces de Maxwell d'attraction entre les faces chargées électriquement, de relier la polarisation  $P$  à la déformation  $S$  en considérant qu'aucune contrainte extérieure n'est appliquée au système :

$$S = -\frac{1}{Y} \left( \epsilon_0 E^2 + \frac{dP}{dE} E^2 \right) = -\frac{1}{Y} \left\{ \epsilon_0 + 3\chi_{lin} \left[ \left( \frac{E_{sat}}{E} \right)^2 - \operatorname{csch}^2 \left( \frac{E}{E_{sat}} \right) \right] \right\} E^2 \quad (\text{III.6})$$

On voit ainsi également un comportement non-linéaire de la déformation en fonction du champ électrique au carré, ainsi qu'observé expérimentalement (Figure III.4). A bas champ cependant, il est possible d'extraire théoriquement la valeur du coefficient d'électrostriction  $M$  :

$$S = ME^2 \Rightarrow M \underset{E \ll E_{sat}}{\approx} -\frac{\epsilon_0 + \chi_{lin}}{Y} \underset{\epsilon_0 \ll \chi_{lin}}{\approx} -\frac{\chi_{lin}}{Y} \quad (\text{III.7})$$

ce qui est en excellent accord avec la loi empirique d'Eury ([EYS<sup>+</sup>99]). Dans le cas du terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$ , on retrouve ainsi une valeur de coefficient d'électrostriction de  $6,32 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-2}$  ( $\chi_{lin} = 50\epsilon_0$  et  $Y = 70 \text{ Mpa}$ , respectivement mesurés en utilisant des cycles  $P(E)$  et par essais de traction), ce qui est également en bon accord avec la littérature ([LRHZ05]<sup>III.2</sup>).

Enfin, de part l'analyse des mécanismes de conversion dans les polymères électrostrictifs, on voit ainsi que l'obtention d'un matériau performant passe par l'augmentation de la permittivité et la diminution du module d'Young. Cependant cette dernière doit être néanmoins assez limitée afin de pouvoir disposer d'une densité

III.2. Il est cependant à noter que le facteur entre la valeur calculée et celle de la référence provient du fait que cette dernière considère le coefficient transverse.



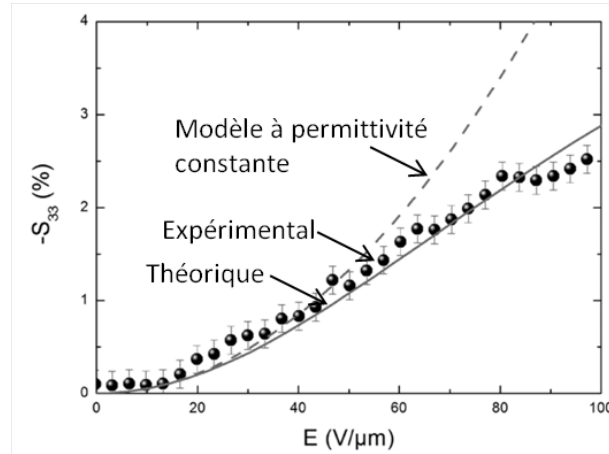


Figure III.4 – Déformation expérimentale et théorique (avec comparaison avec le modèle sans saturation) en fonction du champ électrique pour un terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$  ([CLC<sup>+</sup>12]).

d'énergie suffisante. Ainsi, de par cette analyse, l'inclusion de plastifiant, modifiant l'écartement des distances inter-chaînes conduisant à la naissance de macro-dipôles, a été proposée par Jean-Fabien CAPSAL et Jérémy GALINEAU, conduisant à des performances remarquables du matériau ainsi obtenu ([CGL<sup>+</sup>14, CGC<sup>+</sup>14]).

### III.2.3 Modèle multiphasique

Cette partie propose une extension du modèle précédent en considérant plusieurs phases dans le matériaux. Ceci est typiquement le cas dans les matériaux électrostrictifs où les phases dipolaire et cristallines coexistent, avec également parfois l'apparition d'une polarisation d'électrode. En considérant que le système est composé de  $N$  phases (dont la contribution est considérée donnée par un arrangement parallèle), les réponses électriques en termes de polarisation se superposent conduisant à l'expression suivante :

$$P = \sum_{i=1}^N P_i = 3 \sum_{i=1}^N \phi_i \chi_{lin|i} \mathcal{L} \left( \frac{E}{E_{sat|i}} \right) \quad (\text{III.8})$$

où l'indice  $i$  représente les paramètres (susceptibilités bas champ et champs de saturation - ces derniers dépendant du moment dipolaire et de la densité de dipôles de la phase considérée) associés à la phase  $i$  ( $i = 1 \dots N$ ) et  $\phi_i$  est le taux de la phase  $i$  dans le matériau ( $\sum_{i=1}^N \phi_i = 1$ ). Ainsi, l'expression de la déformation est donnée par :

$$S = -\frac{1}{Y} \left\{ \epsilon_0 + 3 \sum_{i=1}^N \phi_i \chi_{lin|i} \left[ \left( \frac{E_{sat|i}}{E} \right)^2 - \text{csch}^2 \left( \frac{E}{E_{sat|i}} \right) \right] \right\} E^2 \quad (\text{III.9})$$

Un cas intéressant à considérer est le cas biphasique, étant donné qu'en pratique les phases observables correspondent à celles données par la phase cristalline et celle

amorphe. Dans ce cas, on remarque que la réponse en déformation en fonction du champ électrique pour différentes valeurs du rapport de phase présente un point singulier du champ électrique  $E_0$  où les déformations se croisent, suivant l'équation :

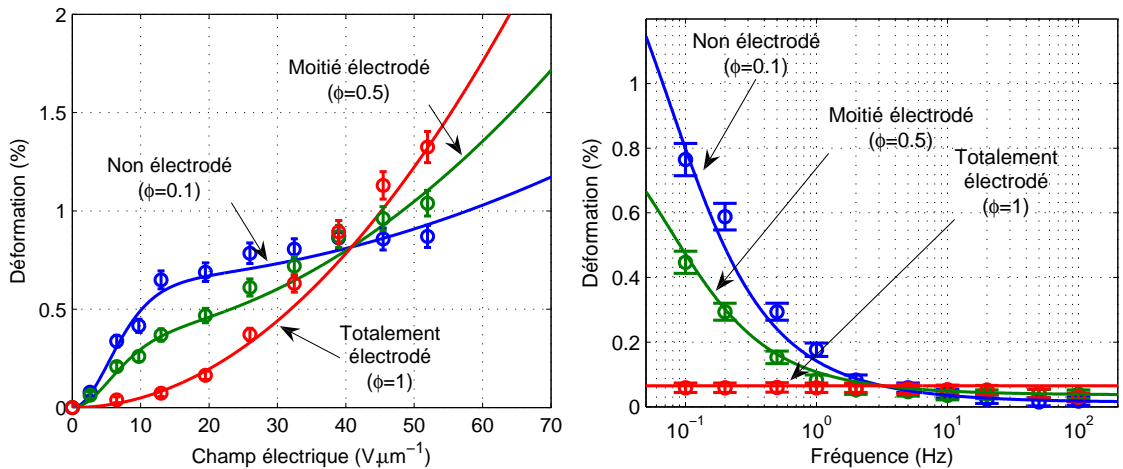
$$\chi_{lin|_1} \left[ \left( \frac{E_{sat|_1}}{E_0} \right)^2 - \operatorname{csch}^2 \left( \frac{E_0}{E_{sat|_1}} \right) \right] = \chi_{lin|_2} \left[ \left( \frac{E_{sat|_2}}{E_0} \right)^2 - \operatorname{csch}^2 \left( \frac{E_0}{E_{sat|_2}} \right) \right] \quad (\text{III.10})$$

qui, dans le cas où la phase 1 présente une saturation bien plus éloignée que la phase 2 (par exemple la phase 1 peut correspondre à une phase dipolaire et la phase 2 à une phase cristalline), avec entre ces deux valeurs de champ de saturation le champ  $E_0$ , peut s'approcher par :

$$E_0 \underset{E_{sat|_2} \ll E_0 \ll E_{sat|_1}}{\approx} E_{sat|_1} \sqrt{\frac{5}{2} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{12}{5} \frac{\chi_{lin|_2}}{\chi_{lin|_1}} \left( \frac{E_{sat|_2}}{E_{sat|_1}} \right)^2} \right]} \quad (\text{III.11})$$

ainsi que montré par la Figure III.5(a), dans laquelle la modulation du rapport de phase a été obtenue en électrodant aucune, une ou les deux faces de l'échantillon, permettant ainsi de modifier la contribution de la polarisation d'électrode. On pourra également noter qu'un tel point particulier, toujours pour le cas biphasique, apparaît également pour le comportement fréquentiel (Figure III.5(b), [LCI<sup>+</sup>12]).

On voit ainsi que le choix du matériaux (et notamment de la distribution de ses



(a) Dépendance au champ électrique

(b) Dépendance à la fréquence (en supposant un comportement suivant une loi de Debye pour la courbe théorique)

Figure III.5 – Déformation d'un matériau électrostrictif biphasique ( $\phi$  est le taux normalisé de contribution de la polarisation dipolaire,  $1 - \phi$  étant celle de la polarisation d'électrode; les traits pleins représentent les prédictions théoriques et les marqueurs les relevés expérimentaux).

phases) dépend fortement de l'application. Ainsi, pour les faibles valeurs de champ électrique et/ou de fréquence d'excitation<sup>III.3</sup>, il convient de privilégier les phases présentant de fortes valeurs de permittivité, alors que ces dernières ayant généralement comme contrepartie un champ de saturation moins élevé ainsi qu'une fréquence de coupure également plus faible, ils ne sont plus adaptés pour des comportements à fort champ et/ou haute fréquence. Par exemple, comme reporté dans la littérature, l'incorporation de nano-particules permet de disposer d'un matériau surpassant la matrice pure à bas champ, mais cette dernière redevient plus intéressante dès lors que le champ électrique prend de fortes valeurs ([GSSG06]).

### III.2.4 Conversion inverse

Les deux parties précédentes se sont attelées à démontrer le lien physiques entre paramètres microscopiques et locaux pour l'électrostriction directe (conversion électrique vers mécanique). Afin de mieux appréhender les mécanismes de ce type de conversion, cette partie propose cette fois-ci de prendre en compte le cas inverse (conversion mécanique vers électrique).

Le point de départ de cette analyse revient à considérer l'orientation des segments de macromolécules dans la chaîne polymérique. Alors qu'au repos (pas de déformation), le moment dipolaire moyen est relié à l'orientation moyenne (angle  $\phi_0$ ) de ces segments, l'application d'une déformation (par exemple selon l'axe de polarisation, noté  $x_3$ ) conduit à une modification de cet angle à une valeur  $\phi$ , comme représenté en Figure III.6.

A partir de cette approche, il est possible d'exprimer le moment dipolaire moyen selon l'axe 3 sans déformation  $\mu_0$  et le moment dipolaire moyen selon l'axe 3  $\mu$  sous déformation  $-S_3$  à partir du moment dipolaire  $\tilde{\mu}$  :

$$\begin{aligned}\mu_0 &= \tilde{\mu} \langle \cos \phi \rangle_0 \\ \mu &= \tilde{\mu} \langle \cos \phi \rangle\end{aligned}\tag{III.12}$$

où  $\langle x \rangle$  représente la valeur moyenne de  $x$  et l'indice 0 la valeur au repos. Par ailleurs, la déformation  $-S_3$  pouvant également être exprimée en fonction de l'angle

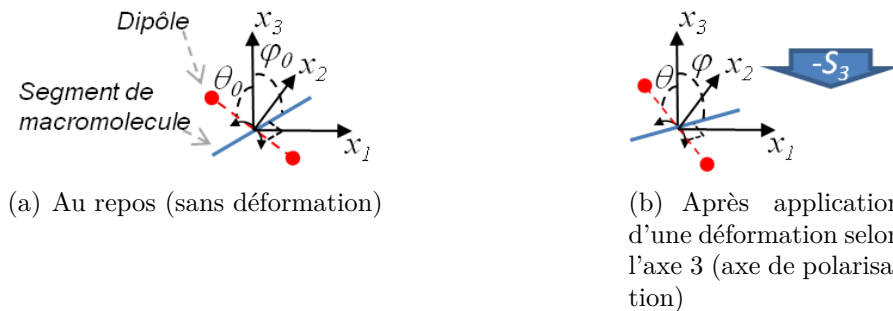


Figure III.6 – Modélisation de l'effet d'une déformation sur l'orientation des dipôles.

---

III.3. La fréquence reflétant l'inverse de la température dans les matériaux étudiés, on peut également étendre les conclusions présentées ici au comportement en fonction de cette dernière.

du segment de macromolécule au repos et sous déformation :

$$-S_3 = \frac{\langle \cos \phi \rangle - \langle \cos \phi \rangle_0}{\langle \cos \phi \rangle_0} \quad (\text{III.13})$$

l'expression du moment dipolaire moyen sous déformation devient :

$$\mu = (1 - S_3) \mu_0 \quad (\text{III.14})$$

Il est alors possible d'injecter cette expression dans la fonction liant la polarisation au champ électrique (Eq. III.2)

$$P = N(1 - S_3) \mu_0 \mathcal{L} \left( \frac{(1 - S_3) \mu_0 E}{k_B T} \right) \quad (\text{III.15})$$

qui dénote du mécanisme d'activation nécessitant la présence d'un champ électrique appliqué de manière externe afin de bénéficier d'une conversion du domaine mécanique vers le domaine électrique. Ainsi qu'indiqué en Figure III.7, les résultats théoriques montrent une bonne corrélation avec les mesures (en prenant en compte un coefficient de Poisson liant les déformations selon l'axe 1 et l'axe 3 de 0,49), avec une susceptibilité diélectrique bas champ dépendant de la valeur de la déformation. Néanmoins, on peut également remarquer que l'augmentation du moment dipolaire influe également sur le champ de saturation, ce dernier diminuant avec la déformation, comme représenté en Figure III.8, où la décroissance de la susceptibilité sous champ est plus rapide lors de l'application d'une déformation.

Enfin, alors que les relations précédentes sont valables quelque soit le champ électrique, il est possible, sous condition de faibles champs, d'extraire la valeur de susceptibilité diélectrique linéaire ainsi que le coefficient d'électrostriction bas champ, dont les expressions sont (fort heureusement) identiques à celles précédemment obtenues (Eqs. (III.3) et (III.7)), confirmant la cohérence des modèles. De plus, il est ici

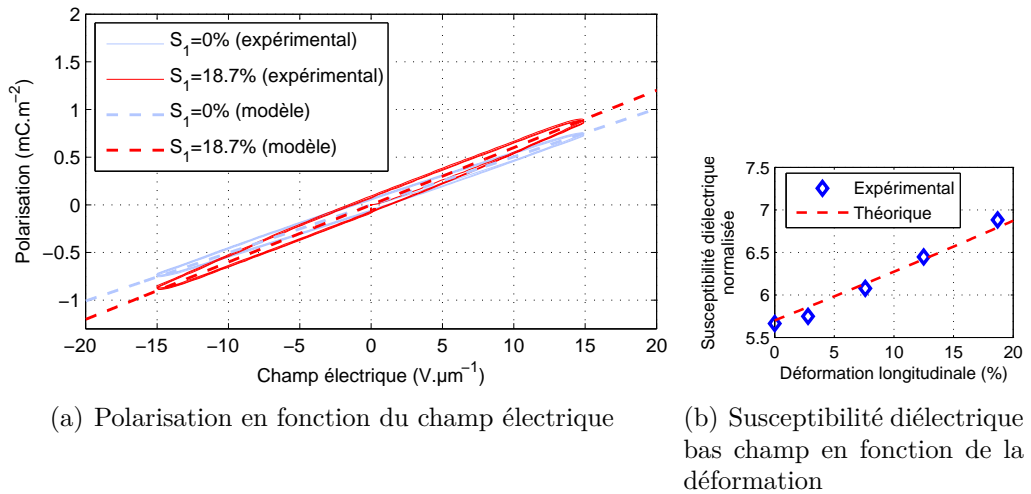


Figure III.7 – Résultats expérimentaux et théorique de la courbe de polarisation et de la susceptibilité diélectrique en fonction de la déformation dans le cas d'un polyuréthane.

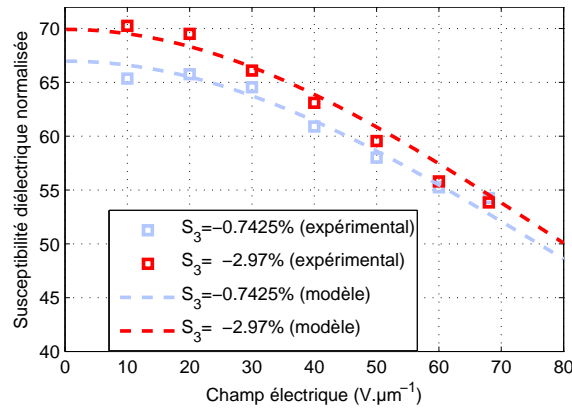
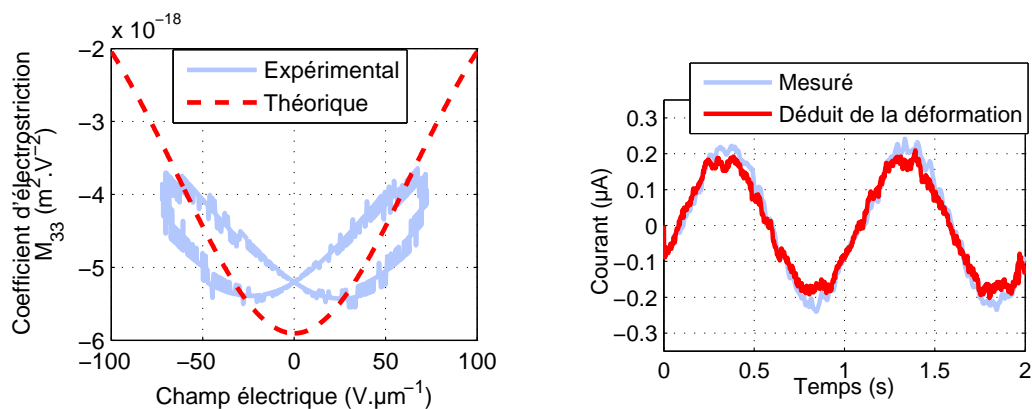


Figure III.8 – Evolution de la susceptibilité diélectrique en fonction du champ pour plusieurs déformations dans le cas d'un terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$ .

possible d'évaluer la variation de ce coefficient en fonction du champ électrique (du fait du comportement non-linéaire), ainsi que de prévoir les formes de courant sous champ électrique à partir de la variation temporelle de la déformation (Figure III.9).

### III.2.5 Effet d'épaisseur

La distribution inhomogène des charges d'espace, surtout lorsque l'on considère l'inclusion de nano-particules, conduit néanmoins à une variation de la permittivité selon l'épaisseur. Cette dernière conduit ainsi à une différence en terme de permittivité globale équivalente, et donc des capacités d'actionnement variables selon l'épaisseur. Ainsi, en considérant que la variation de permittivité peut être vue comme une sorte d'effet de peau en terme de gradient selon l'épaisseur de la permittivité  $\epsilon$ , l'expression de cette dernière en fonction de la position  $x$  selon l'épaisseur



(a) Evolution du coefficient d'électrostriction en fonction du champ électrique de polarisation

(b) Estimation du courant débité pour un champ électrique donné

Figure III.9 – Application du modèle pour la détermination du coefficient d'électrostriction en fonction du champ et de la génération de courant sous sollicitation mécanique variable.

est donnée par ([LCK<sup>+</sup>12]) :

$$\epsilon(x) = \Delta\epsilon \left\{ \left[ \left( 1 + e^{-L/\delta_1} \right) - \left( e^{-\left(\frac{L+x}{\delta_1}\right)} + e^{-\left(\frac{L-x}{\delta_1}\right)} \right) \right] - \left[ \left( 1 + e^{-L/\delta_2} \right) - \left( e^{-\left(\frac{L+x}{\delta_2}\right)} + e^{-\left(\frac{L-x}{\delta_2}\right)} \right) \right] \right\} + \epsilon_{init} \quad (\text{III.16})$$

où  $\Delta\epsilon$  représente l'amplitude de l'effet de peau,  $\epsilon_{init}$  la permittivité au sein du matériau épais (c'est-à-dire sans considération de l'effet de peau),  $L$  l'épaisseur du matériau, et  $\delta_1$  et  $\delta_2$  les profondeurs de pénétration. Se retrouvant ici avec une distribution en série de permittivités élémentaires, la permittivité globale  $\epsilon$  est alors donnée par :

$$\epsilon = \frac{1}{\frac{1}{L} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{1}{\epsilon(x)} dx} \quad (\text{III.17})$$

La Figure III.10 donne une représentation qualitative du phénomène en fonction de l'épaisseur, en considérant que les charges d'espaces conduisent à une augmentation de la permittivité près des surfaces ( $\delta_1 < \delta_2$ ), représentant par exemple un effet d'agrégation lors de l'inclusion de nano-particules. On voit ainsi qu'à faible épaisseur, la variation de charge d'espace étant très limitée, la permittivité varie peu et reste très proche de celle du matériau épais. A l'opposé, pour les film épais, la variation reste localisée très proche des surfaces, de telle manière que la contribution de l'augmentation locale de permittivité est négligeable. Enfin, dans le cas intermédiaire, une variation significative de la permittivité locale sur une plage d'épaisseur non négligeable conduit ainsi à une valeur importante de la permittivité équivalente

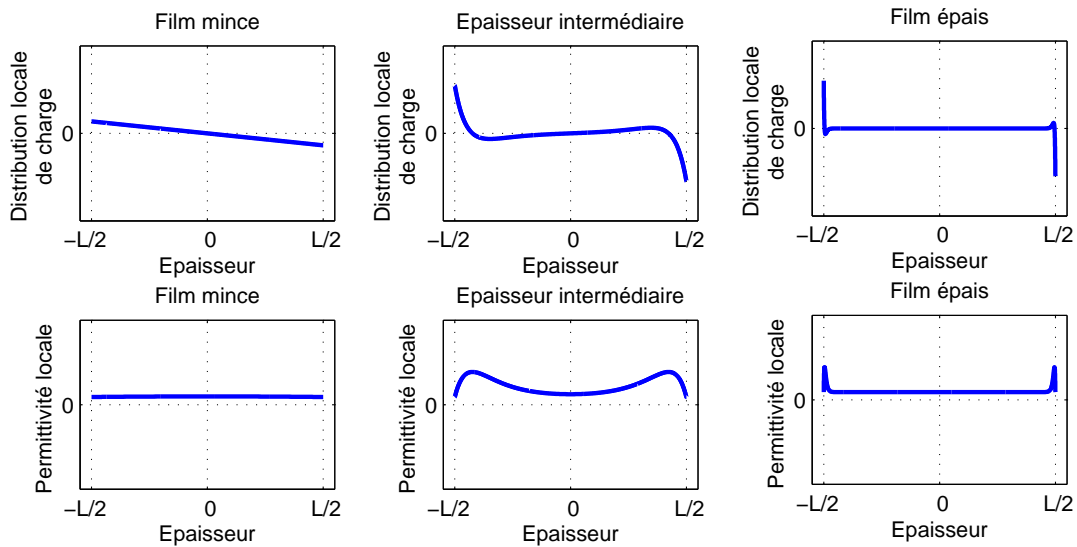


Figure III.10 – Evolution des charges d'espace et de la permittivité locale pour différentes épaisseurs.

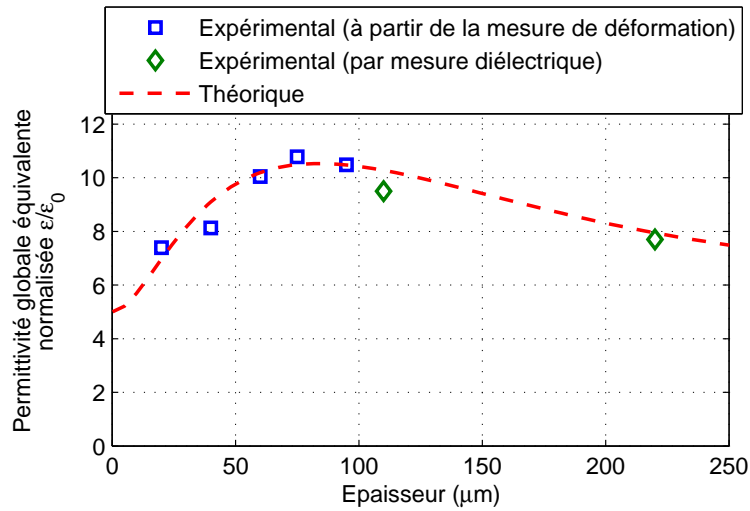


Figure III.11 – Permittivité globale en fonction de l’épaisseur pour un film de polyuréthane.

globale (Figure III.11). Comme montré précédemment (Eq. (III.7)), et en négligeant l’effet d’épaisseur sur le module d’Young, cette variation de permittivité conduit ainsi à une augmentation de l’activité électrostrictive.

A partir de la permittivité obtenue et en approchant la fonction de Langevin par une tangente hyperbolique, il est ainsi possible de déterminer la valeur de la déformation en fonction du champ électrique. Néanmoins, pour cela, il convient d’abord de relier permittivité linéaire (bas champ)  $\epsilon$  et champ de saturation  $E_{sat}$ . En effet, comme la première tend à varier selon la modélisation précédemment décrite, il est à considérer que c’est également le cas pour le dernier. Plus particulièrement, en considérant une variation des deux paramètres selon une loi de la forme :

$$E_{sat}\epsilon^\alpha = \text{cste} \quad (\text{III.18})$$

avec  $\alpha$  un coefficient positif, on constate une bonne corrélation entre champ de saturation et permittivité mesurés (Figure III.12), avec une valeur de  $\alpha$  proche de 2.

Ainsi, avec les paramètres ainsi identifiés, il est possible de tracer l’évolution de la déformation en fonction du champ électrique pour différentes épaisseurs, comme représenté en Figure III.13. On voit ainsi un changement effectif et significatif des capacités d’actionnement en fonction de l’épaisseur, avec comme implication de meilleures performances à bas champ pour les matériaux dont l’épaisseur maximise la permittivité, mais qui du fait du champ de saturation réduit, sont des choix moins judicieux que les matériaux à permittivité réduite mais au champ de saturation plus élevé correspondant à des épaisseurs non optimales en termes de permittivité.

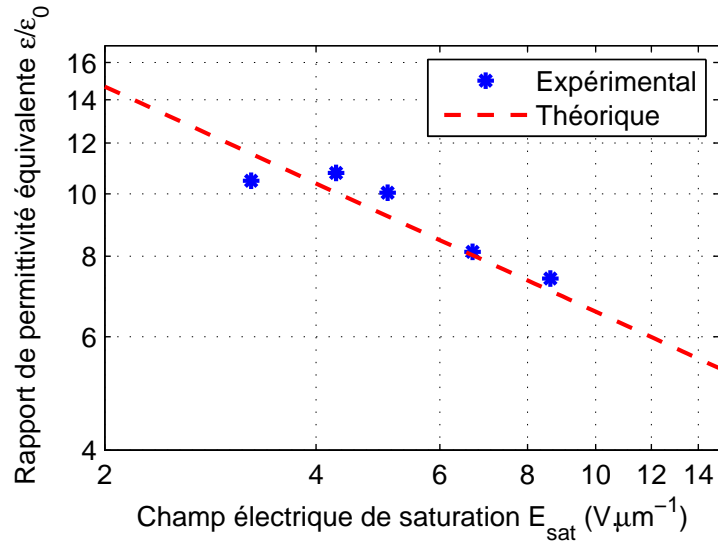


Figure III.12 – Permittivité globale en fonction du champ électrique de saturation.

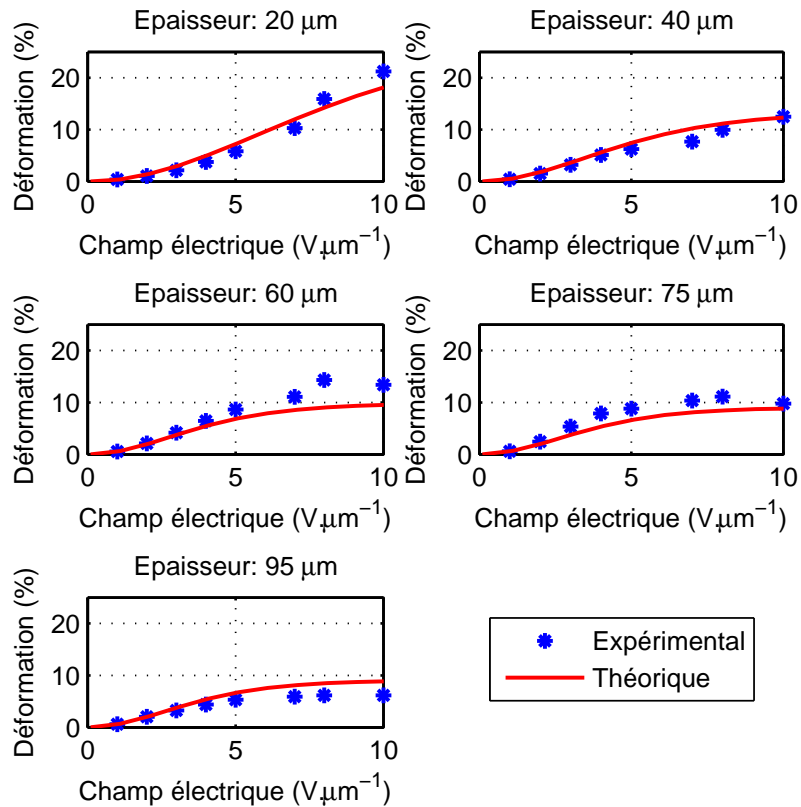


Figure III.13 – Déformation en fonction du champ électrique pour des matériaux de différentes épaisseurs.



## III.3 Modélisation macroscopique de systèmes électrostrictifs

### III.3.1 Motivations pour la modélisation macroscopique

La partie précédente s'est attachée à établir le lien entre grandeurs microscopiques et locales pour les polymères électrostrictifs en vue de l'évaluation de leurs performances, de l'identification des coefficients locaux en fonction des paramètres microscopiques et de l'exploration de voies de développement pour l'élaboration de matériaux efficaces. Néanmoins, l'étude du fonctionnement "système" d'un dispositif incluant de tels éléments, par exemple pour l'établissement et la validation théorique de lois de commande, nécessitent une vision plus haut niveau, donnant le comportement du système en fonction des grandeurs macroscopiques. Ainsi, cette partie propose l'étude du comportement d'actionneurs électrostrictifs, ainsi que l'établissement des équations constitutives des dispositifs électrostrictifs via un modèle à constantes localisées en vue de leur utilisation dans des domaines tels que l'actionnement ou la récupération d'énergie.

### III.3.2 Actionnement

La première partie de la modélisation macroscopique s'est intéressée à l'analyse des performances de transducteurs de type poutre fonctionnant en flexion de manière quasi-statique. Considérant l'élément électrostrictif comme transverse isotropique, les équations constitutives locales de l'électrostriction (en utilisant la notation de Voigt) sont données par :

$$\begin{aligned} S_1 &= s_{11}^E T_1 + s_{12}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + M_{31} E_3^2 \\ S_2 &= s_{11}^E T_1 + s_{11}^E T_2 + s_{13}^E T_3 + M_{31} E_3^2 \\ D_3 &= \varepsilon_{33}^T E_3 + 2M_{31} T_2 E_3 + 2M_{33} T_3 E_3 \end{aligned} \quad (\text{III.19})$$

où l'axe 3 est l'axe de polarisation, l'axe 1 l'axe de la plus grande dimension (longueur),  $S$ ,  $T$ ,  $E$  et  $D$  sont les grandeurs de déformation, contrainte, champ électrique et induction électrique, et  $s^E$ ,  $\varepsilon^T$  et  $M$  les coefficients d'élasticité (à champ électrique constant), la permittivité (à contrainte constante) et le coefficient d'électrostriction. En considérant des déformations relativement faibles, il est également possible d'appliquer les hypothèses d'Euler-Bernoulli ( $S_2 = 0$  et  $T_3 = 0$ ), conduisant à l'expression de la contrainte longitudinale :

$$T_1 = c_p^E S_1 - (1 - \nu_p^E) c_p^E M_{31} E_3^2 \quad \text{avec} \quad c_p^E = \frac{Y^E}{1 - (\nu_p^E)^2} \quad (\text{III.20})$$

avec  $Y^E$  le module d'Young et  $\nu_p^E$  le coefficient de Poisson à champ électrique constant. De plus, afin d'avoir un système pouvant fléchir, il convient de décaler la fibre neutre de l'élément actif, et donc de le placer sur un substrat passif. En appliquant la même démarche et les mêmes hypothèses que précédemment, mais avec un comportement électroactif nul ( $M = 0$ ), il est ainsi possible d'exprimer la contrainte longitudinales dans ce substrat :

$$T_1 = c_b S_1 \text{ avec } c_b = \frac{Y_b}{1 - \nu_b^2} \quad (\text{III.21})$$

où  $Y_b$  et  $\nu_b$  sont le module d'Young et le coefficient de Poisson du substrat.

A partir de ces relations, il est alors possible d'obtenir la réponse en utilisant l'équation reliant déformation longitudinale  $S_1$  et le déplacement selon l'axe 3  $u_3(x_1)$  :

$$S_1 = - (x_3 - h_n) \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} \quad (\text{III.22})$$

où  $x_i$  est la position sur l'axe  $i$  et  $h_n$  la position de la fibre neutre donnée par :

$$h_n = \begin{cases} \frac{h_b^2 c_b + 2h_b h_p c_p^E + h_p^2 c_p^E}{2(h_b c_b + h_p c_p^E)} & \text{dans la zone active (polymère + substrat)} \\ \frac{h_b}{2} & \text{dans la zone passive (substrat uniquement)} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

avec  $h_p$  et  $h_b$  l'épaisseur respective de l'élément électrostrictif et du substrat, et en considérant la position  $x_3 = 0$  comme étant la surface inférieure de la structure (Figure III.14), et en combinant cette équation avec la relation contrainte-déformation (Eq. (III.20) ou (III.21) selon la zone considérée) ainsi que le moment extérieur  $\mathcal{M}$  exercé sur la structure, donné par :

$$\mathcal{M} = \begin{cases} w \int_0^{h_b+h_p} T_1(x_3 - h_n) dx_3 & \text{dans la zone active (polymère + substrat)} \\ w \int_0^{h_b} T_1(x_3 - h_n) dx_3 & \text{dans la zone passive (substrat uniquement)} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

où  $w$  dénote de la largeur du substrat et de l'élément électrostrictif (le problème étant considéré en 2-dimensions, les constituants ont la même largeur).

### Poutre encastree-libre

A titre d'exemple d'étude de cas, il est proposé ici d'établir les relations reliant déplacement en flexion quasi-statique et tension appliquée dans le cas d'un actionneur de type poutre encastree-libre (Figure III.14(a)) avec l'élément électros-

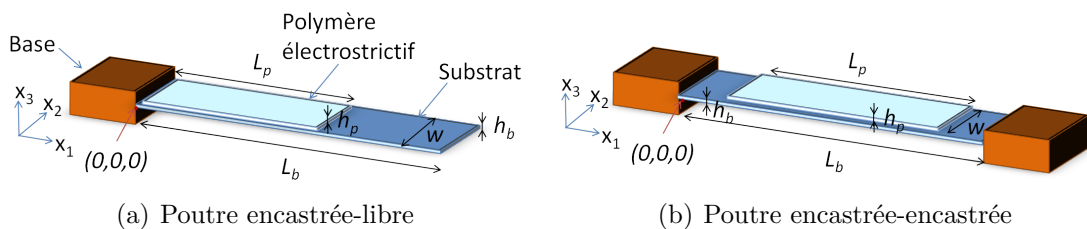


Figure III.14 – Exemples de configuration d'actionneurs électrostrictifs en flexion.

trictif proche de l'encastrement et sans force extérieure appliquée<sup>III.4</sup>. Dans ce cas, le moment extérieur  $\mathcal{M}$  étant nul, l'expression de la dérivée seconde est donnée par :

$$\begin{cases} A \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} = BE_3^2 & \text{dans la zone active (polymère + substrat)} \\ \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} = 0 & \text{dans la zone passive (substrat uniquement)} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

avec :

$$\begin{cases} A = \frac{w}{12} \left( \frac{c_b^2 h_b^4 + 4c_b c_p^E h_b^3 h_p + 6c_b c_p^E h_b^2 h_p^2 + 4c_b c_p^E h_b h_p^3 + c_p^E h_p^4}{c_b h_b + c_p^E h_p} \right) \\ B = -\frac{w}{2} \left( \frac{h_b + h_p}{c_b h_b + c_p^E h_p} \right) (1 - \nu_p^E) c_p^E c_b h_p h_b M_{31} \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

En notant  $L_p$  la longueur de la partie active et  $L_b$  la longueur totale de la poutre, et en considérant des conditions aux limites nulles (déplacement et dérivée du déplacement nuls en  $x_1 = 0$ ) ainsi que la continuité du déplacement et de sa dérivée (notamment au passage entre la partie active et la partie passive), il est alors possible d'obtenir  $u_3(x_1)$  en tout point de l'actionneur :

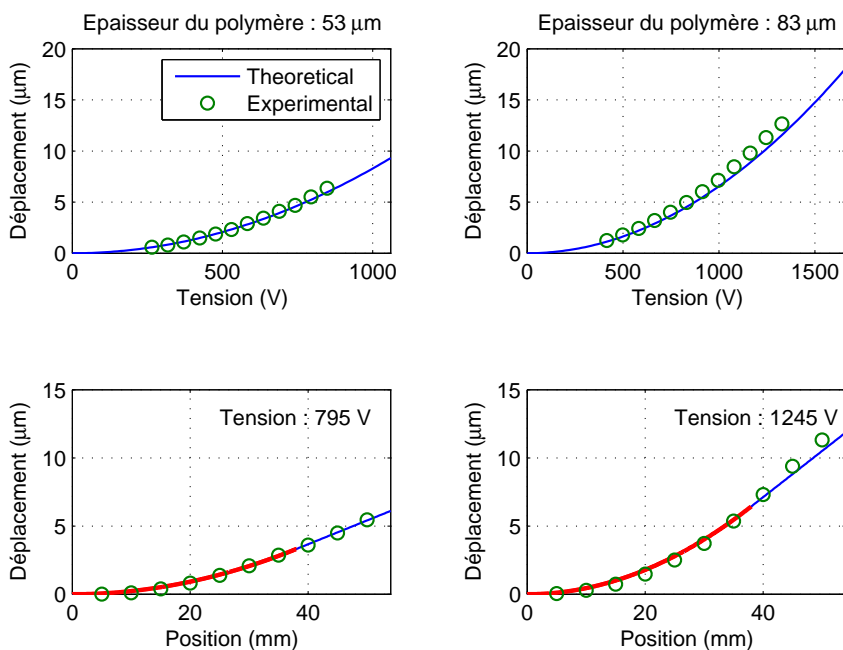
$$u_3(x_1) = \begin{cases} \frac{B}{2A} \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 x_1^2 & \text{dans la zone active} \\ & \text{(polymère + substrat - } 0 \leq x_1 \leq L_p) \\ \frac{B}{2A} \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 L_p (2x_1 - L_p) & \text{dans la zone passive} \\ & \text{(substrat uniquement - } L_p \leq x_1 \leq L_b) \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

où  $V$  est la tension appliquée (en considérant un champ électrique uniforme dans l'élément électroactif).

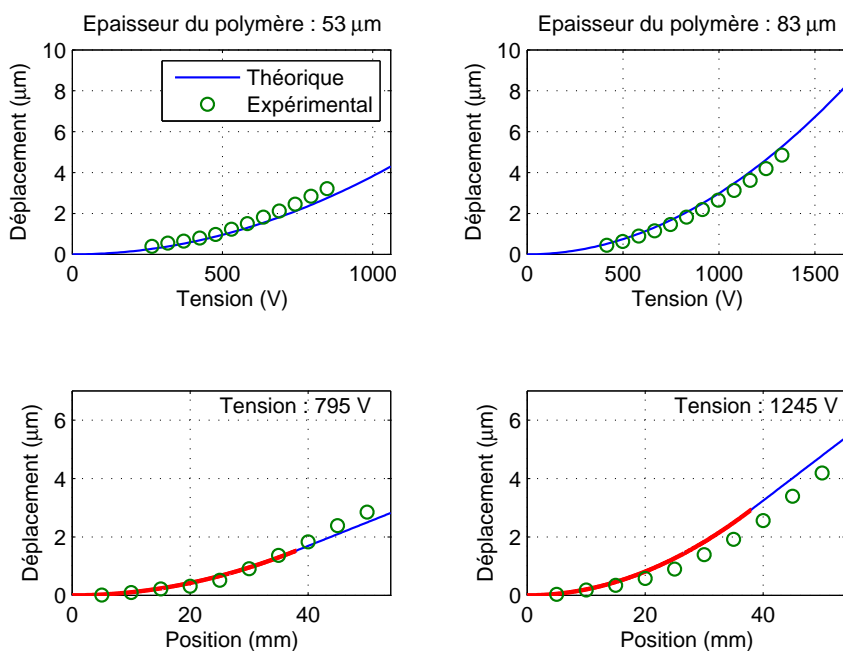
La Figure III.15 montre les résultats théoriques et expérimentaux pour deux configurations d'actionneur de type poutre encastree-libre. On voit ainsi une bonne corrélation entre déplacements prédits et mesurés, avec une dépendance quadratique à la tension, qui est inhérente à la nature électrostrictive du matériau. On remarque également l'effet d'épaisseur et de rigidité du substrat, jouant sur la position de la fibre neutre ainsi que sur la quantité d'énergie fournie au matériau électroactif et convertie sous forme mécanique dans la structure globale (représenté par le rapport  $B/A$  dans l'équation (III.27)). Sur ce dernier point, il est également possible de tracer la réponse en fonction des rapports de rigidité et d'épaisseur entre le polymère et le matériau (Figure III.16), montrant une zone optimale en termes de déplacement, qui correspond à un maximum d'énergie mécanique convertie dans le système. Ainsi, pour des rapports d'épaisseur et/ou de rigidité entre le substrat et le polymère importants, l'énergie reçue et convertie par l'élément électroactif est relativement faible pour pouvoir déformer le substrat de manière significative. Dans le cas contraire (rapport d'épaisseur et/ou de rigidité entre le substrat et le polymère faibles), la

---

III.4. L'inclusion d'une force extérieure est néanmoins possible en injectant l'effet de celle-ci dans l'expression du moment extérieur  $\mathcal{M}$ . Par exemple, pour une force  $F$  appliquée en bout de poutre, l'expression du moment est donnée par  $\mathcal{M} = (L_b - x)F$ , avec  $L_b$  la longueur totale de la poutre.



(a) Substrat en cuivre



(b) Substrat en acier

Figure III.15 – Réponses théoriques et expérimentales pour une poutre encastree-libre (le déplacement est pris en bout de poutre pour les figures du déplacement en fonction du champ électrique et les parties en rouge gras sur les figures du déplacement en fonction de la position représentent la partie active).

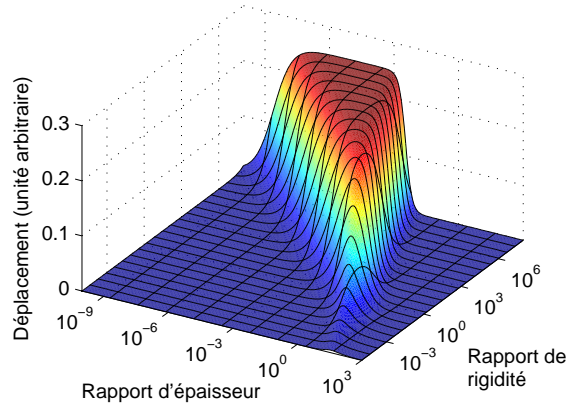


Figure III.16 – Réponse d'un actionneur encastré-libre en fonction des rapports d'épaisseur et de rigidité entre le substrat et le polymère.

une fibre neutre est dans la couche de polymère, ne permettant donc pas d'avoir un effet de flexion. Il existe ainsi des valeurs de rapports optimaux et interdépendants permettant de maximiser le déplacement. Bien entendu, dans le cas où une force extérieure est prise en compte, ces couples de rapports optimaux peuvent varier. Enfin, un dernier paramètre d'optimisation consiste en la longueur du polymère par rapport au substrat. Néanmoins, ce dernier est ici trivial car une maximisation du déplacement par rapport à ce paramètre montre une longueur optimale de l'élément électrostrictif égale à celle du substrat.

### Poutre encastrée-encastrée

Un autre exemple traité ici considère le cas d'un actionneur de type poutre encastrée-encastrée avec l'élément électrostrictif en milieu de poutre (Figure III.14(b)), toujours sans application d'une force extérieure. Dans ce cas, il est possible d'utiliser la symétrie du système afin de n'étudier que la moitié de la structure. Ici,  $L_p$  réfère toujours à la longueur du polymère (Figure III.14(b)), mais du fait du placement de ce dernier, il est plus aisé d'utiliser la position  $L_0$  correspondant au passage entre partie passive et partie active :

$$L_0 = \frac{L_b - L_p}{2} \quad (\text{III.28})$$

Seule la moitié de la structure étant considérée pour des raisons de symétrie ( $0 \leq x_1 \leq L_b/2$ ), il convient également d'introduire un moment extérieur  $\phi$  exercé par l'autre moitié de la structure. Dans ce cas, la dérivée seconde du déplacement (entre 0 et  $L_b/2$ ) est alors donnée par :

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} &= \frac{1}{A} (BE_3^2 - \phi) && \text{dans la zone active (polymère + substrat)} \\ \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} &= -\frac{1}{c_b I_b} \phi && \text{dans la zone passive (substrat uniquement)} \end{aligned} \quad (\text{III.29})$$

avec  $I_b$  le second moment d'inertie du substrat :

$$I_b = \frac{wh_b^3}{12} \quad (\text{III.30})$$

L'obtention du déplacement se fait alors en considérant des conditions aux limites en  $x_1 = 0$  nulles (déplacement et sa dérivée), la continuité du déplacement et de sa dérivée (notamment au passage entre la partie passive et la partie active), et l'annulation de la dérivée du déplacement en  $L = L_b/2$  du fait de la symétrie, ce qui conduit à l'expression du déplacement en tout point de la structure entre 0 et  $L_p/2$  (l'autre partie étant obtenue par construction symétrique) :

$$u_3(x_1) = \begin{cases} -\frac{1}{2C_b I_b} \phi x_1^2 & \text{dans la zone passive (substrat} \\ & \text{uniquement - } 0 \leq x_1 \leq L_0) \\ \frac{1}{2A} \left[ B \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 - \phi \right] x_1^2 + a_1 x_1 + a_0 & \text{dans la zone active (polymère} \\ & \text{+ substrat - } L_0 \leq x_1 \leq L_b/2) \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

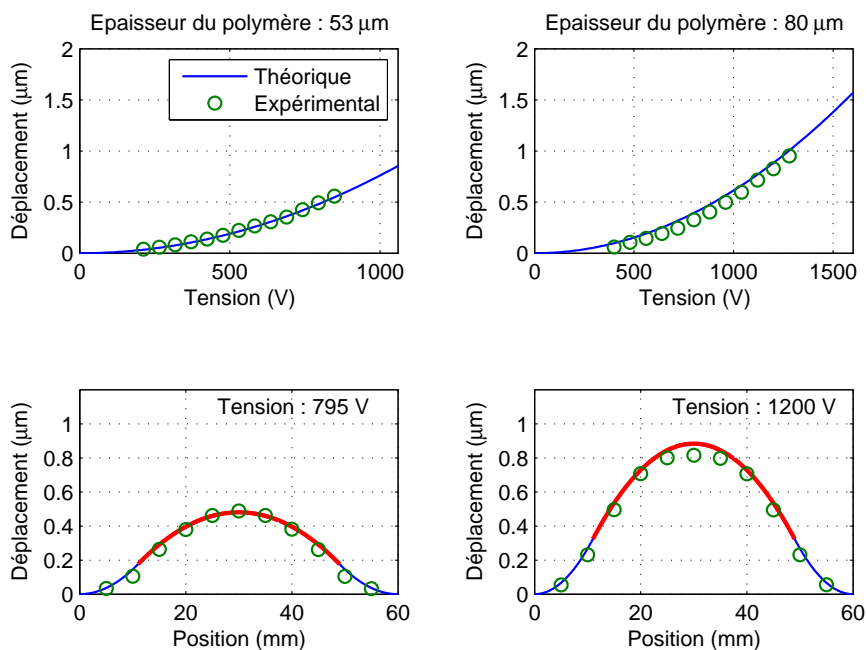
avec les expressions du moment  $\phi$  et des constantes  $a_1$  et  $a_0$  données par :

$$\begin{aligned} \phi &= \left( \frac{c_b I_b L_p}{c_b I_b L_p + 2L_0 A} \right) B \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 \\ a_1 &= - \left( \frac{L_0 L_b}{c_b I_b L_p + 2L_0 A} \right) B \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 \\ a_0 &= \frac{1}{2} \left( \frac{L_0^2 L_b}{c_b I_b L_p + 2L_0 A} \right) B \left( \frac{V}{h_p} \right)^2 \end{aligned} \quad (\text{III.32})$$

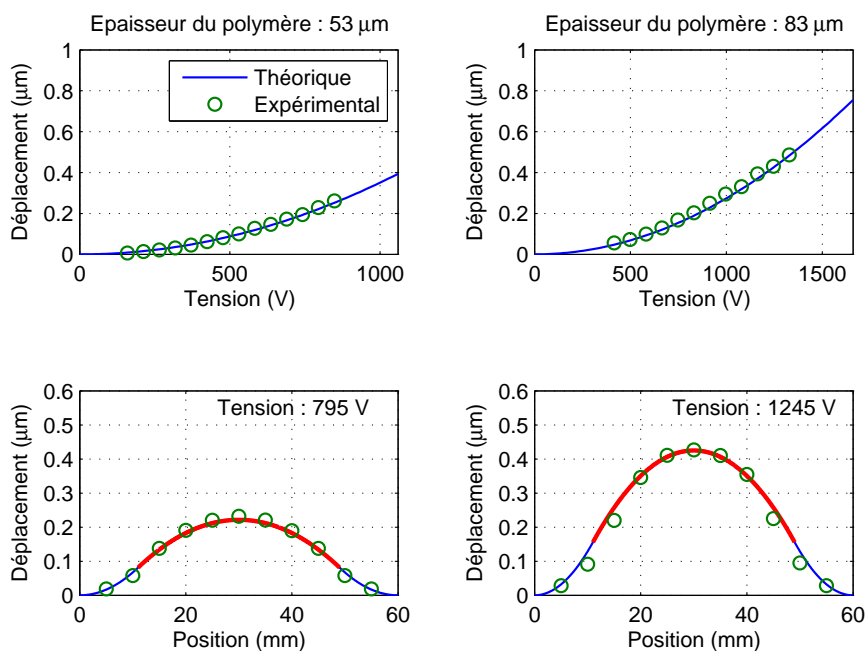
Les résultats expérimentaux, présentés en Figure III.17 montrent également une bonne corrélation avec les prédictions. On retrouve ainsi la dépendance quadratique au champ électrique ainsi que l'effet du substrat, tant en termes d'épaisseur que de rigidité relative. Comme pour le cas encasté-libre, les rapports de rigidité et d'épaisseur entre le substrat et la polymère jouent un rôle important, pour les mêmes raisons que précédemment exposé. Cependant, l'effet de la longueur relative du matériau électrostrictif n'est ici plus triviale, car une trop grande longueur empêche la déformation par l'effet de symétrie, et une trop faible longueur ne permet pas d'exercer un moment assez important sur le substrat, ou, autrement dit, de convertir assez d'énergie sous forme mécanique. On se retrouve ainsi avec des rapports de longueurs optimaux, qui plus est dépendants des rapports de rigidité et d'épaisseurs, comme montré en Figure III.18. Par conséquent, la conception d'un actionneur efficace requiert ici l'optimisation du triplet *{rapport de longueur, rapport d'épaisseur, rapport de rigidité}*.

### III.3.3 Modèle à constantes localisées

Alors que le paragraphe précédent s'est attaché à mettre en place un modèle décrivant les capacités d'actionnement de structures électrostrictives fonctionnant en flexion quasi-statique, il est proposé ici d'établir un modèle encore plus haut niveau basé sur l'analyse par constantes localisées. Un tel modèle, quelquefois présumé à partir de l'adaptation du modèle à constantes localisées pour les éléments piézoélec-



(a) Substrat en cuivre



(b) Substrat en acier

Figure III.17 – Réponses théoriques et expérimentales pour une poutre encastree-encastree (le déplacement est pris en milieu de poutre pour les figures du déplacement en fonction du champ électrique et les parties en rouge gras sur les figures du déplacement en fonction de la position représentent la partie active).

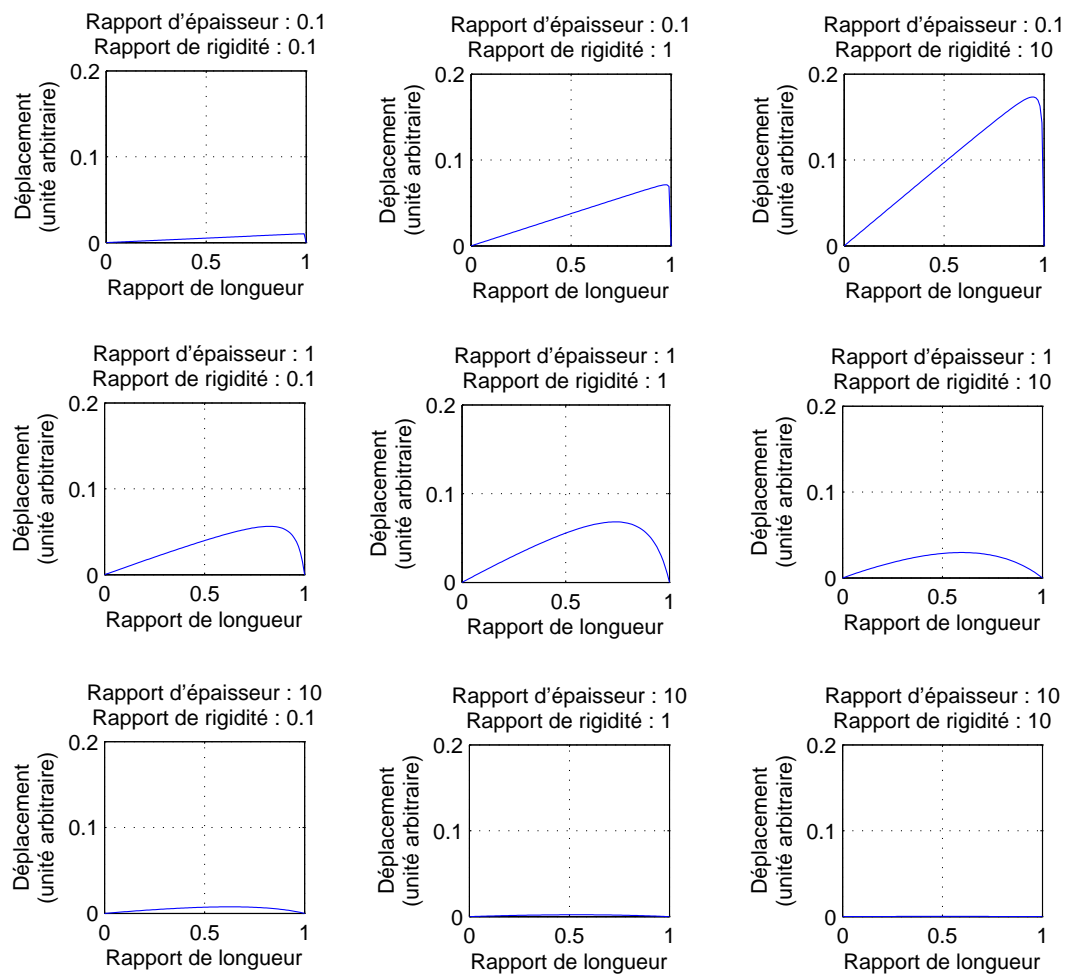


Figure III.18 – Réponse d'un actionneur encastré-encastré en milieu de poutre en fonction du rapport de longueur entre le polymère et le substrat pour plusieurs rapports d'épaisseur et de rigidité entre le substrat et le polymère.



triques<sup>III.5</sup>, permet ainsi une évaluation rapide des techniques proposées d'un point de vue "système", dans le cas de l'actionnement ou la récupération d'énergie par exemple.

### Aspects électriques

Dans un premier temps, il sera considéré l'aspect de conversion d'énergie électrique vers mécanique, où l'énergie fournie relève uniquement du domaine électrique. En reprenant les équations constitutives des éléments électrostrictifs transverses isotropes (Eq. (III.19)) ainsi que par l'application des hypothèses d'Euler-Bernoulli conduisant à l'expression de la contrainte (III.20), l'induction électrique peut s'écrire sous la forme :

$$D_3 \approx \varepsilon_{33}^T E_3 + 2M_{31} (1 - \nu_p^E) c_p^E S_1 E_3 \quad (\text{III.33})$$

qui permet par ailleurs de mettre en évidence la nécessité d'activation du comportement électromécanique via l'application d'un champ électrique de polarisation (voir Paragraphe III.2.4). A partir de l'expression de l'induction électrique, il est alors possible, dans le cas d'un poutre par exemple et en reprenant les notations du paragraphe précédent, d'exprimer la variation d'énergie électrique fournie au matériau :

$$\begin{aligned} dW_{prov,elec} &= \int_0^w \int_0^{L_p} \int_{h_b-h_n}^{h_b+h_p-h_n} E_3 dD_3 dx_3 dx_1 dx_2 \\ &\approx \frac{w L_p \varepsilon_{33}^T}{h_p} V dV - \frac{M_{31} (1 - \nu_p^E) h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p + h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) V^2 d \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=L_p} \right) \\ &\quad - \frac{M_{31} (1 - \nu_p^E) h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p + h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=L_p} \right) V dV \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

On voit ainsi à partir de cette expression deux types d'énergie. L'une purement électrique provenant de la nature diélectrique du matériau, et l'autre dénotant de la conversion. Plus précisément, cette variation d'énergie peut être identifiée à partir des charges électriques  $Q$  macroscopiques sur les surfaces du matériaux :

$$Q = C_0 V - \alpha(x_1) V u_3(x_1) \quad (\text{III.35})$$

où  $C_0$  représente la capacité bloquée et  $\alpha(x_1)$  le facteur de force (coefficient électromécanique dépendant du point d'observation  $x_1$ ). Ainsi, en exprimant la variation d'énergie électrique associée à l'expression précédente :

$$dW_{prov,elec} = V dQ = C_0 V dV - \alpha(x_1) u_3(x_1) V dV \quad (\text{III.36})$$

L'identification des paramètres de l'équation par rapport à l'expression (III.34) conduit à leurs expressions :

---

III.5. par exemple lors des travaux effectués avec M. Pierre-Jean COTTINET lors de son doctorat - [Cot10]

$$\begin{aligned} C_0 &= \frac{wL_p \varepsilon_{33}^T}{h_p} \\ \alpha(x_1) u_3(x_1) &= \frac{M_{31}(1-\nu_p^E) h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p + h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=L_p} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.37})$$

dans lequel on pourra noter la dépendance du facteur de force à la déformée de la structure.

### Aspects mécaniques

Le paragraphe précédent a permis de mettre en évidence le modèle à constantes localisées d'un point de vue électrique. Concernant l'équation constitutive mécanique, il est maintenant considéré que seule une excitation mécanique est appliquée. Dans ce cas, l'énergie fournie (mécanique donc) est donnée par :

$$\begin{aligned} dW_{prov,meca} &= \int_0^w \int_0^{L_b} \int_{-h_n}^{h_b+h_p-h_n} T_1 dS_1 dx_3 dx_1 dx_2 \\ &= c_b I_b \int_0^{L_b} \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} d \left( \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} \right) dx_1 + A \int_0^{L_p} \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} d \left( \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} \right) dx_1 \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{M_{31}(1-\nu_p^E) h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p + h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) V^2 d \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=L_p} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.38})$$

avec les constantes  $A$  et  $I_b$  calculées dans le paragraphe précédent (respectivement Eqs. (III.26) et (III.30)). Là encore, deux types d'énergie, l'une purement mécanique et l'autre dénotant de la conversion électromécanique, apparaissent, et peuvent être identifiées à partir de l'expression d'une force de rappel composée d'un terme purement mécanique et d'un autre électromécanique :

$$dW_{prov,meca} = K(x_1) u_3(x_1) du_3(x_1) + \frac{1}{2} \alpha(x_1) V^2 du_3(x_1) \quad (\text{III.39})$$

avec  $K(x_1)$  la raideur équivalente du système à la position d'observation  $x_1$ . En identifiant les termes des expressions (III.38) et (III.39), il vient alors :

$$\begin{aligned} K(x) u_3^2(x) &= c_b I_b \int_0^{L_b} \left[ \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} \right]^2 dx_1 + A \int_0^{L_p} \left[ \frac{\partial^2 u_3(x_1)}{\partial x_1^2} \right]^2 dx_1 \\ \alpha(x) u_3(x) &= \frac{M_{31}(1-\nu_p^E) h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p + h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) \left( \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \Big|_{x_1=L_p} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.40})$$

avec les paramètres de raideur et de facteur de force dépendants à la fois du point d'observation  $x_1$  et de la déformée de la structure. On pourra également noter, fort heureusement d'un point de vue thermodynamique, l'égalité de l'expression donnant le facteur de force entre l'approche électrique (Eq. (III.37)) et celle mécanique.

Enfin, il est également possible d'inclure ici les aspects dynamiques, en considérant la masse dynamique du système donnée par :

$$M(x_1) = \frac{1}{u_3^2(x_1)} \int_0^{L_b} m(x_1) u_3^2(x_1) dx_1 \quad (\text{III.41})$$

où  $m(x_1)$  fait référence à la masse linéique au point  $x_1$  :

$$m(x_1) = \begin{cases} w(h_b\rho_b + h_p\rho_p) & \text{dans la zone active } (x_1 \in [0; L_p] \text{ dans le cas d'une} \\ & \text{poutre encastrée-libre par exemple)} \\ wh_b\rho_b & \text{dans la zone passive } (x_1 \in ]L_p; L_b] \text{ dans le cas d'une} \\ & \text{poutre encastrée-libre par exemple)} \end{cases} \quad (\text{III.42})$$

avec  $\rho_b$  et  $\rho_p$  les masses volumiques respectives du substrat et du polymère électrostrictif.

## Modèle global

Ainsi, en combinant les expressions obtenues dans les cas d'excitation électrique ou mécanique, on obtient le jeu d'équations constitutives global :

$$\begin{aligned} M(x_1)\ddot{u}_3(x_1) + K(x_1)u_3(x_1) &= F - \frac{1}{2}\alpha(x_1)V^2 \\ I &= \alpha(x_1)V\dot{u}_3(x_1) + \alpha(x_1)\dot{V}u_3(x_1) - C_0\dot{V} \end{aligned} \quad (\text{III.43})$$

avec  $F$  la force extérieure appliquée. On voit ainsi qu'une structure électrostrictive peut être, à haut niveau, vue comme un système masse-ressort électromécaniquement couplé, dont le terme de conversion électro-mécanique est dépendant du carré de la tension, et, d'un point de vue électrique, comme une source de courant commandée à la fois par le déplacement, la tension et leurs dérivées (la dépendance à la tension dénotant de la nécessité d'activation du comportement mécano-électrique) en parallèle avec une capacité représentant la nature diélectrique du matériau. Enfin, il est aussi possible d'intégrer des pertes mécaniques au modèle, via par exemple un frottement visqueux représenté par un coefficient d'amortissement  $C$  :

$$\begin{aligned} M(x_1)\ddot{u}_3(x_1) + C(x_1)\dot{u}_3(x_1) + K(x_1)u_3(x_1) &= F - \frac{1}{2}\alpha(x_1)V^2 \\ I &= \alpha(x_1)V\dot{u}_3(x_1) + \alpha(x_1)\dot{V}u_3(x_1) - C_0\dot{V} \end{aligned} \quad (\text{III.44})$$

A titre d'exemple, le cas d'une poutre encastrée-libre dont une force extérieure s'exerce sur l'extrémité libre, de telle sorte que la considération du moment extérieur  $\mathcal{M}$  conduit à la relation :

$$(L_b - x_1)F = w \int_{-h_n}^{h_b+h_p-h_n} T_1 x_3 dx_3 \quad (\text{III.45})$$

peut être analysé en menant une étude similaire à celles des paragraphes précédents, conduisant à l'expression du facteur de force électromécanique :

$$\alpha(x_1) = \begin{cases} \frac{M_{31}(1-\nu_p^E)h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p+h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) \times \left( \frac{-2L_p L_b + L_p^2}{\frac{1}{3}x^3 - L_b x^2} \right) & \text{dans la zone active} \\ & (0 \leq x \leq L_p) \\ \frac{M_{31}(1-\nu_p^E)h_b c_b c_p^E w}{h_p} \left( \frac{h_p+h_b}{h_p c_p^E + h_b c_b} \right) & \text{dans la zone passive} \\ \times \left[ \frac{(-2L_b L_p + L_p^2)c_b h_b^3 w}{2A(-6L_b x^2 - 2x^3) + (a_1 x + a_0)c_b h_b^3 w} \right] & (L_p < x \leq L_b) \end{cases} \quad (\text{III.46})$$

avec :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{12L_b L_p}{c_b h_b^3 w} - \frac{6L_p^2}{c_b h_b^3 w} - \frac{L_b L_p}{A} + \frac{L_p^2}{2A} \\ a_0 &= -\frac{6L_b L_p^2}{c_b h_b^3 w} + \frac{4L_p^3}{c_b h_b^3 w} + \frac{L_b L_p^2}{2A} - \frac{L_p^3}{3A} \end{aligned} \quad (\text{III.47})$$

dont on peut noter l'indépendance aux grandeurs appliquées (déplacement, force, tension et courant). D'un point de vue expérimental et de sa comparaison avec la théorie, la Figure III.19 représente les mesures effectuées en termes d'estimation du facteur de force (obtenu en faisant le rapport entre amplitude de courant à tension appliquée constante et amplitude de vitesse de vibration), et l'application à la récupération d'énergie dans le cas simple d'une résistance seule connectée au système. On voit ainsi une excellente corrélation entre le modèle établi et les mesures. Plus particulièrement et de façon tout à fait logique, on remarque une indépendance du facteur de force à la tension appliquée<sup>III.6</sup>, ainsi que sa diminution à mesure que le point d'observation se rapproche de l'extrémité libre. Enfin, en termes de récupération d'énergie, on voit que le modèle prédit très correctement les résultats expérimentaux, tant en termes de valeur que de position (de la charge adaptée par exemple).

## III.4 Récupération d'énergie

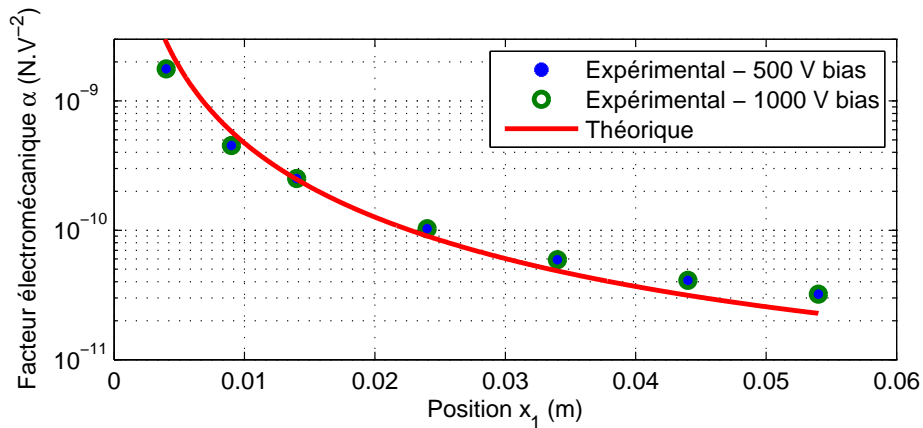
### III.4.1 Application des polymères électrostrictifs à la récupération d'énergie

Dans cette partie il est proposé d'analyser les capacités de récupération d'énergie vibratoire utilisant des polymères électrostrictifs ainsi que de développer des techniques d'amélioration de l'extraction d'énergie dérivées des techniques SSH dans le cas piézoélectrique. Ainsi qu'exposé précédemment, les polymères électrostrictifs présentent l'intérêt, notamment face aux matériaux piézoélectriques, de conformabilité et de souplesse, faisant d'eux des éléments de choix dans certains cas d'applications telles que la récupération d'énergie fluide (micro-éolienne ou énergie des vagues par exemple - [Sy114, MOCA10]) ou sur des structures souples.

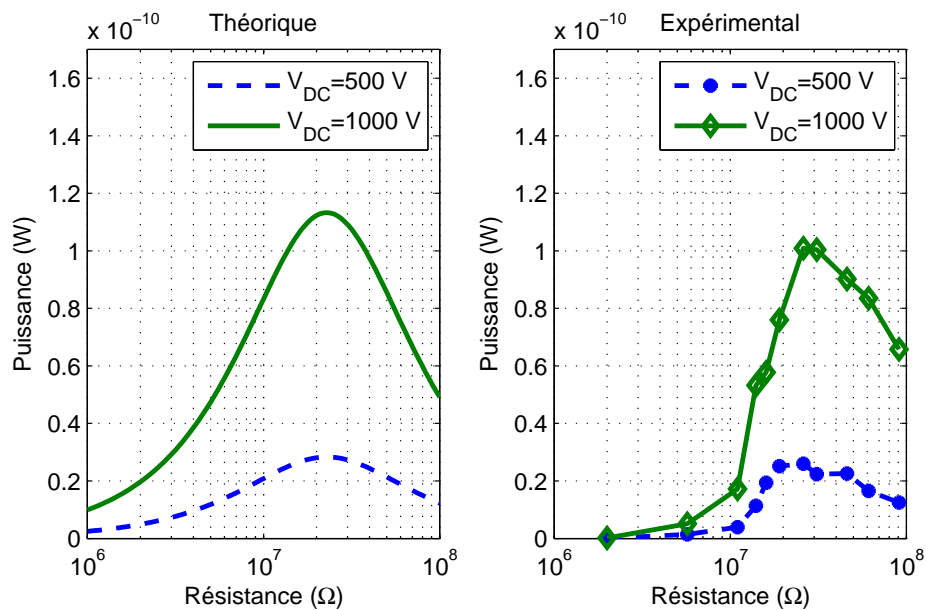
Du fait de la nature électrostatique et de l'activité électromécanique activée par l'application d'un champ électrique, deux approches différentes sont possibles, soit

---

III.6. montrant par ailleurs un effet de cette dernière sur la déformée mécanique négligeable en comparaison de celle engendrée par la force en bout de poutre.



(a) Facteur de force



(b) Puissance récupérée sur une charge résistive

Figure III.19 – Evaluation expérimentale du modèle à constantes localisées.

en utilisant des cycles dérivées des systèmes purement électrostatiques ([RLH<sup>+</sup>07, LRHZ05, LCGL12]), soit en comportement pseudo-piézoélectrique par l'application d'un champ de polarisation ([CGG<sup>+</sup>10, CLG<sup>+</sup>11, LCGL12]). D'un point de vue applicatif, cette dernière approche semble plus intéressante car limitant les pertes de charge et de décharge du polymère (les seules pertes étant dues à la conduction, qui restent relativement faibles - [WLP<sup>+</sup>15])<sup>III.7</sup>, tout en étant bien plus simple à mettre en œuvre car ne nécessitant pas de contrôler constamment les sources d'énergie extérieures.

Ainsi, l'application d'un champ électrique (ou de manière similaire, une tension)

III.7. On pourra même noter la possibilité d'utiliser des électrets pour la polarisation, rendant le système totalement autonome, mais avec des performances fortement réduites ([BCG<sup>+</sup>12, JMCS12]).

de polarisation conduit à un mode de fonctionnement pseudo-piézoélectrique. En effet, en se basant sur le modèle précédemment établi et en considérant la composante alternative  $V_{ac}$  de la tension bien inférieure à celle de polarisation  $V_{DC}$ , on obtient alors le jeu d'équations suivant<sup>III.8</sup> :

$$\begin{aligned} M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku &= F - \frac{1}{2}\alpha V_{DC}^2 \\ I &= \alpha V_{DC}\dot{u} - C_0\dot{V}_{ac} \end{aligned} \quad (\text{III.48})$$

dont l'équation électrique est similaire au modèle à constantes localisées dans le cas piézoélectrique (Eq. (II.35)), avec un facteur de force équivalent égal à  $\alpha V_{DC}$ .

### III.4.2 Figure de mérite des matériaux électrostrictifs pour la conversion d'énergie

Du fait de la dépendance de la réponse des matériaux électrostrictifs aux grandeurs externes appliquées (déformation) mais aussi aux conditions internes (champ de polarisation) la comparaison des performances des matériaux et techniques présentés dans la littérature pour la récupération d'énergie peut s'avérer délicate. A titre d'exemple, le Tableau III.1 expose les densités d'énergie associées à différents travaux. On voit ainsi d'importantes différences apparaître d'une étude à l'autre. Néanmoins, il convient également de noter les conditions significativement disparates d'utilisation ; qu'elles soient externes ou internes.

Ainsi, cette partie propose d'établir une figure de mérite permettant une comparaison plus juste entre les matériaux. Pour ce faire, une analyse du comportement en mode pseudo-piézoélectrique sera considérée ; la figure de mérite établie étant néanmoins indépendante du type de technique d'extraction de l'énergie considérée. L'expression du courant  $I$  généré par le couplage électromécanique<sup>III.9</sup> s'exprime en

	Ren et al. ([RLH+07])	Cottinet et al. ([CGG+10])	Lallart et al. ([LCL+10])
Matériau	Copolymère $P(VDF - TrFE)$ irradié	Polyuréthane	Terpolymère $P(VDF - TrFE - CFE)$ avec noir de carbone (1% wt)
Niveau de déformation	3%	$8.10^{-3}\%$	0,7%
Champ électrique appliqué	$67 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$5 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$10 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
Densité d'énergie	$40 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$20 \text{ pJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$170 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$

Tableau III.1 – Energie récupérée à l'aide de polymères électrostrictifs et conditions d'utilisations.

III.8. Par soucis de clarté, la position  $x_1$  n'est ici pas explicitée et le déplacement de flexion est simplement noté  $u$ .

III.9. On néglige ici la conduction ; cette dernière ne contribuant d'ailleurs pas au mécanisme de conversion.

fonction de la tension au niveau du polymère  $V_{pol}$  (en considérant le champ électrique  $E$  uniforme selon l'épaisseur  $e$  du matériau) et de la déformation  $S$  du polymère par, en considérant une excitation longitudinale (sans autre déformation que sur l'axe 1) :

$$I = \Lambda \dot{D}_3 = \Lambda \left( \epsilon_{33} + 2 \frac{M_{31}}{s_{11}} S_1 - 6 \frac{M_{31}^2}{s} \left( \frac{V_{pol}}{e} \right)^2 \right) \left( \frac{\dot{V}_{pol}}{e} \right) + 2 \Lambda \frac{M_{31}}{s_{11}} \left( \frac{V_{pol}}{e} \right) \dot{S}_1 \quad (\text{III.49})$$

avec  $\epsilon$ ,  $s$  et  $M$  étant respectivement la permittivité, compliance et coefficient d'électrostriction, et  $\Lambda$  la surface du matériau. En négligeant les effets sur la permittivité initiale du matériau, ainsi que la composante alternative de la tension en statique (de telle sorte que la tension du polymère soit à peu près égale à la tension de polarisation  $V_{bias}$ ), l'équation (III.49) se simplifie selon :

$$I \approx \frac{\Lambda \epsilon_{33}}{e} \dot{V}_{pol} + 2 \Lambda \frac{M_{31}}{s_{11}} \left( \frac{V_{bias}}{e} \right) \dot{S}_1 \quad (\text{III.50})$$

La tension  $V_R$  aux bornes de la résistance utilisée pour simuler une charge dans le cas de la récupération d'énergie, connectée à l'élément électroactif via une source de polarisation (Figure III.20), s'exprime en fonction de la tension de polarisation et de la tension aux bornes du polymère selon :

$$V_R = V_{bias} - V_{pol} \quad (\text{III.51})$$

conduisant à l'expression en régime harmonique de  $V_R$ , notée  $\tilde{V}_R$  (avec  $f$  la fréquence d'excitation), en combinant les équations (III.50) et (III.51), ainsi qu'en considérant  $I = V_R/R$  :

$$\tilde{V}_R = R \frac{j4\pi f \frac{M_{31}}{s_{11}} \frac{\Lambda}{e} V_{bias}}{1 + j2\pi R \frac{\Lambda \epsilon_{33}}{e} f} \tilde{S}_1 \quad (\text{III.52})$$

avec  $\tilde{S}_1$  la déformation dans le domaine fréquentiel. Ceci conduit ainsi à l'expression de la puissance  $P$  reçue par cette charge :

$$P = \frac{2R \left( 2\pi f V_{bias} \frac{\Lambda}{e} \frac{M_{31}}{s_{11}} \right)^2}{1 + \left( 2\pi f \frac{\Lambda}{e} \epsilon_{33} R \right)^2} S_M^2 \quad (\text{III.53})$$

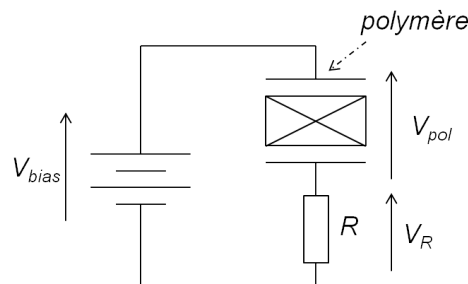


Figure III.20 – Récupération d'énergie AC en mode pseudo-piézoélectrique.

où  $S_M$  dénote de l'amplitude de déformation, et dont la valeur maximale  $P_{max}$  (obtenue pour une résistance optimale  $R_{opt} = e / (\Lambda \epsilon_{33} 2\pi f)$ ) est donnée par, en fonction du champ de polarisation  $E_{bias}$  appliqué au polymère :

$$P_{max} = 2\pi \left[ \frac{1}{\epsilon_{33}} \left( \frac{M_{31}}{s_{11}} \right)^2 \right] \Lambda e E_{bias}^2 S_M^2 \quad (\text{III.54})$$

conduisant à la densité de puissance récupérable maximale  $p_{max}$  :

$$p_{max} = 2\pi \left[ \frac{1}{\epsilon_{33}} \left( \frac{M_{31}}{s_{11}} \right)^2 \right] E_{bias}^2 S_M^2 \quad (\text{III.55})$$

On voit ainsi apparaître dans cette expression des grandeurs et caractéristiques externes et internes. Les premières correspondent aux termes de champ électrique de polarisation (au carré), de fréquence et de niveau de déformation (au carré également). Le second terme est quant à lui directement relié aux caractéristiques du matériaux, faisant intervenir la permittivité, le coefficient d'électrostriction au carré et l'inverse de la souplesse au carré (ou, de manière analogue, le module d'Young au carré dans le cas unidimensionnel). Ainsi, pour un matériau donné, on peut définir la figure de mérite  $FdM$  suivante :

$$FdM = \frac{1}{\epsilon_{33}} \left( \frac{M_{31}}{s_{11}} \right)^2 \quad (\text{III.56})$$

dont les dimensions sont  $\text{J.m}^{-3} \cdot (\text{V/M})^{-2} \cdot (\text{m/m})^{-2} \cdot \text{cycle}^{-1}$ . On voit ainsi que les capacités de récupération d'énergie dépendent de l'inverse de la permittivité (dénotant de la capacité à transférer aisément les charges électriques), ainsi que du coefficient d'électrostriction (relié à la génération de charge) au carré et de la rigidité au carré (relatant la capacité à emmagasiner de l'énergie mécanique).

Il est alors possible de comparer différents matériaux (Figure III.21), dont les courbes "isoperformances" sont des droites telles que le produit  $(M_{31}/s_{11})^2$  est proportionnel à l'inverse de la permittivité (lignes en pointillés sur la Figure III.21).

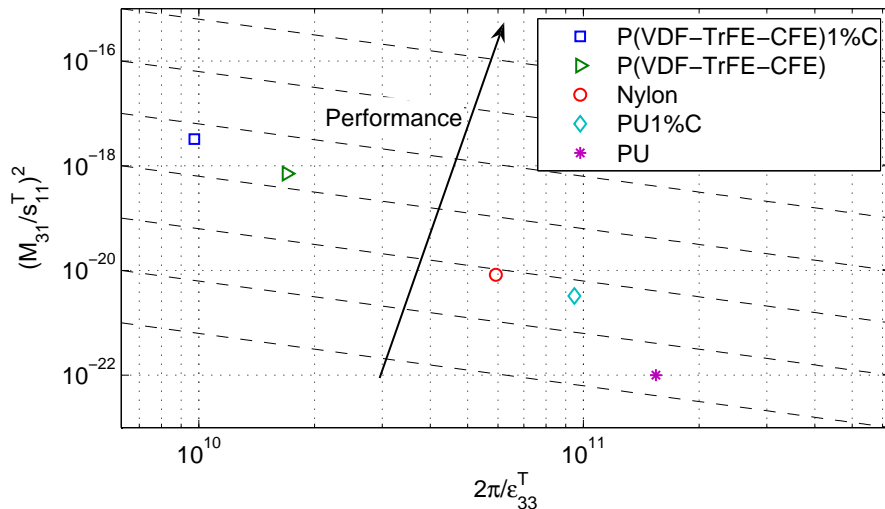


Figure III.21 – Comparaison graphique de matériaux pour la récupération d'énergie.



En comparant ce critère à d'autres critères couramment utilisés, on obtient ainsi le Tableau III.2, montrant une excellente corrélation entre la figure de mérite proposée et les résultats expérimentaux en termes de puissance maximale récupérable. Enfin, en reprenant les données du Tableau III.1 et en y incluant la figure de mérite proposée (en divisant par la champ électrique au carré et par la déformation au carré), on obtient ainsi une base de comparaison qui est bien plus logique par rapport à ce qu'il pourrait être attendu (Tableau III.3).

Bien entendu, les paramètres intrinsèques définissant la figure de mérite précédente ne sont pas les seuls à prendre en compte lors de la conception d'un microgénérateur électrostrictif. Notamment, citons l'importance d'autres paramètres tels que la déformation maximale qui, en plus de fixer de manière externe la puissance maximale, est intimement liée à l'application visée. Le champ électrique maximale admissible est également à prendre en compte, car son augmentation permet une amélioration significative de la puissance de sortie. Les pertes diélectriques, consommant de l'énergie, sont également un paramètre non négligeable, et bien souvent lié à l'augmentation (quelquefois uniquement apparente cependant) du coefficient d'électrostriction, et peuvent également montrer une évolution non-linéaire avec le champ électrique (conduisant à un point optimal ne coïncidant pas avec le champ électrique maximal admissible). Enfin, il est à noter que l'interfaçage, par exemple électrique, est également un facteur important dans la conception d'un microgénérateur. A ce titre, alors que la figure de mérite prône la diminution de la permittivité, une capacité faible du matériau rend l'extraction des charges délicate à concevoir. Ainsi, comme souligné à de nombreuses reprises dans ce manuscrit, une nécessité d'approche globale, embrassant non seulement le matériau mais aussi toute la chaîne de conversion d'énergie (incluant notamment domaines mécanique et électrique, mais aussi leurs interfaces), est nécessaire pour disposer d'un système optimal.

### III.4.3 Interfaces électriques et traitement non-linéaire de la tension de sortie des microgénérateurs électrostrictifs

Alors que la partie précédente s'est plutôt intéressée à l'aspect "matériau", il est proposé ici d'étudier les interfaces électriques permettant d'extraire l'énergie du transducteur. Plus particulièrement, comme exposé précédemment, il sera considéré l'utilisation d'une polarisation via une source de tension continue conduisant à un fonctionnement pseudo-piézoélectrique. Plus, précisément, en reprenant les équations constitutives locales de l'électrostriction et en considérant une partie continue et une partie alternative du champ électrique  $E$  ( $E = E_{DC} + E_{AC}$ ,  $E_{DC}$  étant la composante continue et  $E_{AC}$  la composante alternative), il vient :

$$\begin{aligned} S &= sT + M(E_{DC} + E_{AC})^2 \\ D &= \epsilon(E_{DC} + E_{AC}) + 2M(E_{DC} + E_{AC})T \end{aligned} \quad (\text{III.57})$$

Ainsi, en considérant la contribution dynamique du champ électrique négligeable devant celle de polarisation, le fonctionnement statique est fixe tel que :

Matériau	$\epsilon_{33}^T$	$\left(\frac{M_{31}}{sE_{11}}\right)^2$	$\frac{2\pi}{\epsilon_{33}^T} \left(\frac{M_{31}}{sE_{11}}\right)^2$	Puissance expérimentale
Type de figure de mérite	Energie convertie ([ZLP+02])	Puissance à charge constante ([GLP+09, LGG+09, CGG+10])	Puissance maximale	
<i>PU</i>	1	1	1	<b>1</b>
<i>PU1%C</i>	1.63	32	<b>20.0</b>	<b>21.5</b>
Nylon	2.61	83	<b>31.7</b>	<b>32.9</b>
<i>P(VDF - TrFE - CE)</i>	9.13	7056	<b>773</b>	<b>731</b>
<i>P(VDF - TrFE - CE)1%C</i>	15.9	32400	<b>2040</b>	<b>2060</b>

Tableau III.2 – Comparaison de plusieurs figures de mérite avec la puissance expérimentale maximale moyenne (les valeurs sont normalisées par rapport aux résultats obtenus dans le cas du polyuréthane pur).

	Ren et al. ([RLH <sup>+</sup> 07])	Cottinet et al. ([CGG <sup>+</sup> 10])	Lallart et al. ([LCL <sup>+</sup> 10])
Matériau	Copolymère <i>P(VDF - TrFE)</i> irradié	Polyuréthane	Terpolymère <i>P(VDF - TrFE - CFE)</i> avec noir de carbone (1% wt)
Niveau de déformation	3%	$8.10^{-3}\%$	0,7%
Champ électrique appliqué	$67 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$5 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$10 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
Densité d'énergie	$40 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$20 \text{ pJ} \cdot \text{cm}^{-3}$	$170 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$
Figure de mérite $(\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot (\text{V}/\text{M})^{-2} \cdot (\text{m}/\text{m})^{-2} \cdot \text{cycle}^{-1})$	$10.10^{-9}$	$125.10^{-12}$	$34.10^{-9}$

Tableau III.3 – Energies récupérées à l'aide de polymères électrostrictifs et conditions d'utilisations.

$$\begin{aligned} S &= sT + ME_{DC}^2 \\ D &= \epsilon E_{DC} + 2ME_{DC}T \end{aligned} \quad (\text{III.58})$$

Néanmoins, la contribution dynamique s'exprime par :

$$\begin{aligned} dS &= sdT + 2ME_{DC}dE_{AC} \\ dD &= (\epsilon + 2MT)dE_{AC} + 2ME_{DC}dT \end{aligned} \quad (\text{III.59})$$

qui, en négligeant l'effet diélectrique de la contrainte s'approche par :

$$\begin{aligned} dS &= sdT + 2ME_{DC}dE_{AC} \\ dD &\approx \epsilon dE_{AC} + 2ME_{DC}dT \end{aligned} \quad (\text{III.60})$$

C'est précisément cette dernière équation qui peut être reliée au fonctionnement piézoélectrique, en faisant apparaître un coefficient de charge  $d$  équivalent ( $d = 2ME_{DC}$ ). Ainsi, ce mode de fonctionnement est plus précisément un mode pseudo-piézoélectrique dynamique. Dès lors, pour les interfaces de récupération d'énergie et plus particulièrement pour le redressement de la tension (en vue d'une sortie à tension constante), il convient de ne laisser d'abord passer que cette composante dynamique par un découplage, conduisant dans le cas standard au circuit présenté en Figure III.22.

Dans le cas de la récupération DC standard, le choix de la capacité de découplage  $C_b$  se fait en considérant que l'énergie de polarisation initialement fournie par la source continue se doit d'être la plus faible possible (idéalement négligeable par rapport à celle fournie au matériau électroactif,  $C_b \ll C_0$ , avec  $C_0$  la capacité de l'élément électrostrictif), mais également suffisamment importante pour laisser passer la composante alternative (c'est-à-dire avec une fréquence de coupure  $f_c$  inférieure à la fréquence d'excitation  $f - C \gg 1/(2\pi Rf)$  avec  $R$  la charge équivalente connectée après la capacité III.10). Par la suite, en considérant le système en régime permanent dans la bande passante et en considérant les diodes idéales, le calcul de la puissance  $P_{DC}$  récupérée se fait de manière strictement identique au cas piézoélectrique, conduisant à :

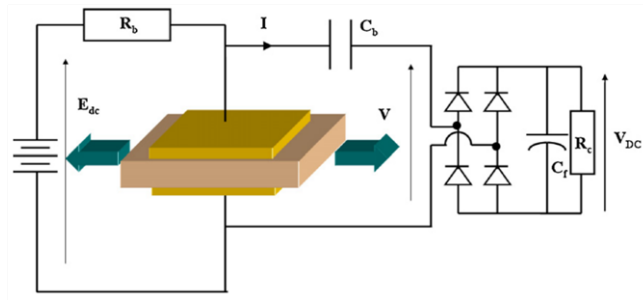


Figure III.22 – Récupération d'énergie avec tension de sortie continue en mode pseudo-piézoélectrique ([CGL11]).

---

III.10. On remarque ainsi, pour une capacité de découplage fixée, que le système ne peut fonctionner que pour des valeurs de résistance suffisamment importantes, ce qui par ailleurs est en accord avec le fait que la résistance optimale des systèmes électrostrictifs est relativement élevée (typiquement de l'ordre de quelques  $M\Omega$ ).

$$P_{DC} = \frac{(4\alpha V_{pol} f)^2 R_C}{(1 + 4R_C C_0 f)^2} S_M^2 \quad (\text{III.61})$$

avec  $\alpha$  le coefficient électromécanique ( $\alpha = -2\frac{M}{s} \frac{\Lambda}{e}$  avec  $M$  et  $s$  le coefficient d'électrostriction et la compliance et  $\Lambda$  et  $e$  la surface et l'épaisseur de l'élément électrostrictif),  $C_0$  la capacité bloquée ( $C_0 = \frac{\epsilon \Lambda}{e}$  où  $\epsilon$  représente la permittivité du matériau électrostrictif),  $V_{pol}$  la tension de polarisation et  $S_M$  l'amplitude de la déformation III.11. Il est également possible à partir de cette expression de tirer l'expression de la résistance adaptée  $(R_C)_{DC}|_{opt}$  et donc de la puissance maximale  $P_{DC}|_{max}$  :

$$\begin{cases} (R_C)_{DC}|_{opt} = \frac{1}{4C_0 f} \\ P_{DC}|_{max} = \frac{(\alpha V_{pol})^2}{C_0} f S_M^2 \end{cases} \quad (\text{III.62})$$

Enfin, comme pour la récupération d'énergie utilisant des matériaux piézoélectriques, il est également possible d'utiliser une structure non-linéaire de type SSHI afin d'améliorer les capacités de conversion (Figure III.23). Néanmoins, il convient ici de noter qu'il s'agit d'une approche "SSHI dynamique", où la tension est cette fois-ci inversée par rapport à la tension de polarisation, dont l'expression de la puissance récupérée  $P_{SSHI}$  s'exprime par :

$$P_{SSHI} = \frac{(4\alpha V_{pol} f)^2 R_C}{(1 + 2(1 - \gamma) R_C C_0 f)^2} S_M^2 \quad (\text{III.63})$$

dont la valeur optimale de résistance  $(R_C)_{SSHI}|_{opt}$  et la puissance maximale  $P_{SSHI}|_{max}$  sont données par :

$$\begin{cases} (R_C)_{SSHI}|_{opt} = \frac{1}{2(1-\gamma)C_0 f} \\ P_{SSHI}|_{max} = \frac{2}{1-\gamma} \frac{(\alpha V_{pol})^2}{C_0} f S_M^2 \end{cases} \quad (\text{III.64})$$

la puissance maximale étant, comme dans le cas piézoélectrique,  $2/(1 - \gamma)$  fois plus importante que dans le cas sans traitement.

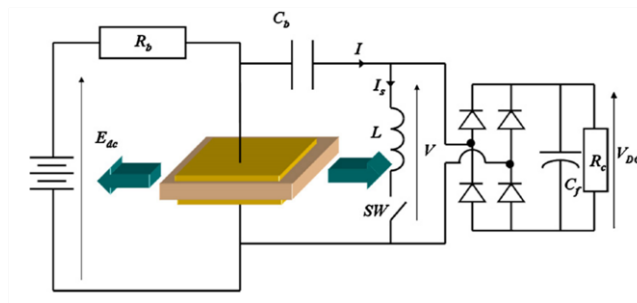


Figure III.23 – Récupération d'énergie avec interface SSHI et tension de sortie continue en mode pseudo-piézoélectrique ([CGL11]).

III.11. Contrairement au cas piézoélectrique où un effet d'amortissement peut apparaître, l'effet du couplage électrique vers mécanique est négligeable dans quasiment tous les cas en récupération d'énergie exploitant l'électrostriction.

Ces résultats théoriques sont en bon accord avec les relevés expérimentaux (Figure III.24), confirmant par ailleurs la supériorité de la technique SSHI pour améliorer la conversion et donc augmenter les capacités de récupération d'énergie<sup>III.12</sup>. Ceci se fait cependant au prix d'une charge optimale plus grande que dans le cas sans commutation, ce qui peut être problématique au vu de l'impédance déjà élevée en standard. Néanmoins, il est également possible d'envisager une technique "SSHI dynamique série" pour diminuer cette charge optimale. Enfin, et toujours comme dans le cas piézoélectrique, on remarque une puissance maximale sans redressement (mais avec filtrage de la composante continue)<sup>III.13</sup> supérieure à celle avec redressement.

### III.5 Conclusion : place des actions de recherche sur les matériaux électrostrictifs dans le monde scientifique et socio-économique et la formation

Alors que les recherches sur les applications des éléments piézoélectriques sont pour la plupart relativement avancées en termes de niveau de maturité technologique (TRL), et, sous certaines conditions, en passe d'être intégrées dans des applications semi-industrielles à plus ou moins long terme (comme démontré par les projets de recherche publics notamment - par exemple le projet ANR BESTMEMS), tout est encore à faire concernant l'utilisation de polymères électrostrictifs, notamment en termes de récupération d'énergie. Ainsi, les travaux présentés ici s'inscrivent plus en

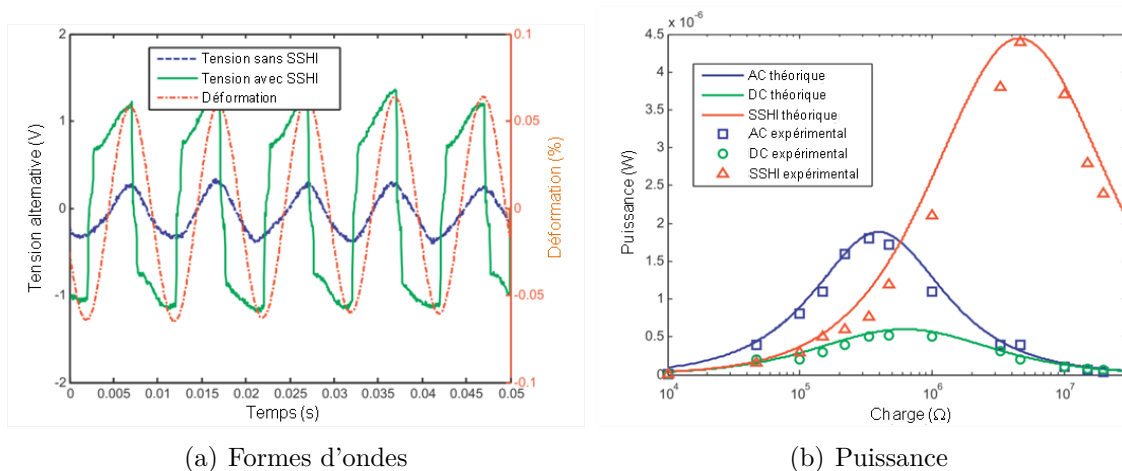


Figure III.24 – Formes d'ondes et puissances pour les structures de récupération d'énergie DC exploitant l'électrostriction (adapté de [CGL11]).

III.12. Le couplage inverse étant négligeable dans l'écrasante majorité des cas (produit du coefficient de couplage au carré par le facteur de qualité mécanique faible), l'intérêt du SSHI se vérifie toujours pour les microgénérateurs électrostrictifs.

III.13. Les détails du calcul théorique de cette configuration peut être trouvée dans [CGL11]; son expression pouvant également être directement adaptée du cas piézoélectrique AC.

amont que les recherches exposées dans le chapitre précédent, mais sont toujours fortement colorés par une volonté d'application. Néanmoins, la conjoncture industrielle actuelle ne permet pas totalement d'être optimiste concernant ces matériaux, par exemple avec l'arrêt de l'activité sur les polymères électroactifs de la part de l'entreprise Danfoss (malgré un appel ouvert pendant plusieurs années, via la distribution de prix, sur la proposition d'applications concrètes de ces polymères), ou encore la restructuration et l'abandon de certaines branches d'activités de la part de la spin-off (de l'université de Penn Stat) Novasentis ([nov] - anciennement SPS - *Strategic Polymer Sciences*), après des années fastes notamment grâce à des fonds publics de l'administration américaine (notamment la Défense), et ce malgré quelques sursauts localisés tel que le projet ANR SEASEA ([Syl14]).

Cependant, ce constat, quelque peu pessimiste, est à nuancer par rapport à certains points exposés dans ce chapitre. Notamment, à partir de la compréhension des phénomènes physiques à l'origine de l'électrostriction, il a été possible d'élaborer des matériaux performants<sup>III.14</sup> ([CGL<sup>+</sup>14, CGC<sup>+</sup>14]), conduisant à un intérêt certain et croissant de la part d'investisseurs potentiels, comme en attestent plusieurs collaborations et contrats de recherche au sein du laboratoire (principalement portés sur cette thématique par Jean-Fabien CAPSAL et Pierre-Jean COTTINET - citons à titre d'exemple des applications prometteuses dans le domaine médical ou pour les applications haptiques). L'application des polymères électrostrictifs en tant qu'actionneurs n'est donc pas totalement compromise, voire même s'avère prometteuse. Le principal problème tient à la valeur de tension à appliquer, significativement importante, mais pouvant être significativement réduite par le développement de structures multicouches (voir par exemple l'actionneur développé par Samsung pour un système de focus dans les téléphones portables - [CLK<sup>+</sup>11, KCL<sup>+</sup>10]), relativement aisé du fait du processus d'élaboration assez simple et de la conformabilité des matériaux. C'est notamment grâce à cette compréhension et ces développements que les polymères électrostrictifs trouvent toujours des potentialités d'applications dans le domaine industriel, mais aussi dans la recherche et la formation; citons, à titre d'exemple, l'arrivée d'une doctorante (Kritsadi THETPRAPHI) travaillant sur le sujet (couplages dans les polymères électrostrictifs) en Septembre 2016.

Outre cet aspect d'application, l'utilisation du modèle proposé reste encore un point de débat (constructif bien entendu) entre les chercheurs et notamment au sein même du laboratoire. Ainsi, l'animation de discussions autour de l'origine de l'électrostriction (forces de Maxwell ou non), est une thématique qui se devra d'être abordée. De même, l'unification de l'approche faite pour la modélisation des éléments électrostrictifs et de celle pour les matériaux ferroélectriques (Paragraphe II.2)<sup>III.15</sup> est un axe de recherche attractif, permettant la mise en place de lois unifiées mais toujours porteuses de significations physiques.

---

III.14. Ce point, et plus particulièrement la méthode employée pour effectuer cette recherche, est par ailleurs un excellent exemple du fait de tirer des questionnements scientifiques à partir d'un réel problème industriel.

III.15. Cette dernière étant survenue de manière antérieure dans le déroulement des recherches.

Enfin, concernant la récupération d'énergie, les niveaux de champ électrique et de tension requis rendent très difficilement exploitables les techniques proposées, qu'elles soient basées sur des cycles de charge/décharge ou un mode de fonctionnement pseudo-piézoélectrique, bien que cette dernière approche semble plus viable du fait d'une simplicité d'implémentation et de pertes réduites. Néanmoins, l'utilisation d'électrets semble apporter une réponse, malheureusement encore très partielle et actuellement peu convaincante du fait de la faible polarisation permise par ces matériaux ainsi que l'instabilité quant à la rémanence de la charge. Une voie, non encore exploitée mais prometteuse, pourrait consister en l'utilisation de circuits auto-synchrones, permettant un démarrage à partir de perturbations externes (par exemple bruit ambiant), déjà utilisés avec succès pour les systèmes capacitifs <sup>III.16</sup> ([dQD11, DKB<sup>+</sup>14, LRW<sup>+</sup>14, WLMC15, WRM<sup>+</sup>15, LWMC15]).

En conclusion, l'application des polymères électrostrictifs, notamment pour la récupération d'énergie (thématique d'application la plus étudiée dans le travail de recherche), est encore à un stade de recherche très amont, avec des débouchés industriels encore plus prospectifs que les matériaux piézoélectriques. Néanmoins, les polymères électrostrictifs trouvent leur place dans de nombreux environnements requérant de fortes déformations à des fréquences relativement faibles, et il convient de bien vérifier les fondements de leur difficulté d'application avant d'abandonner cette voie, d'autant plus que de nouveaux matériaux et/ou interfaces électriques adaptées font tous les jours leur apparition.

---

III.16. J'en profite ici pour remercier Elie Lefeuvre, Professeur à Paris Sud et ancien membre du LGEF, de m'avoir soufflé cette idée ainsi que de ses excellents conseils sur le sujet.





# Chapitre IV

## Autres mécanismes de conversion (2009-2016)

*Ce dernier chapitre propose une description succincte d'autres actions de recherche plus localisées menées sur d'autres types de couplages électroactifs ou sources d'énergie. Dans un premier temps, l'étude de systèmes de récupération d'énergie vibratoire par couplage électrostatique sera abordée. Plus particulièrement, des moyens d'augmentation de la variation de capacité, par l'insertion d'une couche à forte permittivité ou par utilisation de motifs auto-similaires, seront exposés. Par la suite, de nouvelles voies de couplage électrothermique seront développées, basées soit sur l'étude préalable de la polarisation des polymères électrostrictifs, soit sur le passage par le domaine magnétique en exploitant les variations de perméabilité de matériaux ferromagnétiques.*

Contributeurs principaux aux actions de recherche (par ordre alphabétique) : Jean-Fabien CAPSAL (conversion électrothermique via matériaux électrostrictifs), Lionel PETIT (conversion électrostatique, matériaux ferromagnétiques), Gaël SEBALD (matériaux ferromagnétiques), Sébastien PRUVOST (conversion électrostatique).

Thèse associée : Liuqing WANG (2011-2014 - conversion électrostatique, matériaux ferromagnétiques).

## IV.1 Conversion électrostatique

### IV.1.1 Récupération d'énergie par dispositifs électrostatiques

Bien que n'étant pas au cœur de l'activité de recherche, les systèmes électrostatiques, exploitant la variation de capacité, sont néanmoins assez répandus dans le monde scientifique, notamment dans le cas vibratoire<sup>IV.1</sup>. Ces systèmes sont particulièrement attrayants dès lors que les dimensions sont très réduites, de l'ordre de quelques  $\text{mm}^3$  voire en-deçà. Les systèmes électrostatiques se décomposent typiquement en trois architectures différentes (Figure IV.1 - [BDCS10]), selon la direction de vibration (dans le plan ou hors du plan) ainsi que la grandeur variable (entrefer ou surface).

Les systèmes électrostatiques étant basés sur la variation d'un paramètre (et non d'une grandeur) et étant donc par nature passifs, il est ainsi nécessaire de les polariser afin de disposer d'un mécanisme de conversion d'énergie. Typiquement, les techniques d'extraction et de récupération d'énergie reposent sur des cycles actifs (Ericsson - tension constante - ou Stirling - charge constante), ainsi qu'illustré en Figure IV.2 ([MMA<sup>+</sup>01, BDCS10]). Notons également la possibilité d'utiliser des électrets pour assurer la polarisation ([SBPB01, BDS10]) comme dans le cas électrostrictifs, ou l'utilisation de circuit auto-synchrones afin de s'affranchir de sources extérieures ([dQD11, DKB<sup>+</sup>14, LRW<sup>+</sup>14, WLMC15, WRM<sup>+</sup>15, LWMC15]).

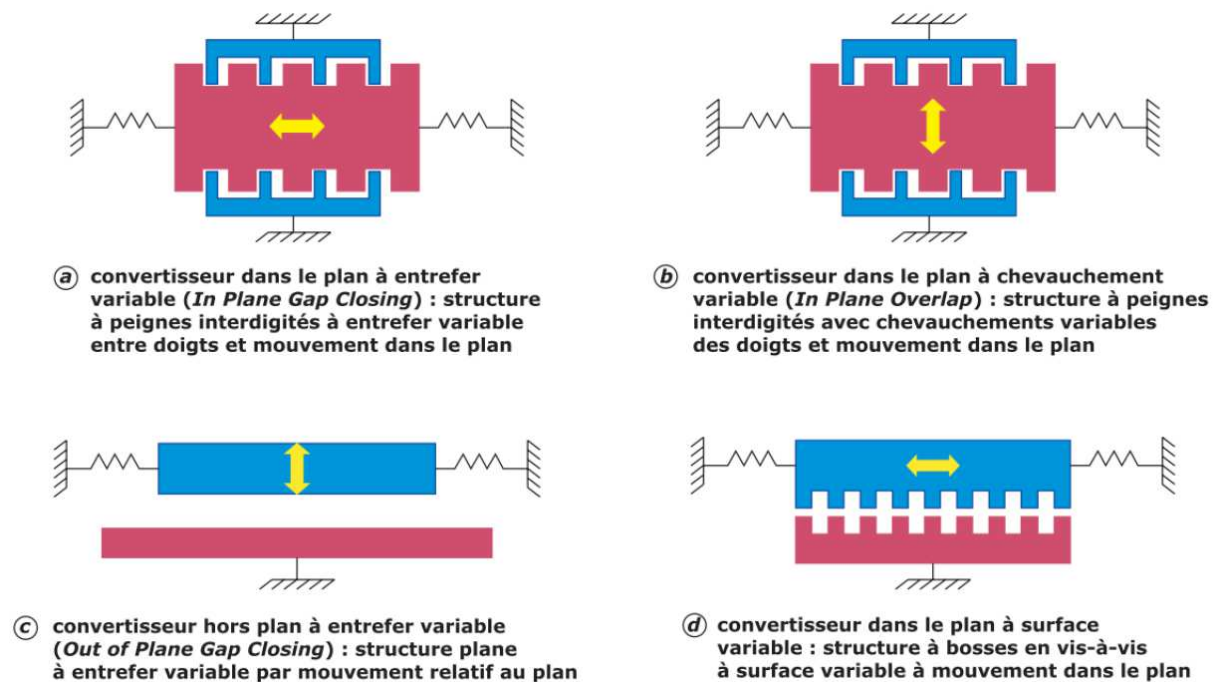


Figure IV.1 – Architectures de systèmes de récupération d'énergie électrostatique ([BDCS10]).

IV.1. On peut néanmoins rencontrer des cas où la variation de capacité est obtenue par variation de permittivité uniquement, engendrée par d'autres sources comme la température ([ZPCG11]).

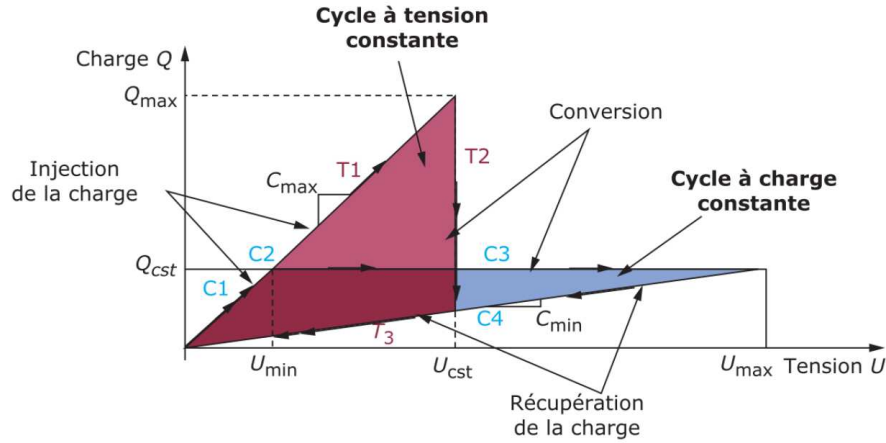


Figure IV.2 – Cycles de charge/décharge pour la récupération d'énergie électrostatique ([BDCS10]).

Dans le cas de cycles actifs (Ericsson et Stirling)<sup>IV.2</sup>, l'énergie totale récupérée (extraite moins fournie)  $W$  s'exprime par :

$$\begin{aligned} W_{Ericsson} &= \frac{1}{2} \left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) C_{max} V_0^2 = \left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) W_0 \\ W_{Stirling} &= \frac{1}{2} \left(\frac{C_{max}}{C_{min}} - 1\right) C_{max} V_0^2 = \left(\frac{C_{max}}{C_{min}} - 1\right) W_0 \end{aligned} \quad (IV.1)$$

avec  $C_{min}$  et  $C_{max}$  les valeurs minimales et maximales de capacité et  $V_0$  et  $W_0$  les tension et énergie fournies initiales. On remarque ainsi qu'à énergie fournie constante, l'approche par cycle de Stirling s'avère plus intéressante. Néanmoins, lors de l'utilisation de cette dernière, la tension n'est pas fixée et peut atteindre des valeurs importantes. Imposer une tension limite pour le dispositif conduirait à une utilisation préférentielle du Cycle d'Ericsson ([MMMA<sup>+</sup>01])<sup>IV.3</sup>. Néanmoins, quelque soit l'approche choisie, on remarque une forte dépendance avec le rapport de capacité maximale sur minimale. Ainsi, les recherches exposées ici se proposent de présenter des architectures permettant, de manière indépendante de la technique choisie, d'augmenter cette variation de capacité afin de pouvoir convertir une quantité d'énergie plus grande (au prix, bien entendu, d'une plus grande énergie mécanique fournie).

IV.2. L'analyse d'autres types de techniques d'extraction conduirait à une conclusion similaire à celle de ce paragraphe.

IV.3. Dans le cas de systèmes électromécaniques, du fait de la variabilité de l'entrefer, imposer une tension limite est différente de la fixation du champ électrique. En particulier, on peut montrer dans le cas simple d'un entrefer variable que le champ électrique est constant dans le cas d'un cycle de Stirling, et diminue quand la distance inter-électrodes augmente en utilisant le cycle d'Ericsson. Cependant, imposer une tension limite a aussi des origines physiques comme par exemple l'effet de collage électrostatique - [BFL15].

## IV.1.2 Amélioration de la conversion par permittivité variable

La première approche considérée ici consiste à modifier la permittivité du matériau lors du déplacement d'une des électrodes. Alors que la plupart des architectures considèrent un milieu homogène (typiquement de l'air) entre les deux électrodes, il est ici proposé d'ajouter une lame d'un matériau à forte permittivité (Figure IV.3). Dans ce cas, en reprenant les notations de la Figure IV.3 avec  $S$  la surface des électrodes et en notant  $\epsilon$  et  $C$  les permittivités et capacités, on obtient :

$$\begin{aligned} \epsilon_{class} &= \epsilon_0 & C_{class} &= \frac{\epsilon_0 S}{l} \\ \epsilon_{couche} &= \frac{(l_0 + l_1)\epsilon_0 \epsilon_1}{l_1 \epsilon_0 + l_0 \epsilon_1} & C_{couche} &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{l_1 \epsilon_0 + l_0 \epsilon_1} \\ &= \frac{l \epsilon_0 \epsilon_1}{l_1 \epsilon_0 + (l - l_1) \epsilon_1} & &= \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{l_1 \epsilon_0 + (l - l_1) \epsilon_1} \end{aligned} \quad (IV.2)$$

avec les indices “*class*” et “*couche*” dénotant respectivement les cas classique et avec variation de permittivité. Ainsi, alors que dans le cas classique la capacité est uniquement proportionnelle à l'inverse de la distance de telle manière à ce que le rapport de capacité de celle-ci est donnée par :

$$\frac{C_{class}|_{max}}{C_{class}|_{min}} = \frac{l_{max}}{l_{min}} \quad (IV.3)$$

avec  $l_{min}$  et  $l_{max}$  la distance inter-électrode minimale et maximale, ce rapport devient, dans le cas de la configuration avec variation de permittivité :

$$\frac{C_{couche}|_{max}}{C_{couche}|_{min}} = \frac{l_1 \epsilon_0 + (l_{max} - l_1) \epsilon_1}{l_1 \epsilon_0 + (l_{min} - l_1) \epsilon_1} \quad (IV.4)$$

qui permet donc une amplification du rapport de capacité par un facteur du à la variation de permittivité. Plus particulièrement, en considérant que les distances inter-électrodes minimales et maximales sont telles que  $l_{max} \gg l_1$  et  $l_{min} \approx l_1$  cette variation devient :

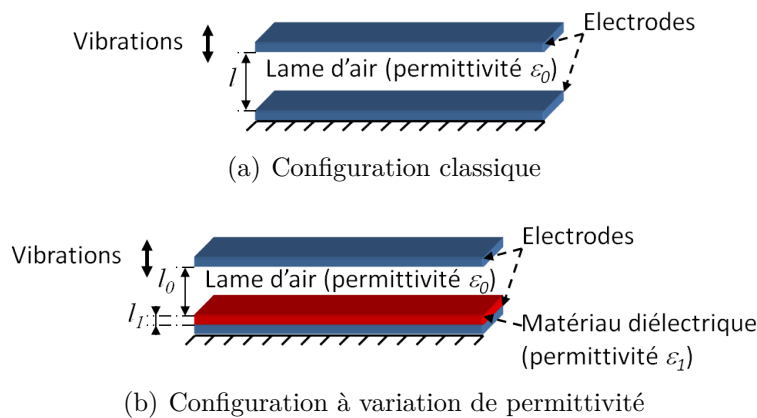
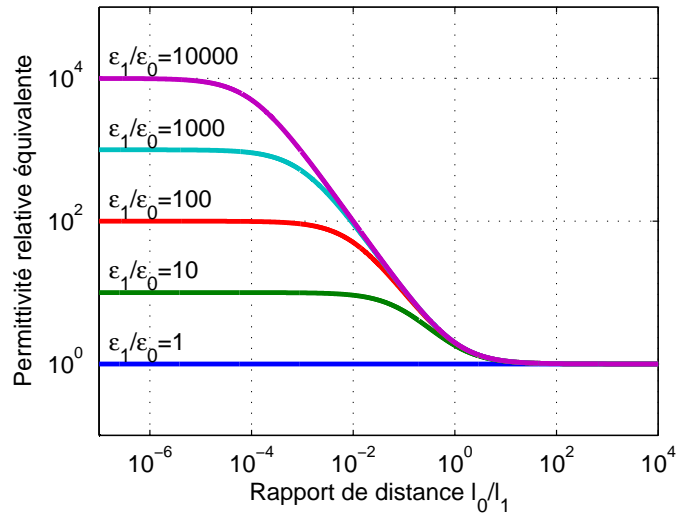


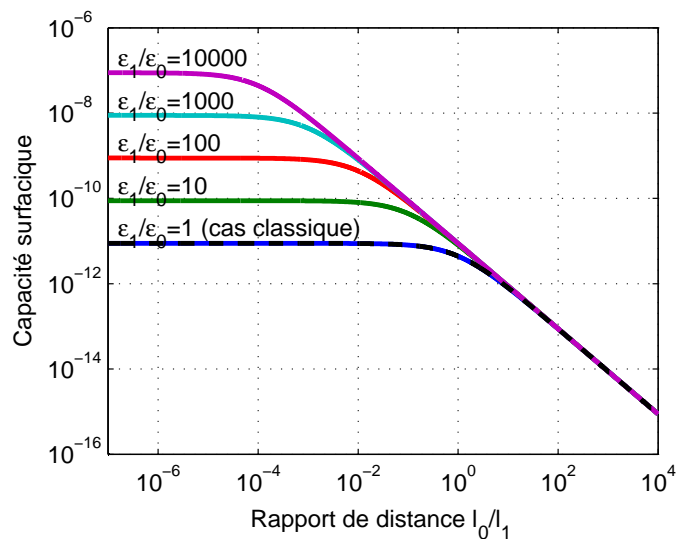
Figure IV.3 – Principe de l'amélioration de la récupération d'énergie électrostatique par variation de permittivité.

$$\frac{C_{couche}|_{max}}{C_{couche}|_{min}} \underset{\substack{l_{max} \gg l_1 \\ l_{min} \approx l_1}}{\approx} \frac{l_{max}}{l_{min}} \frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} \quad (IV.5)$$

qui fait clairement ressortir le facteur donné par le rapport des permittivités ( $\epsilon_1 > \epsilon_0$ ). Théoriquement (Figure IV.4), on remarque ainsi un rapprochement évident avec le cas classique à mesure que la distance inter-électrode devient grande (distance de la lame d'air très supérieure à celle de la couche ajoutée), et une augmentation significative de ces caractéristiques (permittivité et capacité) lorsque l'épaisseur de



(a) Permittivité

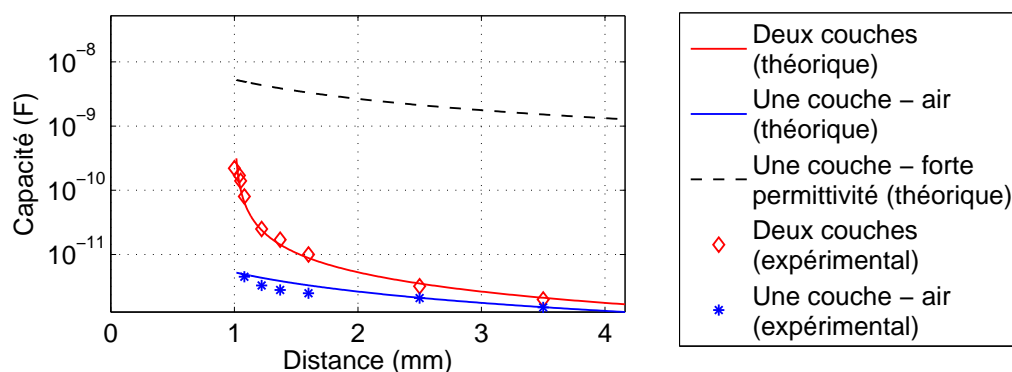


(b) Capacité surfacique

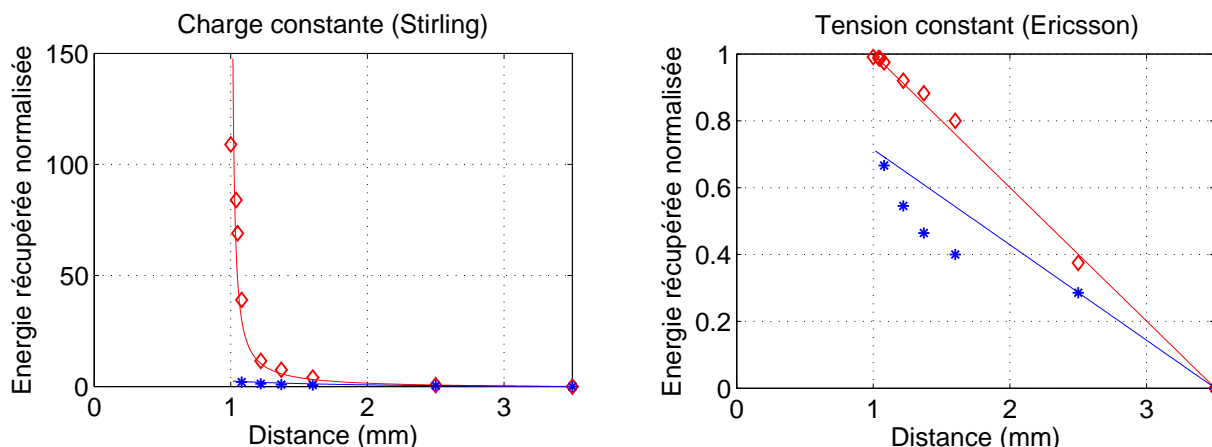
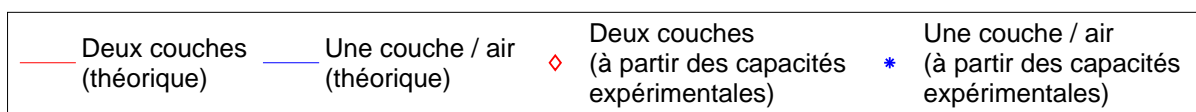
Figure IV.4 – Permittivité et capacité surfacique dans le cas d'utilisation d'un couche supplémentaire en fonction des épaisseurs pour plusieurs valeurs de permittivité de couche.

la lame d'air est très faible. Pour les positions intermédiaires, on pourra également noter que le “plateau” de plus forte permittivité ou capacité est d'autant plus réduit que la différence de permittivité est importante, ce qui s'explique aisément par une plus facile pénétration du champ électrique dans les zones de faible permittivité.

La tendance à l’“explosion” de la capacité lorsque l'on s'approche de la couche à forte permittivité est également confirmée expérimentalement (Figure IV.5(a)), où la couche ajoutée, d'épaisseur 1 mm, a une permittivité  $\epsilon_1 = 1000\epsilon_0$ ). Sur ce graphe sont également tracées les courbes des systèmes monocouches (soit de la plus faible ou de la plus forte permittivité), mettant en évidence la faible variation relative de capacité dans ces derniers cas comparé à l'utilisation de l'architecture multicouche; cette dernière permettant une variation de permittivité contribuant à la forte évolution de la capacité relative. Appliqué à la récupération d'énergie par cycle de charge/décharge, ceci conduit ainsi à une augmentation spectaculaire



(a) Capacité



(b) Energie récupérée

Figure IV.5 – Variations de capacité expérimentales et théoriques et estimation de l'énergie récupérée dans les cas mono- et bi-couches.

de l'aire du cycle et donc de l'énergie récupérée (Figures IV.5(b) et IV.6), surtout concernant le cycle de Stirling; ce dernier n'étant pas limité en terme d'énergie extraite alors que l'approche par cycle d'Ericsson ne peut pas engendrer une énergie convertie plus de deux fois supérieure à celle fournie (et donc ne peut pas récupérer plus d'énergie<sup>IV.4</sup> que l'énergie initialement injectée - Eq. (IV.1)). En particulier, l'augmentation brutale de la capacité lorsque que l'électrode mobile sur rapproche de la couche de forte permittivité peut également s'observer sur les formes d'ondes de courant, qui montrent des pics lorsque le système est polarisé par une différence de potentiel constante (Figure IV.7).

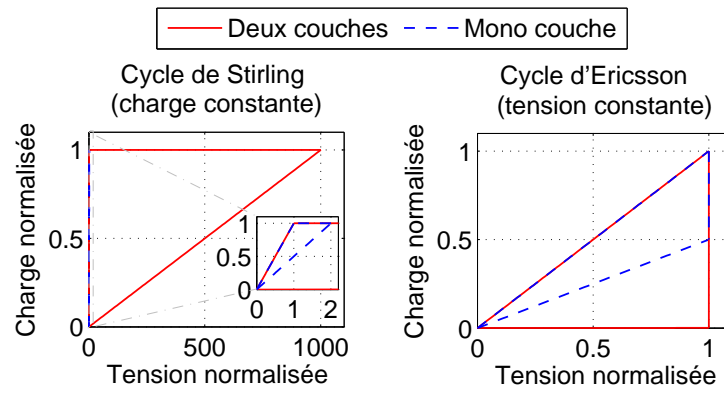


Figure IV.6 – Exemple d'application du système bi-couche à la récupération d'énergie par cycle de charge/décharge (variation de la distance d'un facteur 2 et  $\epsilon_1 = 100\epsilon_0$ ).

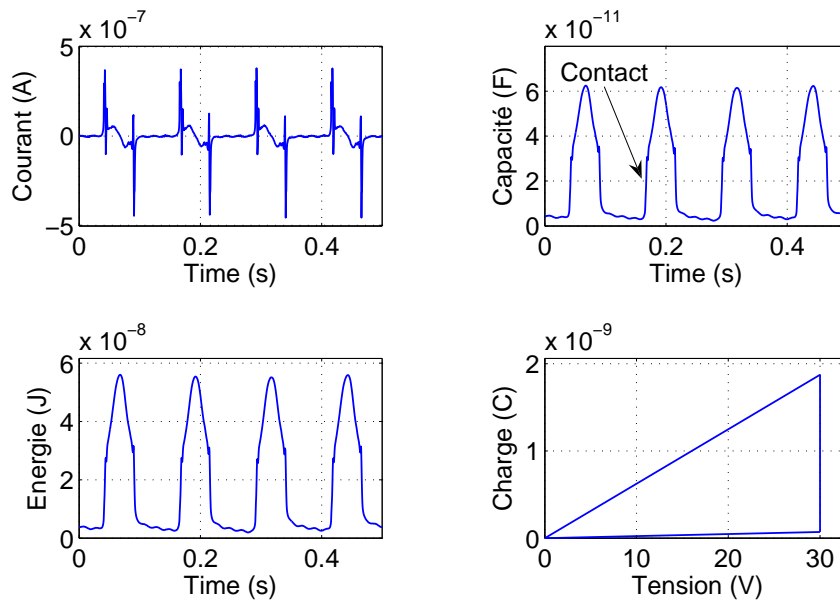


Figure IV.7 – Formes d'ondes expérimentales dans le cas d'une polarisation à tension constante (la charge et décharge dans le cycle énergétique sont extrapolées).

IV.4. L'énergie récupérée est donnée par celle extraite moins celle fournie.



### IV.1.3 Utilisation de motifs auto-similaires

La partie précédente a proposé une piste d'amélioration de la récupération d'énergie électrostatique via le changement de permittivité. Néanmoins, un autre paramètre sur lequel il est possible de jouer est la surface ; la valeur de la capacité étant directement proportionnelle à cette dernière. Ainsi, permettre un changement de surface en fonction de la distance (avec notamment un surface plus importante lorsque les électrodes sont proches), est également une voie intéressante à explorer pour atteindre l'objectif d'augmentation de l'énergie convertie. Alors que les peignes interdigités sont couramment utilisés dans cette optique (en considérant une configuration hors plan à entrefer variable - Figure IV.1), celle-ci est néanmoins limitée technologiquement par le facteur d'échelle entre largeur et hauteur du peigne. En effet, en considérant un peigne unitaire (Figure IV.8), la capacité associée  $C_{peigne}$  est donnée par, en négligeant d'éventuels effets de bords ainsi que la distance inter-peignes devant la largeur du système considéré :

$$C = \begin{cases} \frac{\epsilon_0 L w}{d} + 2 \frac{\epsilon_0 (h-d) w}{d_h} & \text{pour } d \leq h \\ \frac{\epsilon_0 L w}{d} & \text{pour } d > h \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

avec  $L$ ,  $w$ ,  $h$  et  $d_h$  la longueur de l'élément unitaire, son épaisseur, la hauteur d'un peigne et la distance inter-peigne et où  $d$  dénote de la distance entre les électrodes (Figure IV.8). Ainsi, entre le cas de recouvrement des surfaces latérales et celui où les peignes ne sont plus en regard, la variation de surface peut être importante du fait du second terme représentant la capacité latérale. Pour maximiser celle-ci, il convient donc d'augmenter le nombre de peignes (largeur de peigne  $l$  faible) tout en conservant une hauteur de peigne  $h$  relativement importante. Ces deux voies sont néanmoins paradoxales du fait des contraintes technologiques en terme de fabrication, qui imposent une valeur maximale du rapport hauteur sur largeur (facteur d'échelle  $\gamma = h_{max}/l$  - [CAXS02, MRS<sup>+</sup>05, YWSS05, MNCS08, WKP10]), limitant par là même la variation de capacité et présentant une valeur optimale de l'amplitude de vibration dépendant du nombre de doigts (Figure IV.9).

Afin de combler ce problème, une possibilité pour disposer d'une augmentation importante de la surface revient à utiliser le principe des fractales et des motifs auto-similaires. Formalisés par Mandelbrot dans les années 1980 et dont les ori-

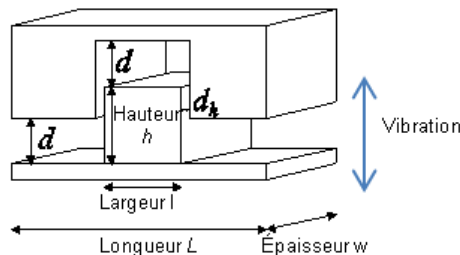


Figure IV.8 – Configuration en peigne - élément unitaire.

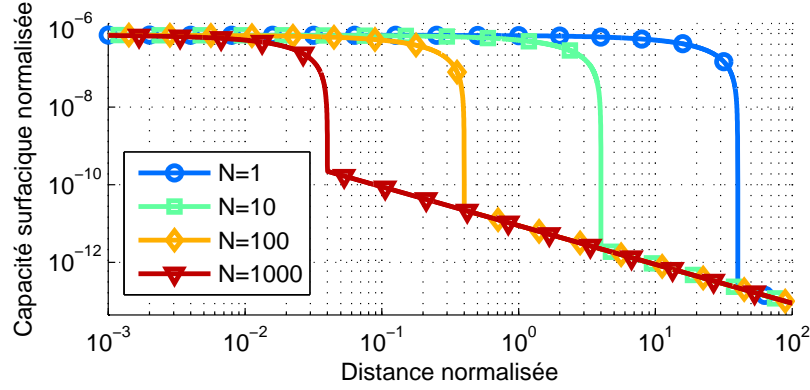


Figure IV.9 – Variation de capacité en fonction de l’amplitude de vibration pour plusieurs nombre de doigts (pour une longueur donnée).

gines se situent dans les années 60<sup>IV.5</sup> ([Man83,Edg93,Pic09]), les fractales et motifs auto-similaires sont notamment très attractifs pour obtenir de grandes surfaces dans des volumes réduits. Plus particulièrement, appliqués aux dispositifs électrostatiques précédemment évoqués (configuration inter-digitée), il est possible d’utiliser les espaces libres entre les doigts en y ajoutant des doigts secondaires de plus faibles dimensions, conduisant à une construction fractale du système. Cette construction peut se faire soit en partant des doigts les plus petits (construction “progressive” - Figure IV.10), soit en partant des doigts les plus grands (construction “dégressive” - Figure IV.11).

Dans les deux cas, la capacité surfacique est donnée par :

$$C_{frac} = \frac{\epsilon_0}{d} + 2\epsilon_0 S_v^{1D} d_h \quad (IV.7)$$

où  $S_v^{1D}$  est la surface horizontale des électrodes en regard :

$$S_v^{1D} = \begin{cases} \gamma \left[ 2 - \left(\frac{2}{3}\right)^{n-i} \right] - 2^{n-i} \frac{d}{l_n} & \text{pour } h_{i-1} < d \leq h_i, 1 \leq i \leq n (h_0 = 0) \\ 0 & \text{pour } h_n < d \end{cases} \quad (IV.8)$$

avec  $h_i$  la hauteur du doigt de la  $i^{\text{ème}}$  itération :

$$h_i = 3^{i-1} \gamma l_1 \quad (IV.9)$$

pour la construction progressive (avec  $l_1$  la plus petite largeur de doigt) et par :

$$h_i = 3^{i-1} \gamma \frac{L}{2} \quad (IV.10)$$

pour la construction dégressive (avec  $L$  la longueur totale).

---

IV.5. Le problème original ayant conduit à la formalisation des fractales était la mesure de la longueur de côte au Royaume-Uni ([Man67]). On notera cependant des prémices bien avant cette date ([Can84, vK04], ou encore le Triangle ou la Tapis de Sierpiński).

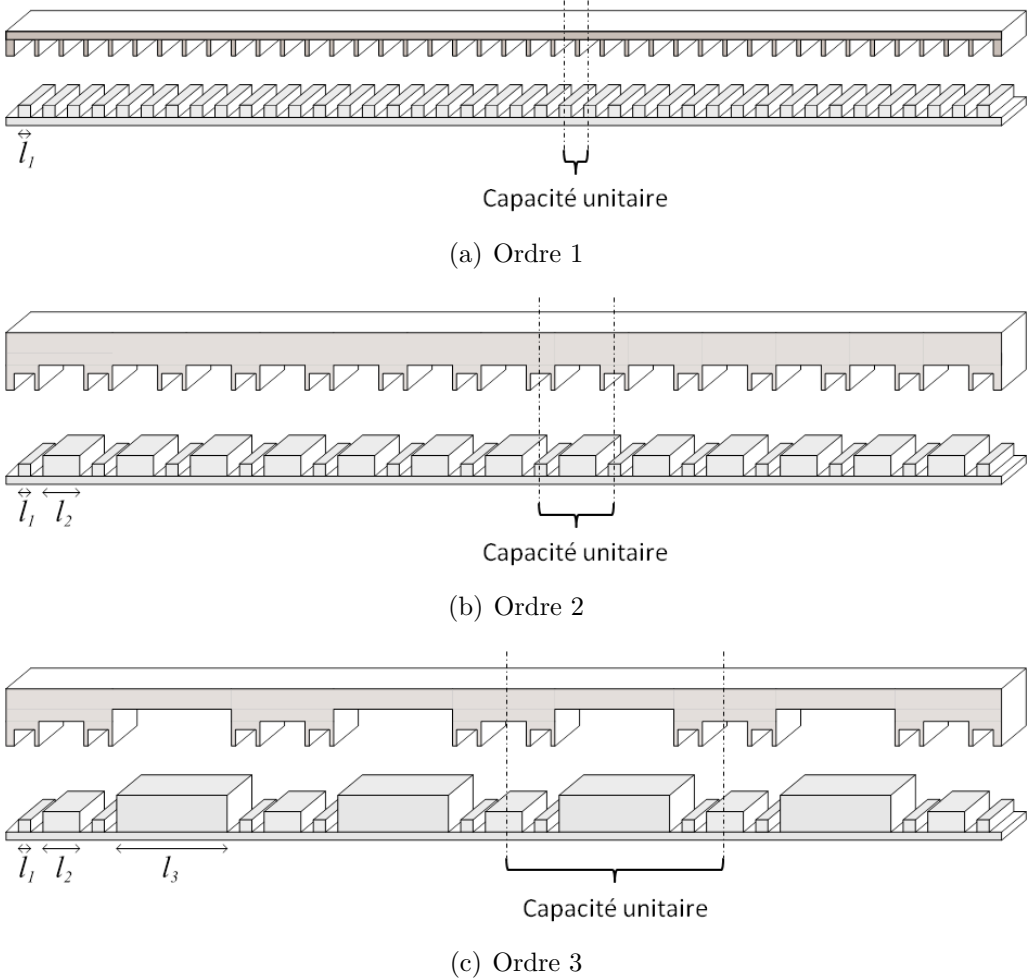


Figure IV.10 – Construction “progressive” de la capacité fractale.

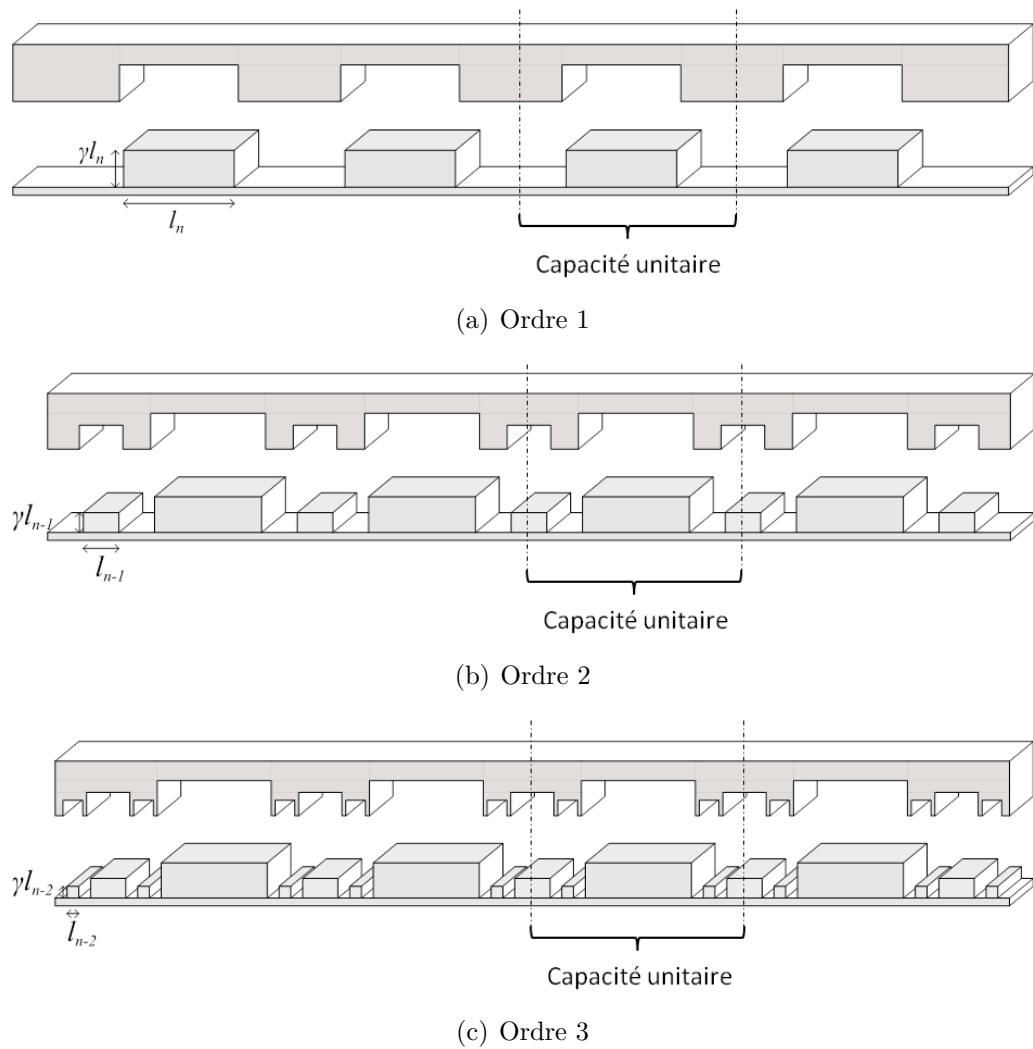


Figure IV.11 – Construction “dégressive” de la capacité fractale.

Ainsi, en comparant les évolutions de capacité, on remarque un gain significatif en termes de variation en utilisant de telles structures (Figure IV.12), avec une bonne corrélation entre résultats théoriques et de simulation/expérimentaux, malgré quelques différences lors de la séparation des doigts notamment du fait d'effets de bord. Plus particulièrement, la construction progressive montre une augmentation de la capacité pour de faibles déplacements, due à la contribution des doigts de faibles dimensions, conduisant ainsi à l'augmentation de la variation de capacité du fait de la valeur identique de capacité, quel que soit l'ordre considéré, lorsque les doigts ne sont plus en regard (distance inter-électrodes importante). On pourra également noter que, du fait de la hauteur moindre de doigts, la variation brutale de capacité intervient plus tôt pour les ordres fractals moins élevés, au prix cependant d'une variation extrême de capacité plus faible. Ainsi, dans le cas considéré, il convient également de dimensionner le système vis-à-vis des caractéristiques de l'application, et notamment de l'amplitude de vibration. Concernant la construction dégressive, qui semble cependant moins applicative (partir des dimensions les plus petites étant plus cohérent, notamment par rapport à la comparaison avec le cas inter-digité

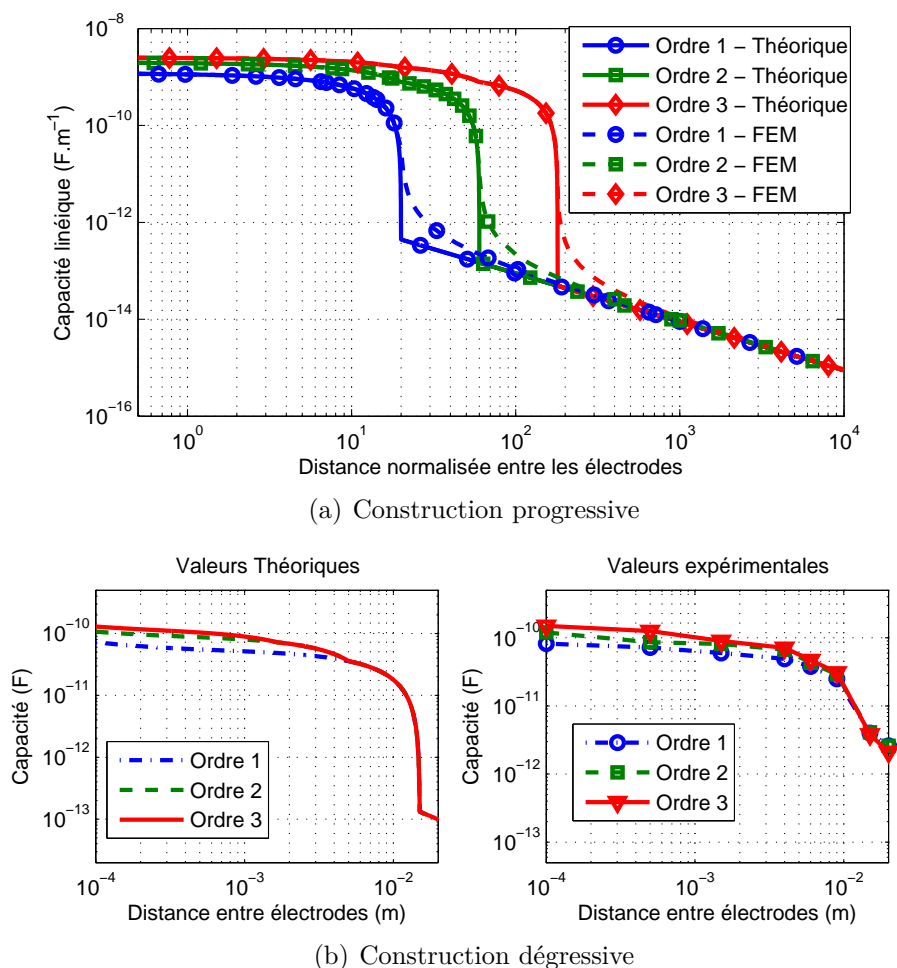
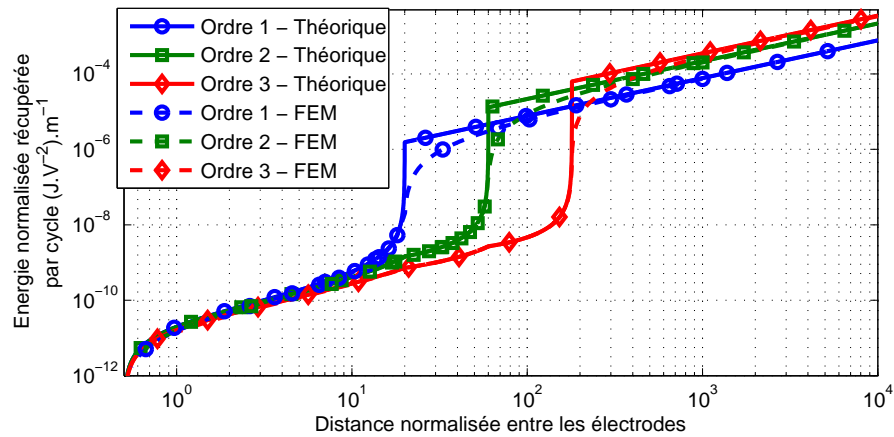


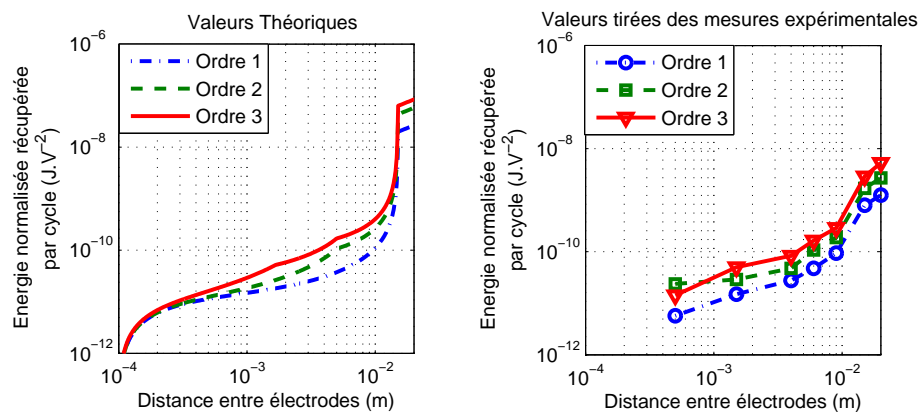
Figure IV.12 – Résultats théoriques, de simulation et expérimentaux pour les constructions de capacités fractales progressives et dégressives.

classique), on remarque que l'augmentation de l'ordre fractal est toujours bénéfique à l'application, contrairement au cas progressif (dépendance à l'amplitude de variation de distance inter-électrode ou, de manière équivalente, de vibration).

A partir des résultats précédents, il est ainsi possible d'évaluer les bénéfices des structures fractales pour la récupération d'énergie. Les résultats en considérant des cycles de Stirling, représentés en Figure IV.13, montrent une bonne corrélation entre prédictions théoriques et valeurs tirées de la simulation (cas progressif) ou de l'expérimentation (cas dégressif), à l'exception des points de rupture théoriques du fait d'effets de bord. Plus particulièrement, il peut être observé que la structure dégressive conduit à accroissement de l'énergie récupérée avec l'ordre fractal, alors que la structure progressive montre un fonctionnement optimal dépendant de l'amplitude de vibrations, comme reflété par l'évolution de la capacité en Figure IV.12(a), du fait de l'augmentation de la hauteur maximale des doigts avec l'ordre fractal. En fonctionnement optimal, on notera cependant qu'il est possible, dans les deux approches, de gagner un ordre de grandeur en termes d'énergie récupérée par cycle comparé au cas standard (ce dernier correspondant ici à l'ordre 1).



(a) Construction progressive



(b) Construction dégressive

Figure IV.13 – Estimation de l'énergie récupérée (normalisée par rapport à la tension initiale au carré) en fonction de la distance.

## IV.2 Conversion électrothermique

Alors que la totalité des travaux exposés jusqu'ici se sont intéressés à la conversion électromécanique, il est ici proposé d'étudier les possibilités d'utiliser des matériaux permettant de faire le lien entre le domaine thermique et celui électrique, et plus particulièrement la conversion d'énergie de la thermique vers l'électrique. En effet, malgré les limitations imposées par le cycle de Carnot ([Car24]), l'énergie disponible au niveau de la source est particulièrement importante, compensant ainsi les faibles capacités de conversion<sup>IV.6</sup>. Outre les effets classiques de la thermoélectricité ([Tho51, See25]) ou de la pyroélectricité ([SLG08, SGA09]), il est ici envisagé d'utiliser d'autres voies pour le couplage électrothermique. La première consistera à reprendre les analyses faites dans le cas de polymères électrostrictifs mais cette fois-ci en étudiant l'influence de la température sur la réponse du système, alors que la seconde analyse propose d'utiliser un couplage non encore évoqué entre le domaine thermique et le domaine magnétique (ce dernier étant ensuite relié au domaine électrique), à travers l'utilisation de matériaux ferromagnétiques.

### IV.2.1 Utilisation de matériaux électrostrictifs

L'analyse menée dans le Chapitre III, Paragraphe III.2 a permis de montrer la dépendance de la polarisation  $P$  (et par la suite de la déformation via des forces de Maxwell) au champ électrique  $E$ . Néanmoins, en reprenant l'expression de la polarisation obtenue :

$$P = N\mu\mathcal{L}\left(\frac{\mu E}{k_B T}\right) \quad (\text{IV.11})$$

où, pour rappel,  $\mathcal{L}(x)$  est la fonction de Langevin de la variable  $x$  ( $\mathcal{L}(x) = \coth(x) - 1/x$ ),  $N$  réfère à la densité de dipôles,  $\mu$  au moment dipolaire,  $k_B$  à la constante de Boltzmann, et  $T$  à la température (en Kelvin), on voit ainsi clairement ressortir une dépendance à la température. Ainsi, il est possible, sous un champ électrique de polarisation donné, de moduler la polarisation en fonction de la température, (physiquement expliqué par le fait que le champ électrique vient contrebalancer l'agitation thermique au niveau des dipôles - Figure IV.14), permettant ainsi un lien direct entre domaines thermique et électrique.

Plus particulièrement, il est possible d'exprimer la dérivée de cette polarisation en fonction de la température (en considérant que la densité de dipôle varie avec la température, c'est-à-dire  $N = N(T)$ ) :

$$\begin{aligned} dP &= \frac{N(T)\mu^2}{k_B T} \left[ \left(\frac{k_B T}{\mu E}\right)^2 - \operatorname{csch}^2\left(\frac{\mu E}{k_B T}\right) \right] dE \\ &+ N(T) \mu \left\{ \frac{\mu E}{k_B T^2} \left[ \coth^2\left(\frac{\mu E}{k_B T}\right) - 1 \right] - \frac{k_B}{\mu E} \right\} dT \\ &+ \frac{\partial N(T)}{\partial T} \mu \left[ \coth\left(\frac{\mu E}{k_B T}\right) - \frac{k_B T}{\mu E} \right] dT \end{aligned} \quad (\text{IV.12})$$

Cette expression fait ainsi apparaître la dépendance de la différentielle de la polarisation en fonction de la variation de température, pour peu qu'un champ élec-

---

IV.6. Les coefficients de couplages faibles permettent également de négliger dans la grande majorité des cas le couplage inverse.

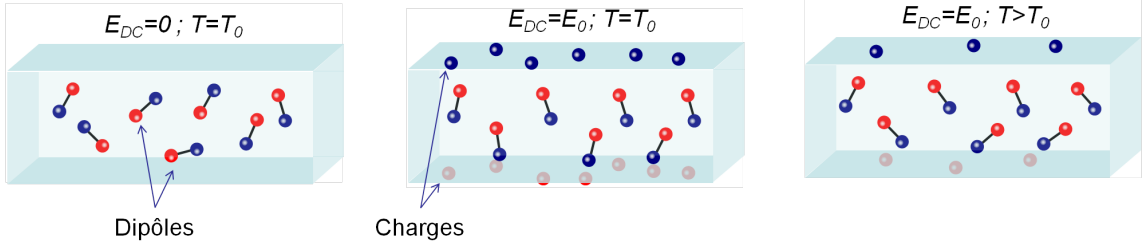


Figure IV.14 – Représentation schématique de la variation de polarisation en fonction de la température pour les polymères électrostrictifs.

trique de polarisation soit appliqué. Ainsi, à l’instar du mode pseudo-piézoélectrique discuté dans le Paragraphe III.4, il est ici possible de définir la notion de comportement pseudo-pyroélectrique dynamique. Ainsi, sous champ électrique constant égal à  $E = E_{DC}$ , il est possible de définir le coefficient pseudo-pyroélectrique dynamique  $p$  :

$$p = \frac{\partial P}{\partial T} = N\mu \left\{ \frac{\mu E_{DC}}{k_B T^2} \left[ \coth^2 \left( \frac{\mu E_{DC}}{k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{k_B}{\mu E_{DC}} \right\} + \frac{\partial N(T)}{\partial T} \mu \left[ \coth \left( \frac{\mu E}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{\mu E} \right] \quad (\text{IV.13})$$

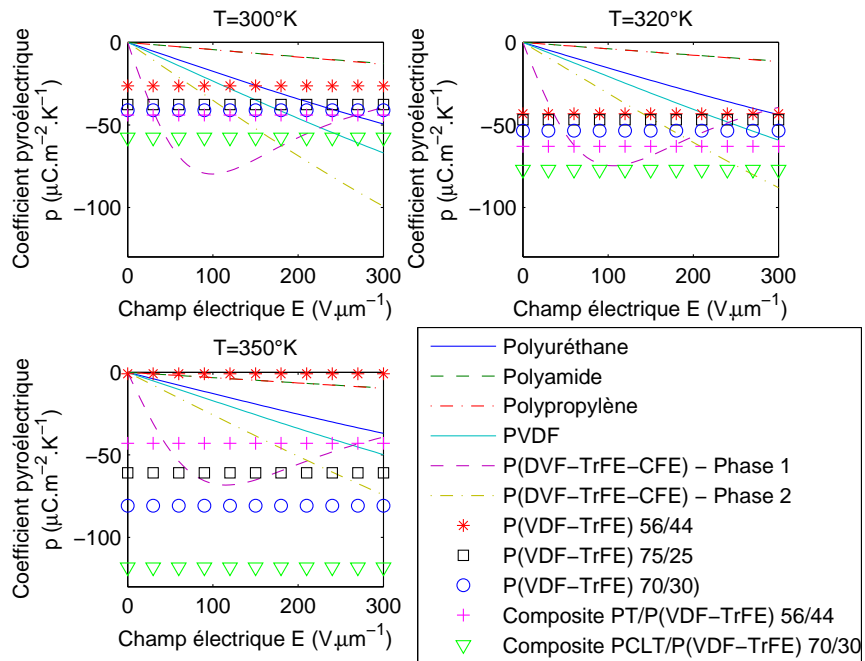
dépendant non seulement du champ électrique mais aussi de la température de travail.

A titre d’exemple, et en considérant que la densité de dipôles varie peu autour de la température de travail, la Figure IV.15 représente le coefficient pseudo-pyroélectrique obtenu pour plusieurs matériaux électrostrictifs, ainsi que leur comparaison avec des matériaux purement pyroélectriques. On remarque ainsi, de manière similaire au cas purement pyroélectrique, une dépendance du coefficient pseudo-pyroélectrique à la température, avec une valeur maximale obtenue pour une valeur particulière de température de fonctionnement. Néanmoins, on remarque également, du fait du comportement non-linéaire de la polarisation avec le champ électrique (phénomène de saturation), une dépendance également non-linéaire du coefficient avec le champ électrique appliqué (le champ de saturation dépendant également de la température). Enfin, on pourra remarquer que ces deux dépendances sont reliées entre elles, comme en témoigne le décalage des valeurs maximales (en valeurs absolue) du coefficient pseudo-pyroélectrique.

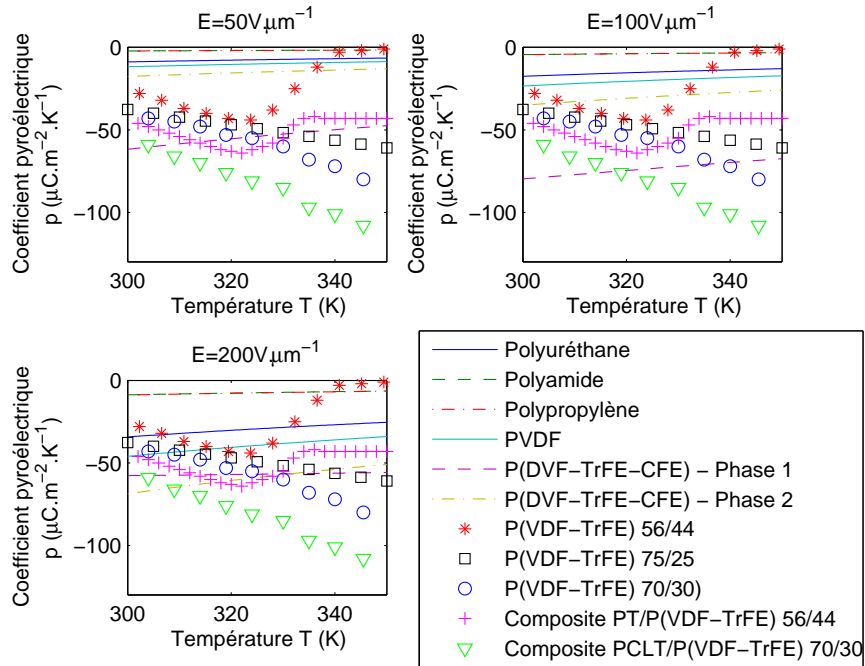
Cependant, on pourra noter que les effets électrothermiques obtenus sont tout à fait comparables à ceux des matériaux réellement pyroélectriques, avec même, dans certains cas, une meilleure capacité de conversion lors de l’utilisation dans des conditions (température et champ) particulières.

Afin de valider la possibilité d’utiliser les matériaux électrostrictifs pour la conversion d’énergie thermique, des cycles expérimentaux de polarisation ont été effectués à différentes températures pour un échantillon de terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$  incluant 4% de noir de carbone. La Figure IV.16 représente la susceptibilité diélectrique obtenue par ces mesures. On peut remarquer un léger hystérésis selon la direction de changement de température, mais une valeur moyenne en très bonne corrélation avec les prédictions théoriques.





(a) Dépendance au champ électrique



(b) Dépendance à la température

Figure IV.15 – Coefficient pseudo-pyroélectrique pour plusieurs polymères électrostrictifs (traits pleins et pointillés) et comparaison avec des matériaux pyroélectriques (marqueurs -  $P(VDF-TrFE)$  56/44 : [PPS+00];  $P(VDF-TrFE)$  75/25 : [TBL94];  $P(VDF-TrFE)$  70/30 : [JNC02];  $PT/P(VDF-TrFE)$  56/44 : [PPS+00];  $PCLT/P(VDF-TrFE)$  70/30 : [JNC02]).

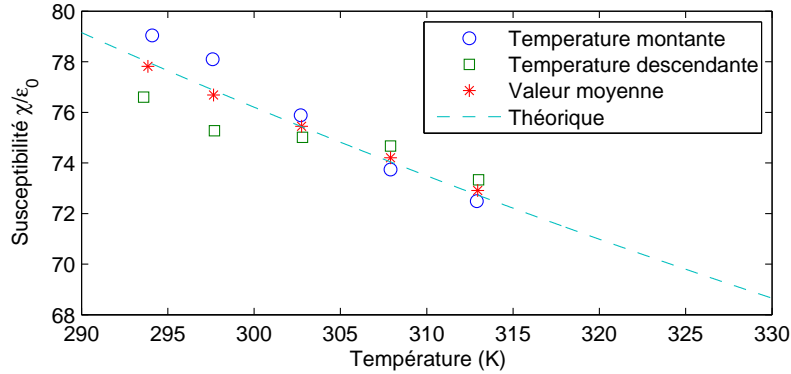


Figure IV.16 – Dépendance théorique et expérimentale de la susceptibilité en fonction de la température pour un terpolymère chargé  $P(VDF - TrFE - CFE) + 4\%CB$ .

## IV.2.2 Conversion par changement de phase de matériaux ferromagnétiques

Alors que la partie précédente s'est intéressée à un autre effet de conversion mais en exploitant les propriétés de matériaux déjà étudiés (polymères électrostrictifs), il est proposé ici d'utiliser un autre mécanisme de conversion présent dans les matériaux ferromagnétiques. Plus précisément, il est ici proposé de tirer partie du changement de la perméabilité de matériaux ferromagnétiques en fonction de la température, notamment autour de la température de Curie de ces derniers. De plus, plutôt que d'avoir un lien direct entre le domaine thermique et le domaine électrique, il est proposé ici de passer par l'intermédiaire du couplage thermomagnétique (Figure IV.17), via la variation de la perméabilité  $\mu(T)$  avec la température, le lien avec le domaine électrique étant obtenu via le phénomène d'induction électromagnétique.

La variation s'effectuant sur un paramètre et non une grandeur du système, il convient, de manière analogue au cas électrostrictif ou électrostatique, d'appliquer une polarisation pour le fonctionnement du système. Bien que le champ magnétique puisse être obtenu par l'application d'un flux (via un courant dans un bobinage secondaire) dans un circuit magnétique, il est plus aisé (d'un point de vue énergétique) d'utiliser un aimant permanent<sup>IV.7</sup>, conduisant au dispositif représenté en Figure IV.18.

Sous ces conditions, le flux magnétique  $\phi$  dans le dispositif s'obtient selon le théorème d'Ampère :

$$\phi = \frac{1}{\frac{l_a}{S_a \mu_a} + \frac{l_b}{S_b \mu_b} + \frac{l_f}{S_f \mu_f(T)}} \left( NI + \frac{l_a}{\mu_a} B_r \right) \quad (\text{IV.14})$$

où  $l_i$ ,  $S_i$  et  $\mu_i$  représentent les longueurs, sections et perméabilités des matériaux (avec les indices  $a$ ,  $b$  et  $f$  dénotant respectivement l'ensemble des aimants, la ferrite et le matériau ferromagnétique) et  $N$  le nombre de spires du bobinage.  $B_r$  et  $I$  sont

IV.7. équivalent magnétique aux électrets, mais avec des performances équivalentes bien plus importantes.

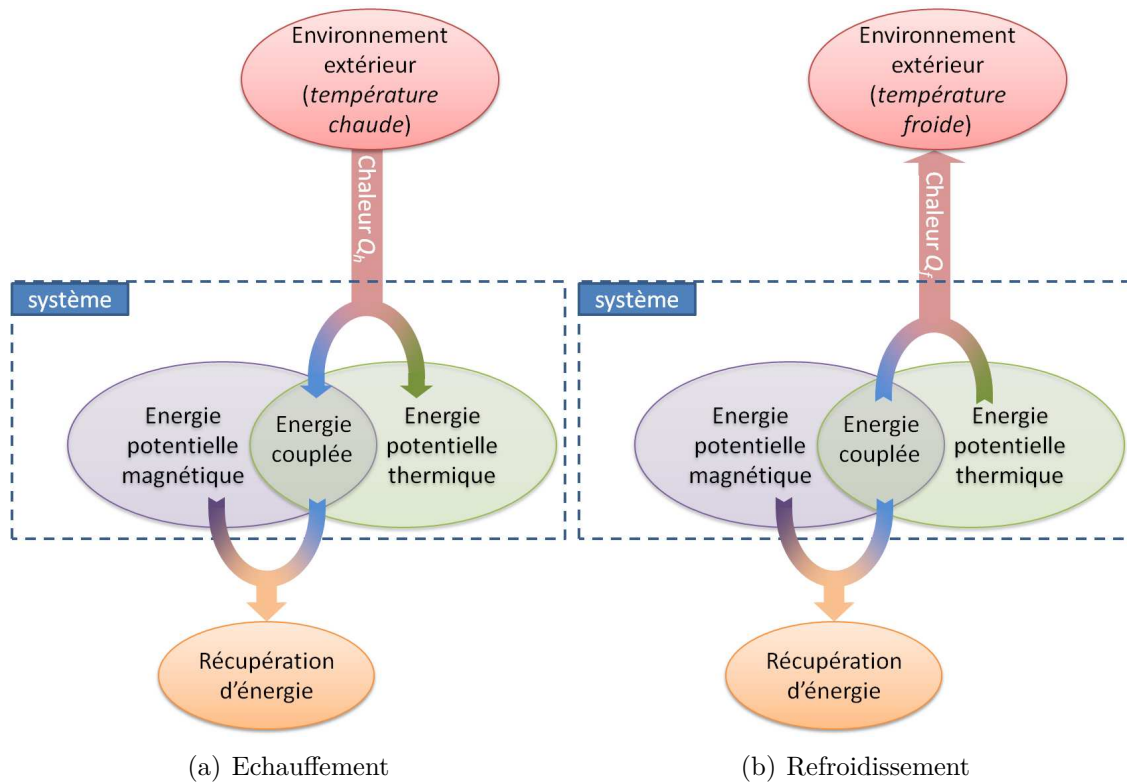


Figure IV.17 – Principe du couplage électrothermique par utilisation de matériaux ferromagnétiques.

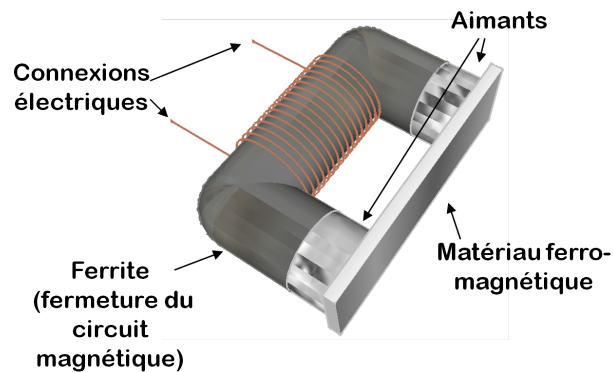


Figure IV.18 – Dispositif de conversion électrothermique par variation de perméabilité.

donnés comme le champ magnétique rémanent de l'aimant et le courant circulant dans le bobinage. Ainsi, selon la loi de Lenz, la tension  $V$  récupérée aux bornes de ce dernier est égale à :

$$\begin{aligned} V &= -N \frac{\partial \phi}{\partial t} \\ &= -N^2 \left( \frac{l_a}{S_a \mu_a} + \frac{l_b}{S_b \mu_b} + \frac{l_f}{S_f \mu_f(T)} \right)^{-1} \frac{dI}{dt} \\ &\quad - N \left( NI + \frac{l_a}{\mu_a} B_r \right) \frac{l_f}{S_f (\mu_f(T))^2} \left( \frac{l_a}{S_a \mu_a} + \frac{l_b}{S_b \mu_b} + \frac{l_f}{S_f \mu_f(T)} \right)^{-2} \frac{d\mu_f(T)}{dT} \frac{dT}{dt} \end{aligned} \quad (\text{IV.15})$$

avec  $t$  la variable représentant le temps. Cette expression peut également être réécrite sous la forme compacte suivante :

$$V = -L \frac{dI}{dt} - \beta \frac{dT}{dt} \quad (\text{IV.16})$$

où  $L$  représente l'inductance du circuit et  $\beta$  le coefficient de couplage électrothermique. Il convient de noter que ces deux paramètres dépendent de la température de travail (via la perméabilité du matériau ferromagnétique  $\mu_f(T)$ ), ainsi que du champ magnétique rémanent de l'aimant et du courant dans le bobinage pour le paramètre de couplage  $\beta$  :

$$\begin{aligned} L &= \frac{N^2}{\frac{l_a}{S_a \mu_a} + \frac{l_b}{S_b \mu_b} + \frac{l_f}{S_f \mu_f(T)}} \\ \beta &= N \left( NI + \frac{l_a}{\mu_a} B_r \right) \frac{l_f}{S_f (\mu_f(T))^2} \left( \frac{l_a}{S_a \mu_a} + \frac{l_b}{S_b \mu_b} + \frac{l_f}{S_f \mu_f(T)} \right)^{-2} \frac{d\mu_f(T)}{dT} \end{aligned} \quad (\text{IV.17})$$

En considération de ce dernier paramètre, on voit ainsi que sa maximisation passe par la maximisation du champ rémanent de l'aimant  $B_r$ , mais aussi par une conception judicieuse du circuit magnétique, où les réluctances de la ferrite et de l'aimant doivent être faibles devant celle de l'élément ferromagnétique. Ainsi, l'utilisation de matériaux ferromagnétiques à forte valeur de perméabilité (par exemple la Gadolinium<sup>IV.8</sup>) n'est pas nécessaire un choix des plus judicieux. On peut également envisager d'enlever la ferrite pour y adjoindre un second matériau ferromagnétique, ainsi que représenté en Figure IV.19, permettant un gain significatif en terme de densité d'énergie ([LWS<sup>+</sup>14]).

Ainsi, en connectant une charge résistive  $R$  aux bornes électriques du dispositif, il est possible d'estimer les capacités de récupération d'énergie. Les prédictions de cette énergie peuvent être obtenus par intégration numérique de l'Eq. (IV.16) avec une charge résistive, conduisant à l'équation différentielle :

$$V = -\frac{L(\theta)}{L} R \frac{dV}{dt} - \beta(\theta, B_r) \frac{dT}{dt} \quad (\text{IV.18})$$

La Figure IV.20 représente ces prédictions avec des mesures effectuées en utilisant comme matériau ferromagnétique du Phytherm@55<sup>IV.9</sup> (alliage Fer/Nickel

---

IV.8. dont le prix est par ailleurs prohibitif...

IV.9. Aimablement fourni par Thierry Waeckerle de Aperam Alloys Imphy et Marie-Ange Raulet de l'Université Claude Bernard Lyon 1, avec l'aide de M. Benjamin DUCHARNE.

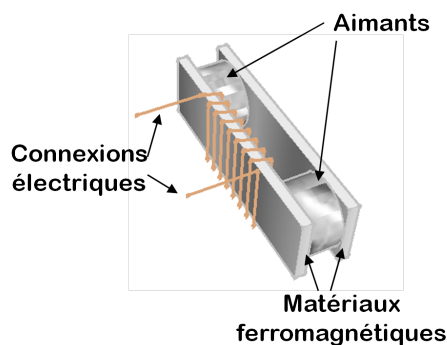
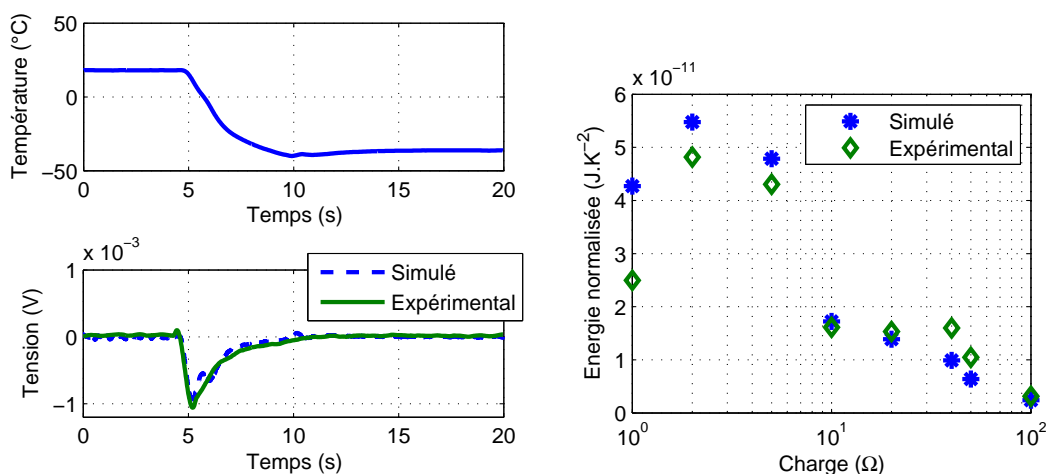


Figure IV.19 – Dispositif de conversion électrothermique par variation de perméabilité sans ferrite.



(a) Formes d'onde pour une charge  $R = 100 \Omega$

(b) Énergie

Figure IV.20 – Résultats numériques et expérimentaux pour la conversion d'énergie utilisant des matériaux ferromagnétiques.

70/30) qui possède une température de Curie de  $72 \text{ }^\circ\text{C}$ , en utilisant le dispositif avec ferrite. On observe ainsi une bonne corrélation entre prédictions numériques et mesures expérimentales, tant du point de vue des formes d'ondes que des valeurs d'énergie par cycle obtenues. On remarque que l'énergie obtenue est relativement faible, notamment par rapport aux travaux sur d'autres mécanismes de conversion électrothermique (par exemple les éléments pyroélectriques, les modules thermoélectriques ou les moteurs thermiques<sup>IV.10</sup> exploitant des matériaux ferromagnétiques ([UCL07]) ou des bilames ([PMM<sup>+</sup>14]) pour générer un mouvement, ce dernier étant converti sous forme électrique par l'intermédiaire d'éléments piézoélectriques), mais les travaux exposés ici sont des résultats de preuve de concept préliminaires (voire très amont) ayant un potentiel d'optimisation énorme.

IV.10. Ces deux derniers effets nécessitent cependant un gradient de température, alors que le dispositif présenté ici, ainsi que les éléments (pseudo-)pyroélectriques, travaillent sur des variations temporelles de température - les gradients pouvant par ailleurs être transformés en variations temporelles via les moteurs thermiques ([UCL07, PMM<sup>+</sup>14]).

### **IV.3 Conclusion : place des autres actions de recherche dans le monde scientifique et socio-économique et la formation**

Dans la continuité de l'évolution de ce manuscrit, les axes de recherche présentés ici, un peu à la périphérie du cœur de l'activité cependant, se veulent encore plus prospectifs que les actions menées sur les matériaux piézoélectriques et électrostrictifs. Ainsi, le lien avec les domaines industriel et socio-économique est encore plus lointain et incertain. Néanmoins, ces recherches amont ne sont pas dénuées d'intérêt afin de lancer de nouvelles pistes de mécanismes de conversion adaptés à certaines applications données.

Dans un premier temps, ces activités périphériques se sont intéressées à la conversion et récupération d'énergie électrostatique. Cette dernière est la moins exploratoire des activités de ce chapitre et est un domaine très actif dans la communauté scientifique. Ceci s'explique notamment par le fait que ces dispositifs sont particulièrement adaptés aux très faibles dimensions et relativement simples et peu coûteux. Ils ont par ailleurs d'ors et déjà trouvé de très nombreuses applications commerciales en tant que capteurs (accéléromètres par exemple) et, avec les différentes avancées scientifiques (circuit auto-synchrones par exemple), leur application en tant que micro-générateur n'est plus chimérique bien que des preuves de concept d'un niveau de maturité technologique (TRL) suffisant manquent encore pour donner une chance à ces systèmes de percer dans le domaine applicatif réaliste. Néanmoins, outre ces problèmes d'interface et d'extraction d'énergie, les travaux exposés ici se sont plutôt situés au niveau du transducteur en lui-même, avec deux voies d'amélioration complémentaires et pouvant être combinées sans problème particulier. Plus particulièrement, ces deux approches ont consisté à accroître la variation de capacité dans le cadre de la conversion électromécanique, lorsque les deux électrodes sont séparées d'une distance variable. La première approche, jouant sur la permittivité et plus particulièrement sur une dépendance de cette dernière à la distance inter-électrode par l'inclusion d'une couche de forte permittivité, permet d'obtenir des variations de capacité multipliées par plusieurs ordres de grandeur, notamment lorsque l'électrode mobile est proche de la couche rajoutée. Une telle approche simple et peu coûteuse (on pourrait par exemple envisager un simple dépôt de polymère diélectrique) est ainsi une solution tout à fait envisageable dans les systèmes de récupération d'énergie électrostatique. De plus, l'utilisation d'une couche isolante empêche les courts-circuits et réduit le risque de claquage (selon la loi de Paschen - [Pas89]). Outre la variation de permittivité, la possibilité d'obtenir des variations de surface importantes par l'utilisation de motifs auto-similaires a été proposée. Cette solution permet ainsi d'adresser les limites technologiques en terme de fabrication de micro-dispositifs électrostatiques pour obtenir des variations de capacité importantes. Cette partie ouvre ainsi de nouvelles voies, sans être néanmoins aussi directement applicable que l'utilisation de configurations multicouches. A titre d'exemple, citons notamment l'exploration de nouvelles structures fractales, voire l'utilisation de structures auto-similaires tridimensionnelles (Figure IV.21). Bien qu'une validation mésoscopique en

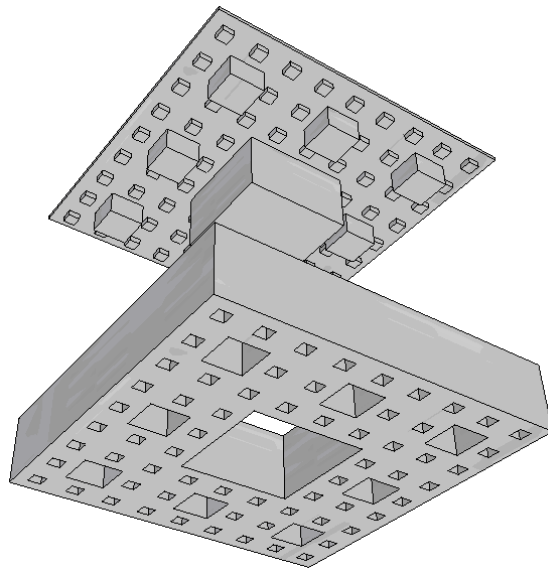


Figure IV.21 – Exemple de structure électrostatique fractale 3D (tapis de Sierpiński).

termes de capacité a été menée, il conviendrait concernant cette partie de valider le concept à des échelles millimétriques caractéristiques des systèmes électrostatiques ainsi que de vérifier le fonctionnement en tant que micro-générateur (via des collaborations externes<sup>IV.11</sup>).

La deuxième section de ce chapitre s'est ensuite intéressée à de nouvelles formes de couplage électrothermique. Dans un premier temps la dépendance de la polarisation des matériaux électrostrictifs avec la température a été exploitée. Il a ainsi été montré que ces matériaux pouvaient, sous un champ électrique de polarisation, exhiber un comportement pseudo-pyroélectrique dynamique avec des coefficients pyroélectriques du même ordre de grandeur (voire plus importants sous certaines conditions) que ceux des matériaux pyroélectriques classiques. Ainsi, la facilité de fabrication et la conformabilité des polymères électrostrictifs peut s'avérer très intéressantes pour remplacer les éléments pyroélectriques typiques dans des applications où le coût et la flexibilité sont des critères de premier ordre. L'obtention de couches minces et/ou de multicouches semble aussi être à l'avantage des matériaux électrostrictifs et faciliter leur intégration dans des systèmes de faibles dimensions ou nécessitant un faible impact (par exemple mécanique) de l'adjonction du transducteur. Cependant, alors que les résultats présentés dans ce paragraphe montrent une bonne corrélation avec les prédictions, il conviendrait d'étudier plus en avant les paramètres influant cet effet pseudo-pyroélectrique, notamment sur la densité de dipôles et les transitions de phase ; des mesures sur un terpolymère pur n'ayant pas été si concluant par rapport aux estimations (Figure IV.22). Plus important encore, l'effet des pertes dans l'application réelle en tant que capteur ou microgénérateur, et leur dépendance avec la température, est un axe à valider ; des mesures préliminaires, non finalisées au moment de l'écriture de ce manuscrit, montrent un effet pseudo-

---

IV.11. Le laboratoire LGEF n'étant pas équipé pour l'élaboration de ce type de dispositifs.

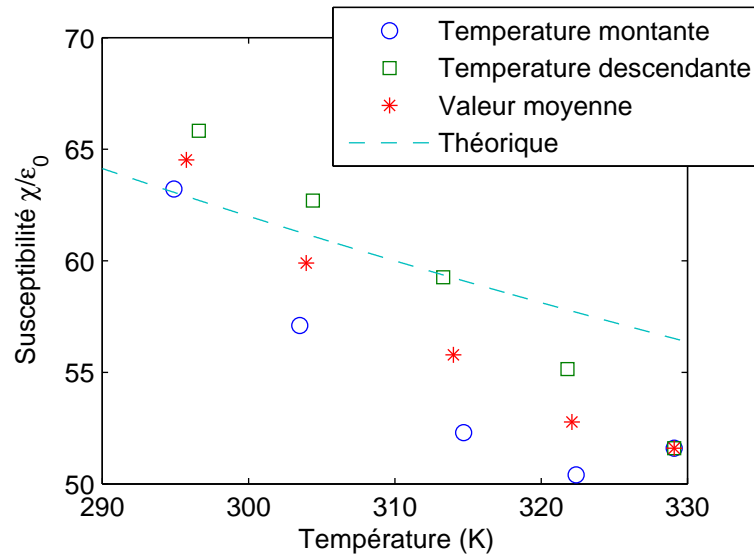


Figure IV.22 – Dépendance théorique et expérimentale de la susceptibilité en fonction de la température pour un terpolymère  $P(VDF - TrFE - CFE)$  pur.

pyroélectrique difficilement mesurable de manière directe car la réponse associée est négligeable par rapport au courant généré par le changement de conductivité. Enfin, la dernière partie de ce chapitre, en rupture avec les couplages traditionnels mais en accord avec la recherche de nouvelles formes de conversion, s'est penché sur l'utilisation de matériaux ferromagnétiques pour la conversion d'énergie thermique à partir de variations temporelles de la température en passant par le domaine magnétique pour lier thermique et électricité. Plus particulièrement, le principe est ici d'utiliser les variations de perméabilité de ces éléments afin d'induire une variation de flux magnétique et ainsi une variation de tension et/ou de courant au niveau d'un bobinage. L'intérêt d'utiliser des matériaux magnétiques réside, ici en une polarisation bien plus aisée grâce à l'utilisation d'aimants, ne requérant aucune énergie externe<sup>IV.12</sup>. Les résultats obtenus ont montré une activité quantitativement faible, mais qualitativement présente. Ceci est d'autant plus encourageant que la preuve de concept exposée ici est loin d'être optimisée, et les voies d'optimisation sont nombreuses (matériau, circuit magnétique, aimantation...), et il ne serait pas étonnant de pouvoir se hisser à des densités d'énergie comparables à celles des matériaux et systèmes classiquement utilisés pour ce type d'application. Néanmoins, malgré le coût faible des matériaux mis en jeu dans cette technologie, la preuve de concept est trop peu mature pour prédire le succès d'une telle approche.

Enfin, du fait du caractère très exploratoire des recherches rapportées ici, il est également difficile de prédire leur impact non seulement dans le mode industriel mais également en termes de formation. Bien que certains thèmes ont pu faire l'objet d'un travail lors du doctorat de Mme Liuqing WANG<sup>IV.13</sup>, il est délicat de stipuler quant

IV.12. à l'instar des électrets dans le domaine électrostatique, mais avec des niveaux de polarisation équivalente bien plus élevée et une bien meilleure tenue dans le temps

IV.13. Une partie du sujet de thèse était très exploratoire.



à leur continuité, surtout dans le cadre d'un Doctorat ou d'un Master où il convient, au final, de pouvoir bien guider l'étudiant au tout début de son travail en ayant une vision assez claire des résultats escomptés pour garantir un enrichissement académique et scientifique de la part du candidat. Il convient néanmoins de nuancer ces propos dans le cas électrostatique, sujet très développé dans la communauté scientifique, et pour les polymères électrostrictifs et leurs différents couplages, comme en témoignent les avancées exposées entre autres dans le chapitre précédent, ainsi que, comme déjà noté précédemment, l'arrivée d'une doctorante (Kritsadi THET-PRAPHI) travaillant sur le sujet (couplages dans les polymères électrostrictifs) en Septembre 2016.

## Chapitre V

# Conclusion - Les “smart systems” : vraiment si intelligents que ça ?

*Ce chapitre se propose de conclure les différents travaux précédemment exposés, en faisant un bilan des recherches effectuées tout en exposant leurs originalités et limites. A partir de cette analyse, des conclusions spécifiques à chaque thématique mais aussi générales seront tirées, permettant de rendre compte de la pertinence de l'utilisation des matériaux et systèmes intelligents selon l'application.*

Les travaux rapportés dans ce manuscrit se sont intéressés aux couplages multiphysiques et plus particulièrement électromécaniques et, dans une moindre mesure, électrothermiques. La taille conséquente pour un mémoire de ce type<sup>V.1</sup> s'explique par une volonté, voire une nécessité, d'englober toutes les étapes nécessaires à la réalisation d'un dispositif multiphysique, allant des aspects matériaux au domaine électrique, et passant par exemple par la mécanique. Ainsi tous ces aspects se doivent d'être abordés et connus, sinon maîtrisés, pour la conception d'un système globalement optimal (l'association de sous-systèmes - électrique, mécaniques, etc... - optimisés indépendamment conduisant à un système global sous-optimal du fait des différentes interactions aux interfaces). La structure du manuscrit s'est présentée, par souci de pédagogie, sous la forme de l'étude de chaque couplage abordé dans le travail de recherche.

Pour chacun de ces couplages, une volonté de compréhension des phénomènes à l'origine de ceux-ci afin de mieux appréhender les modélisations, puis les applications exposées par la suite a été le fil conducteur de ce mémoire<sup>V.2</sup>. Cette approche, allant du matériau au système pour mettre en évidence les tenants et aboutissants de chaque constituant d'un système, y compris leurs interfaces qui sont aussi primordiales que les domaines physiques eux-mêmes, est ainsi sous-jacente dans chacune des actions menées.

Ainsi, dans un premier temps l'étude des possibilités de l'utilisation de matériaux piézoélectriques a été menée dans le Chapitre II. La première partie a notamment proposé une modélisation relativement simple mais assez efficace pour quantifier le comportement de matériaux ferroélectriques. Basée sur une interprétation physique de la polarisation, elle permet, à partir d'un jeu de paramètres restreint (obtenu à partir d'un cycle de polarisation expérimental quasi-statique et d'un autre dynamique, ce qui peut représenter une limite de la méthode), de reconstruire assez fidèlement l'état de polarisation. Cette recherche a néanmoins été faite sans réelle considération de son applicabilité industrielle, mais on peut néanmoins avancer que le développement de lois de contrôle pour des transducteurs de puissance pourrait trouver un intérêt dans ce type d'approche.

Par la suite, des applications des matériaux piézoélectriques ont été étudiées. Dans le cadre du travail de recherche rapporté ici, celles-ci se décomposent en termes de contrôle de vibrations et de récupération d'énergie<sup>V.3</sup>. Les études en termes de contrôle de vibrations s'articulent notamment autour des structures distribuées, et plus particulièrement, dans le cadre des activités récentes, par l'étude des structures périodiques avec interfaces électriques non-linéaires interconnectées, permettant un contrôle relativement large bande qui est aujourd'hui un enjeu majeur en termes d'applications. Cependant, la thématique de contrôle de vibrations utilisant des interfaces non-linéaires peine à trouver des applications industrielles réelles, malgré un intérêt scientifique certain. Ce constat s'applique également, dans une certaine

---

V.1. incluant également quelques redondances - mais la pédagogie étant l'art de se répéter, celles-ci sont assumées.

V.2. Cependant, le déroulement historique des recherches a pu en être autrement.

V.3. Le contrôle de santé structurale a également fait l'objet d'étude, mais n'est ici pas exposé par souci de concision, d'autant plus que cette activité est actuellement en veille.

mesure, à la récupération d'énergie. Afin d'accroître l'intérêt industriel et l'applicabilité des microgénérateurs piézoélectriques, un effort conséquent a été apporté sur l'augmentation des capacités de conversion et d'extraction de l'énergie pour un matériau donné (en l'occurrence en utilisant des matériaux présentant des performances moyennes reflétant un coût réduit, pour la conception d'un système économiquement viable). Un autre verrou à lever nécessairement afin d'assurer un transfert industriel convaincant consiste à garantir un fonctionnement large bande, et fait actuellement partie intégrante du projet de recherche, via des thèses de doctorat en cours ainsi que des projets publics. D'un point de vue des projets industriels, la récupération d'énergie et les systèmes auto-alimentés ont également le vent en poupe, mais l'effet piézoélectrique a encore beaucoup de mal à s'imposer face aux systèmes électromagnétiques. C'est pourquoi il convient de bien fixer les conditions d'applicabilité de l'effet piézoélectrique face aux systèmes électromagnétiques pour la récupération d'énergie, notamment en termes de dimensions critiques pour lesquelles ce premier est plus intéressant. La récupération d'énergie est également, à l'heure actuelle, sous le feu de la rampe du fait du contexte socio-économique, mais il convient de raisonnablement estimer ses réelles capacités afin de ne pas œuvrer en l'encontre de la prolifération et de la promotion de ces systèmes.

Plus en amont, la modélisation des polymères électrostrictifs et l'étude des systèmes utilisant de tels éléments ont été présentées dans le Chapitre III. Ici, malgré la simplicité de fabrication de ces matériaux, et de leur flexibilité et conformabilité, le constat est encore plus inquiétant en termes de récupération d'énergie. En effet, la nécessité de polarisation de ces systèmes, requérant des champs électriques et donc des tensions importantes<sup>V.4</sup>, rend plus que délicate l'application de ces systèmes dans le cadre de la récupération d'énergie. Ainsi, avant de pouvoir convaincre d'éventuels partenaires industriels sur l'intérêt des microgénérateurs électrostrictifs de faible dimensions, il convient de s'assurer du bien-fondé de ce type de couplage pour la récupération d'énergie (par l'utilisation d'interface électriques auto-synchrones par exemple). Fort heureusement, l'utilisation des polymères électrostrictifs comme actionneurs est moins problématique. Notamment, mené par le Docteur Jean-Fabien CAPSAL, l'axe de recherche sur la modélisation des polymères électrostrictifs, utilisant le formalisme de Debye-Langevin, a proposé une voie de meilleure compréhension des phénomènes à l'origine de l'électrostriction. Ceci a ainsi permis de faire ressortir les paramètres à optimiser et a conduit à l'élaboration de matériaux à très forte activité électrostrictive.

Outre ces aspects matériaux et applicatifs, il a été proposé dans ce chapitre des outils permettant de faire ressortir les paramètres importants lors de la conception d'un actionneur électrostrictif en flexion, ainsi que d'un modèle macroscopique à constantes localisées permettant une assertion rapide des différentes interfaces électriques pour l'actionnement ou la récupération d'énergie. Concernant cette dernière thématique, une volonté d'uniformisation des résultats, afin d'évaluer séparément les performances des matériaux et des techniques (interfaces) a également été menée

---

V.4. L'alternative consistant en l'utilisation d'électrets n'est pas non plus convaincante actuellement en raison de la faible polarisation qu'ils permettent et de la faible tenue en temps de cette polarisation.

par la mise en place d'une figure de mérite pour la comparaison des matériaux. En somme, les travaux sur les polymères électrostrictifs sont restés relativement scientifiques (avec une volonté de compréhension et de modélisation de ces matériaux et des dispositifs les exploitant), mis à part la récupération d'énergie qui constitue dans ce mémoire la principale application des polymères électrostrictifs, mais qui à l'heure actuelle n'est pas convaincante pour des applications réalistes.

Plus prospectifs encore, le Chapitre IV a proposé des études un peu à la périphérie du cœur de l'activité de recherche. Dans un premier temps, l'amélioration des capacités de conversion de systèmes électrostatiques motionnels, via une optimisation de la variation de capacité (passant par une variation additionnelle de la permittivité ou des surfaces en regard) a été exposée. Parmi les effets analysés dans ce chapitre, la conversion électrostatique demeure la plus applicative, tant sur le domaine de l'activité de la communauté scientifique que sur l'applicabilité, cette dernière ayant reçu récemment un nouveau souffle grâce aux interfaces auto-synchrones.

Alors que l'écrasante majorité du mémoire s'est intéressé à la conversion électromécanique, une partie concernant la conversion thermique vers électrique a également été exposée dans ce chapitre. Cet intérêt réside notamment dans la disponibilité de la source thermique et des niveaux importants d'énergie associée dans nombre d'environnements. Ainsi, une étude préliminaire sur les capacités de conversion électrothermique des polymères électrostrictifs, basée sur la modélisation présentée dans le Chapitre III, a été exposée, mais nécessite des investigations plus poussées notamment sur la mesure directe de l'effet. Enfin, la conversion utilisant le domaine magnétique, via des matériaux ferromagnétiques permettant une variation de la perméabilité avec la température, a également été étudiée. Là encore, cette recherche est très amont, et, malgré la démonstration qualitative d'un tel effet, les niveaux de puissance récupérée restent bien trop faibles pour espérer une réelle applicabilité, et une étude sur l'optimisation d'une telle approche est nécessaire.

Enfin, les Annexes A et B qui, malgré leur dénomination expliquée par la structure choisie pour le manuscrit (découpage par effet de conversion), font partie intégrante du travail rapporté ici, ont fourni des considérations générales sur la sélection des sources et effets de conversion d'énergie pour la conception de microgénérateurs, ainsi que quelques règles de conception générales pour les dispositifs auto-alimentés. Il a ainsi été mis en évidence dans l'Annexe A de l'intérêt général (mais pas particulier, le choix le plus judicieux étant spécifique à chaque application) des sources thermiques en termes de gradient spatial associé à l'effet thermoélectrique, vibrotoires exploitant les couplages actifs et solaires via l'effet photovoltaïque. Une telle comparaison a été possible grâce à la mise en place de figure de mérite prenant en compte divers paramètres intrinsèques tels que les densités de puissance et le couplage et extrinsèques comme la facilité d'interfaçage. L'Annexe B a quant à elle montré la nécessité de bien connaître l'environnement opératif de l'application ainsi que la réelle nécessité en termes de fonction à implémenter, tout en ayant une approche réaliste sur les capacités des systèmes auto-alimentés afin d'assurer un bilan énergétique positif et donc le fonctionnement du système.

En résumé, outre les travaux scientifiques exposés ici, le message principal de ce mémoire consiste, en termes d’applications et plus particulièrement pour les systèmes autonomes, d’adopter une démarche de conception globale du système, allant du matériau à l’interface électrique et passant par exemple par la mécanique. Sans embrasser le système dans sa totalité en combinant différents blocs, même optimisés indépendamment, le dispositif ne sera pas optimal du fait des nombreux couplages bidirectionnels aux interfaces. Enfin, on assiste à l’heure actuelle à une effervescence sur les systèmes “eco-friendly” qui peut conduire à des aberrations et effets d’annonce en termes de systèmes globaux. Afin de réellement tirer avantage de cette conjoncture unique entre recherche et milieu socio-économique (généralement à l’aube de grands progrès), il convient de faire preuve de pédagogie et d’exposer les réelles possibilités de ces systèmes afin de ne pas braquer les investisseurs potentiels. Notamment, il convient de noter que la récupération d’énergie sert avant tout l’application, et n’est donc pas un but en soi. En particulier, la récupération d’énergie basse échelle ne peut entrer en compétition avec les batteries ou les systèmes de récupération d’énergie à grande échelle pour de nombreuses applications. Ainsi, il est nécessaire d’orienter les systèmes de récupération d’énergie (et de judicieusement choisir ceux-ci, en termes de sources et d’effets de conversion) en accord avec une application visée pour la réussite de projets industriels ou publiques (à titre personnel, la quasi-totalité des projets acceptés consistaient en l’élaboration de systèmes autonomes, et non de la conception d’un microgénérateur uniquement)<sup>V.5</sup>.

Ainsi, bien que le paragraphe précédent ait surtout pris comme base le cas de la récupération d’énergie du fait de l’activité de recherche, un tel enseignement peut être appliqué à tout type de système dit intelligent, pour lequel le succès ou l’échec ne peut être imputé qu’aux acteurs du domaine (scientifiques, industriels et économiques), car les systèmes intelligents sont surtout liés à l’intelligence de ceux qui les conçoivent.

---

V.5. Un exemple d’enseignement qui peut être tiré ici tient au fait qu’il est plus viable de déposer des projets dans des défis en accord avec une application particulière plutôt que dans le défi “Énergie”, pour lequel les microgénérateurs ne peuvent entrer en compétition, sur le plan des besoins socio-économiques, avec les systèmes de production de masse.



## Chapitre VI

# Avenir des thématiques et axes de recherche associés - Projet de recherche

*Ce chapitre se propose de dégager, à partir des travaux exposés dans ce manuscrit, une réflexion sur l'avenir et la pérennité des thématiques abordées durant la carrière scientifique, que ce soit sur le plan de recherche pure ou en termes d'applications dans le monde socio-économique. Dans ce chapitre sont également abordées des perspectives de recherche consistant en une continuité des recherches initiées jusqu'ici, ou alors en rupture plus ou moins légère avec les études abordées. Des réflexions sur les possibilités personnelles en termes d'animations et de responsabilités scientifiques sont également présentées.*



A l'issu de ce manuscrit, il est espéré que le lecteur prenne conscience de la nécessité d'une approche globale (et non d'une somme d'approches locales) pour la conception d'un système globalement optimisé. C'est ainsi dans cette optique que l'étude du matériau au système est une volonté forte dans l'activité de recherche. Néanmoins, il convient toujours, en tant que discipline de recherche appliquée, de ne pas négliger l'aspect industriel et socio-économique de la recherche, sans pour autant se détourner du caractère scientifique de l'activité. Ainsi, il est nécessaire de côtoyer le monde industriel, et de tirer l'essence scientifique des problèmes concrets exposés. Ceci permet d'asseoir la pertinence des thématiques de recherche, pour lesquelles il convient de ne pas s'offusquer outre mesure et d'accepter leur abandon en cas d'inutilité avérée. C'est ainsi qu'ici est exposé un bilan succinct des thématiques de recherche explorées, ainsi que des pistes de recherche futures.

## VI.1 Aspects scientifiques

Au terme de ce mémoire, une certaine sensation, relativement justifiée, de “pappillonnage” des activités scientifiques peut être éprouvée. Cependant, il convient d'une part de rappeler la volonté d'englober au mieux tous les constituants d'un dispositif dans son intégralité, et d'autre part d'assurer une certaine diversité afin de ne pas être bloqué si une thématique est dans une impasse (scientifique et/ou applicative) ainsi que d'avoir une vision assez large pour pouvoir, face à un problème industriel donné, conseiller au mieux sur les solutions possibles ainsi que d'identifier les réels enjeux scientifiques. Il apparaît ainsi un fil conducteur, certes assez large, concernant les possibilités de convertir efficacement tout type d'énergie sous forme électrique, incluant tant l'aspect matériau que système, pour un type d'application donné (contrôle vibratoire, récupération d'énergie...). On notera néanmoins un cœur d'activité fort en termes d'application au contrôle vibratoire et interfaces d'extraction et de récupération d'énergie utilisant des éléments piézoélectriques.

Les activités de recherche se décomposent ainsi sur un aspect très amont consistant à comprendre et modéliser les mécanismes à l'origine des phénomènes de conversion, notamment dans les cas ferroélectrique/piézoélectrique et électrostrictif. Bien que relativement loin de l'application, une telle approche est néanmoins nécessaire afin de pouvoir correctement développer des techniques et des applications associées. Ainsi, la pérennité de cet axe est primordiale afin de pouvoir continuer à élaborer des dispositifs fonctionnels et efficaces.

D'un point de vue applicatif, le contrôle vibratoire à petite échelle peine à trouver acquéreur dans le monde industriel à quelques exception près. Cependant, d'un point de vue scientifique, la compréhension des mécanismes de conversion sur des structures distribuées (par exemple périodiques) peut trouver des retombées dans d'autres domaines que le contrôle vibratoire, tel que l'actionnement et la récupération d'énergie. De plus, alors que le contrôle vibratoire seul se cantonne actuellement à des thématiques de recherche pure, sa combinaison avec d'autres applications telle que la récupération d'énergie (voir par exemple le projet européen ADVICE) ravive les intérêts applicatifs.

En termes de récupération d'énergie, les avancées scientifiques se traduisent par

l'élaboration de techniques simples mais efficaces de l'amélioration des capacités de conversion et d'extraction de l'énergie, notamment en utilisant des transducteurs offrant des performances limitées (et donc aisément disponible dans le commerce à moindre coût), ainsi que de leur facilité d'intégration dans l'environnement (aspect large bande) et d'interfaçage (indépendance à la charge). Répondant à une réelle attente applicative tout en faisant face à des verrous encore non totalement levés actuellement (par exemple sur l'aspect large bande), cette thématique suscite encore de nombreuses interrogations et les activités scientifiques mondiales sur le sujet continuent de s'accroître. Il convient néanmoins de délimiter clairement les domaines d'application des différentes approches, tant en termes de matériaux que de techniques<sup>VI.1</sup>.

## VI.2 Aspects industriels et socio-économiques

Comme discuté notamment en Annexe B, le succès d'un système ou d'une technique tient autant à son efficacité qu'à sa simplicité. Ainsi, excepté certains axes ou travaux qui se sont estompés avec le temps et l'expérience, la recherche actuelle est avant tout pilotée par cette volonté de simplicité d'implémentation.

Outre les travaux de modélisation relativement en amont mais permettant une meilleure compréhension des effets et donc des possibilités d'amélioration adressant un verrou applicatif (citons à titre d'exemple les travaux du Paragraphe III.2<sup>VI.2</sup>, qui ont permis l'élaboration de matériaux diélectriques à forte réponse électrostrictive), les principaux axes de recherche en termes d'applications se sont orientés vers le contrôle de vibrations et la récupération d'énergie.

Comme exposé précédemment, c'est avant tout cette dernière thématique qui trouve un écho dans le monde socio-économique, même si les recherches sur le contrôle de vibrations peuvent avoir des retombées autres (structures distribuées pour la récupération d'énergie, combinaison avec la récupération d'énergie...). Cependant, le désintérêt industriel sur la thématique de contrôle vibratoire a de grandes chances, dans le cas personnel, de venir d'un manque de rayonnement ou d'un masquage par l'étiquetage "récupération d'énergie". En effet, de nombreux laboratoires ont actuellement des contrats publics et industriels sur la thématique de contrôle de vibrations. Il convient ainsi, en plus des recherches purement scientifiques, d'assurer la promotion de cette thématique à l'extérieur du laboratoire.

De plus, bien que la récupération d'énergie soit actuellement porteuse, il est cependant nécessaire de s'assurer de sa pérennité, voire de son réel intérêt. Plus particulièrement, l'essor de cette thématique, au niveau mondial, et les progrès dans ce domaine ont été permis du fait d'une conjecture "scientifico-économico-sociétal" particulière et caractéristique de tout progrès (ou prémices de progrès avorté). Ainsi, il convient de veiller à ce que cette "bulle" sur la thématique n'éclate pas avant d'avoir percé; la déchéance pouvant par ailleurs être l'œuvre d'effets d'annonce et de comportements, plus ou moins volontaires, d'acteurs du domaine. Il est ainsi nécessaire

---

VI.1. Par exemple, les techniques SSH ont un intérêt très limité pour des structures fortement couplées et peu amorties.

VI.2. qui, rappelons-le, ont été avant tout initiés par M. Jean-Fabien CAPSAL

de pouvoir lever certains verrous au plus vite, et les avancées associées ainsi que les preuves de concept deviennent de plus en plus urgents, non seulement en termes de conversion et d'extraction d'énergie mais aussi dans d'autres domaines, comme la microélectronique, ainsi que dans un plan totalement non scientifique avec la nécessité de pédagogie assurant une prise en compte collective des possibilités mais surtout des limitations. Enfin, et si malgré tout ces efforts, les systèmes de récupération d'énergie et les dispositifs autonomes ne parviennent toujours pas à pénétrer durablement le milieu industriel et économique, il sera nécessaire d'admettre la non-pertinence de cette axe et ne pas hésiter à l'abandonner.

## VI.3 Perspectives personnelles

Afin d'illustrer les propos précédents, ce paragraphe se propose de donner quelques exemples concrets en termes de poursuite de thématiques de recherche, voire de proposer des sujets annexes. Également, certaines actions futures à caractère non scientifique qui pourront être menées seront exposées.

### VI.3.1 Thématiques futures

#### Modélisation

Historiquement (sur le plan personnel) première analyse dans le travail de modélisation physique, l'étude du comportement des matériaux électrostrictifs telle qu'exposée au Paragraphe III.2, notamment l'origine via des forces de Maxwell, fait toujours l'objet de controverses, même au sein du laboratoire ([WGdM<sup>+</sup>11]). Ainsi, le travail futur sera de favoriser les discussions sur les différents modèles afin de dégager les avantages et limitations de chaque approche<sup>VI.3</sup>. Notamment, l'application de la modélisation à d'autres matériaux que les polymères pourra être un aspect intéressant.

Cette extension a par ailleurs déjà été engagée dans le cas des matériaux ferroélectriques. L'une des motivations dans cette démarche réside dans l'unification des lois comportementales. Notamment, un axe pouvant être développé à l'aide de cette approche consiste à étudier le phénomène de vieillissement et notation de dépolarisation. Plus précisément, l'analyse de l'opérateur d'effet d'avalanche (voir Paragraphe II.2), permettant de contrôler la dynamique du système, est un atout du modèle exposé qu'il conviendrait de creuser. Ceci est d'autant plus vrai que l'opérateur proposé ici est une fonction de classe  $\mathcal{C}_\infty$  (toutes les dérivées sont continues) qui par conséquent permet de mettre en évidence le comportement physique de relaxation. A titre d'exemple, la Figure VI.1 montre des résultats de simulation à partir du modèle, où un effet de dépolarisation (volontairement exagéré) apparaît après une polarisation initiale sous champ électrique. Ainsi, le lien entre la fonction d'avalanche et les mécanismes physiques de dépolarisation est une voie privilégiée d'étude de ce modèle. De même, le lien entre les grandeurs physiques données par

---

VI.3. Ici, l'une des limitations évidente de l'approche par les forces de Maxwell est l'électrostriction "positive" de certains céramiques ou cristaux ([TYR07]).

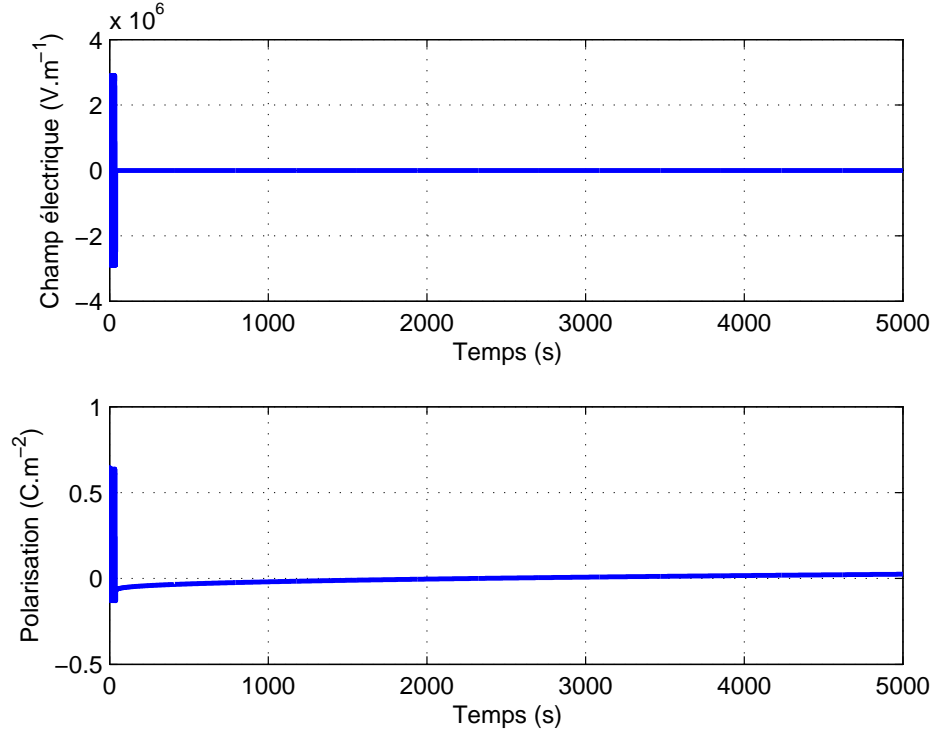


Figure VI.1 – Résultats de simulation montrant l'effet de dépolariation pris en compte par le modèle.

la simulation et les paramètres piézoélectriques (coefficient de charge par exemple) est une piste à développer.

C'est également dans cette optique d'unification que l'animation d'un travail de co-opération entre les chercheurs de ces différents domaines est envisagée. Toujours dans cette optique d'unification, la combinaison du modèle de Debye-Langevin avec les dérivées fractionnaires ([GDS07, DZGS13]), et le lien avec les approches empiriques tel que le modèle de Cole-Cole ([CC41, CC42]) serait un axe prometteur pour apporter un éclairage physique à des observations expérimentales. En particulier, le lien entre polarisation  $P$  et champ électrique  $E$  via par exemple une fonction de Langevin dans laquelle un terme fractionnaire apparaît :

$$P = 3\chi_{lin}E_{sat}\mathcal{L}\left(\frac{E - \rho_{\alpha}\frac{d^{\alpha}P}{dt^{\alpha}}}{E_{sat}}\right) \quad (\text{VI.1})$$

avec  $\rho_{\alpha}$  une impédance réelle d'ordre non entier  $\alpha$ , peut être une base intéressante. En particulier, cette expression de la polarisation donne, en bas champ électrique d'excitation :

$$P \underset{E \ll E_{sat}}{\approx} = \chi_{lin}\left(E - \rho_{\alpha}\frac{d^{\alpha}P}{dt^{\alpha}}\right) \quad (\text{VI.2})$$

qui dans le domaine fréquentiel conduit à l'expression de la susceptibilité électrique  $\chi_{freq}$  :

$$\chi_{freq} \underset{E \ll E_{sat}}{\approx} = \frac{\chi_{lin}}{1 + j\rho_\alpha \omega^\alpha} \quad (\text{VI.3})$$

qui est en très bon accord avec le modèle de Cole-Cole avec  $\chi_{lin}$  représentant la susceptibilité linéaire (bas champ) en quasi-statique.

### Contrôle vibratoire

Les enjeux en termes de contrôle vibratoire consistent en la possibilité de commander efficacement des structures à matériaux électroactifs distribués pour le contrôle large bande. Ainsi, les structure périodiques, bien que surtout développées dans le cadre de thèses de doctorat dont la dernière sur le sujet s'achève bientôt et qu'aucune n'est actuellement envisagée pour reprendre le sujet, restent un axe privilégié de la recherche. A titre d'exemple, toujours dans l'optique de structures distribuées à interfaces électriques non-linéaires, l'utilisation de plusieurs amortisseurs à masse accordée électromécaniques<sup>VI.4</sup>, permettant une conversion efficace de l'énergie de la structure hôte, combinés avec le filtrage spatial (Figure VI.2(a)), est une voie qui semble prometteuse, notamment d'un point de vue de la gestion intelligente des transferts d'énergie<sup>VI.5</sup>. Toujours dans cette optique de structures distribuées, l'incorporation de ces amortisseurs à masse accordée électromécaniques dans les

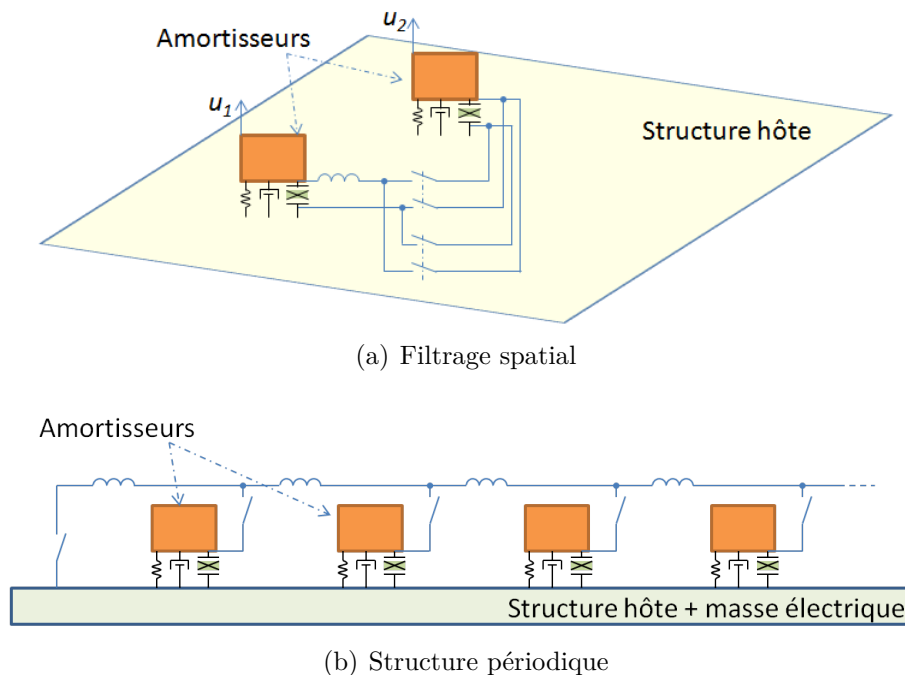


Figure VI.2 – Structures distribuées à amortisseurs à masse accordée électromécanique pour le contrôle vibratoire à interfaces électriques non-linéaires.

VI.4. travaillant notamment sur des modes différents

VI.5. Concernant la gestion des transferts d'énergie entre transducteurs pour le contrôle vibratoire utilisant des structures non-linéaires, la thèse de doctorat de Kaixiang LI ([Li11b]) donne des exemples de techniques et d'implémentations.

structures périodiques (Figure VI.2(b)) est également une piste à creuser.

Cependant, comme tout type d'application des matériaux intelligents, l'utilisation de matériaux piézoélectriques n'est pas adapté à toutes les situations. Citons notamment le contrôle acoustique pour lequel l'impédance acoustique de ces matériaux est tout à fait inadaptée par rapport à celle de l'air. Ainsi, dans cette optique d'application, l'utilisation de membranes faites de polymères électrostrictifs est attractif. Notamment, en termes de systèmes performants mais peu consommateurs, l'adaptation des techniques SSDI/SSDV dans le cas d'un fonctionnement pseudo-piézoélectrique dynamique est une piste intéressante (Figure VI.3). Cette technique est d'autant plus intéressante ici qu'elle permet également une polarisation du polymère à moindre coût, en travaillant autour de la tension de polarisation  $V_{DC}$  amplifiée par un facteur  $(1 + \gamma)$ , où  $\gamma$  représente le facteur d'inversion, où plus précisément ici la qualité de transfert de charge entre la source de tension constante et le polymère, via l'inductance  $L$ . En termes de performances, du fait des facteurs de qualité mécanique et des couplages souvent plus faibles dans le cas électrostrictifs, les performances brutes sont dégradées, mais le meilleur couplage acoustique, permettant à l'énergie de rentrer plus facilement dans la structure, mérite l'étude plus fine des capacités d'amortissement acoustique d'une telle approche.

### Conversion et récupération d'énergie

Comme précédemment noté, la récupération d'énergie se heurte encore à des verrous tenaces pour une application réaliste. L'un de ces verrous majeurs réside dans la difficulté à récupérer de l'énergie de manière large bande. Afin d'adresser ce problème, les axes de recherche futurs, plus ou moins engagés dans le cadre de la thèse de Thomas HUGUET débutée en Janvier 2016, consisteront notamment à assurer le fonctionnement en orbite haute des systèmes mécaniquement non-linéaires (par exemple via une modulation de raideur - Figure VI.4). De même, l'utilisation de structures périodiques, ayant déjà plus ou moins démontré les capacités de fonctionnement en large bande dans le cas de contrôle vibratoire ([LYRGss]), pourra être une piste intéressante dans le cas de la récupération d'énergie.

Outre cet aspect mécanique non-linéaire pour la récupération d'énergie large

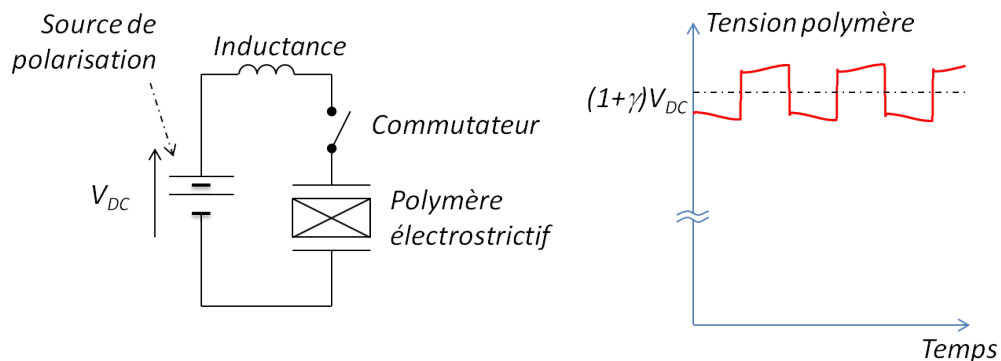


Figure VI.3 – Principe et formes d'ondes de la technique SSDI dynamique pour le contrôle de vibrations à l'aide de polymères électrostrictifs.

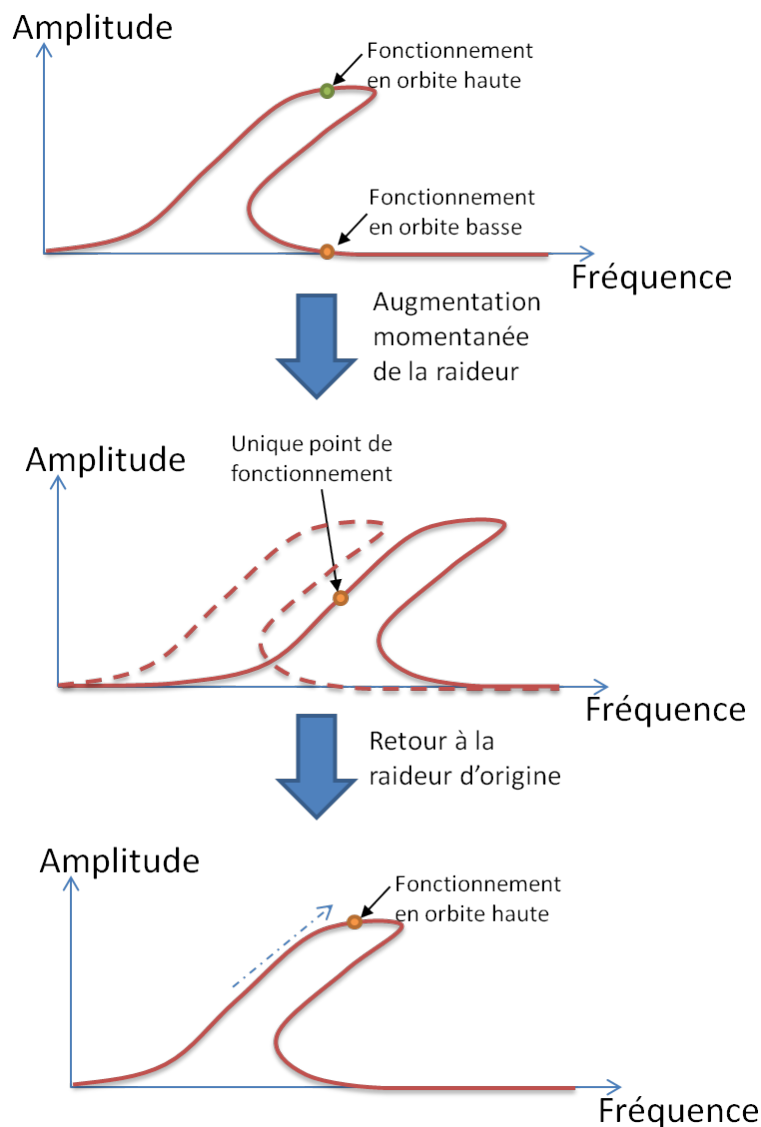


Figure VI.4 – Utilisation de la modulation de raideur pour les structures mécaniquement non-linéaires.

bande, l'utilisation de structures distribuées, par exemple via des techniques dérivées du filtrage spatial ou encore des structures périodiques (avec éventuellement, comme exposé dans le paragraphe précédent, des systèmes à masse accordée - ces dernières correspondant ici au cas de microgénérateurs sismiques) peut être avantageux pour la récupération d'énergie sur plusieurs modes de manière efficace. A titre d'exemple, en reprenant les résultats de la Figure II.31(b), la somme des valeurs efficaces de tension des deux éléments piézoélectriques sur la période de temps considérée passe de 43,5 V dans le cas de contrôle indépendant à 55,5 V pour l'utilisation du filtrage spatial et 81,8 V pour la technique combinant filtrage spatial et temporel. En utilisant de telles structures distribuées, assurer des échanges optimaux vers l'étage de stockage n'est pas trivial ([LWLS13]); cependant certaines techniques, comme le SSHI série, permettent de limiter les interférences entre les différentes branches de commutation

et/ou les transducteurs (Figure VI.5).

En plus de l'effet piézoélectrique, d'autres couplages sont également intéressants à étudier, notamment pour les applications pour lesquelles les éléments piézoélectriques ne sont pas forcément adaptés. Particulièrement, la ré-activation de la thématique de récupération d'énergie à l'aide de polymères électrostrictifs en adressant le problème de polarisation par l'utilisation de circuits auto-synchrones ([dQD11, DKB<sup>+</sup>14, LRW<sup>+</sup>14, WLMC15, WRM<sup>+</sup>15, LWMC15] - Figure VI.6) est une alternative qui pourrait permettre d'assurer une applicabilité de ces matériaux pour ce type d'activation.

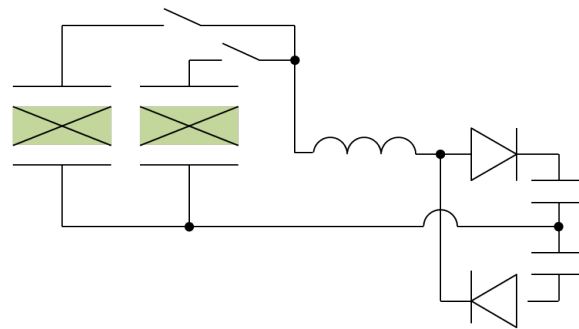
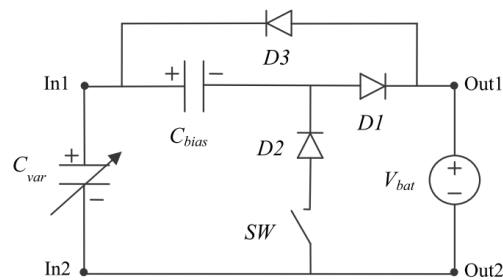
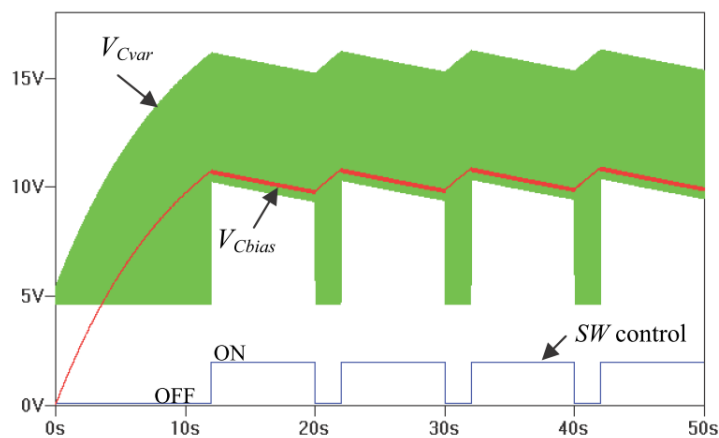


Figure VI.5 – Circuit d'interfaçage SSHI série multi-éléments vers étage unique de stockage avec interférences limitées.



(a) Circuit



(b) Formes d'onde de simulation

Figure VI.6 – Circuit auto-synchrone présenté dans [LWMC15].



En termes de nouveaux couplages, l'utilisation de matériaux magnétostrictifs ([Uen12]) ou de polymère magnétorhéologiques (Figure VI.7), dont la polarisation est aisée grâce à l'utilisation d'aimants, est également envisagée, et par ailleurs engagée via un projet avec l'Université de Tohoku débutant en Avril 2016 (Figure VI.8). Ce projet inclut également une partie de modélisation du couplage dans ces élastomères, dont l'approche dans le cas des polymères électrostrictifs pourra être adaptée.

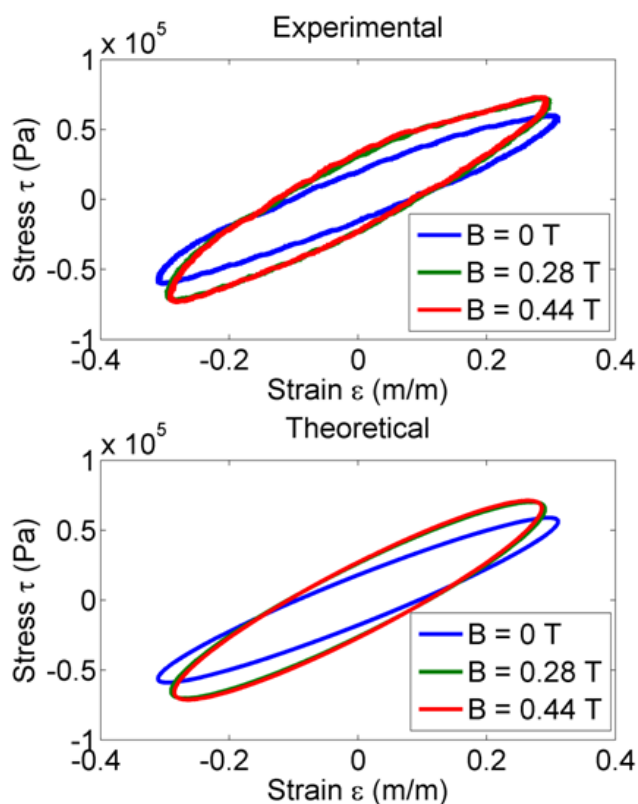


Figure VI.7 – Réponses mécaniques d'élastomères magnétorhéologiques pour différents champs magnétiques ([NSCL15]).

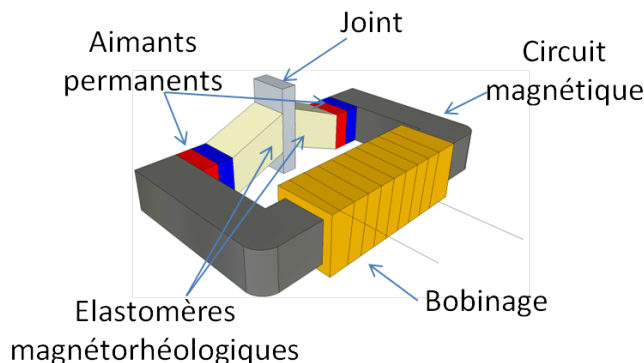


Figure VI.8 – Exemple de structure pour la récupération d'énergie à partir d'élastomères magnétorhéologiques.

En plus de la source vibratoire, la possibilité de récupérer l'énergie thermique par des variations temporelles de la température à l'aide d'éléments électrostrictifs (voir Paragraphe IV.2.1) sera à valider. Ceci sera permis notamment par la thèse de Kritsadi THETPRAPHI, débutant normalement en Septembre 2016.

De même, l'étude de la récupération d'énergie à partir du vent à petite échelle, réactivant ainsi une activité initiée lors du post-doctorat, utilisant par exemple des états instables, est une piste envisagée. Sur ce dernier point, l'utilisation d'une lame rigide montée sur un pivot relié à une poutre incluant un matériau actif (par exemple piézoélectrique - Figure VI.9) et basculant à l'aide de heurtoirs est une solution à creuser.

### VI.3.2 Animations et administrations

En complément des activités purement scientifiques, les activités de promotion et de responsabilités scientifiques sont tout aussi importantes. Ainsi, la poursuite et la candidature à des projets publics ou liés à l'industrie est cruciale afin de s'assurer de la pertinence des axes de recherche (tout en permettant de financer celle-ci). Notamment la proposition en nom propre et la prise de responsabilité de ces projets sont primordiales afin de pouvoir mener les activités scientifiques.

En plus de cet aspect contractuel, maintenir la présence dans certains comités (OMNT, réflexions INSA sur les enjeux sociétaux...), la participation à la vie de la recherche sur un plan local ou national (Ecole Doctorale, organisation de conférences...) et l'implication dans la constitution de nouveaux groupes est nécessaire afin de garantir le rayonnement scientifique. A titre d'exemple, il a été précédemment noté le manque de rayonnement sur la thématique de contrôle vibratoire. Afin de palier à ce problème, la participation au montage et à l'animation de la structure fédérative METAVIBRO permettra une meilleure reconnaissance nationale dans ce domaine.

De plus, maintenir la reconnaissance internationale, par exemple en termes de récupération d'énergie, reste nécessaire, via la participation à l'organisation de confé-

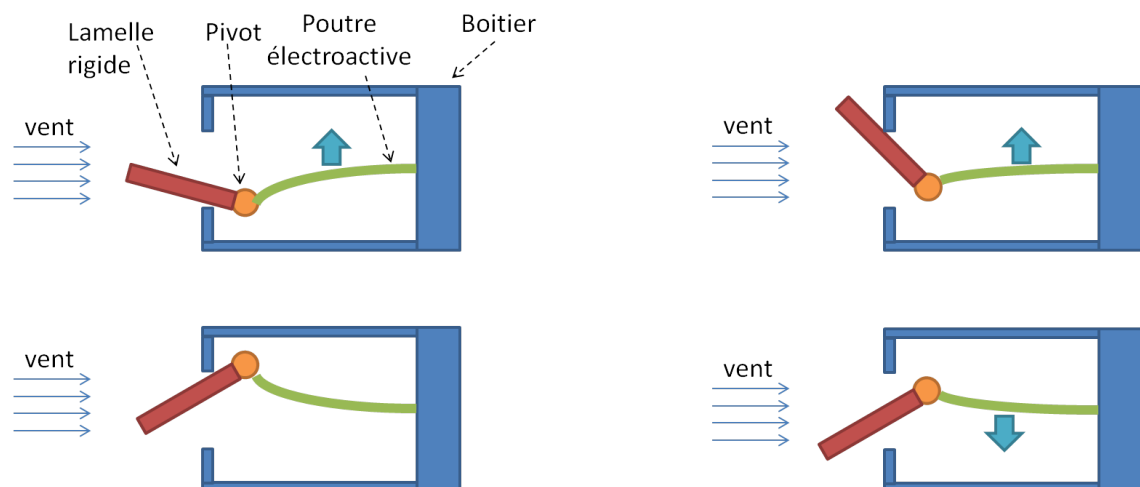


Figure VI.9 – Principe de la micro-éolienne exploitant des états instables.

rences (par exemple PowerMEMS School ou Energy Harvesting Workshop ainsi que la société afférente) ou la participation à des Jurys de thèse à l'étranger (voir par exemple la soutenance de M<sup>me</sup> Marta BERARDENGO), ou encore des collaborations internationales (tels que les projets ANR-MOST BESTMEMS ou avec l'Université de Tohoku), tout en assurant une visibilité nationale, encore à pérenniser, notamment par l'organisation de colloques nationaux (à l'instar des Journées Nationales de la Récupération et le Stockage d'Énergie 2017) ainsi que par la participation, en tant qu'examineur ou rapporteur, à des Jurys de soutenance de doctorat. L'aspect local est également à développer, via la participation à des réflexions au niveau INSA (enjeux sociétaux) ainsi que le montage de projets intra-établissement (BQR<sup>VI.6</sup> INSA ATCHOUM par exemple).

Enfin, assurer un lien entre recherche et formation est nécessaire pour garantir la continuité de l'activité. Ainsi, les différentes responsabilités (Double Diplôme, option Conversion de l'Énergie Électrique...) pourront être l'occasion de tisser des liens scientifiques avec les partenaires académiques visités ou de sensibiliser les étudiants au monde de la recherche. En particulier, le recrutement de doctorants pourra être facilité par ces activités (à titre d'exemple, l'implication, en tant que responsable d'option au département Génie Électrique, au montage et à la participation aux "parcours recherche" proposé par l'Institut est une opportunité très intéressante à ce sujet).

# Références Bibliographiques

- [ABLS05] F. Al-Bender, V. Lampaert, and J. Swevers. The generalized maxwell-slip model : a novel model for friction simulation and compensation. *IEEE Trans. Autom. Cont.*, 50 :1883–1887, 2005.
- [arv] Arveni SAS. <http://www.arveni.fr/fr/>.
- [Ash03] S. Ashley. Artificial muscles. *Sci. Am.*, 289 :52–59, 2003.
- [Bad06] A. Badel. *Récupération d'énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire*. PhD thesis, Université de Savoie, 2006.
- [BAV<sup>+</sup>10] S. Bressers, D. Avirovik, C. Vernieri, J. Regan, S. Chappell, M. Hotze, S. Luhman, M. Lallart, D. Inman, and S. Priya. Small-scale modular windmill. *Am. Cer. Soc. Bull.*, 89(8) :34–40, 2010.
- [Baz01] A. Baz. Active control of periodic structures. *Transactions of the ASME*, 123 :472–479, 2001.
- [BC00] Y. Bar-Cohen. *Electroactive polymers as artificial muscles-capabilities, potentials and challenges, Handbook on Biomimetics*, volume Sec. 11, Chapter 8, “Motion”, paper #134. NTS Inc., 2000.
- [BC01] Y. Bar-Cohen, editor. *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles - Reality, Potential and Challenges*, volume PM98. SPIE Press, 2001. ISBN 0-8194-4054-X.
- [BCG<sup>+</sup>12] F. Belhora, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, L. Lebrun, A. Hajjaji, M. Mazroui, and Y. Boughaleb. Hybridization of electrostrictive polymers and electrets for mechanical energy harvesting. *Sens. Act. A : Phys.*, 183 :50–56, 2012.
- [BDCS10] S. Boisseau, G. Despesse, J.-J. Chaillout, and A. Sylvestre. Microstructures électrostatiques de récupération d'énergie vibratoire pour les microsystèmes. Technical Report RE 160, Techniques de l'Ingénieur, 2010.
- [BDS10] S. Boisseau, G. Despesse, and A. Sylvestre. Optimization of an electret-based energy harvester. *Smart Mater. Struct.*, 19 :075015, 2010.

- [BFL15] A. Badel, F. Formosa, and M. Lallart. *Micro Energy Harvesting*, chapter Electromechanical Transducers, pages 27–60. Wiley, 2015.
- [BMF03] S. Behrens, S. O. R. Moheimani, and A. J. Fleming. Multiple mode current flowing passive piezoelectric shunt controller. *Journal of Sound and Vibration*, 266 :929–942, 2003.
- [Bou67] R. Bouc. Forced vibration of mechanical systems with hysteresis. In *Proceedings of the Fourth Conference on Non-linear Oscillation*, page 315, Prague, Czechoslovakia, 1967.
- [BSG<sup>+</sup>06] A. Badel, G. Sebald, D. Guyomar, M. Lallart, E. Lefeuvre, C. Richard, and J. Qiu. Piezoelectric vibration control by synchronized switching on adaptive voltage sources : towards wideband semi-active damping. *Journal of the Acoustical Society of America*, 119(5) :2815–2825, 2006.
- [BTT<sup>+</sup>07] S. P. Beeby, R. N. Torah, M. J. Tudor, P. Glynne-Jones, T. O’Donnell, C. R. Saha, and S. Roy. A micro electromagnetic generator for vibration energy harvesting. *J. Micromech. Microeng.*, 17 :1257–1265, 2007.
- [Can84] G. Cantor. De la puissance des ensembles parfaits de points. *Acta Math.*, 4 :381–392, 1884.
- [Car24] S. Carnot. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier, Paris, 1824.
- [CAXS02] K.-S. Chen, A. A. Ayón, X. Zhang X, and S. M. Spearing. Effect of process parameters on the surface morphology and mechanical performance of silicon structures after deep reactive ion etching (DRIE). *J. Microelectromech. Syst.*, 11(3) :264–275, 2002.
- [CBCR12] F. Casadei, B. S. Beck, K. A. Cunefare, and M. Ruzzene. Vibration control of plates through hybrid configurations of periodic piezoelectric shunts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(10) :1169–1177, 2012.
- [CC41] K. S. Cole and R. H. Cole. Dispersion and absorption in dielectrics - i alternating current characteristics. *J. Chem. Phys.*, 9 :341–352, 1941.
- [CC42] K. S. Cole and R. H. Cole. Dispersion and absorption in dielectrics - ii direct current characteristics. *J. Chem. Phys.*, 10 :98–105, 1942.
- [CCI09] M. Collet, K. A. Cunefare, and M. N. Ichchou. Wave motion optimization in periodically distributed shunted piezocomposite beam structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20 :787–808, 2009.

- [CCTS08] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry. Powering mems portable devices - a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Mater. Struct.*, 17 :043001, 2008.
- [CGC<sup>+</sup>14] J.-F. Capsal, J. Galineau, P.-J. Cottinet, M. Lallart, and D. Guyomar. Procédé de fabrication de matériau composite polarisable sous l'action d'un faible champ électrique. Brevet # PCT/EP2014/057997, numéro de publication WO2014170479 A1, 2014.
- [CGG<sup>+</sup>10] P.-J. Cottinet, D. Guyomar, B. Guiffard, C. Putson, and L. Lebrun. Modeling and experimentation on an electrostrictive polymer composite for energy harvesting. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 57(4) :774–784, 2010.
- [CGL11] P.-J. Cottinet, D. Guyomar, and M. Lallart. Electrostrictive polymer harvesting using a nonlinear approach. *Sens. Act. A : Phys.*, 172 :497–503, 2011.
- [CGL<sup>+</sup>14] J.-F. Capsal, J. Galineau, M. Lallart, P.-J. Cottinet, and D. Guyomar. Plasticized relaxor ferroelectric terpolymer : Toward giant electrostriction, high mechanical energy and low electric field actuators. *Sens. Act. A : Phys.*, 207 :25–31, 2014.
- [Chu08] B. Chu. PvdF-based copolymers, terpolymers and their multi-component material systems for capacitor applications. Master's thesis, The Pennsylvania State University, 2008.
- [Cla00] W. W. Clark. Vibration control with state-switched piezoelectric materials. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11 :263–271, 2000.
- [CLC<sup>+</sup>12] J.-F. Capsal, M. Lallart, P.-J. Cottinet, J. Galineau, G. Sebald, and D. Guyomar. Evaluation of macroscopic polarization and actuation abilities of electrostrictive dipolar polymers using microscopic Debye/Langevin formalism. *J. Phys. D. : Appl. Phys.*, 45(20) :205401, 2012.
- [CLG<sup>+</sup>11] P.-J. Cottinet, M. Lallart, D. Guyomar, B. Guiffard, L. Lebrun, G. Sebald, and C. Putson. Analysis of ac-dc conversion for energy harvesting using an electrostrictive polymer p(vdf-trfe-cfe). *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 58(1) :30–42, 2011.
- [CLK<sup>+</sup>11] S. T. Choi, J. Y. Lee, J. O. Kwon, S. Lee, and W. Kim. Varifocal liquid-filled microlens operated by an electroactive polymer actuator. *Opt. Lett.*, 36(10) :1920–1922, 2011.
- [CLQ<sup>+</sup>13] X. Z. Chen, X. Li, X. S. Qian, S. Wu, S. G. Lu, H. M. Gu, M. Lin, Q. D. Shen, and Q. M. Zhang. A polymer blend approach to tailor

- the ferroelectric responses in p (vdf-trfe) based copolymers. *Polymers*, 54 :2373–2381, 2013.
- [Cot10] P.-J. Cottinet. *Actionnement et Récupération d’Energie à l’Aide de Polymères Electro-Actifs*. PhD thesis, INSA Lyon, 2010. 2010-ISAL-0094.
- [CRDC10] F. Casadei, M. Ruzzene, L. Dozio, and K. A. Cunefare. Broadband vibration control through periodic arrays of resonant shunts : experimental investigation on plates. *Smart Materials and Structures*, 19 :015002, 2010.
- [CRFN96] S. J. Elliot C. R. Fuller and P. A. Nelson, editors. *Active control of vibration*. Academic press, London, 1996.
- [CZR<sup>+</sup>06] B. Chu, X. Zhou, K. Ren, B. Neese, M. Lin, Q. Wang, F. Bauer, and Q. M. Zhang. A dielectric polymer with high electric energy density and fast discharge speed. *Science*, 313 :334–336, 2006.
- [DBM<sup>+</sup>12] N. Degrenne, M. Boileau, F. Morel, F. Khaled, O. Ondel, F. Buret, and B. Allard. Association of flyback converters to harvest energy from multiple hydraulically connected biofuel cells. In *Proc. 2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GREENCOM 2012)*, pages 664–667, 2012.
- [DCC05] T. R. Dargaville, M. Celina, and P. M. Chaplya. Evaluation of piezoelectric pvdf polymers for use in space environments. part i : Temperature limitations. *J. Polym. Sci. Part B : Polym. Phys.*, 43 :1310–1320, 2005.
- [DGS07] B. Ducharne, D. Guyomar, and G. Sebald. Low frequency modelling of hysteresis behaviour and dielectric permittivity in ferroelectric ceramics under electric field. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 40 :551–555, 2007.
- [DHTS13] A. Dementyev, S. Hodges, S. Taylor, and J. Smith. Power consumption analysis of bluetooth low energy, zigbee, and ant sensor nodes in a cyclic sleep scenario. In *Proc. of IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, 2013. 14-18 April 2013, Beijing, China.
- [DKB<sup>+</sup>14] V. Dorzhiev, A. Karami, P. Basset, V. Dragunov, and D. Galayko. Mems electrostatic vibration energy harvester without switches and inductive elements. *J. Phys. : Conf. Series, PowerMEMS 2014*, 557 :012126, 2014.
- [DKES14] Q. Deng, M. Kammoun, A. Erturk, and P. Sharma. Nanoscale flexoelectric energy harvesting. *Int. J. Solids Struct.*, 51(18) :3218–3225, 2014.

- [DMBR78] G. T. Davis, J. E. McKinney, M. G. Broadhurst, and S. C. Roth. Electric-field-induced phase changes in poly(vinylidene fluoride). *J. Appl. Phys.*, 49 :4998–5002, 1978.
- [dQD11] A. C. M. de Queiroz and M. Domingues. The doubler of electricity used as battery charger. *IEEE Trans. Circ. Syst.*, 58(12) :797–801, 2011.
- [DSEBC06] T. R. Dargaville, J. M. Skutnik-Elliott, B. A. Banks, and M. Celine. Evaluation of piezoelectric pvdf polymers for use in space environments. part iii : Comparison of the effects of vacuum uv and  $\gamma$ -radiation. *J. Polym. Sci. Part B : Polym. Phys.*, 44 :3253–3264, 2006.
- [DZGS13] B Ducharne, B Zhang, D Guyomar, and G Sebald. Fractional derivative operators for modeling piezoceramic polarization behaviors under dynamic mechanical stress excitation. *Sensors and Actuators A : Physical*, 189 :74–79, 2013.
- [Edg93] G. A. Edgar. *Classics on Fractals*. Basic Books, New York, 1993.
- [EEC03] N. Elvin, A. Elvin, and D. H. Choi. A self-powered damage detection sensor. *Journal of Strain Analysis*, 38 :115–124, 2003.
- [EES01] N. G. Elvin, A. A. Elvin, and M. Spector. A self-powered mechanical strain energy sensor. *Smart Materials and structures*, 10 :293–399, 2001.
- [EHI09] A. Erturk, J. Hoffmann, and D. J. Inman. A piezomagnetoelastic structure for broadband vibration energy harvesting. *Appl. Phys. Lett.*, 94 :254102, 2009.
- [eno] Enocean GmbH. <https://www.enocean.com/en/>.
- [EYS<sup>+</sup>99] S. Eury, R. Yimnirun, V. Sundar, P.J. Moses, S.-J. Jang, and R.E. Newnham. Converse electrostriction in polymers and composites. *Mater. Chem. Phys.*, 61 :18–23, 1999.
- [FM59] E. Fatuzoo and J. Merz. Switching mechanism in triglycine sulfate and other ferroelectrics. *Phys. Rev.*, 116 :61–68, 1959.
- [Gal09] C. A. Gallimore. Passive viscoelastic constrained layer damping application for a small aircraft landing gear system. Master’s thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2009.
- [GB06] D. Guyomar and A. Badel. Nonlinear semi-passive multimodal vibration damping : an efficient probabilistic approach. *Journal of Sound and Vibration*, 294 :249–268, 2006.



- [GBLR05] D. Guyomar, A. Badel, E. Lefeuvre, and C. Richard. Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by non-linear processing. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 52(4) :584–595, 2005.
- [GCJD08a] R. Guigon, J.-J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse. Harvesting raindrop energy : experimental study. *Smart Mater. Struct.*, 17 :015039, 2008.
- [GCJD08b] R. Guigon, J.-J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse. Harvesting raindrop energy : theory. *Smart Mater. Struct.*, 17 :015038, 2008.
- [GDS07] D. Guyomar, B. Ducharne, and G. Sebald. Dynamical hysteresis model of ferroelectric ceramics under electric field using fractional derivatives. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 40 :6048–6054, 2007.
- [GGG<sup>+</sup>10] B. Guiffard, D. Guyomar, L. Garbuio, R. Belouadah, J. Zhang, and P. J. Cottinet. Eddy current induced magnetoelectricity in a piezoelectric unimorph bender. *Appl. Phys. Lett.*, 96 :044105, 2010.
- [GJP<sup>+</sup>07] D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, C. Richard, and M. Lallart. Synchronized switch harvesting applied to self-powered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless transmitters. *Sensors and Actuators A : Physical*, 138(1) :151–160, 2007. doi :10.1016/j.sna.2007.04.009.
- [GLC<sup>+</sup>15] F. Ganet, M.-Q. Le, J.F. Capsal, J.F. Gérard, S. Pruvost, J. Duchet, S. Livi, P. Lermusiaux, A. Millon, and P.-J. Cottinet. Haptic feedback using an all-organic electroactive polymer composite. *Sens. Act. B : Chem.*, 220 :1120–1130, 2015.
- [GLM08] D. Guyomar, M. Lallart, and T. Monnier. Stiffness tuning using a low-cost semi-active nonlinear technique. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 13(5) :604–607, 2008.
- [GLP<sup>+</sup>09] D. Guyomar, L. Lebrun, C. Putson, P.-J. Cottinet, B. Guiffard, and S. Muensit. Electrostrictive energy conversion in polyurethane nanocomposites. *J. Appl. Phys.*, 106 :014910, 2009.
- [GMG<sup>+</sup>09] D. Guyomar, D.F. Matei, B. Guiffard, Q. Le, and R. Belouadah. Magnetoelectricity in polyurethane films loaded with different magnetic particles. *Mat. Lett.*, 2009.
- [GNSLM10] J. Gomes, J. Serrado Nunes, V. Sencadas, and S. Lanceros-Mendez. Influence of the  $\beta$ -phase content and degree of crystallinity on the piezo- and ferroelectric properties of poly(vinylidene fluoride). *Smart Mater. Struct.*, 19 :065010, 2010.
- [GRM07] D. Guyomar, C. Richard, and S. Mohammadi. Semi-passive random vibration control based on statistics. *Journal of Sound and Vibration*, 307 :818–833, 2007.

- [GSP<sup>+</sup>09] D. Guyomar, G. Sébald, S. Pruvost, M. Lallart, A. Khodayari, and C. Richard. Energy harvesting from ambient vibrations and heat. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 20(5) :609–624, 2009.
- [GSSG06] B Guiffard, L Seveyrat, G Sebald, and D Guyomar. Enhanced electric field-induced strain in non-percolative carbon nanopowder/polyurethane composites. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 39 :3053–3057, 2006.
- [GZW05] H. Gu, Y. Zhao, and M. L. Wang. A wireless smart pvdF sensor for structural health monitoring. *Struct. Control Health Monitor.*, 12 :329–343., 2005.
- [HBH11] D. A. Howey, A. Bansal, and A.S. Holmes. Design and performance of a cm-scale shrouded wind turbine for energy harvesting. *Smart Mater. Struct.*, 20 :085021, 2011.
- [HF91] N. W. Hagood and A. V. Flotow. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electric networks. *Journal of Sound and Vibration*, 146(2) :243–268, 1991.
- [HG02] S. Hurlebaus and L. Gaul. *Responsive Systems for Active Vibration Control*, chapter PVDF-transducers for Structural Health Monitoring, page 285–296. Kluwer Academic, 2002.
- [HHMaBP04] J. A. Hagerty, F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, and R. Zane and Z. B. Popović. Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays. *IEEE Trans. Microwave Th. Tech.*, 52(3) :1014–1024, 2004.
- [HKL05] T. Hegewald, M. Kaltenbacher, and R. Lerch. Characterization and modeling of piezoelectric stack actuators. In *Proceedings of IWPMA 2005, 2<sup>nd</sup> International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators.*, page 99–106, Heinz Nixdorf Institute, Paderborn, Germany, 2005.
- [Hol94] J. J. Hollkamp. Multimodal passive vibration suppression with piezoelectric materials and resonance shunts. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5 :49–57, 1994.
- [HRG09a] S. Harari, C. Richard, and L. Gaudiller. Hybrid active/ semi-active modal control of smart structures”. In *Proc. SPIE active and passive smart structures and integrated system, vol. 7288*, 2009.
- [HRG09b] S. Harari, C. Richard, and L. Gaudiller. New semi-active multi-modal vibration control using piezoceramic components. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 20(13) :1603–1613, 2009.

- [HY15] D. Han and K.-S. Yun. Piezoelectric energy harvester using mechanical frequency up conversion for operation at low-level accelerations and low-frequency vibration. *Microsystem Tech.*, 21(8) :1669–1676, 2015.
- [HZS08] W. Hong, X. Zhao, J. Zhou, and Z. Suo. A theory of coupled diffusion and large deformation in polymeric gels. *J. Mech. Phys. Sol.*, 56 :1779–1793, 2008.
- [Isi24] E. Ising. *Contribution to the Theory of Ferromagnetism*. PhD thesis, Universities of Göttingen and Hamburg, 1924. (traduction : 1925).
- [JA84] D. C. Jiles and D. L. Atherton. Theory of the magnetisation process in ferromagnets and its application to the magnetomechanical effect. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 17 :1265–1281, 1984.
- [JMCS12] C. Jean-Mistral, T. Vu Cong, and A. Sylvestre. Advances for dielectric elastomer generators : Replacement of high voltage supply by electret. *Appl. Phys. Lett.*, 101 :162901, 2012.
- [JNC02] L. Jinhua, Y. Ningyi, and H. L. W. Chan. Preparation of pclt/p(vdf-trfe) pyroelectric sensor based on plastic film substrate. *Sens. Act. A : Phys.*, 100 :231–235, 2002.
- [JQZ<sup>+</sup>09] H. Ji, J. Qiu, K. Zhu, Y. Chen, and A. Badel. Multi-modal vibration control using a synchronized switch based on a displacement switching threshold. *Smart Materials and Structures*, 18 :035016, 2009.
- [JVRB<sup>+</sup>13] W. Jia, G. Valdés-Ramírez, A. J. Bhandarkar, J. R. Windmiller, and J. Wang. Epidermal biofuel cells : Energy harvesting from human perspiration. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52 :7233–7236, 2013.
- [KCH<sup>+</sup>10] N. Kong, T. Cochran, D. S. Ha, H.-C. Lin, and D. J. Inman. A self-powered power management circuit for energy harvested by a piezoelectric cantilever. In *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electron. Conf. Expo. (APEC)*, pages 2154 – 2160, 2010. Palm Springs, CA.
- [KCL<sup>+</sup>10] J.-O. Kwon, S.-T. Choi, S.-W. Lee, W.-B. Kim, and M.-S. Choi. Electroactive polymer actuator and manufacturing method thereof. Brevet # US 11/927,827, numéro de publication US7719167 B2, 2010.
- [KDZvS08] S. Kerzenmacher, J. Ducreé, R. Zengerle, and F. von Stetten. Energy harvesting by implantable abiotically catalyzed glucose fuel cells. *J. Power Sources*, 182 :1–17, 2008.
- [KE03] C. Keawboonchuay and T. G. Engel. Electrical power generation characteristics of piezoelectric generator under quasi-static and dynamic stress conditions. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 50 :1377–1382, 2003.

- [KG08] K. R. Kumar and N. Ganesan. Vibration and damping studies on a hollow sandwich box column with a viscoelastic/electrorheological/magnetorheological fluid core layer by the finite element method. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 8(4) :531–546, 2008.
- [Kit12] S. Kitazawa. Energy harvesting from ambient rf sources. In *2012 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission : Technologies, Systems, and Applications (IMWS)*, pages 39 – 42, 2012. 10-11 May 2012, Koyot, Japan.
- [KP89] M. A. Krasnosel'Skii and A. Pokrovskii. *Systems with Hysteresis*. Springer-Verlag, 1989.
- [KRO<sup>+</sup>06] S. Kulkarni, S. Roy, T. O'Donnell, S. Beeby, and J. Tudor. Vibration based electromagnetic micropower generator on silicon. *J. Appl. Phys.*, 9 :08P511, 2006.
- [LAI10] M. Lallart, S. R. Anton, and D. J. Inman. Frequency self-tuning scheme for broadband vibration energy harvesting. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 21(9) :897–906, 2010.
- [Lal08] M. Lallart. *Amélioration de la conversion électroactive de matériaux piézoélectriques et pyroélectriques pour le contrôle vibratoire et la récupération d'énergie : application au contrôle de santé structurale auto-alimenté*. PhD thesis, INSA Lyon, 2008.
- [Lal10] M. Lallart, editor. *Ferroelectrics—Applications*. Sciyo/Intech, Croatia, 2010. ISBN 978-953-307-456-6.
- [Lal16] M. Lallart. Conversion électrothermique. Cours INSA, Département Génie Electrique, option “Conversion de l'Energie Electrique”, 2016.
- [LARG07] E. Lefeuvre, D. Audigier, C. Richard, and D. Guyomar. Buck-boost converter for sensorless power optimization of piezoelectric energy harvester. *IEEE Trans. Power Electron*, 22(5) :2018–2025, 2007.
- [LBF<sup>+</sup>13] W. Q. Liu, A. Badel, F. Formosa, Y. P. Wu, and A. Agbossou. Novel piezoelectric bistable oscillator architecture for wideband vibration energy harvesting. *Smart Mater. Struct.*, 22(3) :035013, 2013.
- [LBF<sup>+</sup>15] W. Q. Liu, A. Badel, F. Formosa, Y. Wu, N. Bencheikh, and A. Agbossou. A wideband integrated piezoelectric bistable generator : experimental performance evaluation and potential for real environmental vibrations. *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 26 :872 – 877, 2015.
- [LBP<sup>+</sup>06] E. Lefeuvre, A. Badel, L. Petit, C. Richard, and D. Guyomar. Semi-passive piezoelectric structural damping by synchronized switching on voltage sources. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17 :653–660, 2006.

- [LBR<sup>+</sup>06] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, L. Petit, and D. Guyomar. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sens. Act. A : Phys.*, 126 :405–416, 2006.
- [LBRG05] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, and D. Guyomar. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 16 :865–876, 2005.
- [LBRG07] E. Lefeuvre, A. Badel, C. Richard, and D. Guyomar. Energy harvesting using piezoelectric materials : Case of random vibrations. *J. Electroceram.*, 19(4) :349–355, 2007.
- [LCGL12] M. Lallart, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, and L. Lebrun. Electrostrictive polymers for mechanical energy harvesting. *J. Polym. Sci. Part B : Polym. Phys.*, 20 :523–535, 2012.
- [LCI<sup>+</sup>12] M. Lallart, J.-F. Capsal, A. K. Mossi Idrissa, J. Galineau, M. Kanda, and D. Guyomar. Actuation abilities of multiphasic electroactive polymeric systems. *J. Appl. Phys.*, 112 :094108, 2012.
- [LCK<sup>+</sup>12] M. Lallart, J.-F. Capsal, M. Kanda, J. Galineau, D. Guyomar, K. Yuse, and B. Guiffard. Modeling of thickness effect and polarization saturation in electrostrictive polymers. *Sens. Act. B. : Chem.*, 171-172 :739–746, 2012.
- [LCL<sup>+</sup>10] M. Lallart, P.-J. Cottinet, L. Lebrun, B. Guiffard, and D. Guyomar. Evaluation of energy harvesting performance of electrostrictive polymer and carbon-filled terpolymer composites. *J. Appl. Phys.*, 108 :034901, 2010.
- [LCS<sup>+</sup>14] M. Lallart, J.-F. Capsal, G. Sebald, P.-J. Cottinet, and D. Guyomar. Converse electrostrictive effect in dielectric polymers. *Sens. Act. B. : Chem.*, 190 :259–264, 2014.
- [LG08] M. Lallart and D. Guyomar. Optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output. *Smart Mater. Struct.*, 17 :035030, 2008.
- [LGG<sup>+</sup>09] L. Lebrun, D. Guyomar, B. Guiffard, P.-J. Cottinet, and C. Putson. The characterisation of the harvesting capabilities of an electrostrictive polymer composite. *Sens. Act. A : Phys.*, 153 :251–257, 2009.
- [LGJ<sup>+</sup>08] M. Lallart, D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, P. Guy, and C. Richard. Synchronized switch harvesting applied to self-powered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless receivers. *Sensors and Actuators A : Physical, in press*, 2008.
- [LGRP10] M. Lallart, D. Guyomar, C. Richard, and L. Petit. Nonlinear optimization of acoustic energy harvesting using piezoelectric devices. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(5) :2739–2748, 2010.

- [LI11a] M. Lallart and D. J. Inman. Mechanical effect of combined piezoelectric and electromagnetic energy harvesting. In *Structural Dynamics and Renewable Energy, Volume 1*, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, pages 261–272, 2011.
- [Li11b] K. Li. *Amortissement vibratoire avec échange d'énergie synchronisé entre des éléments piézoélectriques*. PhD thesis, INSA Lyon, 2011.
- [LIG10] M. Lallart, D. J. Inman, and D. Guyomar. Transient performance of energy harvesting strategies under constant force magnitude excitation. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 21 :1279–1291, 2010.
- [LL02] C. Y. Lai and W. H. Liao. Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper. *Journal of Vibration and Control*, 8 :527–547, 2002.
- [LLRG08] M. Lallart, E. Lefeuvre, C. Richard, and D. Guyomar. Self-powered circuit for broadband, multimodal piezoelectric vibration control. *Sensors and Actuators A*, 143 :377–382, 2008.
- [LPBI10] M. Lallart, S. Priya, S. Bressers, and D. J. Inman. Small-scale piezoelectric energy harvesting devices using low density sources. *J. Korean Phys. Soc.*, 57(4) :947–951, 2010.
- [LPG96] L. Lebrun, L. Petit, and P. Gonnard. Piezoelectric motor using a (1, 1) non-axisymmetric mode. *Ultrasonics*, 34(2-5) :251–255, 1996.
- [LPK09] J. S. Lee, A. A. Prabu, and K. J. Kim. Ucst-type phase separation and crystallization behavior in poly(vinylidene fluoride)/poly(methyl methacrylate) blends under an external electric field. *Macromolecules*, 42 :5660–5669, 2009.
- [LPK10] J. S. Lee, A. A. Prabu, and K. J. Kim. Annealing effect upon chain orientation, crystalline morphology, and polarizability of ultra-thin p(vdf-trfe) film for nonvolatile polymer memory device. *Polymers*, 51 :6319–6333, 2010.
- [LRHZ05] Y. Liu, K. L. Ren, H. F. Hofmann, and Q. Zhang. Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 52(12) :2411–2417, 2005.
- [LRL<sup>+</sup>14] M. Lallart, C. Richard, Y. Li, Y.-C. Wu, and D. Guyomar. Load-tolerant, high efficiency self-powered energy harvesting scheme using a nonlinear approach. *Energy Harvesting and Systems*, 1(3-4) :197–208, 2014.
- [LRW<sup>+</sup>14] E. Lefeuvre, S. Risquez, J. Wei, M. Woytasik, and F. Parrain. Self-biased inductor-less interface circuit for electret-free electrostatic energy harvesters. *J. Phys. : Conf. Series, PowerMEMS 2014*, 557 :012052, 2014.

- [LW04] F.-M. Li and Y.-S. Wang. Localization of elastic waves in randomly disordered multi-coupled multi-span beams. *Waves in random media*, 14(3) :217–227, 2004.
- [LWL<sup>+</sup>10] P. Li, Y. Wen, P. Liu, X. Li, and C. Jia. A magnetoelectric energy harvester and management circuit for wireless sensor network. *Sens. Act. A : Phys.*, 157 :100–106, 2010.
- [LWLS13] H. C. Lin, P. H. Wu, I. C. Lien, and Y. C. Shu. Analysis of an array of piezoelectric energy harvesters connected in series. *Smart Mater. Struct.*, 22 :094026, 2013.
- [LWMC15] E. Lefeuvre, J. Wei, H. Mathias, and F. Costa. Single-switch inductorless power management circuit for electrostatic vibration energy harvesters. In *IEEE 13th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 2015. 07-10 June 2015, Grenoble, France.
- [LWR<sup>+</sup>12] M. Lallart, Y.-C. Wu, C. Richard, D. Guyomar, and E. Halvorsen. Broadband modeling of a nonlinear technique for energy harvesting. *Smart Mater. Struct.*, 21 :115006, 2012.
- [LWS<sup>+</sup>14] M. Lallart, L. Wang, G. Sebald, L. Petit, and D. Guyomar. Analysis of thermal energy harvesting using ferromagnetic materials. *Phys. Lett. A*, 378(43) :3151–3154, 2014.
- [LYRGss] M. Lallart, L. Yan, C. Richard, and D. Guyomar. Damping of periodic bending structures featuring nonlinearly interfaced piezoelectric elements. *J. Vib. Cont.*, *in press*.
- [LYWG22] M. Lallart, L. Yan, Y.-C. Wu, and D. Guyomar. Electromechanical semi-passive nonlinear tuned mass damper for efficient vibration damping. *J. Sound Vib*, 5696-5709 :2013, 332(22).
- [Man67] B. B. Mandelbrot. How long is the coast of britain. *Science*, 156(3775) :636–638, 1967.
- [Man83] B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. Henry Holt and Company, New York, 1983.
- [MBP11] A. Marin, S. Bressers, and S. Priya. Multiple cell configuration electromagnetic vibration energy harvester. *J. Phys. D : Appl. Phys.*, 44 :295501, 2011.
- [MF06] S. O. R. Moheimani and A. J. Fleming. *Piezoelectric transducers for vibration control and damping*. Springer-Verlag London, 2006.
- [MGBT14] J. W. Matiko, N. J. Grabham, S. P. Beedy, and M. J. Tudor. Review of the application of energy harvesting in buildings. *Meas. Sci. Technol.*, 25 :012002, 2014.

- [MHH<sup>+</sup>13] K. MacVittie, J. Halámek, L. Halámková, M. Southcott, W. D. Jemison, R. Lobeld, and E. Katz. From “cyborg” lobsters to a pacemaker powered by implantable biofuel cells. *Energy Env. Sci.*, 6 :81–86, 2013.
- [mic] Micropelt GmbH. <http://micropelt.com/>.
- [MMB07] T. Mirfakhrai, J. D. W. Madden, and R. H. Baughman. Polymer artificial muscles. *Mater. Today.*, 10 :30–38, 2007.
- [MMA<sup>+</sup>01] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. P. Chandrakasan, and J. H. Lang. Vibration-to-electric energy conversion. *IEEE Trans. VLSI*, 9(1) :64–76, 2001.
- [MNSC08] K.-J. Morton, G. Nieberg, S. Bai S, and S. Y. Chou. Wafer-scale patterning of sub-40 nm diameter and high aspect ratio (>50 :1) silicon pillar arrays by nanoimprint and etching. *Nanotechnologies*, 19(34) :345301, 2008.
- [MOCA10] T. McKay, B. O’Brien, E. Calius, and Iain Anderson. An integrated, self-priming dielectric elastomer generator. *Appl. Phys. Lett.*, 97 :062911, 2010.
- [MRC05] K. Mrabet, R. Rahouadj, and C. Cunat. An irreversible thermodynamic model for semicrystalline polymers submitted to multisequence loading at large strain. *Pol. Eng. Sci.*, 45(1), 2005.
- [MRS<sup>+</sup>05] F. Marty, L. Rousseau, B. Saadany, B. Mercier, O. Français, Y. Mita, and T. Bourouina. Advanced etching of silicon based on deep reactive ion etching for silicon high aspect ratio microstructures and three-dimensional micro- and nanostructures. *Microelec. J.*, 36(7) :673–677, 2005.
- [MSGM08] G. C. Marano, S. Sgobba, R. Greco, and M. Mezzina. Robust optimum design of tuned mass dampers devices in random vibration mitigation. *Journal of Sound and Vibration*, 313 :472–492, 2008.
- [MVKP07] R. Myers, M. Vickers, H. Kim, and S. Priya. Small scale windmill. *Appl. Phys. Lett.*, 90 :054106, 2007.
- [MYH<sup>+</sup>14] K. Makihara, Y. Yamamoto, C. Horiguchi, H. Sakaguchi, and K. Fujimoto. An innovative controller to increase harvested energy. In *PowerMEMS 2014, Journal of Physics : Conference Series*, volume 557, page 012023, 2014.
- [MZK03] A. Mazzone, R. Zhang, and A. Kunz. Novel actuators for haptic displays based on electroactive polymers. In *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST* : Osaka, Japan., October 1–3 2003.



- [Nak98] B. C. Nakra. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping. *Journal of Sound and Vibration*, 211(3) :449–466, 1998.
- [NAMT09] A. Nisar, N. Afzulpurkar, B. Mahaisavariya, and A. Tuantranont. Mems-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. *Sens. Actuators B : Chem.*, 130 :917–942, 2009.
- [NHR08] B. Nogarède, C. Henaux, and J.-F. Rouchon. Actionneurs électromécaniques pour la robotique et le positionnement - fondamentaux et structures de base. Technical Report D5341, Techniques de l’Ingénieur, 2008.
- [nov] Novasentis, Inc. <http://www.novasentis.com/>.
- [NSCL15] M. Nakano, G. Sebald, J.-Y. Cavaillé, and M. Lallart. Magnetorheological elastomers for energy harvesting. Technical report, Tohoku University, 2015.
- [NTB<sup>+</sup>05] R. C. G. Naber, C. Tanase, P. W. M. Blom, G. H. Gelinck, A., W. Marsman, F. J. Touwslager, S. Setayesh, and D. M. de Leeuw. High-performance solution-processed polymer ferroelectric field-effect transistors. *Nature Materials*, 4 :243–248, 2005.
- [NTW03] N. T. Nguyen, T. Q. Truong, and Z. Wu. A piezoelectric micropump based on polymeric micromachining. In *7<sup>th</sup> International Conference on Miniaturized Chemical and Biochemical Analysts Systems*, Squaw Valley : California, October 5–9 2003.
- [NVPH00] A. K. Noor, S. L. Venneri, D. B. Paul, and M. A. Hopkins. Structures technology for future aerospace systems. *Comp. Struct.*, 74(5) :507–519, 2000.
- [OHBL02] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre. Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply. *IEEE Trans. Power Electron.*, 17(5) :669–676, 2002.
- [OHL03] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, and G. A. Lesieutre. Optimized piezoelectric energy harvesting circuit using step-down converter in discontinuous conduction mode. *IEEE Trans. Power Electron.*, 18(2) :696–703, 2003.
- [OSBT07] T. O’Donnell, C. Saha, S. Beeby, and J. Tudor. Scaling effects for electromagnetic vibrational power generators. *Microsyst. Technol.*, 13 :1637–1645, 2007.
- [Pas89] F. Paschen. Über die zum funkenübergang in luft, wasserstoff and kohlen-säure bei verschiedenen drücken erforderliche potentialdifferenz. *Wied. Annales de physique*, 37 :69–96, 1889.

- [PCFZ05] S. Priya, C.-T. Chen, D. Fye, and J. Zahnd. Piezoelectric windmill : A novel solution to remote sensing. *Jap. J. Appl. Phys.*, 44(3) :104–107, 2005.
- [PF01] J. A. Paradiso and M. Feldmeier. A compact, wireless, self-powered pushbutton controller. In *UbiComp 2001, LNCS 2201*, pages 299–304, 2001.
- [PG09] L. Petit and P. Gonnard. A multilayer twila ultrasonic motor. *Sensors and Actuators A : Physical*, 149 :113–119, 2009.
- [PGLMss] L. Petit, D. Guyomar, M. Lallart, and T. Monnier. *Les Controverses Technologiques de l'INSA de Lyon*, chapter Les micro-dispositifs électroniques énergétiquement autonomes : du concept à la réalité. INSA Lyon, in press.
- [PHB<sup>+</sup>14] O. Pabst, S. Hölzer, E. Beckert, J. Perelaer, U. S. Schubert, R. Eberhardt, and A. Tünnermann. Inkjet printed micropump actuator based on piezoelectric polymers : Device performance and morphology studies. *Org. Electron.*, 15 :3306–3315, 2014.
- [Pic09] C. A. Pickover. *The Math Book : From Pythagoras to the 57<sup>th</sup> Dimension, 250 Milestones in the History of Mathematics*. Sterling Publishing Company, Inc., New York, 2009.
- [PM98] A. Papalou and S. F. Masri. An experimental investigation of particle dampers under harmonic excitation. *Journal of Vibration and Control*, 4(4) :361–379, 1998.
- [PMM<sup>+</sup>14] O. Puscasu, S. Monfray, C. Maitre, P. J. Cottinet, D. Rapisarda, G. Savelli, F. Gaillard, G. Ricotti, P. Ancey, F. Boeuf, D. Guyomar, and T. Skotnicki. A disruptive technology for thermal to electrical energy conversion. *Microelec. J.*, 45(5) :483–558, 2014.
- [PPS<sup>+</sup>00] B. Ploss, B. Ploss, F. G. Shin, H. L. W. Chan, and C. L. Choy. Pyroelectric activity of ferroelectric pt/(pvdf-trfe) composites. *IEEE Trans. Dielec. Elec. Ins.*, 7(4) :517–522, 2000.
- [Pre35] F. Preisach. Über die magnetische nachwirkung. *Zeitschrift Phys.*, 94 :277–302, 1935.
- [Pri07] S. Priya. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. *J. Electroceram.*, 19 :165–182, 2007.
- [PS05] J. A. Paradiso and T. Starner. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. *Pervasive computing*, January-March 2005 :18–27, 2005.

- [PWLF10] Y. Pang, Y. Wang, J. Liu, and D. Fang. A study of the band structures of elastic wave propagating in piezoelectric/piezomagnetic layered periodic structures. *Smart Materials and Structures*, 19 :055012, 2010.
- [Res03] R. Resta. Ab initio simulation of the properties of ferroelectric materials. *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 11 :R69–R96, 2003.
- [RGAB00] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, and H. Bassaler. Enhanced semi passive damping using continuous switching of a piezoelectric device on an inductor. In *Proc. SPIE, Vol. 3989*, 2000.
- [RGAC99] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, and G. Ching. Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device. In *Proc. SPIE, Vol. 3672*, 1999.
- [RGL07] C. Richard, D. Guyomar, and E. Lefeuvre. Self-powered electronic breaker with automatic switching by detecting maxima or minima of potential difference between its power electrodes. Brevet # PCT/FR2005/003000, numéro de publication WO/2007/063194., 2007.
- [RJR96] A. Ramesh, D. C. Jiles, and J. M. Roderick. A model of anisotropic anhysteretic magnetization. *IEEE Trans. Magn.*, 32 :4234–4236, 1996.
- [RLH<sup>+</sup>07] K. Ren, Y. Liu, H. Hofmann, Q. M. Zhang, and J. Blottman. An active energy harvesting scheme with an electroactive polymer. *Appl*, 91 :132910, 2007.
- [RO10] A.W. Richards and G.M. Odegard. Constitutive modeling of electrostrictive polymers using a hyperelasticity-based approach. *J. Appl. Mech.*, 77 :014502, 2010.
- [Rou05] S. Roundy. On the effectiveness of vibration-based energy harvesting. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 16 :809–823, 2005.
- [RTF07] D. Rancourt, A. Tabesh, and L. G. Fréchette. Evaluation of centimeter-scale micro wind mills : Aerodynamics and electromagnetic power generation. In *PowerMEMS 2007*, volume 20079, 2007.
- [RWR03] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Comp. Comm.*, 26 :1131–1144, 2003.
- [SA09] A. M. Sharabash and B. O. Andrawes. Application of shape memory alloy dampers in the seismic control of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 31 :607–616, 2009.
- [Sav14] G. Savelli. Thermoelectric conversion : from materials to devices at bulk and thin film scales. In *Journées Nationales sur la Récupération et le Stockage de L’Energie*, 2014. 7 et 8 Avril 2014, Annecy, France.

- [SBG04] G. Sebald, E. Boucher, and D. Guyomar. A model based on dry friction for modeling hysteresis in ferroelectric materials. *J. Appl. Phys.*, 96 :2785–2791, 2004.
- [SBPB01] T. Sterken, K. Baert, R. Puers, and G. Borghs. Power extraction from ambient vibration. In *Proceedings of SAFE-ProRISC-SeSens 2001*, pages 680–684. SeSens 2001, Veldhoven, the Netherlands, 2001.
- [Sco07] J. F. Scott. Applications of modern ferroelectrics. *Science*, 315 :954–959, 2007.
- [SDNA12] S. Sokhanvar, J. Dargahi, S. Najarian, and S. Arbatani. *Tactile Sensing and Displays*, chapter Haptic Feedback for Minimally Invasive Surgery and Robotics. Wiley : Chichester, UK, 2012.
- [See25] T. J. Seebeck. Magnetische polarisation der metalle und erze durch temperatur-differenz. *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, pages 265–373, 1825.
- [SGA09] G. Sebald, D. Guyomar, and A. Agbossou. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting. *Smart Mater. Struct.*, 18 :125006, 2009.
- [SH99] R. C. Smith and C. L. Hom. A domain wall model for ferroelectric hysteresis. Technical report crsc-tr99-07, Center for Research in Scientific Computation, 1999.
- [SJQ<sup>+</sup>15] H. Shen, H. Ji, J. Qiu, Y. Bian, and D. Liu. Adaptive synchronized switch harvesting : A new piezoelectric energy harvesting scheme for wideband vibrations. *Sens. Act. A : Phys.*, 226 :21–36, 2015.
- [SK10] Y. Suzuki and Y. Kagawa. Active vibration control of a flexible cantilever beam using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, 19 :085014, 2010.
- [SLG08] G. Sebald, E. Lefeuvre, and D. Guyomar. Pyroelectric energy conversion : Optimization principles. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelec. and Freq. Cont.*, 55(3) :538–551, 2008.
- [SQ61] W. Shockley and H. J. Queisser. Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.*, 32 :510–519, 1961.
- [SS11] S. Saadon and O. Sidek. A review of vibration-based mems piezoelectric energy harvesters. *Energy Conv. Manag.*, 52 :500–504, 2011.
- [Ste77] D. S. Steinberg. Taking the shake out of circuit boards. *Machine Design*, 49(21) :96–99, 1977.
- [SWD<sup>+</sup>14] Y. Shi, Y. Wang, Y. Deng, H. Gao, Z. Lin, W. Zhu, and H. Ye. A novel self-powered wireless temperature sensor based on thermoelectric generators. *Energy Conv. Manag.*, 80 :110–116, 2014.

- [SWZ<sup>+</sup>14] Y. Su, X. Wen, G. Zhu, J. Yang, J. Chen, P. Bai, Z. Wu, Y. Jiang, and Z. L. Wang. Hybrid triboelectric nanogenerator for harvesting water wave energy and as a self-powered distress signal emitter. *Nano Energy*, 9 :186–195, 2014.
- [Sy114] A. Sylvestre (*coordinateur*). Projet ANR SEASEA, 2014. <http://www.agence-nationale-recherche.fr/?Projet=ANR-14-CE05-0022> (dernière consultation : 29/03/2016).
- [Sze14] R. Szewczyk. Validation of the anhysteretic magnetization model for soft magnetic materials with perpendicular anisotropy. *Materials*, 7 :5109–5116, 2014.
- [TBK<sup>+</sup>01] G. W. Taylor, J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Powers, and T. R. Welsh. The energy harvesting eel : A small subsurface ocean/river power generator. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 26(4) :539–547, 2001.
- [TBL94] G. Teyssedre, A. Bernes, and C. Lacabanne. Correlations between pyroelectricity, thermal transitions and dielectric relaxations in pvdf and related copolymers. In *Proc. IEEE 8<sup>th</sup> International Symposium on Electrets (ISE8)*, pages 650–655, 1994. 7-9 Sept. 1994, Paris.
- [TBS12] N. Tsutsumi, X. Bai, and W. Sakai. Towards nonvolatile memory devices based on ferroelectric polymers. *AIP Adv.*, 2 :012154, 2012.
- [TGG<sup>+</sup>08] L. M. Tender, S. A. Gray, E. Groveman, D. A. Lowy, P. Kauffman, J. Melhado, R. C. Tyce, D. Flynn, R. Petrecca, and J. Dobarro. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply : Powering a meteorological buoy. *J. Power Sources*, 179(2) :571–575, 2008.
- [Tho51] W. Thomson. On a mechanical theory of thermoelectric currents. In *Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, pages 91–98, 1851.
- [TRB01] O. Thorp, M. Ruzzene, and A. Baz. Attenuation and localization of wave propagation in rods with periodic shunted piezoelectric patches. *Smart Materials and Structures*, 10 :979–989, 2001.
- [Tre01] B. P. Trease. A survey and comparison of smart material linear actuators. Technical report, University of Michigan, Dpt of Mech. Eng., 2001.
- [Tul13] C. Tulkoff. Pad cratering : Prevention, mitigation, and detection strategies. In *APEX Expo 2013*, 2013.
- [TW01] J. Tang and K. W. Wang. Active-passive hybrid piezoelectric networks for vibration control : comparisons and improvement. *Smart Materials and Structures*, 10 :794–806, 2001.

- [TWS05] C. H. Tsang, C. K. Wong, and F. G. Shin. Modeling saturated and unsaturated ferroelectric hysteresis loops : An analytical approach. *J. Appl. Phys.*, 98 :084103, 2005.
- [TYR07] A. V. Turik, A. A. Yesis, and L. A. Reznitchenko. Piezoelectric effect and electrostriction in ceramic ferroelectrics. *Ferroelectrics*, 359 :111–116, 2007.
- [UCL07] M. Ujihara, G. P. Carman, and D. G. Lee. Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials. *Appl. Phys. Lett.*, 91 :093508, 2007.
- [Uen12] T. Ueno. Development of galfenol energy harvesting device. In *Progress and Innovative of Smart Materials and Related Technologies (PI-SMART) 2012*, 2012. April 24nd-25th 2012, Hirosaki, Japan.
- [Van06] J. VanZwol. Designing battery packs for thermal extremes. *Power Electronics Technology*, July 2006 :40–45, 2006.
- [vK04] H. von Koch. Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire. *Arkiv för matematik, astronomi och fysik*, 1 :681–704, 1904.
- [WBF<sup>+</sup>13] Y. Wu, A. Badel, F. Formosa, W. Liu, and A. Agbossou. Piezoelectric vibration energy harvesting by optimized synchronous electric charge extraction. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 24(12) :1445–1458, 2013.
- [Wen76] Y. K. Wen. Method of random vibration of hysteretic systems. *J. Eng. Mech.*, 102 :249–263, 1976.
- [WGdM<sup>+</sup>11] K. Wongtimnoi, B. Guiffard, A. Bogner-Van de Moortèle, L. Seveyrat, C. Gauthier, and J.-Y. Cavaillé. Improvement of electrostrictive properties of a polyether-based polyurethane elastomer filled with conductive carbon black. *Comp. Sci. Tech.*, 71 :885–892, 2011.
- [WH14] F. Wang and O. Hansen. Electrostatic energy harvesting device with out-of-the-plane gap closing scheme. *Sens. Act. A : Phys.*, 211 :131–137, 2014.
- [WHL<sup>+</sup>14] Y.-C. Wu, E. Halvorsen, M. Lallart, C. Richard, and D. Guyomar. Stochastic modeling in the frequency domain for energy harvester with switching electronic interface. *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 20(1) :50 – 60, 2014.
- [WKP10] B. Wu, A. Kumar, and S. Pamarthy. High aspect ratio silicon etch : a review. *J. Appl. Phys.*, 108(5) :051101, 2010.
- [WLMC15] J. Wei, E. Lefeuvre, H. Mathias, and F. Costa. Interface circuit for vibration energy harvesting with adjustable bias voltage. *J. Phys. : Conf. Series, PowerMEMS 2015*, 660 :012016, 2015.

- [WLP<sup>+</sup>15] L. Wang, M. Lallart, L. Petit, L. Lebrun, P.-J. Cottinet, and D. Guyomar. Low-cost charge of electrostrictive polymers for efficient energy harvesting. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 26(16) :2123–2136, 2015.
- [WP90] S.-T. Wei and C. Pierre. Statistical analysis of the forced response of mistuned cyclic assemblies. *AIAA journal*, 28(5) :861–868, 1990.
- [WRM<sup>+</sup>15] J. Wei, S. Risquez, H. Mathias, E. Lefeuvre, and F. Costa. Simple and efficient interface circuit for vibration electrostatic energy harvesters. In *IEEE Sensors 2015 Proc.*, 2015. November 1,4 2015, Busan, South Korea.
- [Wu13] Y.-C. Wu. *Analyse et considérations pratiques de techniques de conversion et récupération d'énergie piézoélectrique linéaires et non-linéaires*. PhD thesis, INSA Lyon, 2013.
- [XTZ06] F. Xia, S. Tadigadapa, and Q.M. Zhang. Electroactive polymer based microfluidic pump. *Sens. Act. A : Phys.*, 125(2) :346–352, 2006.
- [XWC05] Z. Xu, M. Y. Wang, and T. Chen. Particle damping for passive vibration suppression : numerical modelling and experimental investigation. *Journal of Sound and Vibration*, 279 :1097–1120, 2005.
- [Yan13] L. Yan. *Contrôle de vibrations large bande à l'aide d'éléments piézoélectriques utilisant une technique non-linéaire*. PhD thesis, INSA Lyon, 2013.
- [YLG14] L. Yan, M. Lallart, and D. Guyomar. Multimodal nonlinear damping technique using spatial filtering. *J. Intel. Mat. Syst. Struct.*, 25(3) :308–320, 2014.
- [YLRG16] L. Yan, M. Lallart, C. Richard, and D. Guyomar. Hybrid time-domain and spatial filtering nonlinear damping strategy for efficient broadband vibration control. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(2) :261–277, 2016.
- [YWSS05] J. Yeom, Y. Wu, J. C. Selby, and M. A. Shannon. Maximum achievable aspect ratio in deep reactive ion etching of silicon due to aspect ratio dependent transport and the microloading effect. *J. Vacuum Sci. Techn. B : Microelec. Nano. Struct.*, 23(6) :2319, 2005.
- [ZCA<sup>+</sup>13] A. Zebda, S. Cosnier, J.-P. Alcaraz, M. Holzinger, A. Le Goff, C. Gondran, F. Boucher, F. Giroud, K. Gorgy, H. Lamraoui, and P. Cinquin. Single glucose biofuel cells implanted in rats power electronic devices. *Sci. Reports*, 3 :1516, 2013.
- [ZDSG14] B. Zhang, B. Ducharne, G. Sebald, and D. Guyomar. Characterization of fractional order for high-frequency bandwidth model of dielectric ferroelectrics. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *in press*, 2014. DOI : 10.1177/1045389X14563866.

- [ZLP<sup>+</sup>02] Q. M. Zhang, H. Li, M. Poh, F. Xia, Z.-Y. Cheng, H. Xu, and C. Huang. An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant. *Nature*, 419 :284–287, 2002.
- [ZN06] L. Zuo and S. A. Nayfeh. The two-degree-of-freedom tuned mass damper for suppression of single mode vibration under random and harmonic excitation. *Transactions of the ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 128 :56–65, 2006.
- [Zor99] R. Zorn. Applicability of distribution functions for the havriliak-negami spectral function. *J. Polym. Sci., Part B : Polym. Phys.*, 37 :1043–1044, 1999.
- [Zor02] R. Zorn. Logarithmic moments of relaxation time distributions. *J. Chem. Phys.*, 116(8) :3204–3209, 2002.
- [ZPCG11] H. Zhu, S. Pruvost, P. J. Cottinet, and D. Guyomar. Energy harvesting by nonlinear capacitance variation for a relaxor ferroelectric poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) terpolymer. *Appl. Phys. Lett.*, 98 :222901, 2011.
- [ZTS<sup>+</sup>13] Z. Zhu, T. K. Tam, F. Sun, C. You, and Y.-H. P. Zhang. A high-energy-density sugar biobattery based on a synthetic enzymatic pathway. *Nature Comm.*, 5 :3026, 2013.
- [ZZH<sup>+</sup>05] S. Zhang, N. Zhang, C. Huang, K. Ren, and Q. M. Zhang. Microstructure and electromechanical properties of carbon nanotube/poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene-chlorofluoroethylene) composites. *Adv. Mater.*, 17 :1897–1901, 2005.





# Liste des Figures

CV.1	Vue d'ensemble des activités. . . . .	CV-5
CV.2	Répartition des thématiques de recherche. . . . .	CV-8
CV.3	Répartition actuelle des enseignements. . . . .	CV-11
I.1	La conversion électromécanique, intérêt de longue date. . . . .	6
I.2	Classes cristallines et piézoélectricité. . . . .	8
I.3	Élément thermoélectrique. . . . .	9
I.4	Actionneurs électromagnétique, piézoélectrique et électrostatique : du plus grand au plus petit. . . . .	10
I.5	Répartition de différents actionneurs en fonction de leur poids. . . . .	12
I.6	Relation déplacement-force de plusieurs familles d'actionneurs. . . . .	13
II.1	Principe d'un élément du modèle. . . . .	18
II.2	Modèle global. . . . .	19
II.3	Spectre normalisé (à 1) de distribution de la polarisation en fonction du champ coercitif. . . . .	22
II.4	Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour une céramique. . . . .	22
II.5	Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour un polymère. . . . .	24
II.6	Evolution de la polarisation rémanente en fonction du champ élec- trique maximal appliqué pour un polymère. . . . .	25
II.7	Effet de la fréquence sur les cycles de polarisation pour un polymère et deux valeurs de champ électrique maximal. . . . .	26
II.8	Effet de la fréquence sur la polarisation rémanente pour un polymère pour un champ électrique maximal de $71 \text{ V } \mu\text{m}$ . . . . .	27
II.9	Susceptibilité relative à bas champ en fonction du champ électrique maximal appliqué. . . . .	27
II.10	Comparaison du modèle avec les mesures expérimentales pour un polymère en prenant en compte la recristallisation sous champ. . . . .	29
II.11	Exemples d'endommagements sous l'effet de vibrations. . . . .	31
II.12	Exemples d'endommagements de cartes électroniques. . . . .	32
II.13	Amortisseur à masse accordée de la tout 101 de Taipei. . . . .	33
II.14	Couplages multi-physiques. . . . .	33
II.15	Synoptique d'une chaîne de contrôle actif. . . . .	34
II.16	Techniques passives et semi-passives de contrôle de vibrations. . . . .	35

II.17	Principe de l'amortisseur à masse accordée avec système de conversion d'énergie. . . . .	37
II.18	Atténuation en utilisant un dispositif TMD seul en fonction du rapport de masse. . . . .	39
II.19	Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique résistif (avec résistance optimale) en fonction du rapport de masse. . . . .	39
II.20	Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique semi-passif de type SSDI en fonction du rapport de masse. . . . .	40
II.21	Atténuation en utilisant un dispositif TMD électromécanique semi-passif de type SSDI (avec $\gamma = 0,9$ ) en fonction du rapport de masse. . . . .	40
II.22	Résultats expérimentaux et comparaisons théorique et de simulation de l'amortissement. . . . .	42
II.23	Principe du filtrage spatial. . . . .	43
II.24	Exemple de réponse d'une structure de type poutre encastree-encastree et signe de la tension aux bornes des éléments piézoélectriques pour les quatre premiers modes de vibration. . . . .	44
II.25	Connexions pour le contrôle (a) des modes impairs ; (b) des modes pairs. . . . .	45
II.26	Structure de contrôle par filtrage spatial. . . . .	45
II.27	Résultat expérimentaux de la technique de filtrage spatial dans le cas d'une excitation par un bruit rose. . . . .	47
II.28	Amortissement de la technique de filtrage hybride dans le cas d'une excitation impulsionnelle. . . . .	48
II.29	Amortissement de la technique de filtrage hybride dans le cas d'une excitation en bruit rose couvrant les quatres premiers modes. . . . .	49
II.30	Formes d'ondes temporelles dans le cas d'une excitation impulsionnelle. . . . .	50
II.31	Formes d'ondes temporelles dans le cas d'une excitation en bruit rose. . . . .	51
II.32	Exemple d'une structure périodique incluant des éléments piézoélectriques. . . . .	51
II.33	Décomposition de la structure périodique. . . . .	52
II.34	Constantes de propagation théoriques pour les structures périodiques. . . . .	54
II.35	Application expérimentale des structures périodiques (poutre encastree-encastree). . . . .	55
II.36	Structure périodique avec interconnexion électrique. . . . .	55
II.37	Exemple de "méta-cellules" utilisant des interconnexions électriques. . . . .	56
II.38	Facteur de transmission des structures tri-entrelacées et comparaison avec les structures électroniquement indépendantes. . . . .	56
II.39	Principes et résultats expérimentaux sur une poutre encastree-encastree de l'adjonction d'apériodicité par l'association de cellules différentes. . . . .	57
II.40	Evolution de la consommation électrique de composants typiques. . . . .	58
II.41	Auto-décharge de batteries Lithium-ion en fonction de la température d'utilisation. . . . .	59
II.42	Composition en matériaux toxiques des batteries. . . . .	59
II.43	Comparaison des puissances typiques disponibles entre transducteurs électromagnétiques et piézoélectriques. . . . .	60
II.44	Circuits de récupération d'énergie. . . . .	62

II.45	Energie récupérée finale sur une charge capacitive en fonction du produit du coefficient de couplage au carré $k^2$ et du facteur de qualité mécanique $Q_M$ . . . . .	63
II.46	Temps de récupération de 90% de l'énergie finale sur une charge capacitive en fonction du produit du coefficient de couplage au carré $k^2$ et du facteur de qualité mécanique $Q_M$ . . . . .	63
II.47	Réponse fréquentielle et en fonction de la charge pour plusieurs valeurs du produit $k^2 Q_M$ en termes de puissance normalisée. . . . .	65
II.48	Puissance maximale (à charge optimale) normalisée à la puissance maximale récupérable en fonction du produit $k^2 Q_M$ et de la fréquence normalisée ( $\gamma = 0,8$ ). . . . .	66
II.49	Chaîne de conversion d'énergie dans le cas d'un microgénérateur sismique. . . . .	66
II.50	Modèle à deux degrés de liberté du système de récupération d'énergie. . . . .	67
II.51	Réponses de la structure hôte et du microgénérateur pour différents rapports de masse et charge. . . . .	68
II.52	Exemple expérimental de la récupération sismique. . . . .	69
II.53	Principe de l'“auto-échantillonnage” pour l'étude de la réponse stochastique de la technique PSHI. . . . .	70
II.54	Illustration de l'“auto-échantillonnage” et de l'“auto-repliement” dans le cas d'un signal monochromatique avec commutation à une fréquence double. . . . .	70
II.55	Puissance de sortie normalisée à la charge optimale en fonction de la fréquence de commutation. . . . .	73
II.56	Schéma de principe du convertisseur DC-DC auto-adapté. . . . .	75
II.57	Résultats théoriques et expérimentaux du convertisseur DC DC auto-adapté. . . . .	76
II.58	Schéma de principe de la commande autonome (et auto-alimentée) pour le convertisseur DC DC auto-adapté. . . . .	76
II.59	Schéma de principe de la technique AC-SSHR. . . . .	77
II.60	Résultats expérimentaux et théoriques de la technique AC-SSHR. . . . .	79
II.61	Implémentation auto-alimentée de la technique AC-SSHR. . . . .	80
II.62	Schéma de principe et résultats théoriques et expérimentaux pour le système d'auto-adaptation aux changements de fréquence d'excitation. . . . .	82
II.63	Comparaison des énergie récupérées sur une charge capacitive dans les cas standard, SSHI et SSHI-t en excitation monomodale. . . . .	84
II.64	Comparaison des énergie récupérées sur une charge capacitive dans les cas standard, SSHI et SSHI-t en excitation bimodale . . . . .	85
II.65	Circuit auto-alimenté pour la technique SSHI-t et résultats de simulation du fonctionnement. . . . .	87
II.66	Principe de la mini-éolienne sans contact. . . . .	88
II.67	Résultats expérimentaux pour la mini-éolienne sans contact. . . . .	88
II.68	Principe du dispositif de récupération d'énergie exploitant l'eau. . . . .	89
II.69	Résultats expérimentaux pour le dispositif de récupération d'énergie exploitant l'eau. . . . .	89

III.1	Place des éléments électrostrictifs. . . . .	96
III.2	Réponse normalisée de la polarisation en fonction du champ électrique normalisé. . . . .	98
III.3	Polarisation expérimentale et théorique en fonction du champ électrique pour un terpolymère $P(VDF - TrFE - CFE)$ . . . . .	99
III.4	Déformation expérimentale et théorique (avec comparaison avec le modèle sans saturation) en fonction du champ électrique pour un terpolymère $P(VDF - TrFE - CFE)$ . . . . .	100
III.5	Déformation d'un matériau électrostrictif biphasique. . . . .	101
III.6	Modélisation de l'effet d'une déformation sur l'orientation des dipôles. . . . .	102
III.7	Résultats expérimentaux et théorique de la courbe de polarisation et de la susceptibilité diélectrique en fonction de la déformation dans le cas d'un polyuréthane. . . . .	103
III.8	Evolution de la susceptibilité diélectrique en fonction du champ pour plusieurs déformations dans le cas d'un terpolymère $P(VDF - TrFE - CFE)$ . . . . .	104
III.9	Application du modèle pour la détermination du coefficient d'électrostriction en fonction du champ et de la génération de courant sous sollicitation mécanique variable. . . . .	104
III.10	Evolution des charges d'espace et de la permittivité locale pour différentes épaisseurs. . . . .	105
III.11	Permittivité globale en fonction de l'épaisseur pour un film de polyuréthane. . . . .	106
III.12	Permittivité globale en fonction du champ électrique de saturation. . . . .	107
III.13	Déformation en fonction du champ électrique pour des matériaux de différentes épaisseurs. . . . .	107
III.14	Exemples de configuration d'actionneurs électrostrictifs en flexion. . . . .	109
III.15	Réponses théoriques et expérimentales pour une poutre encastree-libre. . . . .	111
III.16	Réponse d'un actionneur encastree-libre en fonction des rapports d'épaisseur et de rigidité entre le substrat et le polymère. . . . .	112
III.17	Réponses théoriques et expérimentales pour une poutre encastree-encastree. . . . .	114
III.18	Réponse d'un actionneur encastree-encastree en milieu de poutre en fonction du rapport de longueur entre le polymère et le substrat pour plusieurs rapports d'épaisseur et de rigidité entre le substrat et le polymère. . . . .	115
III.19	Evaluation expérimentale du modèle à constantes localisées. . . . .	120
III.20	Récupération d'énergie AC en mode pseudo-piézoélectrique. . . . .	122
III.21	Comparaison graphique de matériaux pour la récupération d'énergie. . . . .	123
III.22	Récupération d'énergie avec tension de sortie continue en mode pseudo-piézoélectrique. . . . .	127
III.23	Récupération d'énergie avec interface SSHI et tension de sortie continue en mode pseudo-piézoélectrique. . . . .	128
III.24	Formes d'ondes et puissances pour les structures de récupération d'énergie DC exploitant l'électrostriction. . . . .	129

---

IV.1	Architectures de systèmes de récupération d'énergie électrostatique. . . . .	134
IV.2	Cycles de charge/décharge pour la récupération d'énergie électrostatique. . . . .	135
IV.3	Principe de l'amélioration de la récupération d'énergie électrostatique par variation de permittivité. . . . .	136
IV.4	Permittivité et capacité surfacique dans le cas d'utilisation d'une couche supplémentaire en fonction des épaisseurs pour plusieurs valeurs de permittivité de couche. . . . .	137
IV.5	Variations de capacité expérimentales et théoriques et estimation de l'énergie récupérée dans les cas mono- et bi-couches. . . . .	138
IV.6	Exemple d'application du système bi-couche à la récupération d'énergie par cycle de charge/décharge. . . . .	139
IV.7	Formes d'ondes expérimentales dans le cas d'une polarisation à tension constante. . . . .	139
IV.8	Configuration en peigne - élément unitaire. . . . .	140
IV.9	Variation de capacité en fonction de l'amplitude de vibration pour plusieurs nombre de doigts (pour une longueur donnée). . . . .	141
IV.10	Construction "progressive" de la capacité fractale. . . . .	142
IV.11	Construction "dégressive" de la capacité fractale. . . . .	143
IV.12	Résultats théoriques, de simulation et expérimentaux pour les constructions de capacités fractales progressives et dégressives. . . . .	144
IV.13	Estimation de l'énergie récupérée (normalisée par rapport à la tension initiale au carrée) en fonction de la distance. . . . .	145
IV.14	Représentation schématique de la variation de polarisation en fonction de la température pour les polymères électrostrictifs. . . . .	147
IV.15	Coefficient pseudo-pyroélectrique pour plusieurs polymères électrostrictifs et comparaison avec des matériaux pyroélectriques. . . . .	148
IV.16	Dépendance théorique et expérimentale de la susceptibilité en fonction de la température pour un terpolymère chargé $P(VDF-TrFE-CFE) + 4\%CB$ . . . . .	149
IV.17	Principe du couplage électrothermique par utilisation de matériaux ferromagnétiques. . . . .	150
IV.18	Dispositif de conversion électrothermique par variation de perméabilité. . . . .	150
IV.19	Dispositif de conversion électrothermique par variation de perméabilité sans ferrite. . . . .	152
IV.20	Résultats numériques et expérimentaux pour la conversion d'énergie utilisant des matériaux ferromagnétiques. . . . .	152
IV.21	Exemple de structure électrostatique fractale 3D (tapis de Sierpiński). . . . .	154
IV.22	Dépendance théorique et expérimentale de la susceptibilité en fonction de la température pour un terpolymère $P(VDF-TrFE-CFE)$ pur. . . . .	155
VI.1	Résultats de simulation montrant l'effet de dépolarisation pris en compte par le modèle. . . . .	167
VI.2	Structures distribuées à amortisseurs à masse accordée électromécanique pour le contrôle vibratoire à interfaces électriques non-linéaires. . . . .	168

---

VI.3	Principe et formes d'ondes de la technique SSDI dynamique pour le contrôle de vibrations à l'aide de polymères électrostrictifs. . . . .	169
VI.4	Utilisation de la modulation de raideur pour les structures mécaniquement non-linéaires. . . . .	170
VI.5	Circuit d'interfaçage SSHI série multi-éléments vers étage unique de stockage avec interférences limitées. . . . .	171
VI.6	Circuit auto-synchrone présenté dans [LWMC15]. . . . .	171
VI.7	Réponses mécaniques d'élastomères magnétorhéologiques pour différents champs magnétiques. . . . .	172
VI.8	Exemple de structure pour la récupération d'énergie à partir d'élastomères magnétorhéologiques. . . . .	172
VI.9	Principe de la micro-éolienne exploitant des états instables. . . . .	173
A.1	Evolution du marché de dispositifs connectés. . . . .	A-3
A.2	Evolution de la consommation de systèmes électroniques typiques. . . . .	A-3
A.3	Limitation des batteries comme solution d'alimentation. . . . .	A-4
A.4	Domaines physiques et interfaces de conversion. . . . .	A-5
A.5	Rendement de Carnot en fonction de la différence de température pour plusieurs valeurs de température froide. . . . .	A-6
A.6	Exemples qualitatifs d'environnements vibratoires. . . . .	A-7
A.7	Exemples quantitatifs d'environnements vibratoires de la vie courante et caractéristiques associées. . . . .	A-8
A.8	Densité de puissance de la source éolienne. . . . .	A-9
A.9	Densité de puissance de la source RF. . . . .	A-10
A.10	Densité de puissance d'une bio-batterie. . . . .	A-11
A.11	Figure de mérite des sources d'énergie. . . . .	A-12
A.12	Rendement des systèmes thermoélectriques en fonction de la différence de température pour plusieurs valeurs de température froide. . . . .	A-13
A.13	Figure de mérite de différents matériaux thermoélectriques en fonction de la température. . . . .	A-14
A.14	Exemple de la difficulté d'interfaçage d'éléments thermoélectriques. . . . .	A-15
A.15	Profil d'une variation de température typique au niveau des vêtements portés. . . . .	A-16
A.16	Comparaison des capacités de récupération d'énergie d'éléments thermoélectrique et pyroélectrique en fonction du coefficient d'échange thermique. . . . .	A-16
A.17	Densités de puissance normalisées en fonction des dimensions pour les effets électromagnétiques et piézoélectriques. . . . .	A-17
A.18	Différents exemples de matériaux piézoélectriques. . . . .	A-18
A.19	Microgénérateur électrostatique. . . . .	A-19
A.20	Microgénérateur magnétostrictif. . . . .	A-19
A.21	Rendement des cellules photovoltaïques. . . . .	A-20
A.22	Rendement des dispositifs de conversion éolienne. . . . .	A-21
A.23	Exemple de microturbine électromagnétique. . . . .	A-21
A.24	Exemple de conception d'une antenne large bande pour la récupération d'énergie. . . . .	A-22

A.25	Effet magnétoélectrique. . . . .	A-22
A.26	Effet des électrodes pour la conversion d'énergie à partir du glucose. . . . .	A-23
A.27	Exemples de microgénérateurs biologiques. . . . .	A-24
A.28	Figure de mérite des effets de conversion. . . . .	A-26
A.29	Figure de mérite globale des sources d'énergie et des effets de conversion associés. . . . .	A-28
B.1	Chaîne typique de conversion d'énergie pour les systèmes auto-alimentés. . . . .	B-2
B.2	Exemple schématique du principe de la "wake-up radio". . . . .	B-5





# Liste des Tableaux

I.1	Couplages entre les domaines de la physique. . . . .	7
II.1	Paramètres de simulation de l'état de polarisation d'une céramique ferroélectrique. . . . .	21
II.2	Paramètres de simulation de l'état de polarisation pour un échantillon de polymère ferroélectrique. . . . .	23
II.3	Paramètres de simulation de l'état de polarisation pour un échantillon de polymère ferroélectrique en prenant en compte la recristallisation sous champ. . . . .	28
II.4	Résultats expérimentaux et de simulation pour la technique de filtrage spatial et comparaison avec la technique SSDI classique. . . . .	46
III.1	Energie récupérée à l'aide de polymères électrostrictifs et conditions d'utilisations. . . . .	121
III.2	Comparaison de plusieurs figures de mérite avec la puissance expérimentale maximale moyenne. . . . .	125
III.3	Energies récupérées à l'aide de polymères électrostrictifs et conditions d'utilisations. . . . .	126
A.1	Densités surfaciques ou volumiques de puissance d'éclairage naturel ou artificiel. . . . .	A-9
B.1	Exemples de paramètres normalisés pour les sources d'énergie et effets de conversion. . . . .	B-4
B.2	Exemple de consommation moyenne d'un microcontrôleur <i>PIC16F688</i> en fonction du temps d'opération et du temps de veille. . . . .	B-5
B.3	Illustration des puissances, temps d'opération et énergie par fonction nécessaires pour l'envoi d'une trame radiofréquence. . . . .	B-6



# Annexe A

## Analyse des sources et effets de conversion pour la récupération d'énergie

*L'objectif de cette Annexe est de dresser une vision d'ensemble des sources d'énergie disponibles pour la conception d'un microgénérateur, ainsi que la sélection de l'effet de conversion électroactive associé. A partir de ces considérations, des figures de mérite comparant séparément sources et effets de conversion, puis une figure de mérite globale comparant à la fois ces sources et les effets de conversion associés, pourront être mises en place, permettant de mettre en avant les sources et effets les plus adaptés à une application donnée.*

## A.1 Introduction - De l'intérêt de la récupération d'énergie

Cette Annexe se propose d'apporter un regard particulier sur les capacités de récupération d'énergie dans les microsystèmes. Cet intérêt pour ce type de dispositifs s'explique par le fait que le monde connaît un essor sans précédent pour les systèmes mobiles et sans fil, tant sur le plan public qu'industriel. Par exemple, une étude d'Ericsson prévoit que d'ici 2020, plus de 20 milliards d'objets connectés seront déployés dans le monde entier (Figure A.1). Une telle explosion du nombre de systèmes sans fils autonomes s'explique notamment par la diminution drastique de la consommation des circuits électroniques selon une loi de Moore (Figure A.2), ce qui permet la conception de dispositifs très économes en énergie pour l'accomplissement d'une fonction donnée.

Cependant, de l'énergie est toujours nécessaire, et est actuellement fournie par des batteries primaires dans l'écrasante majorité des cas. Cependant, ces batteries deviennent de plus en plus un frein à la prolifération des systèmes supposés fonctionner pour un temps relativement important (Figure A.3). Premièrement, la capacité des batteries n'a pas suivi le même développement que les autres dispositifs électroniques. Ensuite, leur durée de vie est également limitée par leur auto-décharge, ce qui peut être encore plus critique dans des environnements sévères. Enfin, les batteries contiennent des matières dangereuses qui soulèvent des problèmes environnementaux et de recyclage<sup>A.1</sup>.

Ainsi, le coût de maintenance élevé de remplacement des batteries fait de cette solution une option non réellement viable pour les dispositifs de type "placer et oublier" (*place and forget*), notamment pour les systèmes déployés en grand nombre et/ou difficiles d'accès. Ainsi, d'autres sources d'énergies doivent être trouvées. Fort heureusement, il en existe beaucoup dans l'environnement sous différentes formes (par exemple chaleur ou mouvement), et de manière quasi-infinie. Il devient donc intéressant de convertir l'énergie de ces sources (qui serait autrement perdue) sous forme électrique pour l'alimentation de dispositifs électroniques, conduisant ainsi au concept de récupération d'énergie<sup>A.2</sup>.

Ainsi, dans le cadre de la récupération d'énergie électrique pour des systèmes de faibles dimensions, de nombreuses sources sont disponibles dans l'environnement,

---

A.1. On peut néanmoins objecter à ce dernier argument le fait que certains éléments de conversion d'énergie, comme certaines céramiques piézoélectriques, contiennent également des matériaux toxiques, comme le plomb dans le cas de céramiques PZT, qui restent néanmoins encore exempté de classification sur la liste de REACH.

A.2. D'autres intérêts peuvent également émerger dans l'utilisation des matériaux électroactifs. Plus particulièrement, un tel matériau peut souvent accomplir plusieurs fonctions en plus de la récupération d'énergie sous forme électrique. Les capacités de convertir de l'énergie donnée (par exemple mécanique ou thermique) permet non seulement de récupérer cette énergie, mais aussi de servir de capteur pour récolter des informations sur l'environnement. De plus, de nombreux matériaux disposent de l'effet de conversion inverse, permettant de générer une action sur l'environnement à partir d'une excitation électrique, permettant un usage en qualité d'actionneur. Ainsi un matériau peut accomplir plusieurs fonctions, et de manière encore plus poussée, il est possible de mettre ces dispositifs en réseau pour l'accomplissement d'une fonction qui transcende les capacités locales, comme les cellules du corps humain, qui, prises de manière indépendante, ont des opérations limitées, mais sont capables de faire vivre un système complexe une fois mises ensemble.

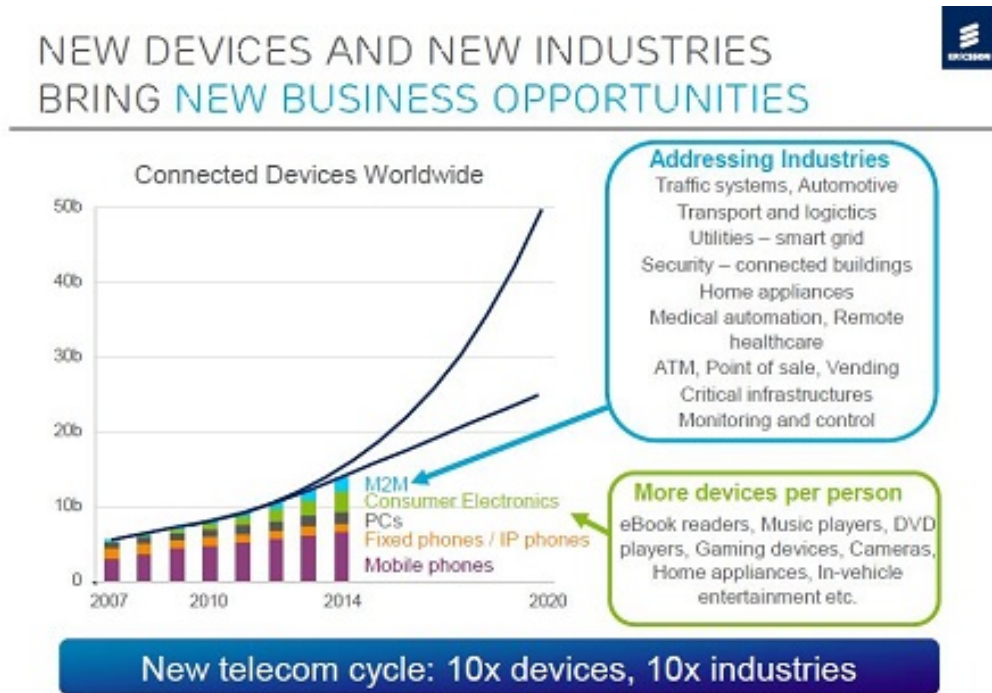


Figure A.1 – Evolution du marché de dispositifs connectés (<http://viodi.com/> - à partir d'une étude Ericsson).

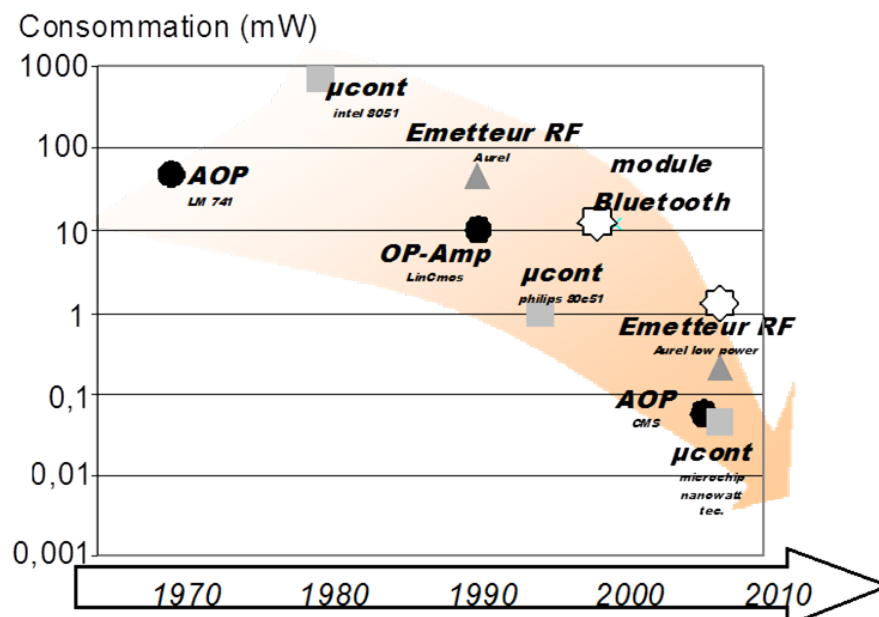
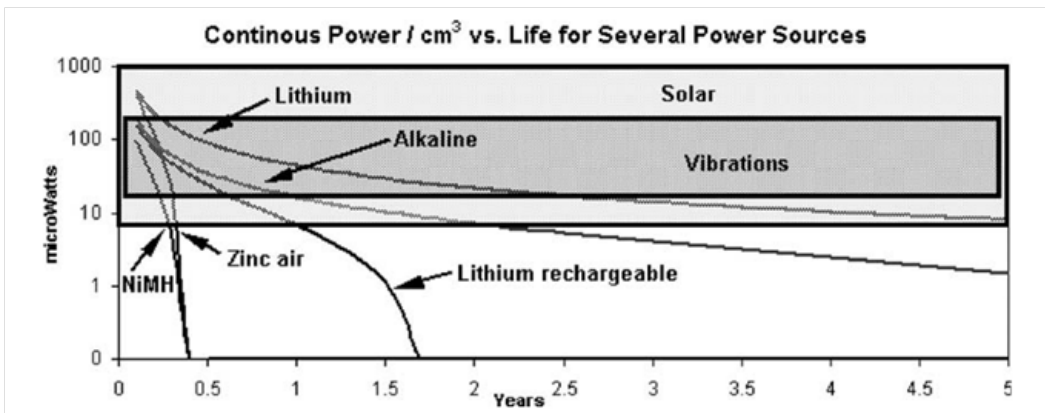
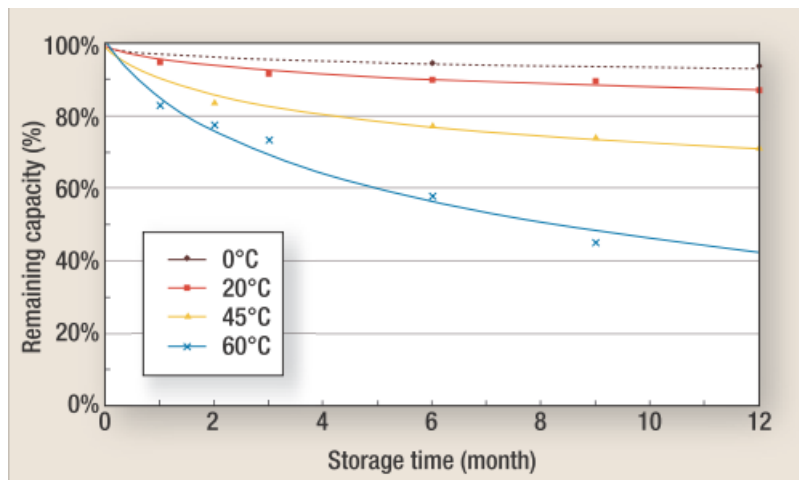


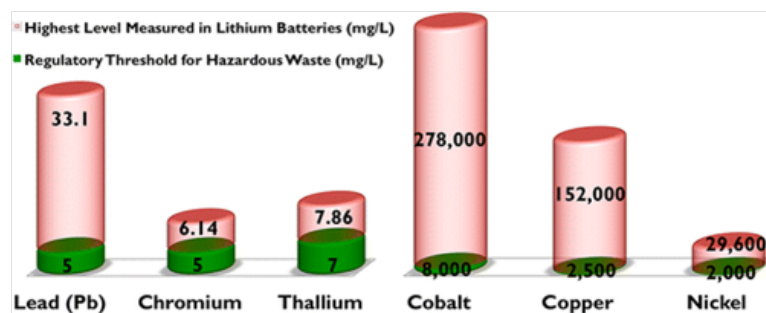
Figure A.2 – Evolution de la consommation de systèmes électroniques typiques ([PGLMss]).



(a) Auto-décharge et durée de vie ([RWR03])



(b) Dépendance aux conditions externes ([Van06])



(c) Contenance en substances chimiques dangereuses (<http://phys.org>)

Figure A.3 – Limitation des batteries comme solution d'alimentation.

chacune entrant dans un domaine particulier de la Physique. Ainsi, il est possible, en utilisant les liens entre ces domaines, de convertir l'énergie associée sous forme électrique (Figure A.4). Bien que la source la plus adaptée pour la récupération d'énergie soit très dépendante de l'application visée et de son environnement, il est néanmoins possible de tirer des analyses générales entre ces sources, surtout lorsque plusieurs d'entre elles sont disponibles. Une fois la ou les source(s) choisie(s), il convient ensuite de sélectionner l'effet de conversion le plus adapté pour chacune d'entre elles, dépendant non seulement des couplages électroactifs typiques des matériaux, mais aussi des caractéristiques de la source (amplitude, fréquence...). Ainsi, sans être spécialement spécifique à une application donnée, pour laquelle une étude précise de l'environnement (énergies, caractéristiques, etc...) est nécessaire, cette Annexe propose une analyse générale des sources communément disponibles, et, pour chacune d'entre elles, les effets de conversion typiques possibles vers le domaine électrique.

## A.2 Sources d'énergie principales

Ce paragraphe se propose de discuter des potentialités des sources d'énergies typiquement disponibles dans l'environnement d'un système à l'échelle centimétrique ou millimétrique. Encore une fois, il convient de rappeler que cette discussion est générale; le choix judicieux d'une source ou d'une autre dépendant largement de l'application visée et de son environnement.

### A.2.1 Source thermique

L'énergie thermique, associée à la chaleur et pouvant se retrouver sous forme de gradient spatial ou de variations temporelles, peut être vue comme l'énergie primaire de tout système. En effet, il s'agit là du domaine de la Physique vers lequel convergent toutes les énergies, qu'elles soient électriques (par exemple pertes Joules), mécaniques (frottements) ou autre.

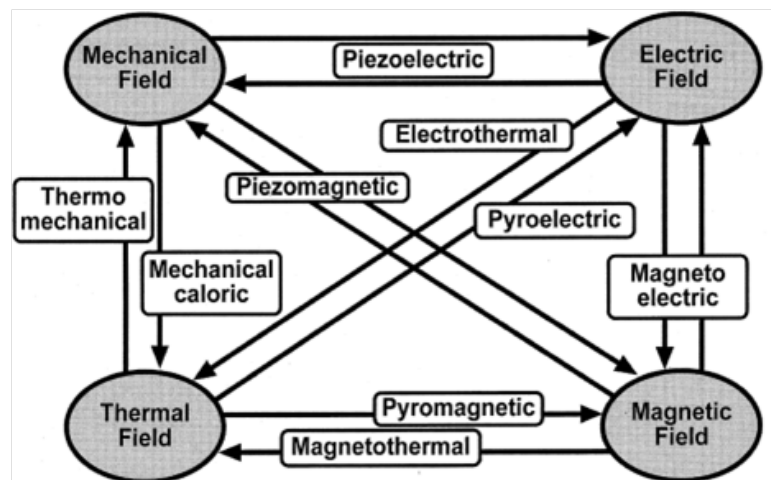


Figure A.4 – Domaines physiques et interfaces de conversion ([NVPH00]).



Outre cette spécificité de l'énergie thermique, celle-ci dispose également de la particularité de ne pas opérer autour d'un point de fonctionnement nul (zéro absolu), mais autour d'une "polarisation" correspondant à la température moyenne de travail. Cependant, quel que soit le type de variation considéré (gradient spatial ou variation temporelle), cette particularité, d'un point de vue de la conversion d'énergie sous forme électrique, impose un rendement théorique maximal, le rendement de Carnot  $\eta_{Carnot}$  ([Car24])<sup>A.3</sup>, donné par :

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (A.1)$$

où  $T_f$  et  $T_c$  représentent respectivement la température froide et la température chaude auxquelles opère le système. Les rendements associés, représentés en Figure A.5, montrent une valeur relativement faible, typiquement inférieure à 15 % pour des conditions de travail typiques<sup>A.4</sup>.

Néanmoins, il convient de noter que ces rendements faibles sont généralement compensés par une énergie d'entrée importante (les capacités de récupération étant donnée non seulement par les capacités de conversion, donnant le rapport entre énergie électrique disponible sur l'énergie fournie, mais également par la quantité d'énergie disponible de la source - Lal08, GSP<sup>+</sup>09). A titre d'exemple, une variation

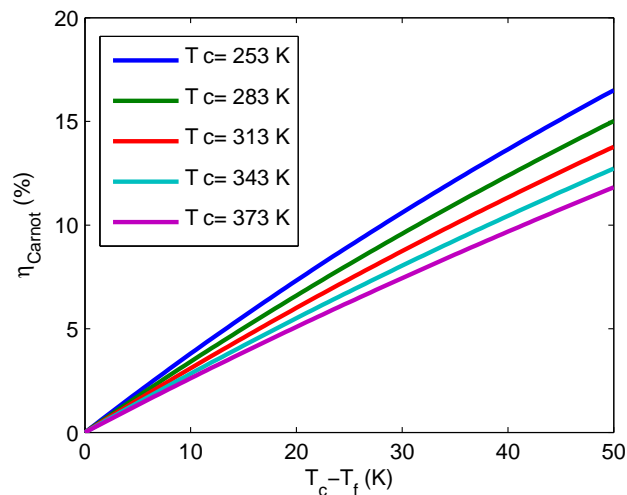


Figure A.5 – Rendement de Carnot en fonction de la différence de température pour plusieurs valeurs de température froide.

---

A.3. Ce rendement est obtenu en accomplissant un cycle idéal de Carnot en fonctionnement générateur, composé :

1. D'une compression isotherme à partir de la source chaude, conduisant à une chaleur absorbée  $Q_c$ .
2. D'une compression adiabatique de la source chaude à la source froide.
3. D'une détente isotherme à partir de la source froide, conduisant à une chaleur donnée  $Q_f$ .
4. D'une détente adiabatique.

A.4. Rappelons également que ces rendements sont des rendements théoriques maximaux, généralement bien supérieurs aux rendements obtenus en pratique.

---

de 1 ° C d'un volume d'air de 1 cm<sup>3</sup> à température ambiante conduit à une variation d'énergie de 1,3 mJ, et pour l'eau 4,2 J, ce qui peut être bien supérieur à l'énergie disponible à partir d'une autre source (par exemple, une masse dynamique de 1 g ayant une amplitude de déplacement de 1 mm à 100 Hz possède une énergie cinétique de 0,2 mJ). Notons cependant que la fréquence, dans le cas de variations temporelles de température, est généralement bien inférieure à 1 Hz, limitant ainsi la puissance qui peut être espérée de ces systèmes.

### A.2.2 Source vibratoire

Une autre source communément disponible réside dans les vibrations (source mécanique). Ces dernières peuvent être bénéfiques ou nuisibles mais peuvent toujours être récupérées, et sont présentes dans un nombre important d'environnements (Figure A.6). Les systèmes vibratoires peuvent se répartir en deux catégories. La première inclue les systèmes quasi-statiques, où la fréquence du mouvement est très faible, alors que la seconde exploite la résonance du système permettant une amplification du déplacement et donc un gain important en termes d'énergie disponible. Pour cette raison, dans la mesure où l'application le permet, il convient donc d'utiliser cette seconde option ([KE03])<sup>A.5</sup>.

De plus, les systèmes de récupération d'énergie vibratoire peuvent consister à directement rapporter le transducteur, quel qu'il soit, sur la structure hôte (couplage direct), ou utiliser une structure mécanique intermédiaire (structure sismique); la première permettant d'avoir une image directe du mouvement de la structure hôte (vitesse ou déformation), et la seconde permettant une maintenance plus aisée et une amplification mécanique. Dans ces deux cas, en utilisant les structures résonantes, les paramètres à prendre en considérations sont la fréquence, la force<sup>A.6</sup> ou l'accélé-

<i>Human Body</i>	<i>Vehicles</i>	<i>Structures</i>	<i>Industrial</i>	<i>Environment</i>
Breathing, blood pressure, exhalation, body heat	Aircraft, UAV, helicopter, automobiles, trains	Bridges, roads, tunnels, farm house structures	Motors, compressors, chillers, pumps, fans	Wind, solar, temperature gradient, daily temperature
Walking, arm motion, finger motion, jogging, swimming, eating, talking	Tires, tracks, peddles, brakes, shock absorbers, turbines	Control-switch, HVAC systems, ducts, cleaners, etc.	Conveyors, cutting and dicing, vibrating machine	Ocean currents, acoustic waves, EM waves, RF signal

Figure A.6 – Exemples qualitatifs d'environnements vibratoires ([Pri07]).

---

A.5. qui reste néanmoins assujettie à un fonctionnement ciblée sur une fréquence - les recherches actuelles se focalisant en grande partie sur l'élargissement de la bande fréquentielle comme mentionné dans le Chapitre II.

A.6. cas direct

ration<sup>A.7</sup> (Figure A.7). Bien que les niveaux de puissance soient relativement variés (de 10  $\mu\text{W}$  à 1 W), les sources vibratoires disposent typiquement de densités de puissance de l'ordre de 1 à 10  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$ , quelles que soit les caractéristiques et/ou applications.

### A.2.3 Sources radiatives

La troisième source considérée ici est la source radiative, qui peut principalement se subdiviser en deux catégories. La première tient en l'énergie solaire, pour laquelle des niveaux conséquents de puissance peuvent être atteints mais dont la variabilité est également importante (Tableau A.1), compromettant notamment tout usage intérieur. En plus de ces considérations purement scientifiques, il apparaît également que les transducteurs associés devant ainsi se situer exposés, le risque de vandalisme et de vol n'est pas négligeable.

Egalement, associé à l'énergie solaire, l'énergie éolienne est à considérer, car le vent est un produit secondaire du soleil du fait de l'échauffement provoqué par ce dernier. Dans ces cas, la puissance  $P_{vent}$  associée peut être obtenue en dérivant l'énergie cinétique, conduisant à :

$$P_{vent} = \frac{1}{2}\rho\Lambda v^3 \quad (\text{A.2})$$

avec  $\rho$ ,  $\Lambda$  et  $v$  dénotant respectivement la masse volumique, la section considérée et la vitesse, conduisant à des densités surfaciques de puissance de l'ordre du milliwatt par centimètres carrés dans des conditions typiques (Figure A.8), pour lesquelles il

Vibration source	Peak acceleration ( $\text{m/s}^2$ )	Frequency (Hz)
Base of 3-axis machine tool	10	70
Kitchen blender casing	6.4	121
Clothes dryer	3.5	121
Door frame just as door closes	3	125
Small microwave oven	2.25	121
HVAC vents in office building	0.2–1.5	60
Wooden deck with foot traffic	1.3	385
Breadmaker	1.03	121
External windows (2 ft $\times$ 3 ft) next to a busy street	0.7	100
Notebook computer while CD is being read	0.6	75
Washing machine	0.5	109
Second story floor of a wood frame office building	0.2	100
Refrigerator	0.1	240

Figure A.7 – Exemples quantitatifs d'environnements vibratoires de la vie courante et caractéristiques associées ([Rou05]).

---

A.7. cas sismique

Niveau d'éclairément	Source	Densité de puissance	Référence
–	Lumière naturelle (extérieur / éclairément direct)	15000 mW.cm <sup>-3</sup>	[RWR03]
–	Lumière naturelle (extérieur / nuageux)	150 mW.cm <sup>-3</sup>	[RWR03]
–	Lumière naturelle (intérieur)	6 mW.cm <sup>-3</sup>	[RWR03]
100 000 lx	Lumière naturelle (ensoleillé)	80 mW.cm <sup>-2</sup>	[MGBT14]
10 000 lx	Lumière naturelle (nuageux)	8 mW.cm <sup>-2</sup>	[MGBT14]
300 lx	Lumière artificielle (appartement bien éclairé)	0,24 mW.cm <sup>-2</sup>	[MGBT14]
1 000 lx	Lumière artificielle	0,80 mW.cm <sup>-2</sup>	[MGBT14]

Tableau A.1 – Densités surfaciques ou volumiques de puissance d'éclairage naturel ou artificiel.

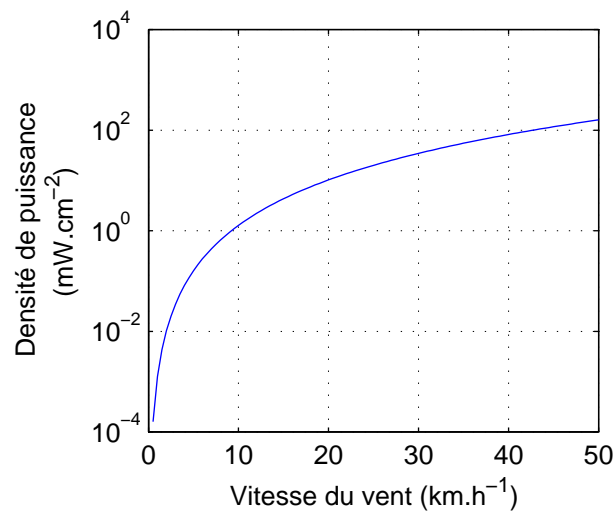


Figure A.8 – Densité de puissance de la source éolienne.

convient également de noter, pour les systèmes destinés à être déployés au sol, une grande variabilité. Ce concept peut par ailleurs être étendu à tout type de fluide, comme l'eau qui possède une masse volumique bien plus importante, mais présente également des vitesses plus faibles (or la puissance dépend du cube de ce paramètre).

La deuxième possibilité en termes de source radiative tient en l'énergie portée par les ondes radiofréquences (RF) pour les télécommunications, particulièrement présentes en milieu urbain et industriel. Néanmoins, ce type de transmission étant surtout basé sur du signal (sans notion particulière d'énergie donc), les niveaux de puissance associés sont très faibles (Figure A.9), et avec une décroissance quadratique par rapport à la distance.

### A.2.4 Sources biologiques

Enfin, la dernière source considérée ici consiste en l'énergie pouvant être générée par des organismes biologiques. Cette source correspond principalement en l'énergie potentielle chimique disponible au niveau des bactéries ou molécules de l'élément ou du sujet. Cette énergie est généralement importante, comme il peut être vu sur les informations nutritionnelles des aliments, mais les densités effectives sont toujours de l'ordre de quelques  $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Figure A.10).

### A.2.5 Figure de mérite des sources

A partir des analyses faites précédemment, il est possible de classer les différentes sources selon plusieurs critères, afin de permettre le tracé d'une figure de mérite (sous forme d'un radar - Figure A.11). Excepté le critère évident de densité de puissance ou d'énergie, d'autres paramètres importants sont à prendre en compte, tels que <sup>A.8</sup> :

**Le type de flux :** constant, sinusoïdal ou impulsionnel, ce dernier étant le plus désavantageux.

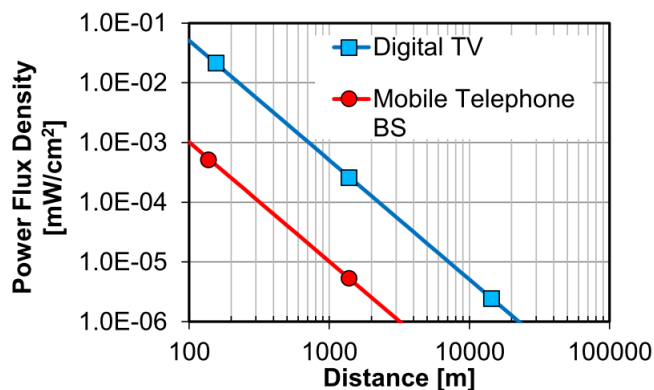


Figure A.9 – Densité de puissance de la source RF ([Kit12]).

---

A.8. Les critères exposés ici ne sont bien entendu pas exhaustifs, et leur importance et signification peuvent varier d'une application à une autre, selon les contraintes de celle-ci - on pourrait par exemple inclure aussi la contenance en termes de matières dangereuses ou l'amortissement énergétique.

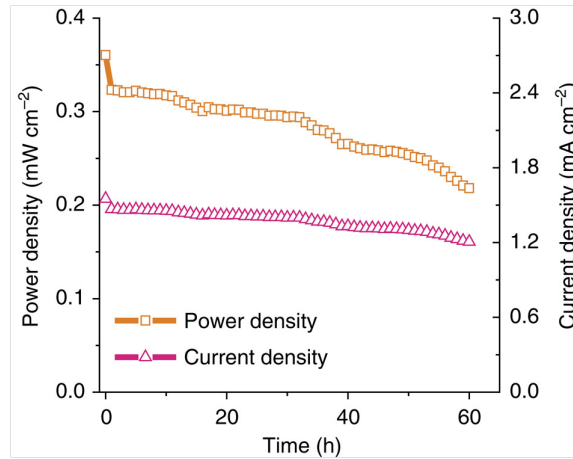


Figure A.10 – Densité de puissance d’une bio-batterie ([ZTS<sup>+</sup>13]).

**La disponibilité à petite échelle :** l’objectif ici étant de discuter de la récupération d’énergie pour des dispositifs de taille centimétrique ou millimétrique, la possibilité d’exploiter la source pour ces dimensions est à prendre en considération.

**La variabilité :** source continue ou intermittente, ce dernier étant le plus désavantageux.

**La disponibilité :** défini si la source est facilement disponible dans une grande variété d’environnements.

Ainsi, on remarque l’intérêt des sources thermiques (notamment en termes de gradient spatial), vibratoires et solaire, cette dernière étant néanmoins sujette à une disponibilité réduite et une variabilité importante (malgré des densités de puissance importantes). Concernant les sources radiofréquences et biologiques, les faibles densités de puissance les rendent à l’heure actuelle difficilement exploitables.

### A.3 Effets de conversion

Le paragraphe précédent s’est attelé à lister et comparer des sources d’énergie typiquement disponibles dans un environnement donné. Néanmoins, il convient de convertir l’énergie associée à celles-ci sous forme électrique. Ainsi, cette partie propose de discuter des effets de conversion, qui peuvent être multiples pour une source donnée. On s’intéressera ici uniquement aux effets “directs” principaux, n’incluant pas les mécanismes de conversion utilisant d’autres domaines de la Physique comme intermédiaire (à l’instar du concept présenté dans le Paragraphe IV.2.2), excepté pour le cas électromagnétique car ce dernier est largement répandu.

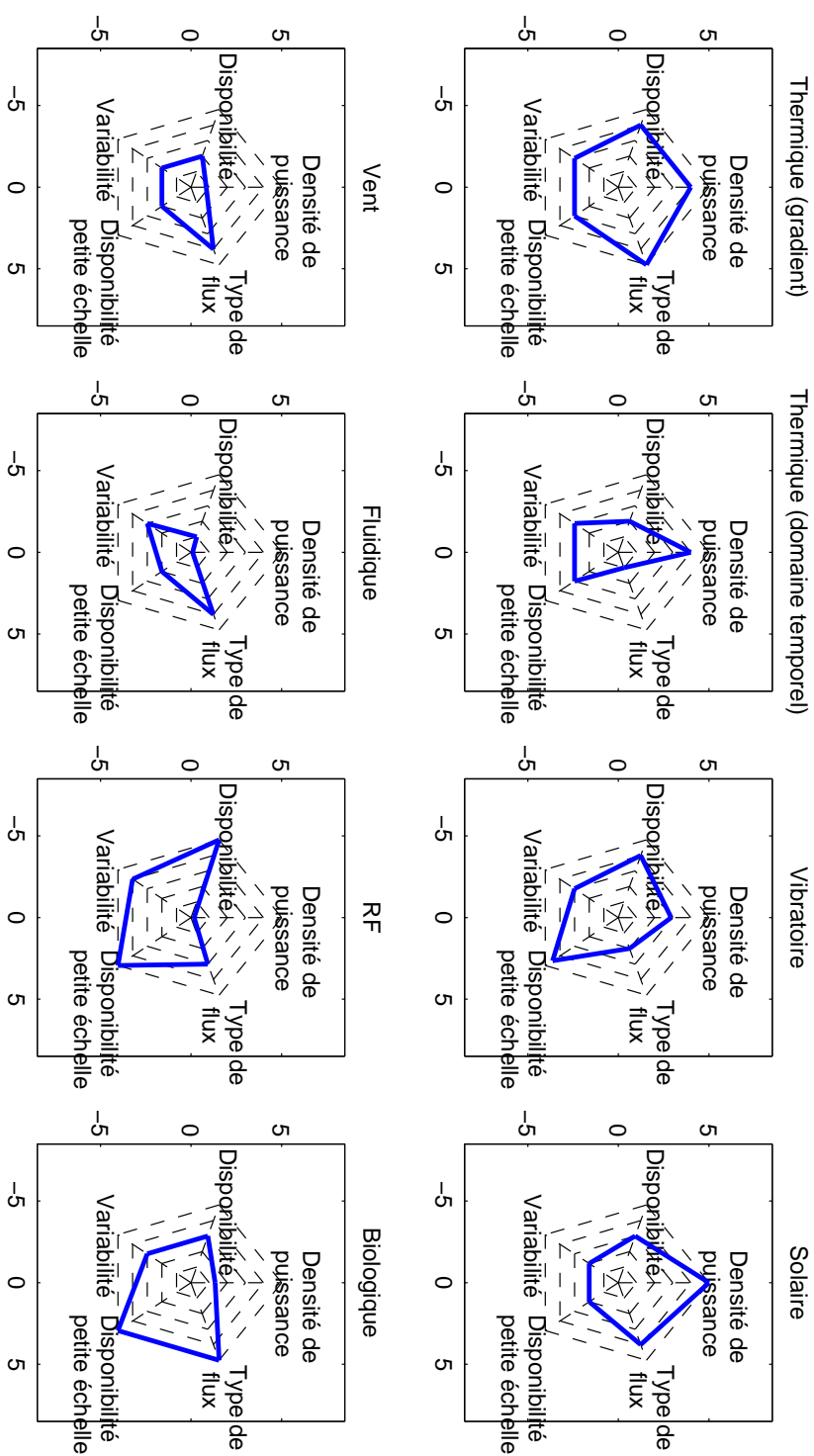


Figure A.11 – Figure de mérite des sources d'énergie.

### A.3.1 Conversion thermique vers électrique

#### Gradient thermique spatial

En termes de conversion d'énergie, les gradients de température sont typiquement convertis sous forme électrique via des éléments thermoélectriques, qui exploitent l'effet Seebeck de jonctions PN. Ces éléments sont caractérisés par leur figure de mérite  $ZT$  :

$$ZT = \frac{S^2}{\lambda\rho}T \quad (\text{A.3})$$

caractérisée par le coefficient Seebeck  $S$ , la conductivité thermique  $\lambda$ , la résistivité électrique  $\rho$  et la température moyenne de travail  $T$ . Cette figure de mérite intervient directement dans l'efficacité et le rendement maximal global (qui fait aussi intervenir le rendement de Carnot)<sup>A.9</sup> :

$$\eta_{thermo} = \eta_{Carnot} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_f}{T_c}} \quad (\text{A.4})$$

Ainsi, le rendement des systèmes thermoélectriques reste inférieur à celui de Carnot (Figure A.12), et est souvent inférieur à 5%. L'optimisation de ce rendement, qui revient à maximiser  $ZT$ , passe notamment par un paradoxe entre diminution de la conductivité thermique et diminution de la résistivité. De plus, on pourra noter une dépendances des facteurs composants l'expression de  $ZT$  en fonction de la température (Figure A.13), conduisant à un choix de matériaux dépendant de la température moyenne de travail de l'application.

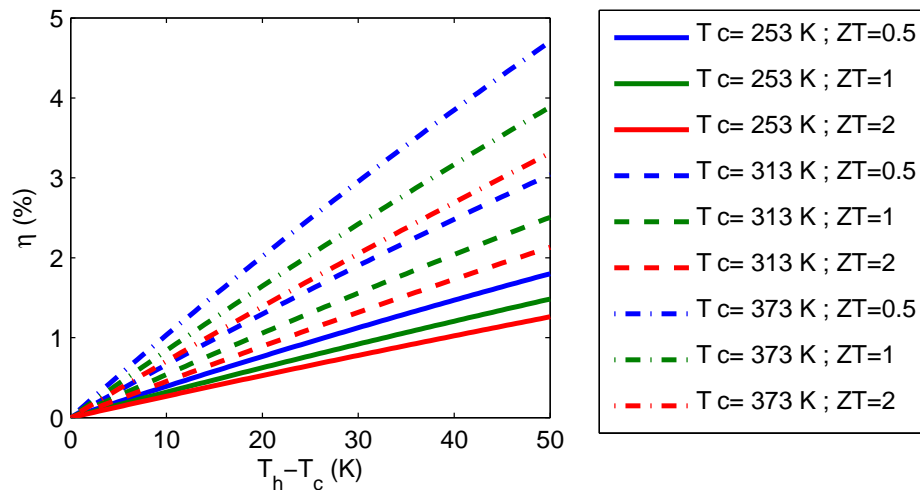


Figure A.12 – Rendement des systèmes thermoélectriques en fonction de la différence de température pour plusieurs valeurs de température froide.

A.9. On pourra noter que, comme dans beaucoup de cas et du fait du couplage bidirectionnel qui modifie la facilité pour l'énergie d'entrer dans la structure, le fonctionnement à rendement maximal ne correspond pas celui à puissance maximale.



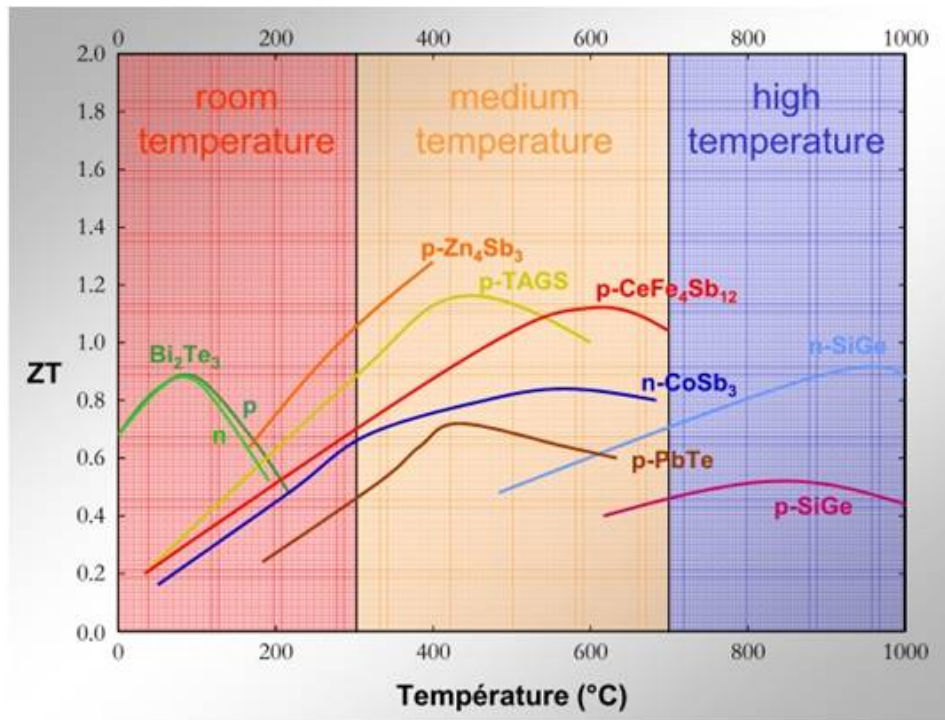
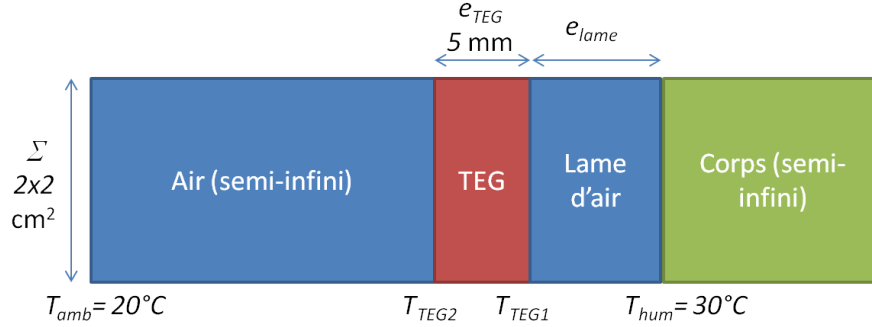


Figure A.13 – Figure de mérite de différents matériaux thermoélectriques en fonction de la température ([Sav14]).

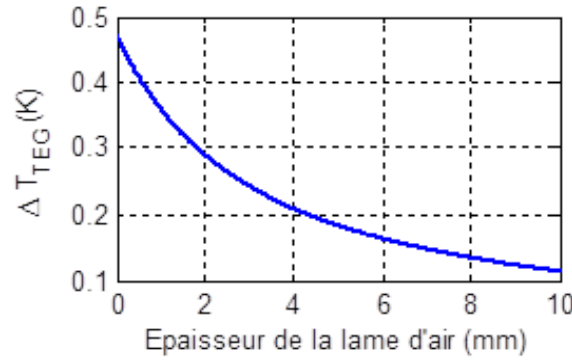
En plus du paradoxe concernant l'optimisation de  $ZT$ , l'un des inconvénients majeurs des éléments thermoélectriques réside dans leur grande conductivité thermique, qui conduit à des problèmes d'interfaçage thermique car ne permettant pas d'assurer aisément l'application de la majeure partie du gradient thermique au sein même du matériau actif, nécessitant ainsi l'utilisation d'échangeurs thermiques encombrants diminuant drastiquement la densité de puissance, ainsi que la faible résistance électrique rendant l'interfaçage électrique délicat. A titre d'exemple, la Figure A.14 montre la température obtenue au niveau d'un élément thermoélectrique (TEG) pour récupérer de l'énergie d'une source à  $30^\circ\text{C}$ , avec une température ambiante à  $20^\circ\text{C}$ . Outre l'effet fortement pénalisant de la moindre lame d'air au niveau du dispositif, on remarque que même sans celle-ci, le gradient de température au sein du matériau est bien plus faible que celui entre le corps considéré et la température ambiante, du fait de la forte conduction du système par rapport à la convection naturelle de l'air (le TEG agissant comme un "court-circuit thermique"). De plus, les tensions de sortie produites sont généralement très faibles (quelques dizaines de millivolts), rendant l'interfaçage électrique délicat.

### Variations temporelles de température

Concernant la conversion des variations temporelles de température, les éléments les plus indiqués sont les matériaux pyroélectriques, dont la polarisation dépend de la température, à la fois de manière directe (effet pyroélectrique primaire) et via la



(a) Schéma-bloc du système



(b) Température au sein de l'élément thermoélectrique

Figure A.14 – Exemple de la difficulté d'interfaçage d'éléments thermoélectriques.

dilatation et l'effet piézoélectrique (effet pyroélectrique secondaire)<sup>A.10</sup>. Bien que ces matériaux soient peu couplés et que les variations temporelles de température soient moins communes et limitées (Figure A.15), même des variations à très basse fréquence permettent de récupérer plus d'énergie que les matériaux thermoélectriques, notamment du fait des problèmes de conductivité thermique de ces derniers (Figure A.16). De plus, il est tout à fait possible de transformer des gradients thermiques en variations temporelles de température via l'utilisation de petites machines thermiques ([UCL07, PMM<sup>+</sup>14]).

Comme dans le cas piézoélectrique, il est possible de définir un coefficient de couplage  $k$  pour les matériaux pyroélectriques relatant leur capacité de conversion d'énergie ([Lal16]) :

$$k^2 = \frac{1}{2} \frac{p^2 T_c}{\epsilon_\theta c^E} \eta_{Carnot} \quad (\text{A.5})$$

faisant intervenir le coefficient pyroélectrique  $p$ , la permittivité à température constante  $\epsilon_\theta$  et la capacité calorifique à champ électrique constant  $c^E$ . On remarque également que ce coefficient est directement proportionnel à la température, et peut théori-

A.10. Un effet tertiaire (via des gradients de déformation induits par la température) existe également mais peut être généralement négligé.

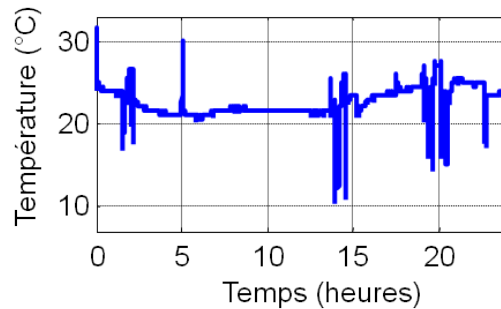


Figure A.15 – Profil d’une variation de température typique au niveau des vêtements portés ([SGA09]).

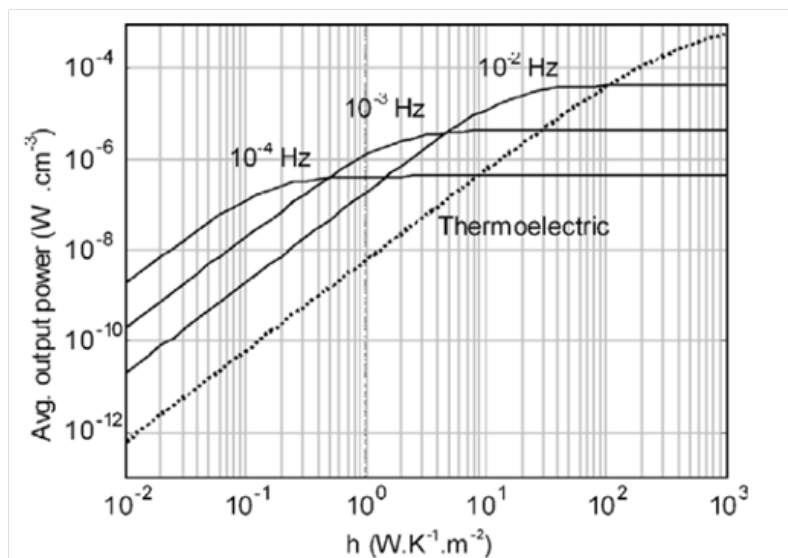


Figure A.16 – Comparaison des capacités de récupération d’énergie des éléments thermoélectriques et pyroélectriques en fonction du coefficient d’échange thermique  $h$  ([SGA09]).

quement dépasser 1. Ceci s’explique néanmoins physiquement (et thermodynamiquement) par le fait de travailler autour d’une “polarisation” en température (pas autour du zéro absolu), conduisant à un cycle thermodynamique ouvert. De même, la dépendance des paramètres (notamment la capacité calorifique) avec la température modifie le coefficient de couplage à haute température.

### A.3.2 Conversion mécanique vers électrique

La seconde source qui a précédemment été considérée est la source mécanique et plus particulièrement vibratoire. Dans ce cas, il est possible de classer les effets selon deux types : actifs et passifs.

## Transducteurs actifs

Les matériaux actifs peuvent majoritairement se décomposer 2 catégories. La première réside dans les systèmes électromagnétiques qui exploitent l'induction magnétique. Ainsi, ces éléments sont sensibles à la variation de flux qui se traduit mécaniquement par la vitesse (induction motionnelle). Cependant, leur intégration est un enjeu majeur (Figure A.17 - [KRO<sup>+</sup>06,BTT<sup>+</sup>07,OSBT07]), notamment en ce qui concerne l'aimant permanent (ce dernier jouant un rôle primordial dans la conversion d'énergie). Egalement, les systèmes électromagnétiques fonctionnent généralement à des fréquences telles que leur comportement inductif puisse être négligé, conduisant à une part significative d'énergie perdue dans la résistance interne du transducteur. De plus, cette résistance étant généralement faible (quelques dizaines d'Ohms), l'interface électrique pour un fonctionnement au point optimal est peu aisée à mettre en œuvre, même si ce comportement résistif permet une adaptation d'impédance indépendante de la fréquence. Cet interfaçage est par ailleurs également très délicat du fait des faibles niveaux de tension générée par les systèmes électromagnétiques (souvent inférieurs au Volt, nécessitant des architectures particulières de redresseurs).

La seconde possibilité de matériaux actifs sont les éléments piézoélectriques (voir Chapitre II), qui peuvent fonctionner en mode 33 ou 31 (le mode 31 correspondant à la flexion par exemple) et être obtenus sous différentes formes (Figure A.18 - [CCTS08]). Contrairement aux systèmes électromagnétiques, ces éléments travaillent à des niveaux de tension pouvant atteindre plusieurs centaines de Volts, permettant un interfaçage électrique plus aisé pour le redressement, et sous des courants faibles. De plus, ils ne génèrent aucune perturbation électromagnétique significative. Enfin, dans une certaine mesure, ces éléments peuvent être relativement bien intégrés à une échelle micrométrique, malgré une perte de couplage significative ([SS11]). A l'échelle millimétrique et centimétrique, le couplage global (structure électromécanique incluant élément actif et substrat) qui peut être espéré avec des éléments

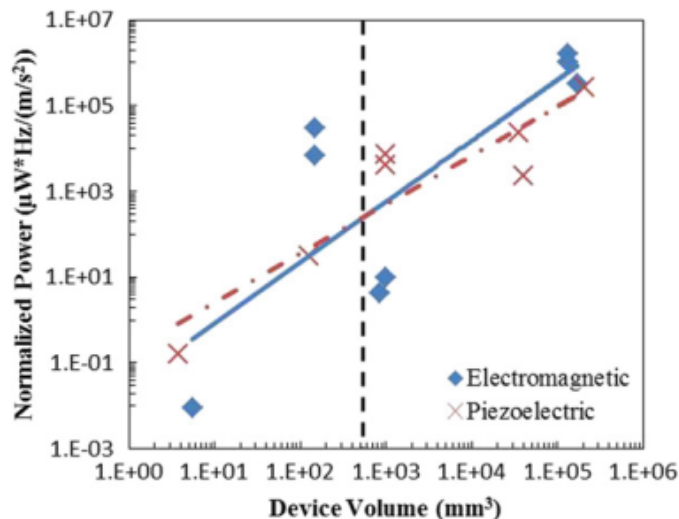


Figure A.17 – Densités de puissance normalisées en fonction des dimensions pour les effets électromagnétiques et piézoélectriques ([MBP11]).

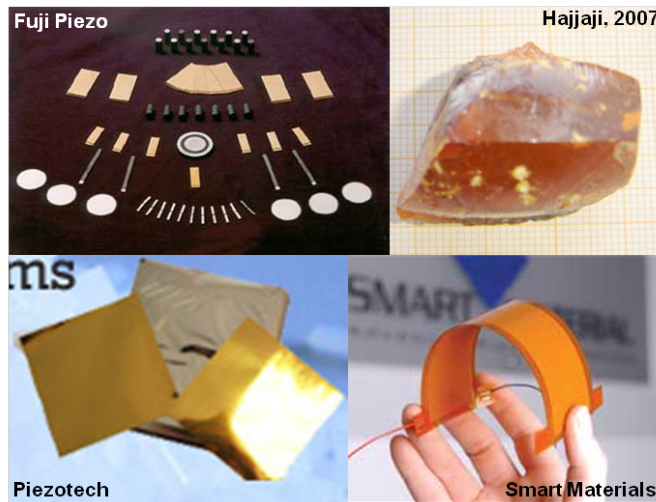


Figure A.18 – Différents exemples de matériaux piézoélectriques.

piézoélectrique dépasse rarement les 20 – 25 %.

Dans les deux cas cependant, les capacités de récupération sont intimement liées au coefficient de couplage, relatant le rapport d'énergie convertie par rapport à l'énergie d'entrée, ainsi qu'au facteur de qualité mécanique<sup>A.11</sup>, traduisant l'impact de la récupération sur la structure ([LI11a]).

On pourra enfin noter que d'autres effets commencent à émerger, telles que la triboélectricité ([SWZ<sup>+</sup>14]) ou la flexoélectricité ([DKES14]).

### Transducteurs passifs

L'autre famille de transducteurs pour la récupération d'énergie mécanique tient des systèmes passifs, où la variation se fait sur un paramètre et non une grandeur, tels que les dispositifs électrostatiques basés sur la variation de capacité et qui sont très facilement et hautement intégrables (Figure A.19), ou les matériaux magnéto- et électro-strictifs dont l'activité électromécanique est activée par un champ de polarisation (Figure A.20 - [Uen12]). Ces dispositifs nécessitent néanmoins des cycles de charge/décharge réclamant des sources d'énergie extérieures pilotables (voir par exemple le Paragraphe IV.1 dans le cas électrostatique), mais avec certaines avancées récentes permettant de démarrer sur des perturbations ambiantes tout à fait atteignables en pratique ([dQD11, DKB<sup>+</sup>14, LRW<sup>+</sup>14, WLMC15, WRM<sup>+</sup>15, LWMC15]), ou encore l'obtention assez aisée d'une polarisation dans le cas magnétique via l'utilisation d'aimants. Notons également des précautions d'emploi dans l'usage des systèmes électrostatiques, tel que le risque d'adhérence par forces de Maxwell ([BFL15]).

---

A.11. On s'intéresse surtout au cas de structures résonantes ici.

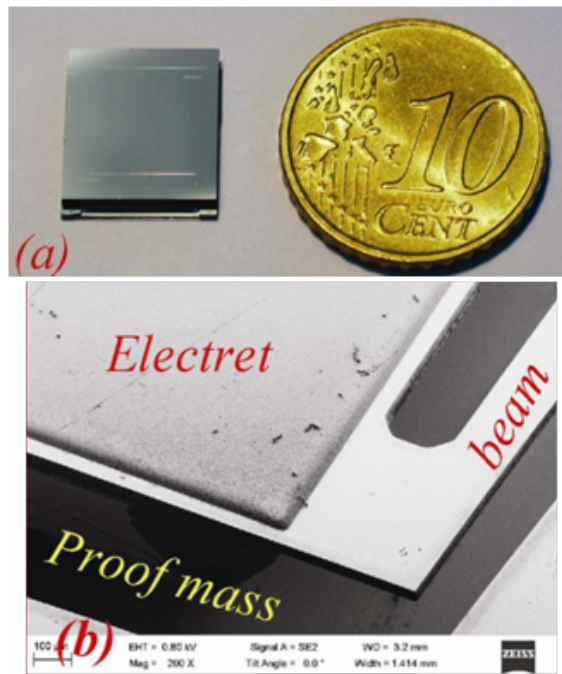


Figure A.19 – Microgénérateur électrostatique ([WH14]).

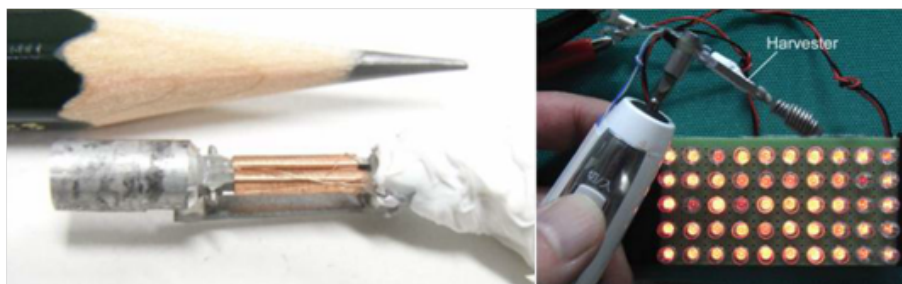


Figure A.20 – Microgénérateur magnétostrictif ([Uen12]).



### A.3.3 Conversion radiations vers électrique

#### Conversion photovoltaïque et éolienne

En termes de radiations solaires, l'effet de conversion le plus répandu demeure bien entendu l'effet photovoltaïque, consistant à extraire une partie de l'énergie de photons possédant une énergie dépassant un certain seuil (barrière d'énergie). D'un point de vue scientifique, les avancées dans le domaine photovoltaïque ont été nombreuses, permettant d'approcher la limite théorique de Shockley Queisser (Figure A.21 - [SQ61]) de 33% pour une jonction P-N unique (le reste de l'énergie étant dissipée sous forme de chaleur, laissée aux photons traversant la cellule ou perdue dans des recombinaisons électron-trou locales). Afin d'améliorer le rendement, les recherches actuelles se penchent sur des cellules multicouches permettant un plus large spectre d'absorption d'électrons. Cependant, malgré ces avancées, les rendements des cellules photovoltaïques, notamment celles commercialisées, sont typiquement aux alentours de 10 – 15%.

Comme précédemment évoqué, il est également possible de considérer ici le vent, ce dernier étant un produit dérivé du soleil, et d'étendre le concept à toute source fluide. Ainsi, dans le cas éolien comme fluide, il est nécessaire de d'abord convertir l'énergie entrante sous forme mécanique, induisant ainsi un étage de conversion supplémentaire pour arriver au domaine électrique. Néanmoins, cette conversion "mécano-fluide" est limitée par la limite théorique de Betz, aux alentours de 60% (Figure A.22), rarement atteinte par les systèmes de conversion, dont l'efficacité dépend également de la vitesse du vent. De plus, une fois sous forme mécanique, cette énergie doit être une nouvelle fois convertie sous forme électrique (via par exemple l'effet électromagnétique - Figure A.23, [RTF07, BAV<sup>+</sup>10] - ou piézoélectrique - [PCFZ05, MVKP07, LPBI10]), induisant donc une puissance de sortie encore réduite.

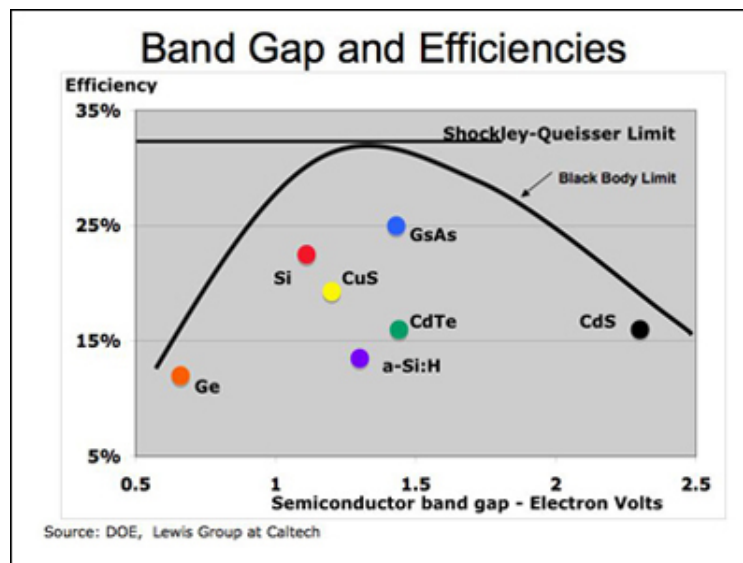


Figure A.21 – Rendement des cellules photovoltaïques ([http://solarcellcentral.com/limits\\_page.html](http://solarcellcentral.com/limits_page.html)).

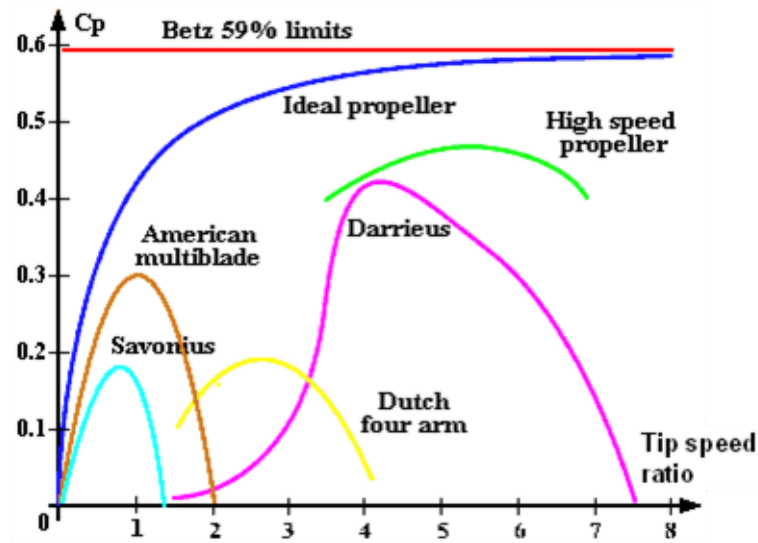


Figure A.22 – Rendement des dispositifs de conversion éolienne (hmf.enseeiht.fr).

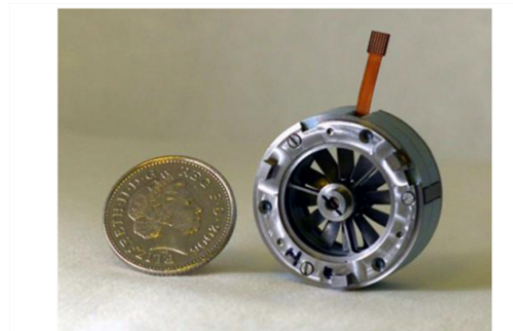


Figure A.23 – Exemple de microturbine électromagnétique ([HBH11]).

### Conversion radiofréquence

Pour les radiofréquences, les antennes peuvent convertir quasiment toute l'énergie qu'elles reçoivent, mais restent cependant pour la plupart directives, ont une sélectivité qui dépend de la fréquence, et délivrent des tensions assez basses. Des configurations particulières existent (telles que les rectenna ou des antennes aux motifs self-similaires - Figure A.24) qui peuvent plus ou moins contourner ces problèmes.

Une autre possibilité de conversion de l'énergie radiofréquence est l'effet magnétoélectrique, qui permet un lien direct entre le domaine magnétique et électrique trouvant son origine dans les interactions longues distance entre les dipôles ([GMG<sup>+</sup>09]). Cependant, il est possible d'utiliser une conversion indirecte par combinaison d'éléments ferroélectriques et magnétostrictifs couplés mécaniquement afin d'augmenter les capacités de conversion (Figure A.25 - [LWL<sup>+</sup>10]), ou encore d'exploiter les courants de Foucault dans une céramique piézoélectrique ([GGG<sup>+</sup>10]).



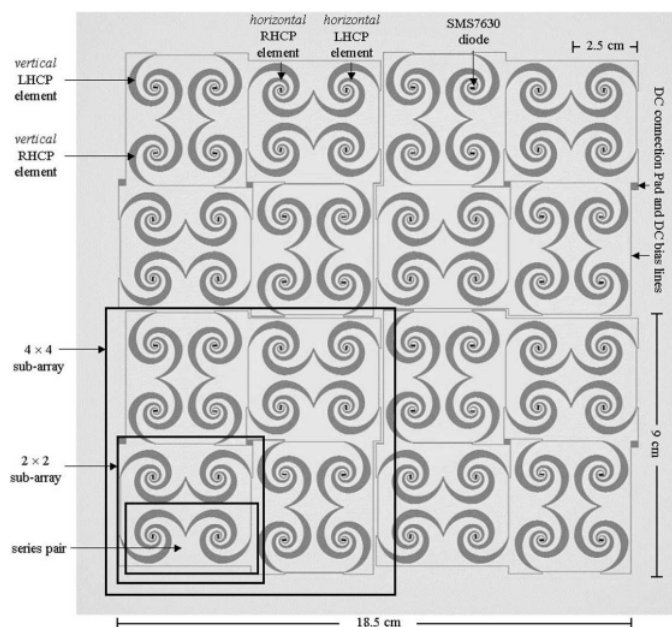


Figure A.24 – Exemple de conception d’une antenne large bande pour la récupération d’énergie ([HHMaBP04]).

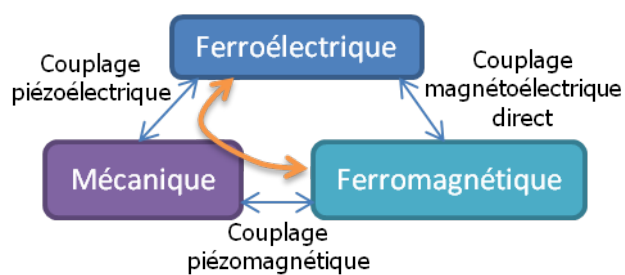


Figure A.25 – Effet magnétoélectrique.

### A.3.4 Conversion biologique vers électrique

Les sources biologiques se basant sur l'énergie potentielle chimique, la conversion est typiquement faite par des réactions d'oxydo-réduction. Ainsi, le choix de l'électrode est capital, mais les tensions et puissances sont toujours assez faibles dans tous les cas (Figure A.26). Il reste cependant possible d'alimenter des capteurs à partir de sédiments ([TGG<sup>+</sup>08]) ou de bactéries ([DBM<sup>+</sup>12]), ou encore sa montre avec son animal de compagnie favori (Figure A.27). Enfin, notons une application particulière à partir de la sueur, cette dernière pouvant être vue comme une solution saline ([JVRB<sup>+</sup>13]).

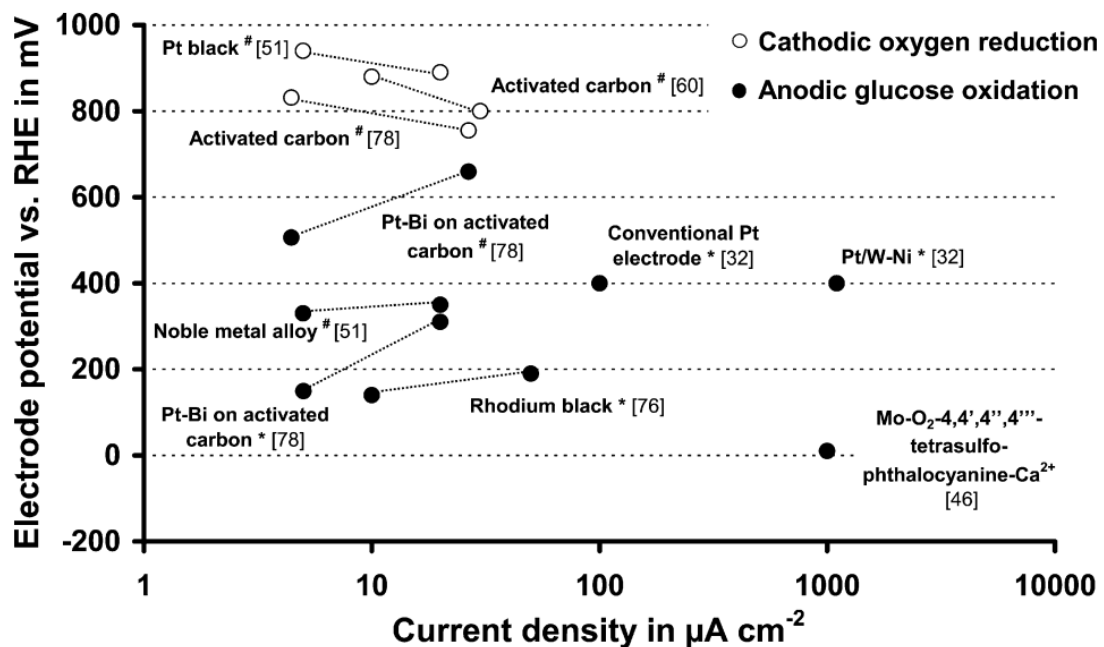
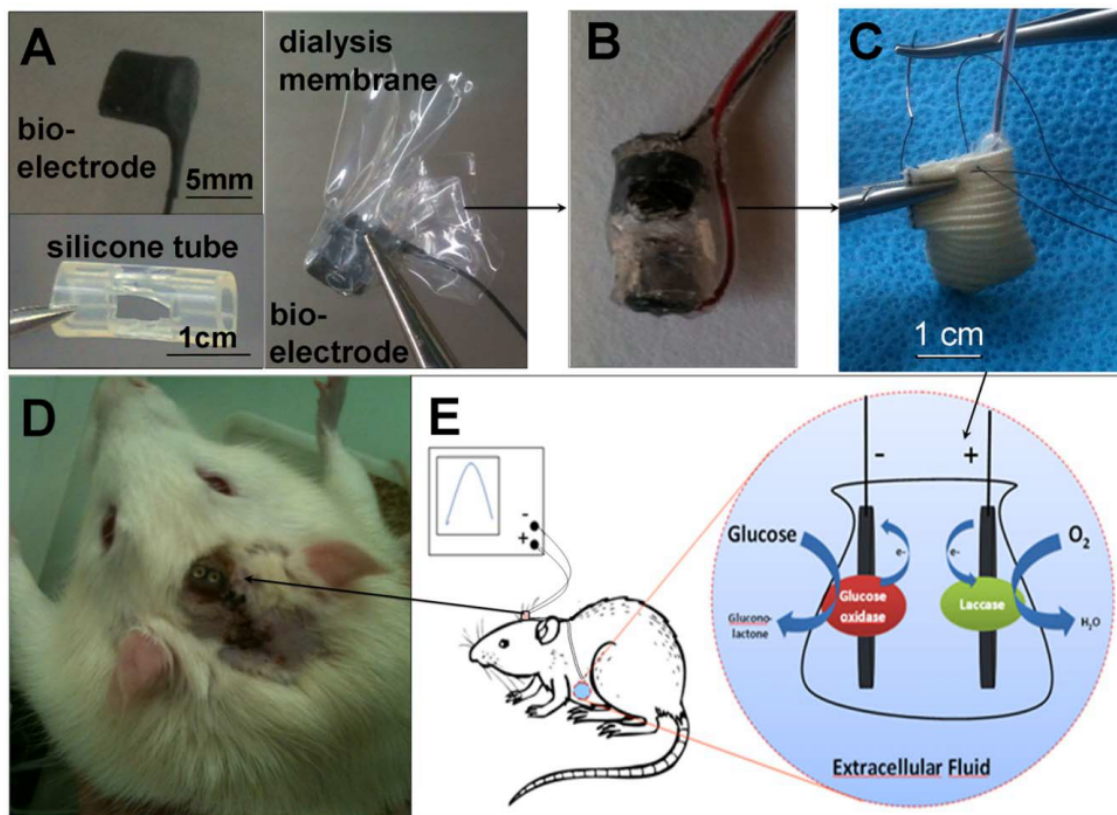
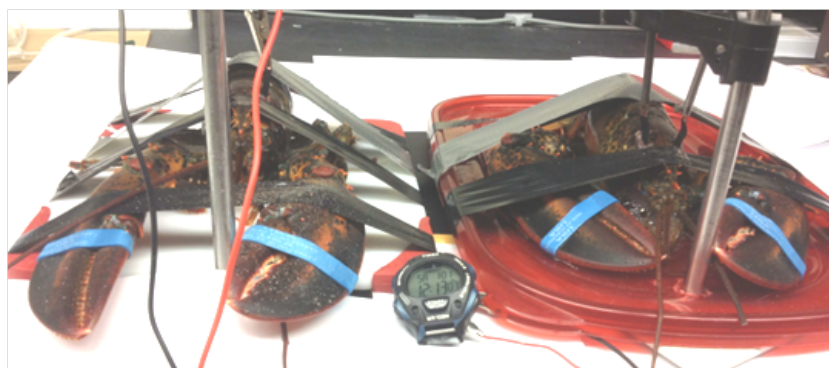


Figure A.26 – Effet des électrodes pour la conversion d'énergie à partir du glucose ([KDZvS08]).



(a) Biopile implantée dans un rat ([ZCA<sup>+</sup>13])



(b) Homards alimentant une montre ([MHH<sup>+</sup>13])

Figure A.27 – Exemples de microgénérateurs biologiques.

### A.3.5 Figure de mérite des effets

De manière similaire aux sources, il est également possible de tracer un radar de mérite pour les effets de conversion (Figure A.28), avec comme critères (toujours non exhaustifs) :

**Le couplage/rendement** : définit la part d'énergie qui peut être convertie.

**L'intégration** : permet d'évaluer la facilité de conception et d'implantation du transducteur à petite échelle.

**La nécessité de polarisation** : transducteur actif ou passif et, dans ce dernier cas, facilité d'appliquer une polarisation.

**La facilité d'interfaçage électrique** : niveaux de tension/courant de sortie, impédance optimale.

**La facilité d'interfaçage avec la structure** : transmission d'énergie aisée, facilité d'intégration.

Ainsi, selon ces critères, on peut remarquer l'intérêt des effets thermoélectriques, électromécaniques actifs (piézoélectrique et électromagnétique notamment), et RadioFréquences.

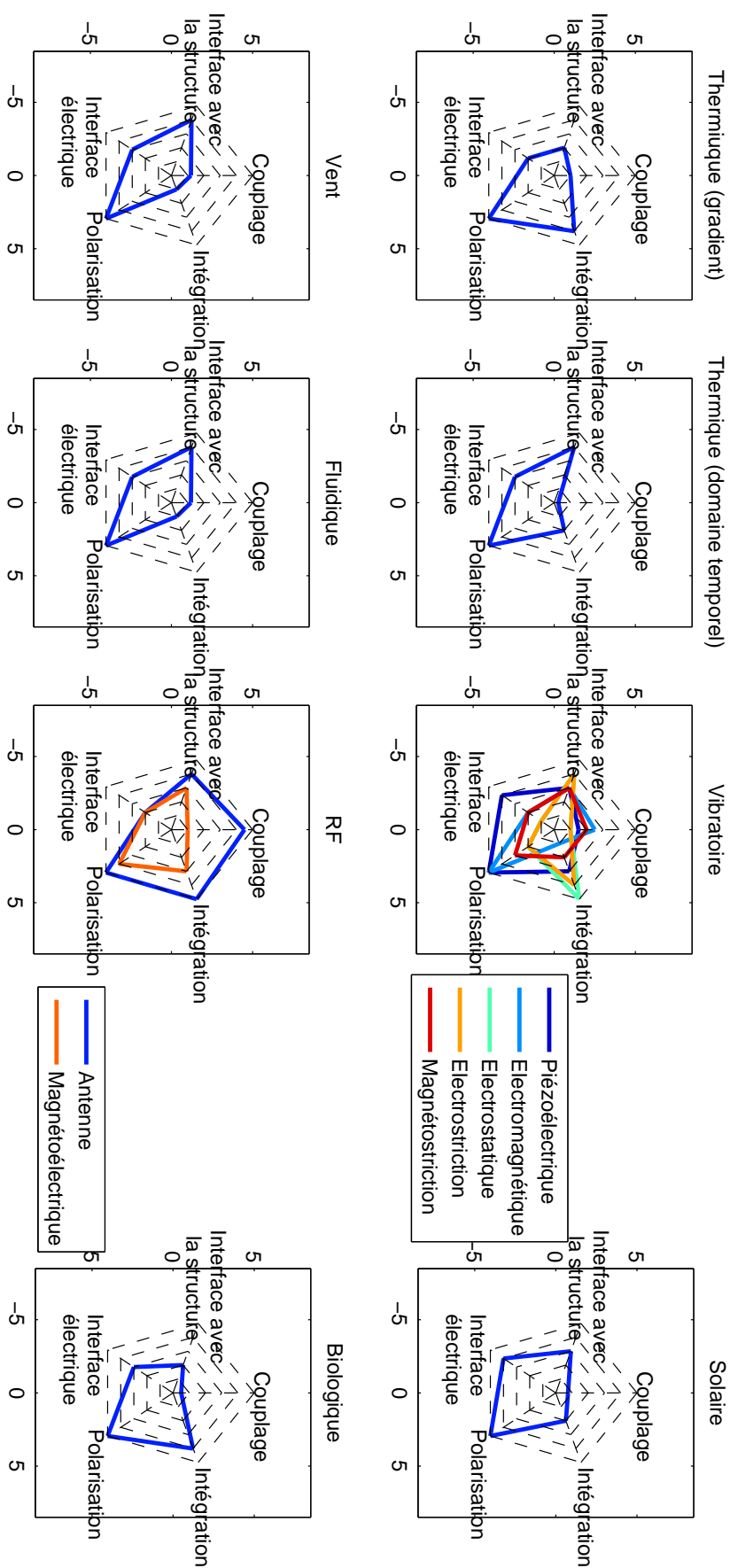


Figure A.28 – Figure de mérite des effets de conversion.

## A.4 Analyse comparative et conclusions

Les capacités de récupération dépendant de l'énergie disponible (sources) et de la part de celle-ci pouvant être convertie (effets de conversion), il est alors possible de combiner les figures de mérite des Figures A.11 et A.28 afin d'avoir une vue d'ensemble générale, conduisant à la Figure A.29. On peut ainsi voir que les meilleurs choix se portent sur les gradients thermiques, les vibrations avec matériaux actifs, et le solaire. On pourra noter qu'ici, la densité de puissance est tracée en échelle logarithmique, et donc même une petite différence correspond à plusieurs ordres de grandeurs (ce qui explique l'intérêt limité des sources biologiques).

Enfin, il convient ici de rappeler que l'analyse menée ici est générale, et ne peut tenir compte des spécificités de chaque application et de son environnement ; ces derniers conditionnant en priorité le choix de source et d'effet les plus adaptés.

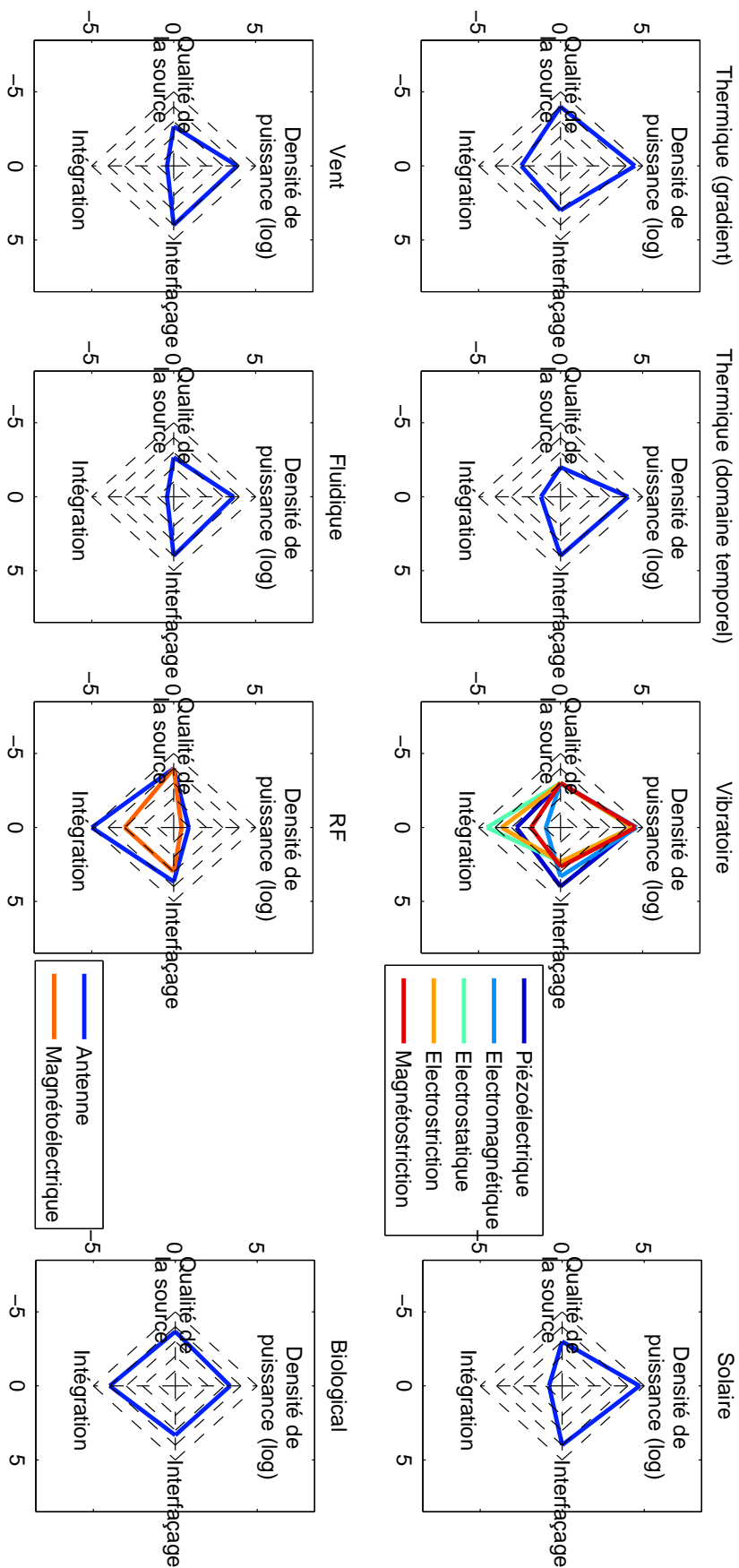


Figure A.29 – Figure globale des sources d'énergie et des effets de conversion associés.

# Annexe B

## Généralités sur la conception d'un dispositif autonome

*En complément de l'Annexe A, cette Annexe propose de dégager des règles de conception générales pour la conception d'un dispositif auto-alimenté. Un focus sur la nécessité d'assurer un bilan énergétique positif entre l'énergie disponible et celle consommée sera présenté, suivi de quelques indications sur l'implémentation de la fonction désirée afin de garder ce bilan positif.*



## B.1 Chaîne de conversion de l'énergie

Avant de détailler chaque étape dans la conception d'un système auto-alimenté, il convient de s'attarder un peu sur la chaîne de transfert d'énergie (Figure B.1). En particulier, du aux nombreux couplages inverses qui modifient également les étages précédents, il convient de considérer la chaîne complète. En effet, le flux d'énergie n'étant pas unidirectionnel, une optimisation de chaque étage de manière indépendante conduirait à un système global sous-optimal du fait des modifications engendrées par chaque étage sur le suivant, mais aussi le précédent. Ceci démontre ainsi la nécessité de maîtriser chaque étape, ainsi que des interfaces entre elles et entre les différents domaines de travail et de la Physique. Ainsi, il convient également d'unifier les termes lors de la collaboration entre personnes de champs scientifiques différents.

## B.2 De la nécessité de connaître son environnement

Il est également essentiel de parfaitement connaître l'environnement dans lequel le dispositif sera déployé. Ceci est nécessaire afin de pouvoir estimer les niveaux d'énergie en entrée<sup>B.1</sup>. Egalement, il peut être intéressant de savoir quelle sont les caractéristiques de la structure sur laquelle sera déployé le système, car le fait de récupérer de l'énergie peut modifier le comportement de celle-ci (par exemple dans le cas vibratoire sismique - voir Paragraphe II.4.2). Une fois les sources potentielles

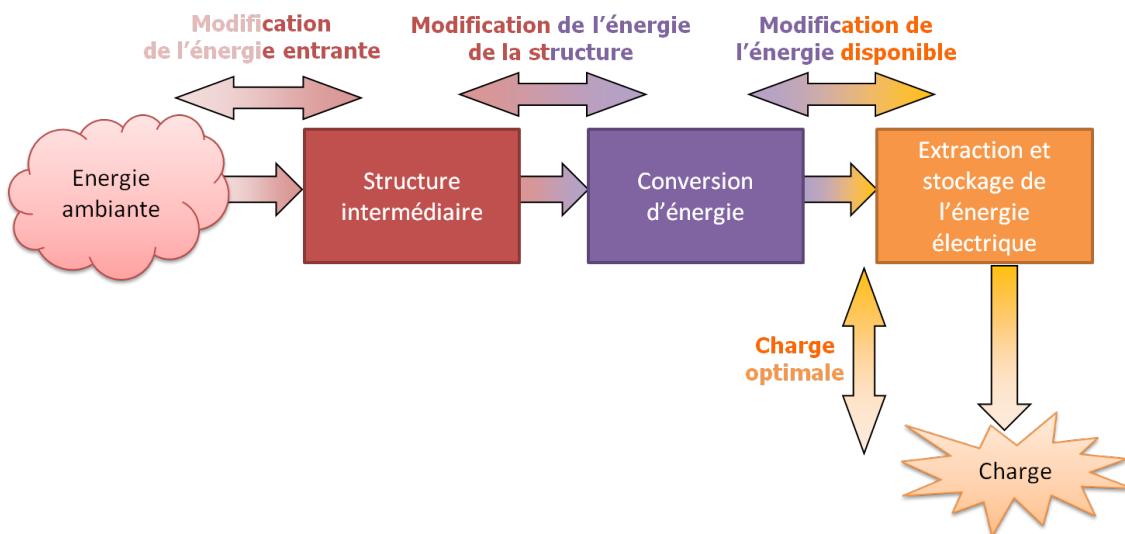


Figure B.1 – Chaîne typique de conversion d'énergie pour les systèmes auto-alimentés.

---

B.1. Personnellement, il m'est arrivé à maintes reprises de recevoir d'éventuels partenaires académiques ou industriels qui demandaient quelle serait la quantité d'énergie récupérée. Cependant, face à la question "Quels sont les niveaux disponibles dans l'environnement ?", aucune réponse ne pouvait être apportée, mais ils étaient toujours insistants sur les niveaux d'énergie récupérée.

identifiées, il peut aussi être des plus intéressants, afin de pouvoir rapidement comparer les possibilités de manière préliminaire, d'utiliser des grandeurs normalisées selon le ou les types de grandeur d'entrée possibles (Tableau B.1).

### **B.3 De la nécessité de connaître ses besoins réels - Bilan énergétique**

En plus de la source et des entrées, il est tout aussi primordial de connaître quelles sont les fonctions exactes à implémenter et quels sont leurs réels besoins énergétiques. Un critère des plus importants est le bilan d'énergie entre ce qui est disponible et ce qui est requis, permettant de s'assurer de la viabilité du système<sup>B.2</sup>. Particulièrement, il convient de savoir quelles est la précision exacte nécessaire pour la mesure. Ainsi, ceci permet de ne pas surdimensionner inutilement le capteur et de réaliser des économies d'énergie significatives.

De plus, il est aussi des plus intéressants de connaître à quel type d'action se destine le système, selon qu'elle soit reliée à l'entrée énergétique via un usage intentionnel (comme par exemple un interrupteur auto-alimenté) ou qu'elle en soit (relativement) indépendante. Dans ce dernier cas, il convient alors de légèrement surdimensionner le système de récupération et d'utiliser des réservoirs d'énergie additionnels afin de prévoir les temps de fonctionnement sans énergie en entrée. De même, il convient de différencier les fonctions de traitement d'information, qui ne nécessitent intrinsèquement pas d'énergie et les actions sur l'environnement lui-même, ou une part d'énergie sera toujours nécessaire à convertir. Enfin, comme aucun matériau de conversion d'énergie ne peut être directement connecté à la charge, il est également important de prévoir les interfaces électriques nécessaires à la mise en forme des grandeurs, qui, du fait de leurs pertes, réduisent l'énergie disponible en sortie.

### **B.4 Implémentation des fonctions**

Le dispositif connecté peut demander un fonctionnement continu. Ceci doit cependant être évité le plus possible car cela consomme une quantité d'énergie considérable. Néanmoins, de telles opérations sont quelquefois nécessaires, comme dans le cas de l'écoute RF par exemple, et est par conséquent l'aspect le plus critique en termes de consommation d'énergie. Dès lors, même si cela semble de prime abord contre-productif, il peut être intéressant de légèrement complexifier le système en adjoignant un dispositif très basse consommation qui contrôle le système énergivore qui devrait fonctionner de manière continue, comme c'est le cas dans le principe de la "wake-up radio" par exemple (Figure B.2), où un comparateur ultra basse consommation est utilisé en permanence à la place du récepteur RF (l'alimentation de ce dernier étant contrôlé par le comparateur).

---

B.2. Il sera ainsi illusoire par exemple, comme il m'est déjà arrivé de rencontrer, de demander à chauffer des chaussures de ski à partir des vibrations de ces derniers.

Source	Thermique		Vibratoire	
	Gradient	Spatial	Actif	Passif
Grandeur	$W.cm^{-3}.K^{-2}$	$J.cm^{-3}.cycle^{-1}.K^{-2}$	$J.cm^{-3}.cycle^{-1}.a^{-2}$ $J.cm^{-3}.cycle^{-1}.N^{-2}$	$J.cm^{-3}.cycle^{-1}.a^{-2}.(V.\mu m^{-1})^{-1}$ $J.cm^{-3}.cycle^{-1}.N^{-2}.(V.\mu m^{-1})^{-1}$ $J.cm^{-3}.cycle^{-1}.a^{-2}.T^{-1}$ $J.cm^{-3}.cycle^{-1}.N^{-2}.T^{-1}$

Source	Solaire	Eolien/fluidique	RF	Biologique
	Grandeur	lx	$W.cm^{-2}.(m.s^{-1})^{-3}$	$J.cm^{-2}.cycle^{-1}$

Tableau B.1 – Exemples de paramètres normalisés pour les sources d'énergie et effets de conversion.

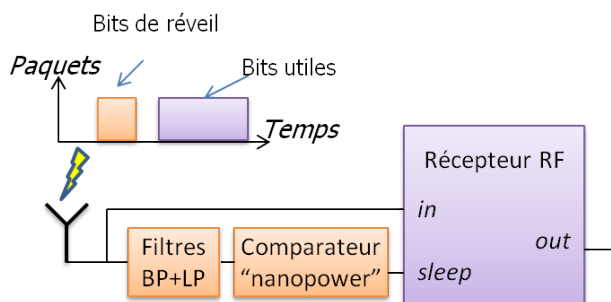


Figure B.2 – Exemple schématique du principe de la “wake-up radio”.

Contrairement au fonctionnement continu, les opérations intermittentes déclenchées par des événements extérieurs ou par des compteurs internes sont bien plus viables, car elles permettent l'utilisation maximale de fonctions de veille très peu consommatrices. Dans ce cas, la puissance moyenne consommée est directement liée au temps de répétition ou de manière équivalente au rapport cyclique d'utilisation, diminuer ce rapport cyclique conduisant bien sûr à une diminution de la consommation moyenne sur la période (Tableau B.2), mais devant aussi être choisie sur la base de la fonction souhaitée.

De manière générale mais surtout lorsque le bilan énergétique devient négatif, il convient de réellement réfléchir à l'application visée, voire de la re-penser afin de limiter les utilisations inappropriées de l'énergie. Celle-ci doit rester la plus simple possible. En particulier, il convient de ne pas surdimensionner les besoins comme la sensibilité d'un capteur, mais plutôt de vraiment se poser la question de quels sont les besoins réels<sup>B.3</sup>.

Toujours dans l'optique de re-penser le système, il convient non pas de raisonner directement sur la puissance nécessaire pour un circuit, mais plutôt sur l'énergie nécessaire pour l'accomplissement d'une tâche particulière. A titre d'exemple, si

Temps d'opération / période de répétition	Consommation en opération (32 kHz @ 2 V)	Consommation en veille avec timer (@ 2 V)	Puissance moyenne
Toujours actif	22 $\mu$ W	0 $\mu$ W	22 $\mu$ W
500 ms / 1 s	11 $\mu$ W	1 $\mu$ W	12 $\mu$ W
500 ms / 10 s	11 $\mu$ W	19 $\mu$ W	3 $\mu$ W

Tableau B.2 – Exemple de consommation moyenne d'un microcontrôleur *PIC16F688* (<http://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F688>) en fonction du temps d'opération et du temps de veille.

---

B.3. On rappelle ici le cas d'un projet où l'équipe en charge de la conception du système de communication avait fourni un dispositif des plus performants, capable de communiquer sur une distance de plusieurs centaines de mètres (voire des kilomètres), avec de nombreux protocoles de vérification. Cependant la distance de communication maximale dans le cadre de l'application n'était seulement que de quelques mètres (et la nécessité de vérification de données limitée), et la consommation était bien entendu rédhibitoire, avec quasiment 1 W (même si selon eux, le dispositif était “low-power”).

l'on compare le protocole Bluetooth Low Energy avec le Zigbee, le premier est plus intéressant d'un point de vue consommation de puissance. Néanmoins, le temps total pour la transmission est plus élevé pour le même nombre d'informations transmises, ce qui conduit à une énergie plus importante (Tableau B.3).

	Bluetooth Low Energy	Zigbee
Temps de transmission ([DHTS13])	1150 ms	250 ms
Courant en transmission (@ 3,3 V - [DHTS13])	<b>4,5 mA</b>	9,3 mA
Energie	17 mJ	<b>7,7 mJ</b>

Tableau B.3 – Illustration des puissances, temps d'opération et énergie par fonction nécessaires pour l'envoi d'une trame radiofréquence.



## FOLIO ADMINISTRATIF

### HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON ET L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON I

NOM : **LALLART**

(avec précision du nom de jeune fille, le cas échéant)

DATE de SOUTENANCE : **06 Septembre 2016**

Prénoms : **Mickaël Maurice Pierre**

TITRE : **Modélisation des couplages multiphysiques et application aux systèmes électroactifs de faibles dimensions**

NATURE : **Habilitation à Diriger des Recherches**

Numéro Identificateur :

École Doctorale : **Électronique, Électrotechnique et Automatique de Lyon**

Spécialité : **Énergie et Systèmes**

#### RÉSUMÉ :

Les avancées, plus ou moins récentes, dans le domaine des matériaux et dispositifs de conversion d'énergie à petite échelle ont permis un essor formidable des "systèmes et matériaux intelligents" (*smart materials and systems*), notamment dans les communautés académiques et scientifiques. Cependant, la compréhension des phénomènes mis en jeu dans ces matériaux, ainsi que leur utilisation dans des applications réalistes suscitent toujours un grand nombre de questionnements. D'un point de vue purement scientifique, appréhender les phénomènes physiques permettant le lien entre un domaine physique et le domaine électrique permet de dégager des possibilités d'amélioration de la conversion, voire même de percevoir de nouvelles thématiques de recherche. D'un point de vue industriel, démontrer les capacités de ces matériaux dans différents domaines est hautement nécessaire afin d'assurer un transfert et une utilité technologiques couronnés de succès, permettant de ne pas rendre stérile des années d'efforts scientifiques. Dès lors, il convient concernant ce type de matériaux et systèmes d'assurer une synergie entre recherche scientifique appliquée et problèmes industriels, en dégageant de grands questionnements scientifiques de ces derniers afin de faire à la fois avancer les connaissances scientifiques et en faire émerger de nouveaux concepts, et d'assurer que ces recherches ne soient pas vaines et servent le bien-être général. C'est dans ce cadre que s'inscrivent mes travaux entrepris en tant que Maître de Conférences à l'Institut National des Sciences Appliquées de l'INSA de Lyon (INSA Lyon), et plus particulièrement dans le Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) pour l'aspect recherche, et au Département de Génie Electrique (GE) pour la partie enseignement. Les travaux exposés ici, couvrant la conversion électromécanique (notamment via les éléments piézoélectriques et électrostrictifs), ainsi qu'électrothermique (dans une moindre mesure cependant), se proposent d'offrir une vision relativement générale, allant du matériau et sa modélisation au système global, avec des applications à la récupération d'énergie et au contrôle vibratoire.

**MOTS-CLÉS : Conversion électroactive, Conversion électromécanique, Conversion électrothermique, Ferroélectricité, Piézoélectricité, Electrostriction, Traitement non-linéaire, Contrôle de vibrations, Semi-passif, Semi-actif, Récupération d'énergie, Dispositifs auto-alimentés**

Laboratoire de recherche : **Laboratoire de Génie Électrique et Ferroélectricité (LGEF)**  
INSA Lyon - EA 682

Directeur du laboratoire : **Pr. Laurent LEBRUN**

Département d'enseignement : **Génie Electrique**

Directeur du Département : **Pr. Claude RICHARD**

Président du Jury :

Composition du Jury :

**Pr. Bruno ALLARD, Pr. Skandar BASROUR, Pr. Jean-François DEÛ, Pr. Daniel GUYOMAR, Pr. Colette LACABANNE, Pr. Laurent LEBRUN, Pr. Elie LEFEUVRE, Dr. Boudjemaa REMAKI**