



HAL
open science

Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique

Onoriu Puscasu

► **To cite this version:**

Onoriu Puscasu. Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique. Thermique [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2014. Français. NNT : 2014ISAL0012 . tel-01149913

HAL Id: tel-01149913

<https://theses.hal.science/tel-01149913>

Submitted on 7 May 2015

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.

Thèse

Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique

Présentée devant
L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

Pour obtenir
Le grade de docteur

Laboratoire de recherche : **Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF)**
Entreprise : **STMicroelectronics, Crolles 2**
Ecole Doctorale : **Électronique, Électrotechnique et Automatique (EEA)**

Par
Onoriu PUSCASU
(Ingénieur INSA de Lyon)

Soutenue publiquement le 22 Janvier 2014 devant la commission d'examen

Jury MM.	Elie LEFEUVRE Pr. Université Paris-Sud	Rapporteur
	Skandar BASROUR Pr. UJF, Grenoble	Rapporteur
	Paul MURALT Pr. EPFL, Lausanne	Président du jury
	Philippe CORONEL Dr. CEA Liten, Grenoble	Examineur
	Daniel GUYOMAR Pr. INSA de Lyon	Directeur de thèse
	Thomas SKOTNICKI Directeur, STMicroelectronics, Crolles	Co-directeur
	Stéphane MONFRAY Dr. Ing. STMicroelectronics, Crolles	Invité
	Jean-Louis COMPEAU Ing., Groupe SEB, Pont-Evêque	Invité

INSA Direction de la Recherche - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2011-2015

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> http://www.edchimie-lyon.fr Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage Insa : R. GOURDON	M. Jean Marc LANCELIN Université de Lyon – Collège Doctoral Bât ESCPE 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 13 95 directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> http://edeea.ec-lyon.fr Secrétariat : M.C. HAVGOUDOUKIAN eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 Gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	<u>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</u> http://e2m2.universite-lyon.fr Insa : H. CHARLES	Mme Gudrun BORNETTE CNRS UMR 5023 LEHNA Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Forel 43 bd du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 e2m2@univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</u> http://www.ediss-lyon.fr Sec : Insa : M. LAGARDE	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 avenue Jean Capelle INSA de Lyon 696621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax :04 72 68 49 16 Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	<u>INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES</u> http://infomaths.univ-lyon1.fr Sec :Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 ^e etage infomaths@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie CALABRETTO LIRIS – INSA de Lyon Bat Blaise Pascal 7 avenue Jean Capelle 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax 04 72 43 16 87 Sylvie.calabretto@insa-lyon.fr
Matériaux	<u>MATERIAUX DE LYON</u> http://ed34.universite-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry Ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIERE INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 83 18 Fax 04 72 43 85 28 Jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	<u>MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE</u> http://mega.universite-lyon.fr Secrétariat : M. LABOUNE PM : 71.70 –Fax : 87.12 Bat. Saint Exupéry mega@insa-lyon.fr	M. Philippe BOISSE INSA de Lyon Laboratoire LAMCOS Bâtiment Jacquard 25 bis avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél :04.72 .43.71.70 Fax : 04 72 43 72 37 Philippe.boisse@insa-lyon.fr
ScSo	<u>ScSo*</u> http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/ Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT	M. OBADIA Lionel Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 Tél : 04.78.77.23.86 Fax : 04.37.28.04.48 Lionel.Obadia@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

La présente thèse a fait l'objet d'une collaboration entre la société STMicroelectronics, le CEA Liten et le laboratoire LGEF de l'INSA de Lyon. De ce fait des nombreuses personnes ont contribué au bon déroulement du travail mené.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury pour l'attention accordée à ce manuscrit, leurs suggestions et les questions posées lors de la soutenance.

J'aimerais remercier Thomas Skotnicki pour la confiance qu'il m'a faite en m'accordant la possibilité d'effectuer cette thèse, sur un sujet nouveau pour l'entreprise. Je le remercie également pour le suivi du travail, en tant que co-directeur, et les nombreuses et riches discussions. Par son ouverture d'esprit et son exigence il a réussi à m'insuffler le goût pour l'innovation et l'envie de progresser.

J'aimerais également remercier Stéphane Monfray, qui a encadré la thèse et que j'ai côtoyé au quotidien. Je tiens à apprécier ses conseils, sa qualité de gestion, aussi bien que sa créativité. Les très nombreuses discussions qu'on a eues ont permis de faire avancer rapidement le travail et de mieux le structurer.

Je voudrais remercier Daniel Guyomar, qui a accepté diriger la thèse et qui m'a ainsi offert une ouverture vers les développements faits au sein du laboratoire LGEF. Je tiens également à remercier Pierre-Jean Cottinet pour son aide au niveau de la mise en place d'expériences et de la compréhension des phénomènes qui régissent la piézoélectricité et les composants développés dans le cadre de ce travail. Ses conseils pour les publications et les formalités administratives ont été très utiles.

Aussi, j'aimerais remercier Emmanuelle Rouvière, co-encadrante du côté du CEA Liten, pour le suivi du travail et les moyens mis à disposition pour la réalisation des expériences. J'ai pu ainsi bénéficier d'un milieu très favorable pour les activités quotidiennes.

Je dois également beaucoup aux équipes au sein desquelles j'ai travaillé. J'aimerais commencer par l'équipe de « Modules Avancés » de STMicroelectronics qui a su se montrer « bienveillante » envers mon travail, malgré les plusieurs ordres de grandeur qui nous « séparent ». Se reconnaîtront ici les personnes avec qui j'ai pu partager des nombreux repas, pauses café, aussi bien que des activités dans des endroits où le port du badge n'est pas obligatoire.

Je voudrais remercier Frédéric Bœuf et Olivier Noblanc pour leur confiance et leur soutien. Je suis également reconnaissant envers les personnes qui se sont penché sur la récupération de l'énergie et qui ont apporté leur contribution technique et non seulement : Christophe, Emilie et Arthur. J'aimerais tout particulièrement remercier ceux qui lors de leurs stages ont contribué au présent travail de thèse : Jihane Boughaleb et Jean-Philippe Péméant.

Je suis également reconnaissant à l'équipe de l'ex-LCRE, laboratoire du CEA Liten. Se reconnaîtront ici les personnes avec qui j'ai partagé des nombreux moments agréables au travail et lors des sorties faites ensemble. Je dois mes remerciements à plusieurs membres de l'équipe qui ont contribué à l'avancement des travaux : Guillaume Savelli, Chloé Guerin, Mélanie Descharles, Dario Rapisarda et Sébastien Quénard.

Une autre équipe que j'aimerais remercier est celle du LGEF. Mis appart les discussions scientifiques, souvent intenses et riches j'ai pu apprécier leur accueil et leur bienveillance. J'aimerais remercier Lionel Petit pour ses conseils scientifiques et Evelyne Dorieux pour l'aide aux formalités.

J'aimerais également remercier toutes les personnes qui ne font pas partie de mes équipes de rattachement et qui ont eu une contribution non moins importante au travail effectué. Je voudrais souligner la contribution de Gilbert Pitone et Gabriel Delepierre, de la société Delta Concept, qui ont fabriqué les bilames utilisés. J'ai pu apprécier les interactions avec Sébastien Boisseau et Ulrich

Soupremanien du CEA, qui ont développé d'autres voies innovantes de conversion de l'énergie thermique. D'autres échanges utiles ont eu lieu avec la société Infinergia, à l'origine de nombreuses collaborations et avec l'institut ITE de Varsovie.

De manière générale, je tiens à exprimer ma gratitude envers les personnes qui ont été impliquées dans ce travail et dont les noms ne figurent pas dans ces lignes. Il s'agit notamment des participants au projet HEATec, qui a été lancé en 2012 et dont le but est de développer les nouveaux dispositifs de récupération d'énergie thermique.

Bien évidemment j'aimerais remercier ma famille pour leur support et leur présence dans les moments importants. J'aimerais également remercier Natalia, qui a été à mes côtés lors de la rédaction de ce manuscrit et qui a toujours su m'encourager.

Résumé

Le présent travail est une contribution au domaine de la récupération de l'énergie. Le fait de rendre les objets autonomes du point de vue énergétique est un des grands défis pour les acteurs de l'industrie et de la science. L'autonomie énergétique implique un moindre coût à l'utilisation et aussi une maintenance réduite pour les dispositifs à alimenter. Elle peut amener un confort d'utilisation accru et une empreinte écologique réduite.

L'énergie récupérée est gratuite et peut être convertie en électricité ou autre forme utile. C'est une conversion à petite échelle, les puissances produites étant suffisantes pour alimenter des dispositifs à basse consommation. Parmi ces derniers, on compte les capteurs sans fil, qui peuvent être alimentés avec des puissances aussi faibles que $10 \mu\text{W}$.

Le présent travail est focalisé sur la récupération de l'énergie thermique. La technologie classique de conversion repose sur les dispositifs à effet Seebeck. Les matériaux employés sont souvent chers, rares voire dangereux pour la santé. Aussi, les dispositifs ont besoin d'un radiateur pour des performances optimales.

Dans ce contexte une technologie innovante est proposée dans le cadre du présent travail. L'objectif est de fabriquer des dispositifs fins, flexibles et bas coût pour un fonctionnement sans radiateur. Le fonctionnement repose sur une conversion de la chaleur en électricité en deux étapes : thermomécanique et mécano-électrique. La première étape est réalisée avec des bilames thermiques qui oscillent en présence d'un gradient de température et la seconde avec des éléments piézoélectriques.

Plusieurs prototypes ont été élaborés, le point de départ étant la preuve de concept sur plaque chaude, avec refroidissement par un bloc métallique avec circulation d'eau froide. Ensuite, la mise en prototype sur substrat dur a été effectuée, pour un fonctionnement avec refroidissement à l'air ambiant. L'étape suivante a été la fabrication sur substrat flexible, avec des structures matricielles de quelques millimètres d'épaisseur refroidies par convection naturelle. Le signal généré par les dispositifs est composé de pics de tension périodiques pouvant atteindre 16 V d'amplitude. La puissance électrique moyenne développée par une cellule de matrice fonctionnant à 75°C est d'environ $3.3 \mu\text{W}$. La puissance mécanique développée par le bilame dans ce cas est de l'ordre de $200 \mu\text{W}$. Les dispositifs bénéficient donc d'une marge confortable d'optimisation. Un modèle a été mis en place pour l'étape de conversion mécano-électrique et montre que le rendement théorique limite est de 100%. Un modèle thermique analytique a été développé pour calculer la différence de température gardée par un prototype dans des conditions externes imposées. Des étapes d'optimisation ont été suggérées, avec comme résultat le doublement du gradient de température conservé par rapport au concept d'origine. Ainsi un prototype amélioré est capable de prendre la moitié de la différence de température externe imposée, pour un refroidissement à l'air.

Les lois d'échelle des dispositifs ont été établies. Il a été démontré que si la taille des dispositifs est réduite d'un facteur k , la fréquence d'oscillation du bilame augmente d'un facteur k^2 . En même temps, les températures de fonctionnement restent constantes. Suite à l'accélération conséquente en fréquence, la densité de puissance mécanique transportée augmente du facteur d'échelle k , tout comme la densité de puissance électrique. La miniaturisation peut donc amener des performances supérieures, ce qui a justifié le début de la fabrication sur silicium.

Les premiers cas d'usage ont été investigués, avec des tests effectués dans des conditions proposées par des potentiels intégrateurs : sur tuyau d'eau chaude et dans une installation électrique. L'utilisation des dispositifs développés pour des applications de la domotique est également à l'étude.

Mots-clés: bilame, piézoélectrique, récupération de l'énergie thermique, lois d'échelle.

Abstract

The present work is a contribution to the domain of energy harvesting. Making objects and appliances autonomous from the point of view of the consumed energy is one of the big industrial and scientific challenges of our time. Self-powered objects can be cheaper in use and maintenance-free. The comfort of use could be higher and the ecological footprint lower.

Harvesting means converting free energy from the environment into another useful form. The conversion scale is usually small and the generated power is sufficient for low power devices. Among the latter wireless sensors gained a significant popularity in the last decade. These are devices that can work with an electrical power as low as $10 \mu\text{W}$.

The present work is focused on thermal energy harvesting. The state of the art technology in this domain is represented by Seebeck effect devices. The materials they use are often expensive, rare and sometimes dangerous for health. Also, the devices need a heat sink for an optimal performance.

An innovative technology that can serve as an alternative is proposed in the current work. The goal is to build devices that are thin, flexible, low-cost, and able to work without a heat-sink. The new technology relies on a two-step conversion of heat into electricity. The first step is thermomechanical and is done with thermal bimetal that oscillate in presence of a thermal gradient. The second step is mechano-electrical and is accomplished with piezoelectric elements.

Several prototypes have been fabricated, after a proof of concept between a hot plate and a cold block with water cooling. The first modules have been assembled on a hard substrate, and worked while cooled by ambient air. The next step was fabrication of matrixes on a flexible substrate. The resulting modules are a few millimeters thick and work under natural convection. The voltage provided by the devices is composed of periodic spikes that can have an amplitude as high as 16 V. The average electrical power generated by a matrix cell at 75°C is of $3.3 \mu\text{W}$, while the mechanical power developed by the bimetal is in the order of $200 \mu\text{W}$. Thus, the mechano-electrical conversion efficiency can be largely enhanced, with a theoretical limit approaching 100%, according to the conversion model that has been developed. A thermal model has also been proposed for calculating the temperature difference kept by a prototype under given external conditions. Optimization steps have been suggested and performed subsequently. As a result the temperature difference maintained by the devices has been doubled, reaching half of the external one with natural convection cooling.

The scaling laws of the devices have been established in this work. It has been proven that by diminishing the size of a device by a factor k , the bimetal oscillation frequency is multiplied by k^2 . Meanwhile, its working temperatures do not change. As a result of the frequency acceleration, the transported mechanical power density is multiplied by k , as well as the generated electrical power density. Thus, the miniaturization can bring a significant gain. In order to take advantage of it, a process at micro scale has been proposed and validated for the fabrication of bimetal.

The first use cases have been investigated for the developed devices, with on-site tests performed in conditions proposed by potential end users. Tests have been done on a hot water pipe and on inside an electrical installation. A study for the integration of the devices in home appliances is under way.

Keywords: bimetal, piezoelectric, thermal energy harvesting, scale laws.

Table des matières

REMERCIEMENTS	- 1 -
RÉSUMÉ	- 3 -
ABSTRACT	- 4 -
TABLE DES MATIÈRES	- 7 -
CHAPITRE 1: ETAT DE L'ART ET INTRODUCTION.....	- 11 -
1.1 RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE À PETITE ÉCHELLE. SOURCES, CAS D'USAGE, MÉTHODES.....	- 12 -
1.1.1 <i>Les dispositifs autonomes et les réseaux de capteurs sans fil</i>	- 12 -
1.1.2 <i>La récupération de l'énergie lumineuse</i>	- 16 -
1.1.3 <i>Introduction à la récupération de l'énergie mécanique</i>	- 18 -
1.1.3.1 <i>La conversion électromagnétique</i>	- 19 -
1.1.3.2 <i>La conversion piézoélectrique</i>	- 20 -
1.1.3.3 <i>La conversion capacitive.....</i>	- 21 -
1.1.4 <i>Récupération de l'énergie des ondes radiofréquence.....</i>	- 22 -
1.2 RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE. LES DISPOSITIFS À EFFET SEEBECK.....	- 24 -
1.2.1 <i>Les dispositifs à effet Seebeck : principe de fonctionnement et matériaux.....</i>	- 24 -
1.2.2 <i>Inconvénients des dispositifs classiques</i>	- 27 -
1.2.3 <i>Modalités alternatives de conversion de l'énergie thermique en électricité.....</i>	- 28 -
1.2.3.1 <i>La conversion pyroélectrique.....</i>	- 28 -
1.2.3.2 <i>Autres méthodes non-conventionnelles</i>	- 30 -
1.3 INTRODUCTION AUX DISPOSITIFS INNOVANTS DE RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE THERMIQUE	- 32 -
1.3.1 <i>Conversion thermomécanique par vaporisation brusque de fluide</i>	- 32 -
1.3.2 <i>Conversion thermomécanique par alliages à mémoire de forme.....</i>	- 35 -
1.3.3 <i>Conversion thermomécanique par bilames thermiques</i>	- 37 -
CHAPITRE 2: LES BILAMES THERMIQUES.....	- 41 -
2.1 L'EFFET BILAME. LES BILAMES CLOQUANTS.	- 42 -
2.1.1 <i>Modélisation analytique de l'effet bilame.....</i>	- 42 -
2.1.2 <i>Energie stockée dans un bilame à déformation continue.</i>	- 46 -
2.1.3 <i>Simulation numérique.....</i>	- 48 -
2.2 LES BILAMES CLOQUANTS : FABRICATION ET CARACTÉRISATION.....	- 52 -
2.2.1 <i>Procédé de fabrication, formes et températures de fonctionnement</i>	- 52 -
2.2.2 <i>Le cloquage en imagerie infrarouge.....</i>	- 54 -
2.2.3 <i>Energie mécanique mesurée.....</i>	- 55 -
CHAPITRE 3: LA CONVERSION MÉCANO-ÉLECTRIQUE. LES PIÉZOÉLECTRIQUES.	- 59 -
3.1 VOIES POUR LA CONVERSION MÉCANO-ÉLECTRIQUE. MODÈLES ET PERFORMANCES.	- 60 -
3.1.1 <i>La conversion électromagnétique. Couplage avec les bilames.....</i>	- 60 -
3.1.2 <i>La conversion électrostatique. Le couplage électret-bilame.....</i>	- 61 -
3.1.2.1 <i>Information générale sur les électrets.....</i>	- 61 -
3.1.2.2 <i>Prototypes à base de bilames et électrets</i>	- 63 -
3.2 L'EFFET PIÉZOÉLECTRIQUE : LOIS ET MATÉRIAUX.....	- 67 -
3.2.1 <i>Historique et usages des piézoélectriques.....</i>	- 67 -
3.2.2 <i>Physique de la piézoélectricité.....</i>	- 68 -
3.2.2.1 <i>Classification.....</i>	- 68 -
3.2.2.2 <i>Equations de la piézoélectricité</i>	- 69 -
3.2.2.3 <i>Les grandeurs électriques</i>	- 72 -
3.2.2.4 <i>Le coefficient de couplage</i>	- 73 -
3.2.3 <i>Matériaux piézoélectriques.....</i>	- 75 -

3.3	COMPORTEMENT D'UNE POUTRE PIÉZOÉLECTRIQUE SOUS UNE SOLLICITATION EN MODE CHOC.....	- 78 -
3.3.1	<i>Modèles à constantes localisées. Equations du comportement.....</i>	- 78 -
3.3.1.1	Modèle générique pour la conversion mécano-électrique.....	- 78 -
3.3.1.2	Modèle pour les convertisseurs piézoélectriques. Oscillations et chocs.....	- 79 -
3.3.2	<i>Cas particulier : comportement en court-circuit.....</i>	- 80 -
3.3.3	<i>Cas particulier : comportement en circuit ouvert.....</i>	- 82 -
3.3.4	<i>Cas particulier : comportement avec une impédance adaptée.....</i>	- 84 -
3.3.5	<i>Le rendement mécano-électrique.....</i>	- 85 -
3.4	LES CIRCUITS DE GESTION DE PUISSANCE. STOCKAGE DE L'ÉNERGIE.....	- 88 -
3.4.1	<i>Les circuits passifs.....</i>	- 88 -
3.4.2	<i>Les circuits actifs.....</i>	- 90 -
3.4.2.1	Les techniques SSH.....	- 90 -
3.4.2.2	Le circuit dédié de STMicroelectronics.....	- 92 -
3.4.3	<i>Stockage de l'énergie.....</i>	- 93 -
CHAPITRE 4: DISPOSITIFS À BASE DE BILAMES ET PIÉZOÉLECTRIQUES.....		- 97 -
4.1	PREUVE DE CONCEPT ET PREMIERS PROTOTYPES. FONCTIONNEMENT AVEC POINT FROID FORCÉ....	- 98 -
4.1.1	<i>Configurations et éléments piézoélectriques pour la construction de prototypes.....</i>	- 98 -
4.1.1.1	Configurations pour la construction des prototypes.....	- 98 -
4.1.1.2	Éléments piézoélectriques utilisés.....	- 99 -
4.1.2	<i>Fonctionnement avec refroidissement à l'eau. Preuve de concept.....</i>	- 100 -
4.1.2.1	Bilames cloquant à haute température.....	- 100 -
4.1.2.2	Bilame cloquant à basse température.....	- 101 -
4.1.3	<i>Amélioration des performances, stockage de l'énergie.....</i>	- 102 -
4.1.3.1	Bilames cloquant à haute température, interaction en mode choc.....	- 102 -
4.1.3.2	Chargement de batterie en couche mince.....	- 105 -
4.1.3.3	Bilame cloquant à basse température.....	- 106 -
4.1.3.4	Allumage de diode avec dispositif à bilame.....	- 107 -
4.1.4	<i>Mise en prototype, fonctionnement avec refroidissement à l'air ambiant.....</i>	- 107 -
4.1.4.1	Prototype fin fonctionnant avec convection forcée.....	- 108 -
4.1.4.2	Analyse du comportement lors du cloquage.....	- 110 -
4.1.4.3	Prototype fin fonctionnant avec convection naturelle.....	- 112 -
4.2	PROTOTYPES SUR SUBSTRAT FLEXIBLE. FONCTIONNEMENT MATRICIEL.....	- 114 -
4.2.1	<i>Mise en œuvre sur substrat flexible.....</i>	- 114 -
4.2.2	<i>Mise en œuvre de la connectique flexible.....</i>	- 116 -
4.2.3	<i>Fonctionnement d'une cellule et d'une matrice.....</i>	- 117 -
4.2.3.1	Tests avec des cellules unitaires.....	- 117 -
4.2.3.2	Estimation de l'énergie fournie par pic.....	- 120 -
4.2.3.3	Matrice 2x2.....	- 122 -
4.2.3.4	Matrice 3x1.....	- 124 -
4.2.3.5	Matrice avec plusieurs points de fonctionnement.....	- 125 -
4.3	PROPRIÉTÉS THERMIQUES DES DISPOSITIFS SUR SUBSTRAT FLEXIBLE.....	- 127 -
4.3.1	<i>Mise en place du modèle à résistances thermiques équivalentes pour une cellule....</i>	- 127 -
4.3.2	<i>Calcul des résistances et comparaison aux mesures.....</i>	- 130 -
4.3.2.1	Résistances de transfert par conduction.....	- 130 -
4.3.2.2	Résistances de transfert radiatif.....	- 131 -
4.3.2.3	Ajustement par rapport aux mesures.....	- 131 -
4.3.3	<i>Optimisation des propriétés thermiques.....</i>	- 133 -
CHAPITRE 5: LOIS D'ÉCHELLE.....		- 135 -
5.1	LE GAIN EN DENSITÉ DE PUISSANCE MÉCANIQUE AVEC LA MINIATURISATION.....	- 136 -
5.1.1	<i>Modèle analytique. Résolution de l'équation de la chaleur.....</i>	- 136 -
5.1.1.1	Solution générale pour une plaque chauffée.....	- 136 -
5.1.1.2	Solution de l'équation de la chaleur pour un bilame. La fréquence d'oscillation.....	- 141 -
5.1.2	<i>Evolution des températures et vitesses au cloquage.....</i>	- 142 -

5.1.2.1	Evolution des températures caractéristiques des bilames avec l'échelle.....	- 142 -
5.1.2.2	Evolution des vitesses de cloquage avec l'échelle.....	- 143 -
5.1.3	<i>Evolution théorique et expérimentale de la fréquence d'oscillation des bilames</i>	- 144 -
5.1.3.1	Evolution théorique de la fréquence d'oscillation d'un bilame avec l'échelle.....	- 144 -
5.1.3.2	Preuve expérimentale de l'accélération en fréquence avec la miniaturisation	- 146 -
5.1.4	<i>Evolution de la densité de puissance mécanique et du flux thermique transporté ..</i>	- 146 -
5.1.4.1	Augmentation de la densité de puissance mécanique avec la miniaturisation	- 146 -
5.1.4.2	Evolution de la chaleur transmise par les bilames avec la réduction de l'échelle	- 148 -
5.2	GAIN EN DENSITÉ DE PUISSANCE ÉLECTRIQUE GÉNÉRÉE AVEC LA MINIATURISATION	- 151 -
5.2.1	<i>Evolution de la raideur et de la force d'interaction</i>	- 151 -
5.2.2	<i>Evolution avec l'échelle des contraintes et de la tension générée</i>	- 154 -
5.2.3	<i>Evolution de la densité de puissance électrique</i>	- 156 -
5.2.4	<i>Synthèse et discussion sur les lois d'échelle</i>	- 158 -
CHAPITRE 6: CAS D'USAGE, COMPARAISONS, FUTURES ÉVOLUTIONS		- 161 -
6.1	PREMIERS CAS D'USAGE INVESTIGUÉS.....	- 162 -
6.1.1	<i>Les environnements industriels et l'infrastructure</i>	- 162 -
6.1.2	<i>La domotique et les équipements électriques</i>	- 164 -
6.2	COMPARAISON À L'ÉTAT DE L'ART, TESTS SUR LA DURÉE DE VIE.....	- 166 -
6.2.1	<i>Comparaison aux dispositifs du marché pour un fonctionnement sans radiateur ..</i>	- 166 -
6.2.2	<i>Tests sur la durée de vie des dispositifs</i>	- 170 -
6.2.2.1	Mécanismes de vieillissement. Tests sur la durée de vie des bilames.....	- 170 -
6.2.2.2	Tests sur la durée de vie des piézoélectriques.....	- 172 -
6.3	FUTURES ÉVOLUTIONS.....	- 175 -
6.3.1	<i>Dépôt de peinture piézoélectrique sur les bilames</i>	- 175 -
6.3.2	<i>Fabrication à micro échelle</i>	- 177 -
CONCLUSION GÉNÉRALE		- 179 -
BIBLIOGRAPHIE		- 183 -
COMMUNICATIONS DE L'AUTEUR		- 187 -

Chapitre 1: Etat de l'art et introduction

1.1 Récupération d'énergie à petite échelle. Sources, cas d'usage, méthodes

On appelle récupération d'énergie la conversion de l'énergie provenant d'une source gratuite en une autre forme utile, notamment en électricité. De manière conventionnelle on parle de récupération d'énergie pour les dispositifs de petite échelle, de l'ordre du centimètre ou en dessous et on parle de production d'énergie pour les dispositifs de grande échelle, au-dessus du mètre. La même technologie peut servir dans les deux buts. C'est le cas notamment des cellules solaires, qui sont utilisées pour produire de l'énergie pour les ménages et également pour récupérer l'énergie nécessaire pour faire fonctionner des petits dispositifs, comme les montres ou les calculatrices. La différence entre les deux types d'usage est donc déterminée par l'échelle des dispositifs.

La récupération de l'énergie permet d'alimenter des dispositifs de petite taille, pour les rendre autonomes. Ceci permet en premier temps d'éviter l'utilisation des fils pour les alimenter, ce qui facilite l'installation. Egalement, la maintenance est allégée, car il n'y a plus besoin de changer les batteries, ou même plus besoin d'en utiliser, selon l'application.

Les sources d'énergie récupérée, les mécanismes de conversion, aussi bien que les applications sont discutées dans cette section. Pour débiter, un résumé des applications visées est fait.

1.1.1 Les dispositifs autonomes et les réseaux de capteurs sans fil

La micro-électronique a connu un progrès vertigineux les dernières décennies, en suivant la loi de Moore. Ainsi, la consommation des circuits a été réduite drastiquement et des fonctionnalités de plus en plus complexes ont pu être rajoutées aux appareils électroniques. Les domaines de l'informatique et des communications ont été grandement impactés, avec comme résultat des habitudes quotidiennes redéfinies.

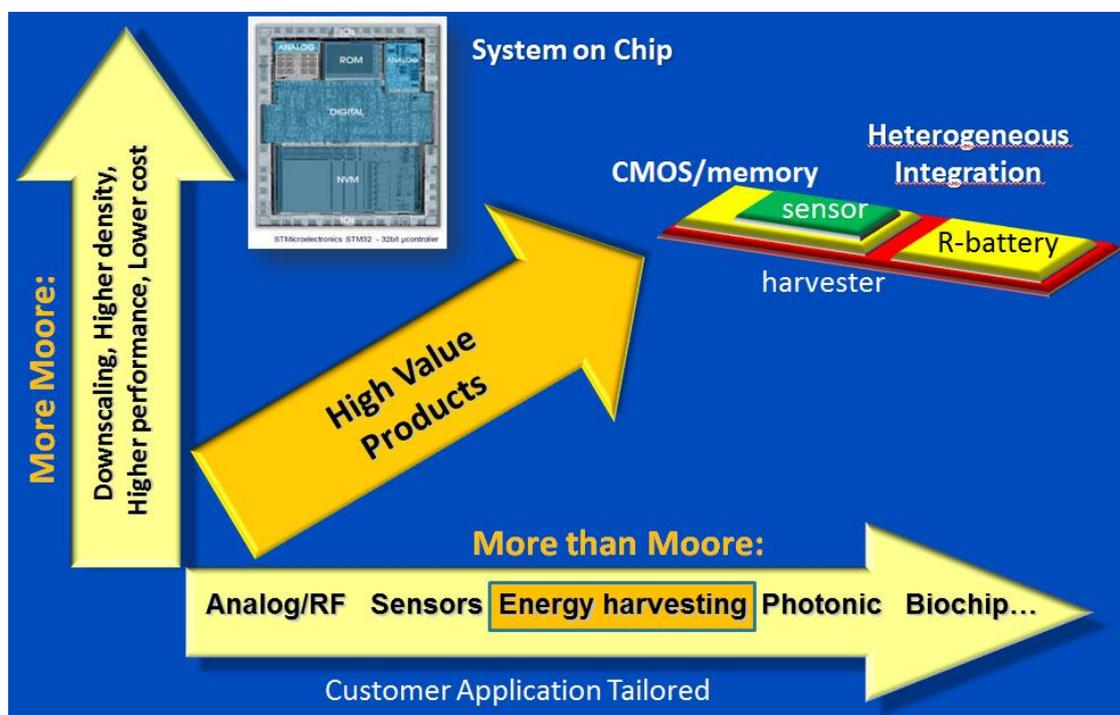


Figure 1.1 : Approches développées dans l'industrie de la microélectronique. La voie « more Moore » implique la miniaturisation des composants pour les circuits, afin d'augmenter la vitesse de fonctionnement et de réduire la puissance par opération et le coût. Les produits visés sont des systèmes sur puce. La voie « more than Moore » regroupe les technologies alternatives. La combinaison de produits issus des deux approches est appelée intégration hétérogène.

Dans l'industrie de la microélectronique, on distingue deux voies de développement : « More Moore » et « More than Moore » (Figure 1.1). La première voie implique la miniaturisation continue des composants élémentaires pour les circuits, notamment les transistors, afin d'augmenter leur vitesse de fonctionnement et de réduire la puissance consommée par opération en même temps que le coût. C'est la direction entamée avec la fabrication des premiers microprocesseurs.

L'amélioration et la diversification des technologies de fabrication sur silicium ont permis de développer la seconde voie technologique : « More than Moore ». Des fonctionnalités différentes ont été recherchées cette fois-ci, avec la fabrication de circuits analogiques, de capteurs, de circuits pour la photonique. Une des technologies les plus récentes tirant profit des outils de micro fabrication est la récupération de l'énergie. Les composants qui en résultent peuvent faire office de sources d'alimentation pour les produits sur silicium et autres.

La baisse en consommation des appareils électroniques a permis de penser à des nouvelles manières pour les alimenter. La méthode classique : le branchement au secteur n'est pas compatible avec la portabilité. L'utilisation d'une pile à son tour, implique de recharger l'appareil ou de changer la pile, ce qui n'est pas toujours possible. Il serait donc intéressant d'avoir des appareils autoalimentés, qui ne nécessitent aucune intervention pour la maintenance. Ceci a été réussi dans le cas de plusieurs dispositifs consommant une faible puissance électrique: montres, calculatrices. Dans le cas des montres, plusieurs sources d'énergie ont pu être utilisées afin de les alimenter : solaire, thermique, mécanique (Figure 1.2).

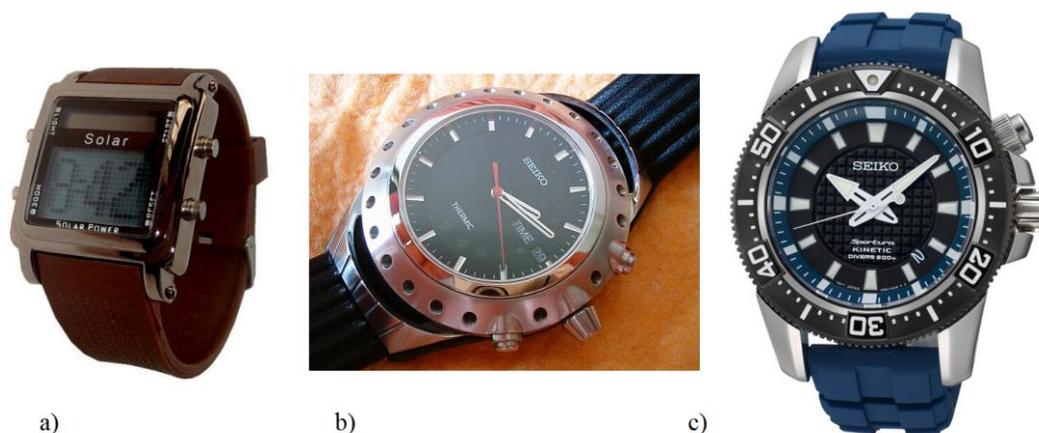


Figure 1.2 : Montres autoalimentées : a) solaire ; b) thermique (Seiko Thermic) ; c) mécanique (Seiko Kinetic)

Les appareils électroniques conçus actuellement consomment entre 1 μ W (montres) et plusieurs watts (téléphones portables) de puissance électrique (Figure 1.3). La consommation des ordinateurs portables est de l'ordre des 10 W. Ce sont des valeurs qui s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur, ce qui demande de choisir les méthodes d'alimentation au cas par cas. En choisissant la récupération de l'énergie comme solution, il faut s'assurer que le générateur qui convertit l'énergie ambiante a une taille raisonnable. Ainsi, pour alimenter un téléphone portable qui consomme environ 1 W, il est nécessaire d'avoir une cellule solaire de 1 m² sous un éclairage artificiel, en supposant une densité de puissance produite de l'ordre de 100 μ W/cm². Une cellule solaire ne serait donc pas la solution à retenir pour ce cas d'usage, tout comme d'autres solutions de récupération, dans le souci de limiter la surface ou le volume du système final. Par contre, l'aire de la cellule sera réduite à 100 cm² pour produire 1 W avec exposition au soleil. Dans ce cas une cellule solaire représente une solution adaptée d'alimentation en journée, qui viendrait en complément de l'alimentation classique. Bien évidemment il faudrait que le terminal soit exposé au soleil pour en tirer profit.

La récupération de l'énergie est surtout adaptée pour alimenter des appareils consommant quelques milliwatt de puissance ou moins : récepteurs radio miniaturisés, puces RFID, prothèses auditives, capteurs.

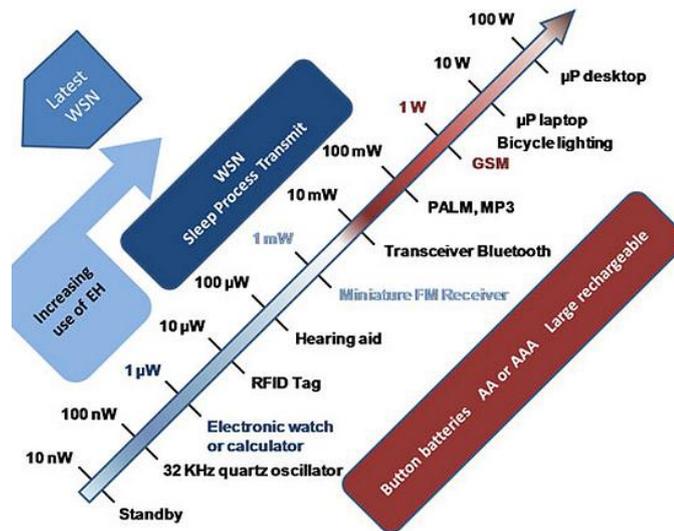


Figure 1.3 : Puissances consommées par les appareils électriques [IDTechEx].

Une nouvelle classe de composants électriques qui se développent est constituée par les capteurs sans fil. En associant un capteur à un émetteur radio on peut faire des mesures et transmettre les résultats à une station de réception. On peut ainsi imaginer des nombreux capteurs distribués dans un environnement, qui font des mesures sur des paramètres d'intérêt : température, humidité, présence d'espèces chimiques, présence d'objets, position, luminosité etc. Avec un tel réseau on peut surveiller des installations industrielles, les unités de transport, les produits alimentaires ou les maisons. La manière la plus judicieuse pour l'alimentation des capteurs sans fil est la récupération de l'énergie, pour éviter de changer des piles. Aucune maintenance sur le terrain ne serait nécessaire dans ce cas sur la durée de vie du système.

La structure typique d'un capteur sans fil est donnée dans la Figure 1.4. Un convertisseur d'énergie alimente le système qui contient plusieurs composants. Un microcontrôleur est nécessaire pour les faire communiquer. Le capteur acquiert l'information nécessaire, qui est ensuite envoyée par le transmetteur radio. L'énergie récupérée du milieu ambiant est gérée par un circuit dédié, et peut être distribuée directement aux composants ou accumulée sur un élément de stockage en cas de nécessité (condensateur, super-condensateur ou batterie rechargeable). L'information mesurée sera reçue par un autre module radio et sera stockée ou utilisée pour exécuter des commandes de contrôle (réglage de température dans un bâtiment, de pression dans un pneu, etc.)

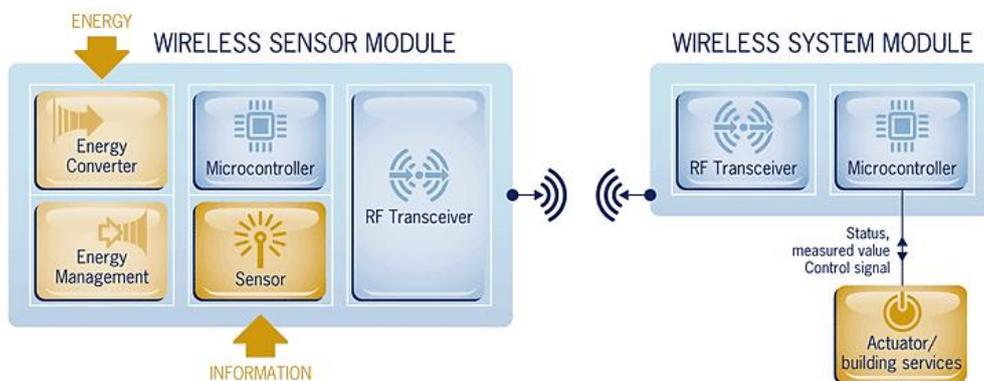


Figure 1.4 : Structure d'un capteur sans fil et d'un récepteur [EnOcean, TI].

Dans le cycle de fonctionnement d'un capteur autonome on distingue des périodes d'activité et de périodes de veille (Figure 1.5). Les périodes d'activité vont correspondre aux cycles de mesure-transmission. C'est pendant ce temps que la plus grande partie de l'énergie est consommée. La mesure

et la transmission des données durent en général quelques millisecondes, avec des énergies consommées entre 100 μJ et quelques mJ. Lors de l'activation d'un capteur sans fil typique, un courant d'environ 10 mA est consommé, ce qui correspond à 30 mW de puissance pour une tension d'alimentation de 3V. Une fois la mesure réalisée par le capteur et l'information traitée, les données sont transmises. Le pic de consommation est enregistré lors de cette dernière étape. Des courants de 20 mA ou plus sont drainés. Le système se met ensuite en veille, et le courant consommé descend à quelques microampères.

A partir de l'analyse du cycle de fonctionnement d'un capteur sans fil on comprend facilement que la puissance moyenne consommée va dépendre de la fréquence de mesures réalisées, et peut évoluer entre 10 μW en moyenne pour une mesure toutes les minutes et 1 mW pour une mesure par seconde ou plus. Les bas niveaux de puissance consommée sont spécifiques aux capteurs asynchrones. Ceux-ci font des mesures et transmettent les informations sans communiquer entre eux. Une puissance supplémentaire sera consommée si le capteur communique avec d'autres nœuds sans fil, pour relayer les informations ou communiquer son état, par exemple. Il s'agira alors d'un réseau de capteurs synchrones. Le choix de la source d'énergie associée à un capteur va donc dépendre de son utilisation. Les batteries sont l'option d'alimentation classique. Plusieurs capteurs sans fil disponibles dans le commerce ont été conçus pour être alimentés de cette manière. La nécessité de maintenance mais aussi d'autres limites amenées par les batteries, comme la toxicité, la durée de vie limitée, la température de fonctionnement limitée encouragent et même imposent dans certains cas l'utilisation des récupérateurs d'énergie.

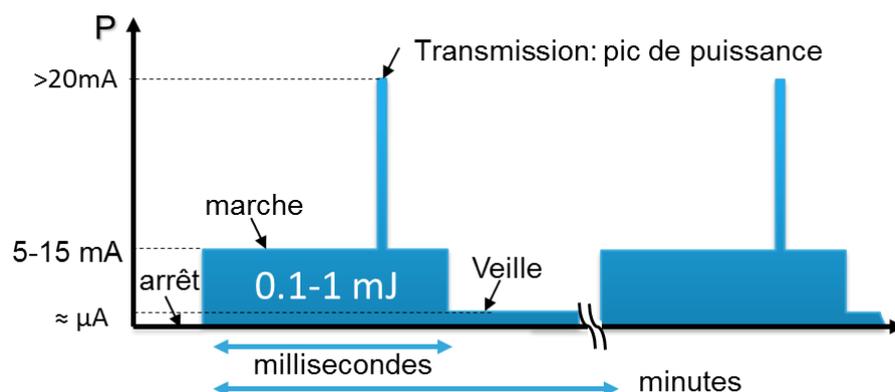


Figure 1.5: Cycle de fonctionnement d'un capteur autonome. La mise en marche et la transmission de données génèrent des pics de puissance consommée. Des longues périodes de veille impliquent moins de puissance consommée en moyenne.

Plusieurs sociétés se sont focalisées sur le développement de capteurs autoalimentés, qui récoltent la chaleur, les vibrations ou la lumière solaire. On peut citer la plateforme GreenNet, développée par STMicroelectronics, composée de capteurs alimentés par des cellules solaires. La même méthode d'alimentation a été choisie par la société Libellium pour des nœuds autonomes (Figure 1.6). KCF Technologies a développé une solution de surveillance des vibrations avec alimentation par module thermoélectrique. EnOcean offre des modules de transmission du signal et des modules de récupération de l'énergie. La société ALGRA a développé un bouton poussoir sans fil ni batterie, capable d'activer à distance un interrupteur électrique. Des télécommandes sans batterie aussi bien que des claviers récupérant l'énergie mécanique de la frappe sont à l'étude.

Une des idées technologiques innovantes qui a pris ampleur récemment et qui pourrait tirer profit de la récupération de l'énergie est « l'internet des objets ». Le concept consiste dans l'extension du réseau Internet existant aux objets physiques, en les rendant communicants. Ainsi, chaque objet serait marqué par un code, une puce RFID ou une adresse de type URL, et son état pourrait être lu et transmis à une unité de surveillance. Il peut s'agir d'un ordinateur ou d'un téléphone portable ou tout

autre dispositif connecté au réseau. Un des premiers domaines d'application du concept « internet des objets » est la domotique intelligente, avec possibilité de surveillance et d'intervention à distance. On pourrait ainsi contrôler le système de chauffage ou l'état de l'éclairage dans une maison à partir d'un téléphone portable. Des solutions d'impression à distance existent et sont déjà commercialisées.

Dans le cas où un objet ne peut pas être branché au réseau électrique ou à un réseau informatique, il est nécessaire de disposer d'un système sans fil pour la surveillance. Les développements actuels visent donc l'intégration des réseaux de capteurs sans fil et leur branchement aux réseaux de données pour ce type d'application. Ceci permettrait de faire communiquer une multitude d'objets et ouvrirait des nombreuses applications dans le domaine industriel, médical, dans le domaine de la logistique, et aussi dans la vie quotidienne. Les réseaux de capteurs sans fil font donc partie intégrante de « l'internet des objets ».

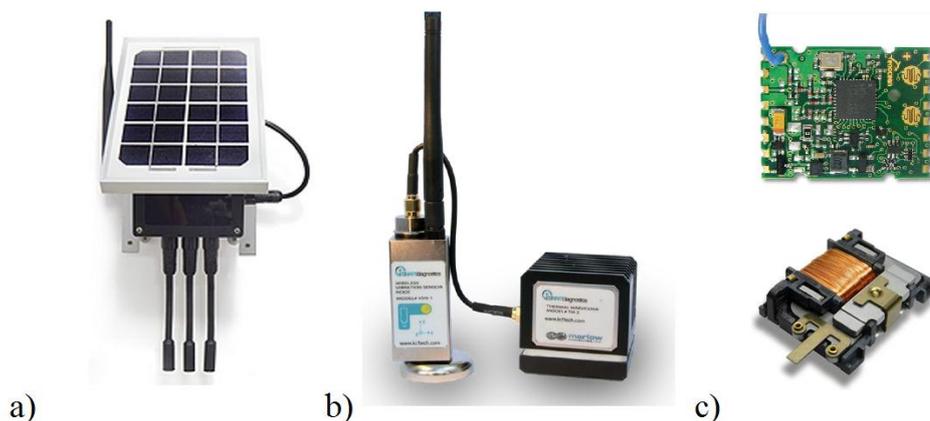


Figure 1.6: a) nœud sans fil alimenté par panneau solaire, avec possibilité de branchement de capteurs [Libelium] ; b) module de surveillance pour les vibrations avec alimentation par générateur thermoélectrique [KCF Technologies] ; c) interrupteur qui récupère l'énergie mécanique et circuit de transmission radio associé [EnOcean].

La récupération de l'énergie permet donc d'ouvrir des nouvelles voies pour les technologies du futur. En rendant les objets autonomes, elle permet de se passer de fils et de la maintenance liée au rechargement ou au changement des batteries. Un confort accru dans l'utilisation devient alors possible, tout en réduisant les coûts d'exploitation (énergie gratuite) et l'impact sur l'environnement (moins de déchets toxiques). Afin de rendre tout ceci possible, plusieurs voies de récupération de l'énergie ont été mises en place. L'introduction à différentes méthodes est faite dans les paragraphes qui suivent.

1.1.2 La récupération de l'énergie lumineuse

Une des sources d'énergie les plus exploitées actuellement est la lumière. Qu'elle provienne du soleil ou d'un dispositif d'éclairage artificiel, la lumière est convertie en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques (Figure 1.7).

Une cellule typique est constituée d'une jonction p-n, avec des contacts métalliques des deux côtés. Les photons incidents créent des paires électron-trou, qui sont séparées grâce au champ électrique présent dans la jonction. Une force électromotrice est ainsi créée et un circuit peut être alimenté. Les cellules solaires les plus répandues sont en silicium, qui présente un bon compromis entre le coût et la performance.

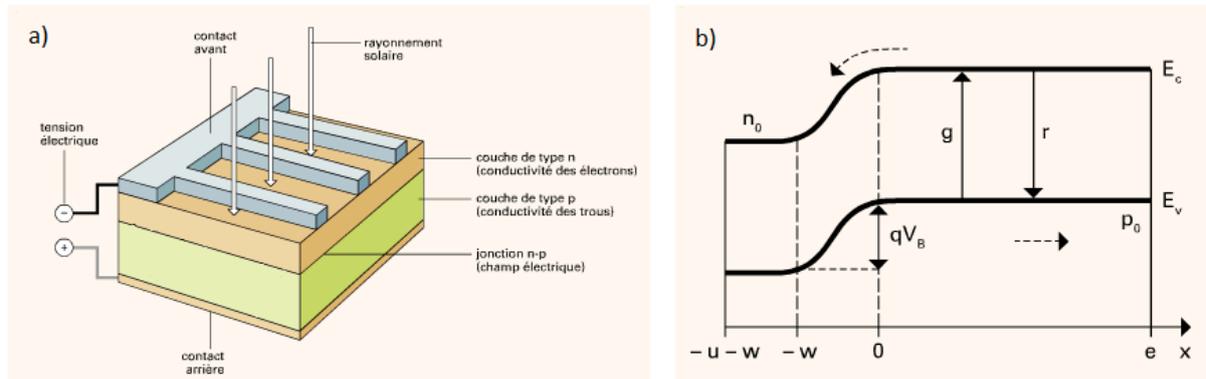


Figure 1.7 : a) Structure typique d'une cellule photovoltaïque. La jonction p-n qui constitue la partie active est prise entre deux contacts métalliques. b) Diagramme de bandes de la jonction p-n. Des paires électron-trou sont générées dans la zone de charge d'espace, située entre $-w$ et 0 . Les électrons se déplacent vers le côté n et les trous vers le côté p sous l'influence du champ électrique présent (figure adaptée de [1]).

La puissance lumineuse en plein soleil est d'environ 1000 W/m^2 , ce qui revient à 100 mW/cm^2 . Un module solaire avec un rendement typique de 15 % est capable de fournir 15 mW/cm^2 dans ces conditions. Sous un éclairage artificiel cette puissance devient de l'ordre de $10\text{-}100 \text{ }\mu\text{W/cm}^2$ (tableau 1.1). Ce sont des ordres de grandeur compatibles avec la puissance consommée par plusieurs types de dispositifs autonomes. Les cellules photovoltaïques sont donc les sources d'énergie de choix dans les milieux lumineux.

Condition	Puissance lumineuse (mW/cm ²)	Puissance électrique (mW/cm ²)
Plein soleil	100	15
Soleil voilé	50	7.5
Ciel nuageux	5-20	0.75-3
A l'intérieur, à proximité d'une fenêtre	0.4-2	0.06-0.3
Eclairage artificiel	0.1-1.5	0.015-0.225
A l'intérieur, bureau	0.5	0.075
Nuit	0	0

Tableau 1.1 : Densité de puissance lumineuse en fonction des conditions externes et densité de puissance électrique correspondante avec une cellule photovoltaïque ayant un rendement de 15% [2].

La récupération d'énergie solaire est un domaine mature, dont les performances continuent à évoluer. On distingue plusieurs types de technologies, ayant des performances et des coûts variables.

La technologie la plus populaire est basée sur le silicium. Généralement les cellules solaires sur silicium montrent des rendements qui ne dépassent pas 20% [1]. Des rendements record de 25% ont été atteints par l'université de Nouvelle-Galles-du-Sud.

Les composés III-V offrent des propriétés intéressantes et constituent une alternative au silicium. Comme ils peuvent être synthétisés avec des compositions variables, leur énergie de gap évolue entre 0,16 eV et 2,24 eV. Ainsi, des jonctions sensibles à plusieurs parties du spectre solaire peuvent être créées. Leur empilement donne des cellules à haute absorption et donc à haut rendement.

Une autre voie pour augmenter le rendement est la concentration des rayons solaires. Ainsi, sous un rayonnement concentré, un rendement de 29,1% a été atteint avec une jonction simple (Figure 1.8) [NREL]. La concentration des rayons solaires est également un moyen de réduire la surface de matériau actif et donc le coût d'un module.

Les dispositifs à jonctions multiples et concentration sont les plus performants, atteignant un rendement record de 44% pour Solar Junction.

Des cellules à base de matériaux organiques sont également développées. Leur coût est bas et la mise en œuvre facile, la contrepartie étant les performances plus modestes. Avec un rendement autour de 3% en 2001, ces cellules atteignent 11% actuellement. Un des soucis rencontrés pendant leur développement est leur durée de vie limitée, chiffrée en milliers d'heures.

Une autre technologie émergente, les cellules photo électrochimiques, ou cellules Gratzel, du nom de leur inventeur, présentent l'avantage d'un coût bas et de la flexibilité. La fabrication est faite par des procédés de laminage. Avec un rendement de 14,1% démontré par l'EPFL, les modules sont intéressants en termes de rapport performance/coût, mais souffrent encore de problèmes de stabilité chimique dus à la présence d'un électrolyte liquide.

Du fait de la puissance électrique intéressante, les cellules solaires ont été utilisées pour l'alimentation d'un grand nombre de systèmes autonomes, en commençant par les appareils nomades et en allant jusqu'aux satellites. Parmi les applications plus récentes figurent les horodateurs et les lampadaires solaires. Des chargeurs nomades ont été conçus en associant des cellules solaires de taille centimétrique à des batteries rechargeables.

Aussi, des réseaux de capteurs autonomes avec alimentation photovoltaïque sont en développement. C'est le cas de la plateforme GreenNet développée par STMicroelectronics.

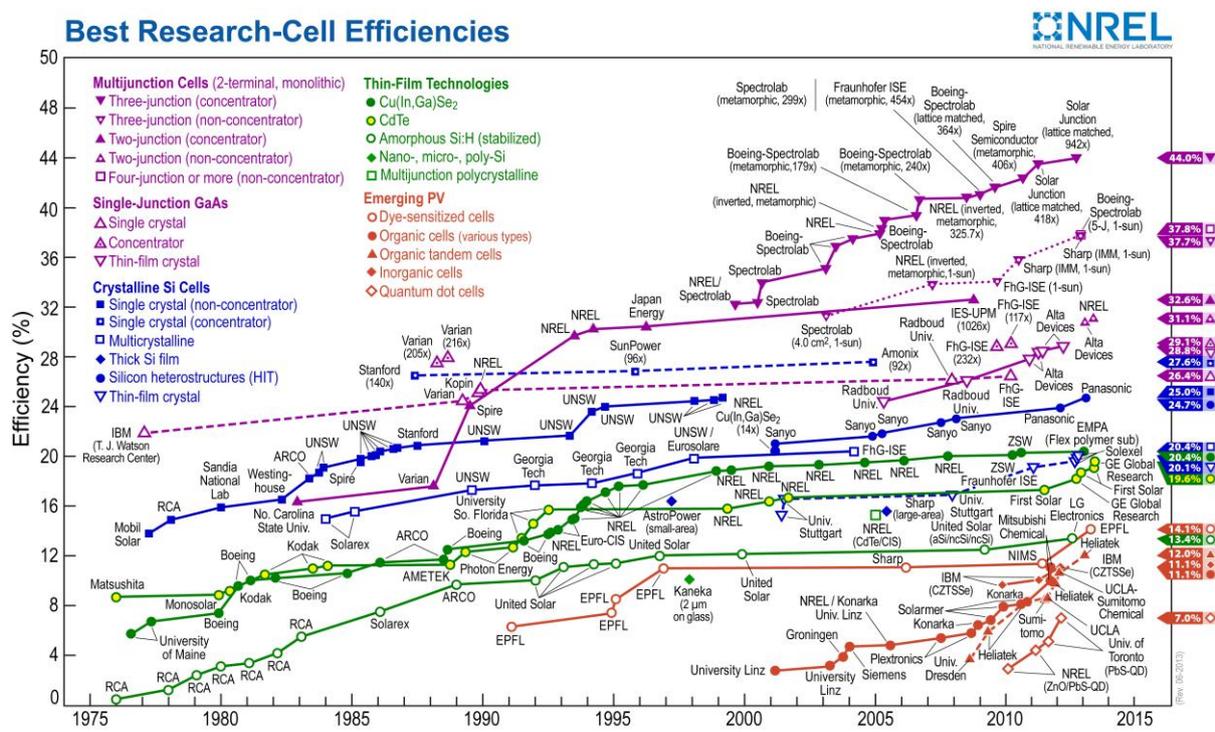


Figure 1.8 : Evolution du rendement des cellules solaires en fonction de la technologie [NREL]

1.1.3 Introduction à la récupération de l'énergie mécanique

Les sources d'énergie mécanique sont omniprésentes. Des systèmes ont été développés pour générer de l'électricité à partir des vibrations, des mouvements du corps humain, du vent ou encore de l'énergie des fluides en mouvement.

L'énergie disponible selon la source est donnée dans la Figure 1.9. On peut distinguer plusieurs types de sollicitations mécaniques, dont notamment les chocs et les vibrations. Les vibrations sont des sollicitations entretenues, avec des fréquences connues. Les plus souvent on peut en extraire une composante sinusoïdale dominante. Les chocs sont des sollicitations brusques, qui surviennent à des intervalles de temps pas nécessairement réguliers. On peut faire la distinction entre choc et impact.

Le premier implique le contact entre deux corps et le second une mise en mouvement brusque d'un ensemble sous effet inertiel.

La puissance mécanique disponible pour un volume de 1 cm³ de matière est d'environ 100 μW pour les vibrations, qu'elles proviennent d'un moteur de voiture, ou des machines utilisées au quotidien. Des vibrations plus fortes sont produites dans l'environnement industriel (exemple : machine 3 axes). Les chocs, bien qu'ayant des fréquences plus réduites, constituent une source de puissance plus grande, du fait des amplitudes plus importantes des déformations produites. Entre 1 et 10 mW/cm³ sont disponibles lors des mouvements du corps humain (exemple : bras, jambes, talons).

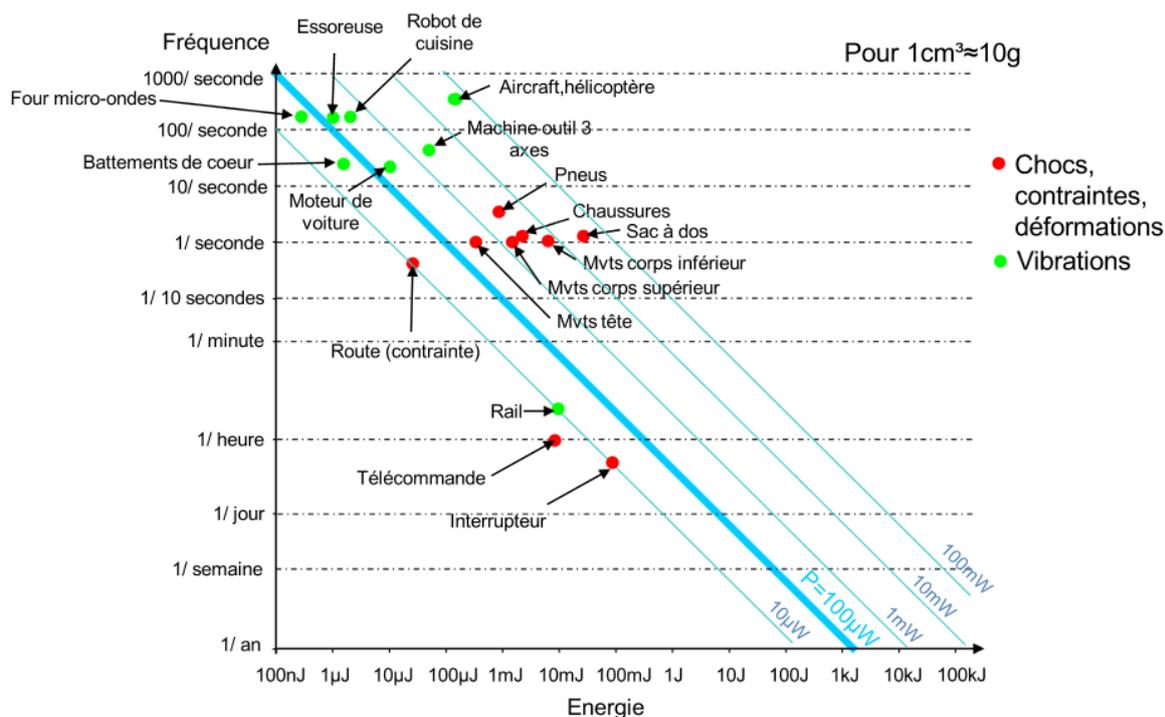


Figure 1.9 : Energie et puissance mécanique disponible en fonction de la source [2]

La puissance disponible est donc suffisamment grande pour l'alimentation de dispositifs autonomes. Plusieurs techniques ont été mises en œuvre pour la récolter. On distingue les techniques classiques de conversion : électromagnétique, piézoélectrique et capacitive. Certaines techniques émergentes montrent des résultats intéressants, notamment la conversion magnétostrictive [3] et la REWOD [4] (ou « reverse electrowetting » en anglais).

1.1.3.1 La conversion électromagnétique

Historiquement, la conversion électromagnétique a été la première méthode développée. Elle est largement utilisée à grande échelle, notamment dans les centrales électriques où l'énergie mécanique de l'eau ou de la vapeur est convertie en énergie électrique lors de la rotation d'une turbine. Des dispositifs de taille centimétrique ont été fabriqués pour la récupération de l'énergie. C'est le cas de la dynamo de vélo, et des dispositifs à rechargement mécanique comme les lampes de poche ou les radios.

Des dispositifs ont également été adaptés à la conversion de l'énergie provenant des vibrations. Un convertisseur classique est constitué d'un aimant qui se déplace par rapport à une bobine (Figure 1.10). Le fonctionnement est régi par la loi de Faraday :

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Eq.(1.1)}$$

avec ε – force électromotrice générée, Φ_B – flux magnétique à travers la bobine.

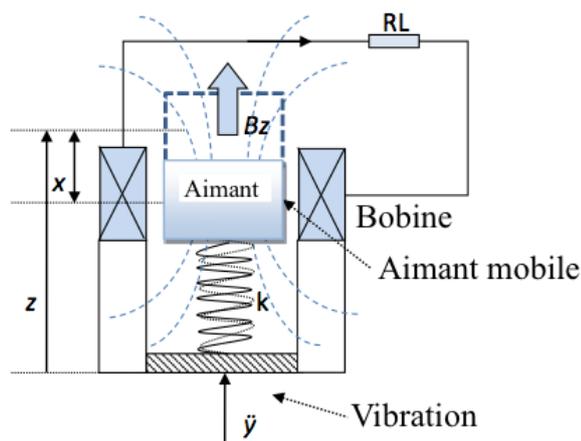


Figure 1.10 : Structure et principe de fonctionnement d'un transducteur électromagnétique activé par les vibrations. Un aimant attaché à un ressort est mis en mouvement par rapport à une bobine sous l'effet de l'accélération [5].

La puissance développée par ces dispositifs dépend de l'accélération imposée par les vibrations et de la valeur de la masse mobile. Elle est autour de $100 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ pour des fréquences de l'ordre de 100 Hz [6]. Une des limites de ces dispositifs est la tension en sortie, plutôt basse et qui a besoin de rectification. Aussi la densité volumique de l'énergie diminue avec l'échelle. Une étude plus détaillée des systèmes à conversion électromagnétique par rapport à nos dispositifs est faite dans la première section du chapitre 3.

1.1.3.2 La conversion piézoélectrique

Une autre modalité pour transformer l'énergie mécanique en électricité est la conversion piézo-électrique. Le principe consiste dans l'apparition d'une différence de potentiel entre deux faces d'un matériau piézoélectrique qui est soumis à une déformation (Figure 1.11). L'application classique des matériaux piézoélectriques est la détection sonore ou de mouvement. Ce sont les matériaux de choix pour la construction des microphones.

La tension générée lors de la déformation s'exprime comme:

$$V = ge \frac{F}{S} \quad \text{Eq.(1.2)}$$

avec g – constante piézoélectrique de tension selon le mode de sollicitation, e , S - épaisseur et surface de l'échantillon sollicité, F – force appliquée.

L'effet piézoélectrique est utilisé aussi en sens inverse, pour l'actionnement : en appliquant un champ électrique à un matériau, une déformation est induite. On peut ainsi générer une force mécanique ou une onde sonore si le matériau est mis en vibration.

Les structures piézoélectriques conçues pour la détection peuvent être adaptées à la récupération de l'énergie mécanique (Figure 1.12). L'ajout d'une masse est nécessaire pour faire coïncider la fréquence de résonance de la structure piézoélectrique avec la fréquence de sollicitation, ce qui maximise la puissance convertie.

Ces structures permettent de récupérer des puissances autour de $100 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ pour des fréquences d'environ 50 Hz [6]. Leur performance dépend en grande partie des matériaux utilisés. Dans la plupart ce sont des céramiques capables de garder une polarisation électrique longtemps.

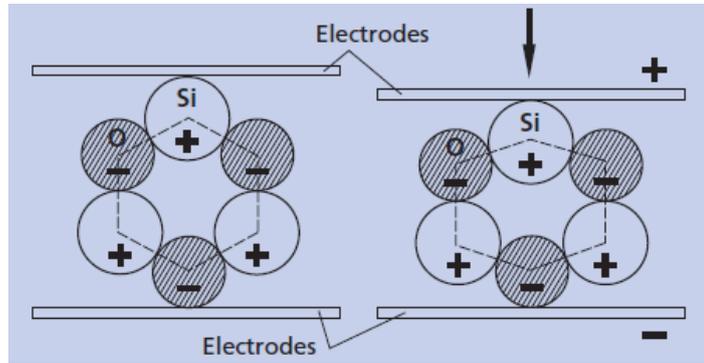


Figure 1.11: Apparition d'une tension électrique lors de la déformation du quartz [7].

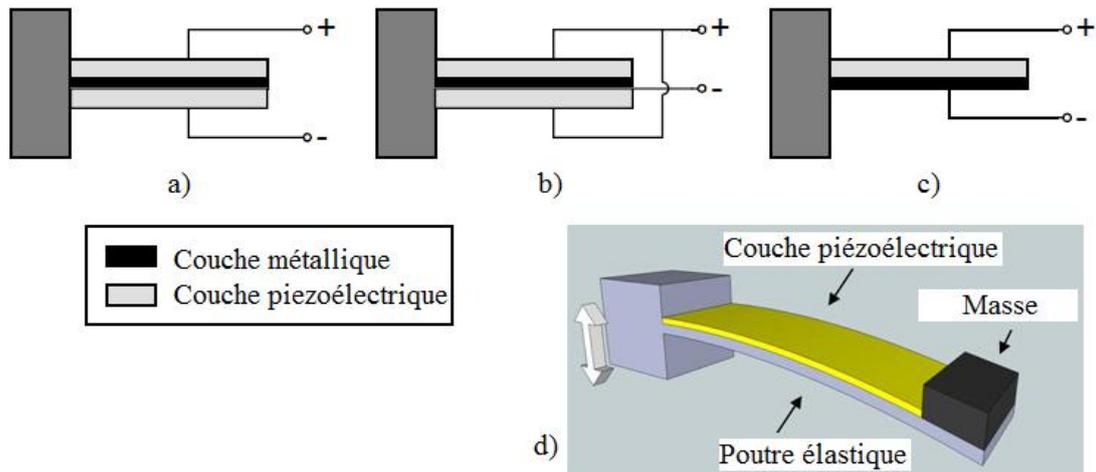


Figure 1.12 : Structures de capteurs à base de matériaux piézoélectriques [8]: a) poutre avec 2 couches piézoélectriques reliées en série, b) poutre avec deux couche piézoélectriques reliées en parallèle, c) poutre avec une seule couche piézoélectrique, d) poutre pour la récupération de l'énergie, encastree dans un support mis en mouvement.

1.1.3.3 La conversion capacitive

Une troisième voie de récupération de l'énergie mécanique est la voie capacitive, dite aussi électrostatique. Le fonctionnement repose sur la variation d'une capacité, dont la charge est collectée sur une unité de stockage. La capacité variable peut être conçue de plusieurs manières (Figure 1.13). On distingue des capacités à entrefer et à chevauchement variable. L'électrode mobile peut osciller dans le plan ou hors du plan de la structure. Dans le cas d'une oscillation dans le plan (Figure 1.13 a, b) une structure en forme de peigne permet d'avoir des valeurs de capacité plus importantes.

Afin de permettre le fonctionnement d'un récupérateur il faut avoir un réservoir de charge électrique, qui permette de rétablir la polarisation nécessaire au début de chaque cycle d'oscillation. Dans une configuration classique, la capacité variable est chargée par un générateur externe quand elle est à sa valeur maximale. La sollicitation mécanique entraîne une des électrodes et la capacité diminue, tout en gardant sa charge constante. Au point où la capacité est minimale, elle est vidée de sa charge. On appelle ce type de fonctionnement un cycle à charge constante. Le circuit électrique correspondant est représenté dans la Figure 1.14 a.

Afin d'éviter la présence d'une source externe, des systèmes à électrets ont été développés (Figure 1.14 b). Un électret est un diélectrique possédant une charge d'espace, qui fait office de générateur de tension intégré.

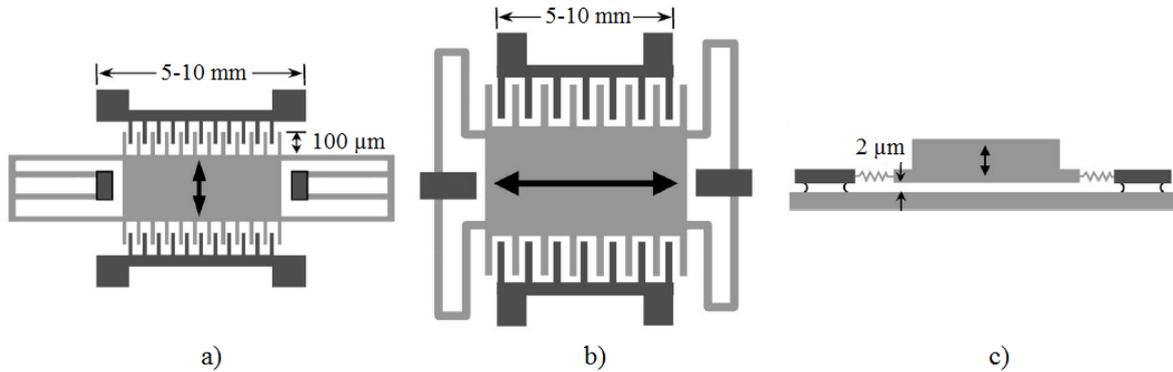


Figure 1.13 : Configurations possibles pour les récupérateurs capacitifs : a) capacité dans le plan à chevauchement variable ; b) capacité dans le plan à entrefer variable ; c) capacité hors plan à entrefer variable [9]. Les flèches à double sens indiquent la direction de mouvement.

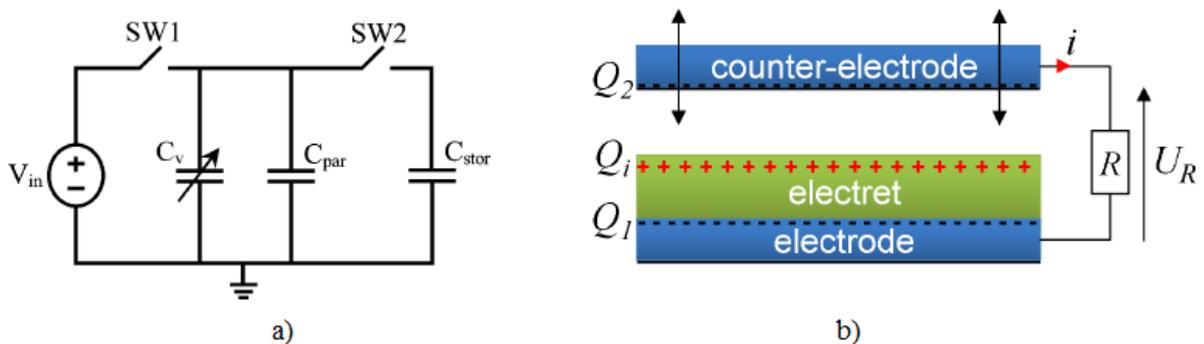


Figure 1.14 : a) Schéma électrique pour un récupérateur capacitif à source externe de polarisation. La capacité variable C_v est chargée par la source V_{in} . L'énergie est stockée sur la capacité C_{stor} . b) récupérateur à base d'électret jouant le rôle de source de polarisation. Un courant i traverse la résistance R quand l'électrode supérieure est mise en mouvement [10].

La puissance générée avec les récupérateurs capacitifs est de l'ordre de $1-10 \mu\text{W}/\text{cm}^3$ pour des fréquences de l'ordre de 10 Hz [6], pour des systèmes de taille centimétrique. Ce sont des valeurs inférieures au cas de la récupération électromagnétique ou piézoélectrique. En revanche, des meilleures performances sont attendues pour ces récupérateurs à échelle microscopique, car le couplage électromécanique est amélioré du fait de l'augmentation des champs électriques.

1.1.4 Récupération de l'énergie des ondes radiofréquence

La récupération de l'énergie des ondes radio fréquence fait partie des méthodes de conversion les plus étudiées. La recherche est facilitée par le fait que les circuits de détection correspondants (les circuits radio) sont connus depuis longtemps.

Des circuits ont été développés pour la récupération de l'énergie des ondes radio diffusées par les antennes de téléphonie ou de télévision, mais aussi pour la récupération des ondes provenant de sources dédiées. Ce dernier cas correspond aux étiquettes RFID qui stockent des informations lues avec des lecteurs à ondes radio.

C'est une situation peu commune dans le domaine de récupération de l'énergie, ou la source est bien connue à l'avance et même fabriquée sur mesure pour que l'énergie puisse être convertie. C'est un facteur important qui assure la fiabilité lors de l'usage.

Les étiquettes RFID sont fabriquées sur un substrat flexible et sont composées d'une antenne en métal et une puce en silicium. Cette dernière contient l'information relative à l'objet marqué. Le lecteur RFID viendra collecter l'information sans contact en envoyant une onde radio à une fréquence déterminée. Les étiquettes RFID sont utilisées à échelle large, pour marquer des produits dans les magasins ou pour faire du contrôle d'accès (faisant partie de cartes, badges ou bracelets).



Figure 1.15: Puce et bracelets RFID. L'antenne (sous forme de spirale) occupe la majeure partie de la surface de la puce.

Les puces RFID font donc partie des produits utilisant la récupération de l'énergie qui rencontrent un grand succès commercial. D'autres technologies radio sont en développement et impliquent la récupération des ondes provenant du milieu ambiant.

Les puissances radio disponibles dans l'environnement en fonction de la source sont données dans le Tableau 1.2.

Source	Distance	Densité de puissance
Antenne radio 50 kW	5 km	159 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	10 km	40 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Antenne GSM 100 W	100 m	800 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	500 m	32 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
	1000 m	8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$
Téléphone portable 0.5 W	1 m	40 mW/m^2
	5 m	1.6 mW/m^2
	10 m	0.4 mW/m^2

Tableau 1.2 : Densité d'énergie des ondes radio en fonction de la source et de la distance [11].

Les densités de puissance sont relativement basses, autour de $100 \mu\text{W}/\text{m}^2$, ce qui impose une antenne collectrice de grande surface. L'avantage de ces dispositifs est dans leur rendement global de conversion confortable, pouvant dépasser 30 % dans certains cas [12].

Un diagramme typique pour la conversion RF est présenté dans la Figure 1.16. Le circuit de récupération est composé d'une antenne, d'un circuit d'adaptation d'impédance, d'un rectificateur de signal et d'un convertisseur DC-DC qui génère la tension nécessaire pour charger une unité de stockage.

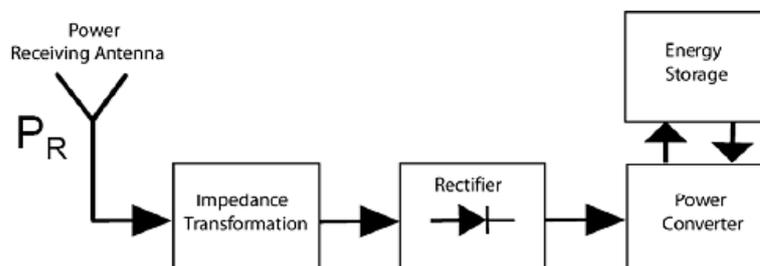


Figure 1.16 : Diagramme de conversion de l'énergie des ondes radio. Une antenne collecte la puissance incidente. Le signal passe par une transformation d'impédance, est rectifié puis converti en énergie stockée.

1.2 Récupération de l'énergie thermique. Les dispositifs à effet Seebeck.

Plusieurs voies sont connues pour la conversion d'un flux de chaleur en électricité. On peut faire la conversion à partir d'un gradient spatial de température ou à partir d'une variation temporelle.

La méthode de loin la plus populaire est l'utilisation de l'effet Seebeck. C'est l'effet à la base du fonctionnement des thermocouples et qui se manifeste dans la présence d'un gradient spatial de température. La puissance électrique générée va dépendre de ce gradient et aussi des matériaux utilisés pour l'assemblage des modules. Les lois régissant le comportement des dispositifs à effet Seebeck, ainsi que les matériaux utilisés sont données dans la présente section. D'autres méthodes de conversion sont également décrites, notamment par effet pyroélectrique et effet thermoionique.

1.2.1 Les dispositifs à effet Seebeck : principe de fonctionnement et matériaux

L'effet Seebeck a été découvert par T.J. Seebeck en 1821. Il consiste dans l'apparition d'une force électromotrice au sein d'une jonction de conducteurs soumise à un gradient thermique. Le cas typique est une jonction de 2 métaux différents, dont les extrémités sont à température ambiante et la zone de contact est chauffée, comme dans la Figure 1.17.

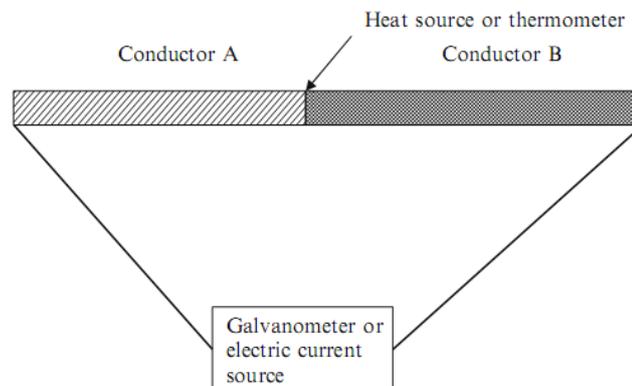


Figure 1.17 : Principe de l'effet Seebeck: deux conducteurs dont la jonction est chauffée génèrent une force électromotrice [13].

Cette configuration est largement utilisée dans les thermocouples actuels, exploitant le fait que la tension générée est proportionnelle à la différence de température :

$$V = \alpha_{AB} \cdot \Delta T \quad \text{Eq.(1.3)}$$

avec α_{AB} – coefficient de Seebeck de la jonction.

L'effet Seebeck est dû au fait que les porteurs de charge migrent depuis les zones à haute température vers les zones à basse température, créant ainsi une différence de potentiel. Les meilleures performances thermoélectriques sont manifestées par des matériaux semi-conducteurs. La structure typique d'un générateur thermoélectrique est donnée dans la Figure 1.18. Il est fabriqué à partir d'un barreau semi-conducteur avec un dopage de type p et un barreau avec dopage de type n. En plaçant cette structure entre une source chaude et une source froide et en y branchant une résistance, un courant électrique sera généré.

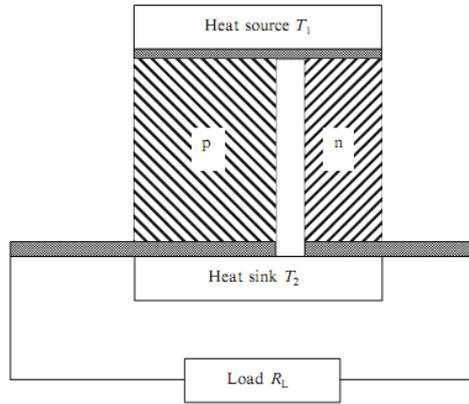


Figure 1.18 Générateur Seebeck composé d'une jonction pn

L'expression de l'intensité du courant est donnée par :

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_{ch} - T_{fr})}{R_p + R_n + R_L} \quad \text{Eq.(1.4)}$$

où α_p et α_n sont les coefficients de Seebeck des matériaux p et n respectivement et R_p et R_n - leurs résistances. R_L est la résistance de charge branchée au générateur, T_{ch} - température de la source chaude, T_{fr} - température de la source froide.

La puissance électrique ainsi produite s'exprime comme :

$$w = I^2 R_L = \left[\frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_{ch} - T_{fr})}{R_p + R_n + R_L} \right]^2 R_L \quad \text{Eq.(1.5)}$$

Cette puissance représente une fraction du flux thermique qui transite la structure. Elle dépend des propriétés des matériaux thermoélectriques ainsi que de la résistance de charge. Le rendement thermoélectrique maximal qui peut être obtenu est le suivant :

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + \frac{T_{fr}}{T_{ch}}} \cdot \frac{T_{ch} - T_{fr}}{T_{ch}} \quad \text{Eq.(1.6)}$$

On peut distinguer dans cette expression le rendement de Carnot, donné par le rapport $(T_{ch} - T_{fr})/T_{ch}$. C'est le rendement théorique maximal d'un système thermique. Pour s'y approcher dans le cas d'un générateur thermoélectrique, il faut maximiser son facteur de mérite ZT_m :

$$ZT_m = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\sqrt{k_{tp}\rho_p} + \sqrt{k_{tn}\rho_n})^2} T_m \quad \text{Eq.(1.7)}$$

avec k_t et ρ - conductivité thermique et résistivité électrique des matériaux semiconducteurs, et T_m - moyenne des températures chaude et froide. L'optimisation du facteur de mérite global passe donc par l'optimisation du facteur de mérite de chaque matériau, qui s'exprime comme:

$$z = \frac{\alpha^2}{k_t \rho} \quad \text{Eq.(1.8)}$$

Pour augmenter le facteur de mérite z il est nécessaire de diminuer la conductivité thermique des matériaux tout en augmentant leur conductivité électrique. Ces deux tendances sont antagonistes par nature, ce qui rend délicate l'augmentation des performances des générateurs.

La conduction de la chaleur dans un matériau se réalise de 2 manières : par l'intermédiaire des électrons et par l'intermédiaire des phonons. La nécessité d'avoir une bonne conduction électrique implique la présence des électrons, et donc du mécanisme de conduction de la chaleur associé. Ainsi, les métaux manifestent une bonne conductivité électrique et thermique à la fois. Leur facteur de mérite ne s'avère pas suffisamment important pour des applications de récupération de l'énergie. Les isolants électriques comme le verre manifestent une conductivité thermique basse, y compris par le mécanisme des phonons, mais la conductivité électrique est quasi nulle. Le matériau idéal pour les générateurs thermoélectriques doit donc conduire le courant électrique comme un métal et la chaleur comme un verre.

Le compromis qui a été trouvé afin d'optimiser les deux propriétés à la fois est l'utilisation de matériaux semi-conducteurs. Dans ce cas le contrôle du dopage permet de maximiser le facteur de mérite Figure 1.19.

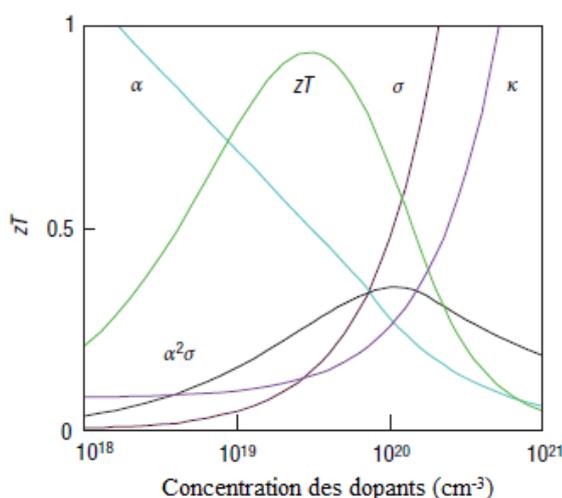


Figure 1.19: Simulation de l'évolution du facteur de mérite zT du Bi_2Te_3 en fonction du dopage. Le zT optimal est atteint pour une concentration de porteurs proche de quelques 10^{19} cm^{-3} [14].

Comme les propriétés physiques des matériaux thermoélectriques dépendent de la température d'utilisation, leur facteur de mérite est maximal dans un segment de température défini. Cette propriété est illustrée dans la Figure 1.20.

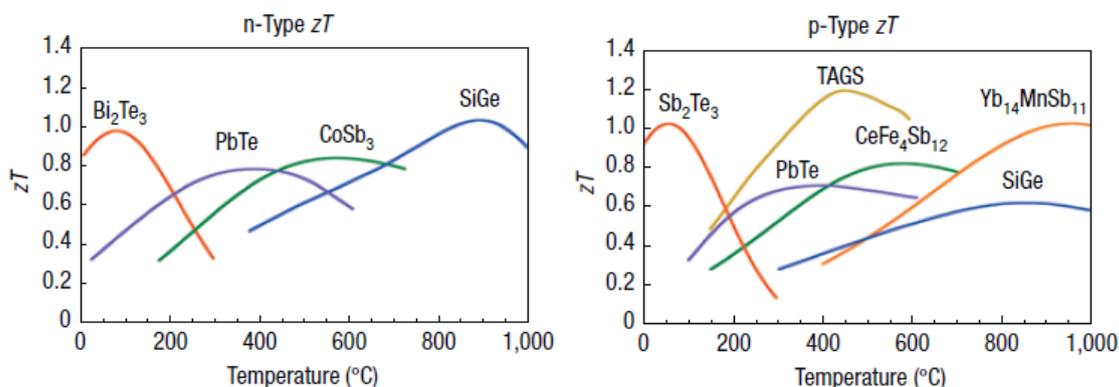


Figure 1.20 : Facteur de mérite des matériaux thermoélectriques disponibles actuellement. a) matériaux dopés n. b) matériaux dopés p. Le Bi_2Te_3 et le Sb_2Te_3 sont produits à échelle industrielle.

Le matériau le plus efficace pour des températures proches de l'ambient est le tellure de bismuth, Bi_2Te_3 . Il a un facteur de mérite zT proche de 1, ce qui constitue l'état de l'art pour les matériaux disponibles dans le commerce.

Il faut noter que les matériaux dopés n et les matériaux dopés p utilisés ne sont pas nécessairement les mêmes pour une gamme de température donnée. Ainsi le matériau de type p le plus performant à température ambiante est le tellure d'antimoine, Sb_2Te_3 , avec un facteur de mérite dépassant de peu l'unité.

Des variations autour de la composition standard sont faites afin d'adapter les matériaux thermoélectriques aux applications voulues. Ainsi, les compositions les plus étudiées sont $\text{Bi}_2(\text{Te}_{0.8}\text{Se}_{0.2})_3$ pour les matériaux de type n et $(\text{Sb}_{0.8}\text{Bi}_{0.2})_2\text{Te}_3$ pour les matériaux de type p, pour des applications allant jusqu'à 200 °C [14].

Le tellure de plomb est un des matériaux de choix pour l'intervalle de température allant de 200°C à 600°C (Figure 1.20). C'est un intervalle où les tellures basés sur des éléments du groupe 4 (PbTe, GeTe, SnTe) manifestent les meilleures propriétés, avec un facteur de mérite atteignant 0.8 pour les matériaux de type n. Concernant les matériaux de type p, l'alliage le plus utilisé est le TAGS, $(\text{GeTe})_{0.85}(\text{AgSbTe}_2)_{0.15}$, avec un ZT atteignant 1.2.

Les matériaux les plus utilisés pour des températures supérieures à 600°C sont les alliages à base de silicium-germanium. Leur facteur de mérite peut atteindre l'unité pour un dopage de type n.

Les matériaux thermoélectriques constituent une direction de recherche d'intérêt pour le LITEN. Leur développement a été fait selon plusieurs voies, dont les couches minces et les couches massives. La synthèse en couches minces [15] permet d'obtenir des dispositifs à petite échelle, sur un substrat de choix, y compris le silicium. La synthèse en couches massives est compatible avec les applications de puissance. Des activités ont également été conduites pour la compréhension théorique du comportement des matériaux thermoélectriques afin d'établir des voies d'optimisation. Il a été montré entre autres que la nano structuration des matériaux peut amener des améliorations au niveau des performances [16].

1.2.2 Inconvénients des dispositifs classiques

Les dispositifs à base de l'effet Seebeck présentent certains inconvénients, notamment dus aux matériaux thermoélectriques utilisés. Les matériaux les plus performants contiennent dans la plupart des éléments chimiques qui présentent des risques pour la santé, y compris le tellure et l'antimoine. L'antimoine est notamment connu pour sa grande toxicité, sa teneur dans les eaux étant réglementée dans certains pays. Le tellure est entre autres un élément rare, avec une teneur dans la croûte terrestre de l'ordre de celle du platine.

Composé de matériaux abondants et peu dangereux, le SiGe ne présente des propriétés thermoélectriques intéressantes qu'à haute température. Il est donc à ce jour difficile de trouver un matériau thermoélectrique performant aux basses températures et qui ne soit pas dangereux pour l'environnement.

Un des plus grands défis pour les fabricants de générateurs thermoélectriques est le maintien de la différence de température aux bords des modules. En effet, les meilleurs matériaux utilisés ont des conductivités thermiques de l'ordre de $2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, ce qui est environ 70 fois supérieur à celle d'une mousse isolante en polymère ($0.03 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) ou celle de l'air ($0.026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Afin de maintenir une différence de température suffisante pour le fonctionnement d'un module, un radiateur est nécessaire. Ainsi, le volume de matériau actif est souvent bien inférieur au volume occupé par le dispositif de refroidissement Figure 1.21. Ceci rend difficile la fabrication de modules minces. Il est donc plus difficile de répondre aux cas d'usage qui impliquent des espaces limités, comme les armoires électriques, ou les outils de cuisine.

Les activités de recherche sur la réduction de la conductivité thermique des matériaux thermoélectriques se concentrent sur le mécanisme lié aux phonons, vu que la conduction thermique

engendrée par les électrons est inévitable. C'est une voie peu explorée jusqu'à présent, demandant des efforts dans la compréhension de la physique fondamentale de la conductivité [16]. Les matériaux qui y ressortent ont souvent des structures et compositions chimiques complexes, qui demandent des procédés de fabrication poussés. Ceci a un impact non négligeable sur le prix de fabrication.

Un autre défaut connu des thermoélectriques est la fragilité. Ce sont des matériaux dont les propriétés mécaniques s'apparentent aux céramiques. Il est donc préférable de limiter les efforts qu'ils subissent. Les modules vendus ne sont pas flexibles et ne peuvent épouser la surface sur laquelle ils sont montés que si elle est plane. On ne trouve pas non plus de dispositif à grande surface, les tailles étant limitées à l'ordre du centimètre. Toute réalisation grande surface impliquerait des matériaux peu performants pour limiter les coûts.

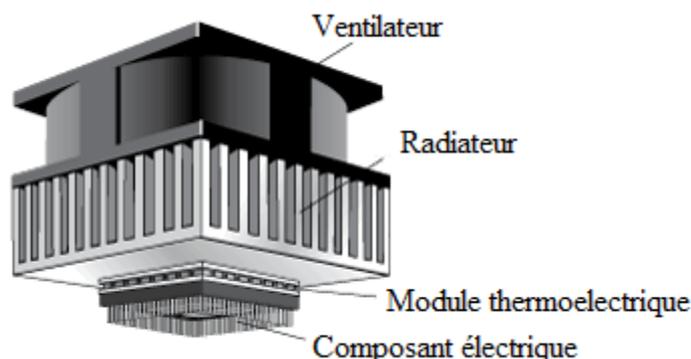


Figure 1.21 : Exemple de montage d'un module thermoélectrique sur un composant électrique qui chauffe. Un radiateur volumineux est souvent nécessaire au maintien de gradient de température à l'intérieur du module.

Les limites amenées par les matériaux thermoélectriques imposent une réflexion par rapport à la réalisation de dispositifs fins tant à petite qu'à grande surface qui soient flexibles et qui aient un coût bas. Pour répondre à ces critères une nouvelle technologie a été développée et fait l'objet de cette thèse. L'introduction au principe de fonctionnement est faite dans la section 1.3. D'autres méthodes de conversion connues sont présentées dans le paragraphe qui suit.

1.2.3 Modalités alternatives de conversion de l'énergie thermique en électricité

1.2.3.1 La conversion pyroélectrique

Une voie prometteuse pour la conversion de la chaleur en électricité est l'utilisation de matériaux pyroélectriques. Le principe de fonctionnement repose sur le changement de la polarisation du matériau avec la température. Un matériau contenant des dipôles électriques à basse température perd une partie de sa polarisation au chauffage, générant un courant de charges à travers une résistance ou un ampèremètre (Figure 1.22).

L'effet pyroélectrique est utilisé dans les détecteurs de température à base de rayons infrarouges. Ce sont des sondes de température sans contact dont la partie sensible, le matériau pyroélectrique, réagit aux rayons infrarouges incidents.

Du fait de la présence de la polarisation dans le volume, les matériaux pyroélectriques sont également piézoélectriques.

La grande différence entre la conversion de la chaleur par effet Seebeck et par effet pyroélectrique est que pour ce dernier des variations temporelles de température sont nécessaires. Afin de récupérer de l'énergie à partir d'un gradient thermique on peut déplacer le matériau pyroélectrique entre la source chaude et la source froide ou générer un courant de fluide qui pourra le chauffer et refroidir.

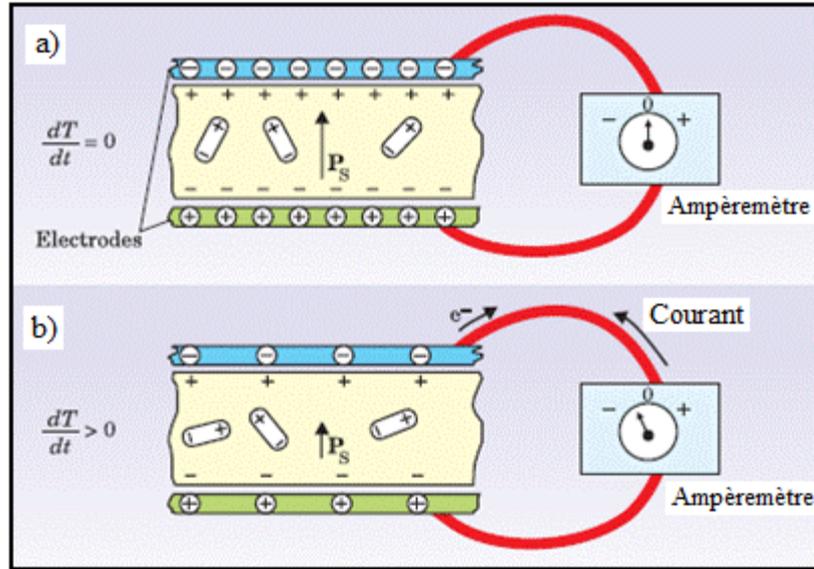


Figure 1.22 : Principe de l'effet pyroélectrique [17] : a) Le matériau pyroélectrique (en jaune) est recouvert de deux électrodes. Comme il manifeste une polarisation à basse température, cela génère un déplacement de charges externes sur les électrodes au court-circuit. b) L'augmentation de la température provoque une diminution de la polarisation et un courant de charges inverse.

Il a été montré que le rendement de la récupération d'énergie à base de pyroélectriques peut atteindre plusieurs dizaines de pourcents du rendement de Carnot [18]. Ceci en utilisant un circuit de traitement du signal adapté. Les équations de base du phénomène sont les suivantes:

$$dD = \varepsilon_{33}^{\theta} dE + p d\theta \quad \text{Eq.(1.9)}$$

$$d\Gamma = p dE + c_E \frac{d\theta}{\theta} \quad \text{Eq.(1.10)}$$

avec D , E , θ et Γ – déplacement électrique, champ électrique, température, et entropie respectivement. Les constantes utilisées sont p – le coefficient pyroélectrique ε – la permittivité et c_E – la capacité calorifique du matériau.

Un facteur de mérite pour la récupération de l'énergie, ou facteur de couplage électrothermique peut être défini à une température θ_h :

$$k^2 = \frac{p^2 \theta_h}{\varepsilon_{33} c_E} \quad \text{Eq.(1.11)}$$

C'est le facteur qui va déterminer le rendement de la conversion pyroélectrique. Ce dernier va également dépendre du circuit de récupération associé. Dans le cas le plus simple d'une résistance adaptée le rendement est proportionnel au facteur de couplage:

$$\eta_{res\ opt} = \frac{\pi}{4} k^2 \eta_{Carnot} \quad \text{Eq.(1.12)}$$

Avec des méthodes de récupération plus performantes, un rendement supérieur peut être atteint. Il est estimé qu'en utilisant la technique SSDI avec un pyroélectrique ayant un facteur de couplage k^2 de 0.1, un rendement de 50% de Carnot peut être atteint [18]. La technique SSDI, de l'anglais « Synchronised Switch Damping on Inductor », consiste dans l'association d'une bobine et

d'un interrupteur en parallèle avec le récupérateur afin d'augmenter le signal en sortie et par conséquent la puissance extraite [19].

Une autre donnée importante pour les matériaux pyroélectriques est la réponse en tension pour une variation de température donnée :

$$\Delta V \sim \frac{p}{\varepsilon_{33}^{\theta} c_E} \quad \text{Eq.(1.13)}$$

La Figure 1.23 montre le facteur de couplage et la réponse en tension pour différents classes de matériaux. On peut remarquer la haute réponse en tension des matériaux polymère, comme le PVDF, ainsi que celle des composites à base de PZT et polymères. Ce sont des propriétés qui se manifestent à une température proche de l'ambiante et se dégradent à haute température.

Les matériaux les plus performants sont les monocristaux, qui assurent un bon facteur de couplage, allant jusqu'à 4.79% pour une composition PMN-0.25PT, contenant du plomb, du manganèse, du niobium et du titane. Leur inconvénient est la fragilité, ainsi que l'indisponibilité dans le commerce. A l'heure actuelle ces matériaux sont utilisés uniquement à des fins de recherche.

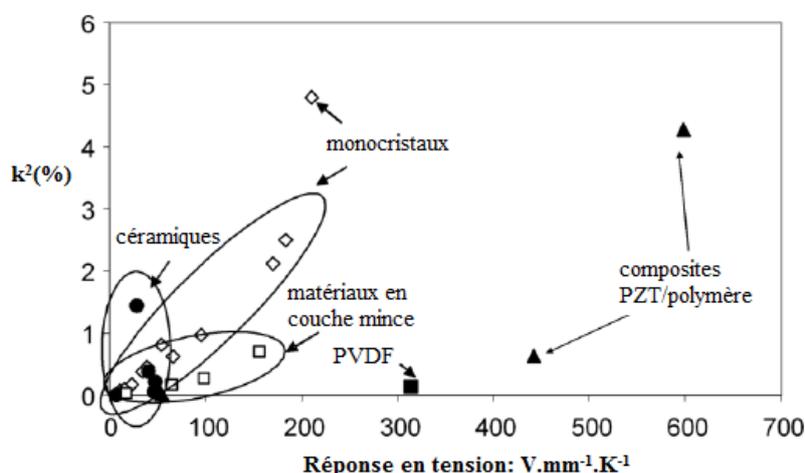


Figure 1.23 : Le carré du facteur de couplage et la réponse en tension de différents matériaux pyroélectriques.

La conversion pyroélectrique représente donc une alternative intéressante par les performances annoncées et mérite une analyse plus approfondie. Elle répond à des cas d'usage impliquant des variations temporelles de température, ce qui la rend complémentaire aux dispositifs à effet Seebeck.

1.2.3.2 Autres méthodes non-conventionnelles

Une autre méthode alternative à l'effet Seebeck est la conversion thermoionique (Figure 1.24 a). Le dispositif typique consiste de deux électrodes métalliques placées en face à face. Une est maintenue à haute température (1000-2000 K) et l'autre à température plus basse de quelques centaines de degrés. Des électrons s'échappent de l'électrode chaude suite à l'agitation thermique et sont collectés par la partie froide. Les tensions ainsi générées sont de l'ordre du dixième de volt. Des dispositifs de ce type ont été utilisés pour des applications spatiales, associés à des réacteurs nucléaires. Les températures hautes de fonctionnement rendent cette technologie incompatible avec les applications à l'ambiante.

Pour s'y rapprocher, l'effet thermoionique a été décliné sous forme d'effet thermo tunnel [20]. En mettant deux électrodes parallèles à une distance de l'ordre des 100 picomètres, le passage par effet tunnel des électrons devient possible. Les températures nécessaires dans ce cas sont plus basses, par contre, les défis technologiques associés sont importants.

Une méthode originale de récupération de l'énergie thermique consiste dans le couplage d'une membrane piézoélectrique avec un aimant, le tout au-dessus d'un plot en FeNi dont l'aimantation change avec la température [21]. A l'état froid l'aimant est en contact avec le plot et le piézoélectrique est contraint (Figure 1.24 b, c). Au chauffage, l'aimantation du plot chute et l'aimant s'y détache en libérant la membrane piézoélectrique de manière brusque. Un pic de tension est ainsi produit. L'énergie électrique générée est d'environ 30 μJ au détachement et 5 μJ à la remise en contact de l'aimant avec le plot.

D'autres manières de conversion d'un flux thermique en électricité existent, notamment avec des micro-pompes, ou un flux de fluide chaud met en rotation une turbine qui fait la conversion mécano-électrique [22]. Ces récupérateurs nécessitent un fluide en mouvement pour fonctionner.

Des dispositifs qui transforment la chaleur en ondes acoustiques dans un gaz ont également été conçus. Leur énergie peut être récupérée par effet piézoélectrique. Ces dispositifs, connus aussi sous le nom de générateurs thermo acoustiques sont étudiés notamment pour leur effet sonore, permettant de concevoir des nouveaux types alarmes [23].

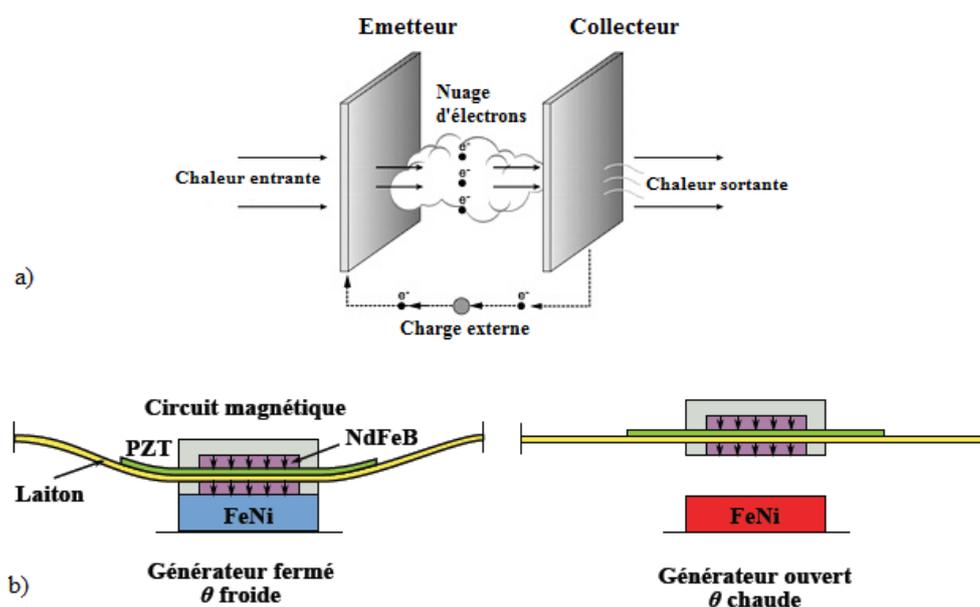


Figure 1.24 : a) Convertisseur thermoionique, avec émetteur à haute température et collecteur de charges à basse température. b) Récupérateur d'énergie thermique à base d'une membrane piézoélectrique (en PZI) associée à un aimant (en NdFeB). La membrane est contrainte à basse température et se libère lors du chauffage.

1.3 Introduction aux dispositifs innovants de récupération de l'énergie thermique

Etant donnés les défauts présentés par les dispositifs à effet Seebeck, la principale technologie de récupération de l'énergie thermique présente sur le marché, une nouvelle approche s'avère nécessaire pour réaliser la conversion de la chaleur en électricité. Le but est de limiter l'utilisation de matériaux rares, toxiques, ou à structure complexe qui nécessite un développement poussé. Les dispositifs ainsi créés sont censés être flexibles pour s'adapter à des surfaces chaudes à géométrie complexe. Un prix réduit est aussi recherché, ce qui va permettre de répondre à des cas d'usage à grande surface. Les dispositifs doivent être capables de fonctionner sans radiateur pour un encombrement minimal.

Pour répondre à ces défis, plusieurs voies de récupération ont été mises en place par l'équipe de recherche ou le présent travail de thèse a été effectué. La conversion de la chaleur en électricité en deux étapes a été choisie comme solution pour répondre à tous les critères souhaités. En un premier temps le flux de chaleur est transformé en puissance mécanique. L'étape d'après est la conversion de la puissance mécanique en puissance électrique. Trois méthodes pour effectuer la conversion thermomécanique ont été mises en place, ayant comme agents thermiques des liquides, des alliages à mémoire de forme et des bilames thermiques. L'étape de conversion mécano-électrique peut elle aussi être réalisée par trois méthodes, introduites auparavant : électromagnétique, piézoélectrique et électrostatique.

Un résumé des travaux effectués sur les générateurs innovants proposés par STMicroelectronics est fait dans les paragraphes qui suivent. L'introduction à la technologie qui constitue l'objet de ce travail de thèse est également faite.

1.3.1 Conversion thermomécanique par vaporisation brusque de fluide

La conversion liquide-vapeur constitue un des moyens classiques de transformation de la chaleur en énergie mécanique. Elle est à la base de la grande majorité des moteurs thermiques, que ce soit pour propulser des véhicules ou pour mettre en mouvement les turbines des centrales électriques. Pourtant, peu de travaux ont été réalisés pour utiliser la conversion liquide-vapeur pour la récupération de l'énergie ambiante.

L'idée innovante proposée par STMicroelectronics [24] consiste dans le couplage de la vaporisation explosive d'un liquide avec l'effet piézoélectrique. Une goutte de liquide est placée dans une enceinte fermée, en contact avec une surface chaude et une surface froide. La surface chaude est à une température supérieure à celle d'ébullition du liquide. Pour une différence suffisamment grande la goutte de liquide explose au contact avec la surface chaude (Figure 1.25). La vapeur générée remplit l'enceinte en créant une surpression. Elle se condense sur la surface froide et revient au point chaud par effet capillaire ou effet gravitationnel. Ceci ferme le cycle des oscillations, qui pourra ensuite reprendre.

La surpression créée dans la cavité agit sur une membrane piézoélectrique qui la recouvre. La membrane se déforme et génère des pics de tension cycliques. Ces pics peuvent être récupérés avec un circuit de gestion de puissance électrique et convertis en énergie stockée.

Plusieurs liquides s'apprêtent à l'utilisation dans un tel générateur. Leur température d'ébullition va déterminer le point de démarrage des dispositifs. L'eau est le choix le plus simple

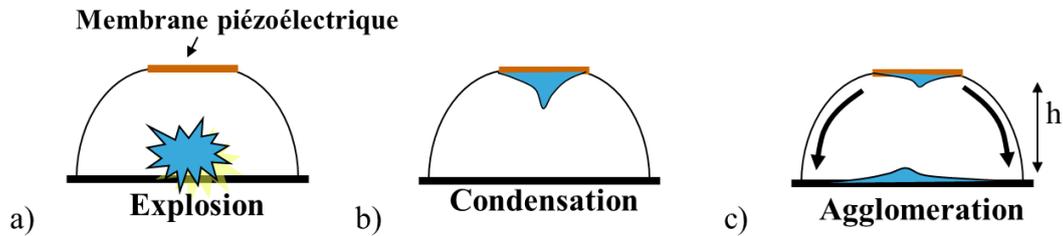


Figure 1.25: Cycle de fonctionnement d'un dispositif à conversion thermo fluïdique : a) explosion d'une goutte qui entre en contact avec la surface chaude ; b) condensation de la vapeur sur la surface froide ; c) retour et agglomération du liquide sur la surface chaude

pour des surfaces plus chaudes que $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. On peut également utiliser d'autres liquides, tels l'acétone ($T_{\text{ébullition}} = 54^{\circ}\text{C}$), l'éthanol (78°C) ou le méthanol (65°C). Les liquides HFE-7100 et HFE-7200 présentent des propriétés intéressantes, car leur température d'ébullition est en dessous de 80°C et le rapport des masses volumiques liquide/vapeur est haut. Ceci permet de d'avoir un minimum de liquide mis en circulation pour créer les pics de surpression dans un volume donné.

Des travaux déroulés au CEA Liten ont permis de faire la preuve de concept pour le système thermo fluïdique. La première démonstration a été faite avec une goutte d'eau placée entre une plaque métallique à 140°C et le corps froid d'un détecteur de pression. La goutte est entourée d'une paroi transparente pour l'observation du phénomène. Des oscillations autoentretenues ont été obtenues et à chaque explosion des variations de pression de 50 mbar et plus ont pu être observées (Figure 1.26).

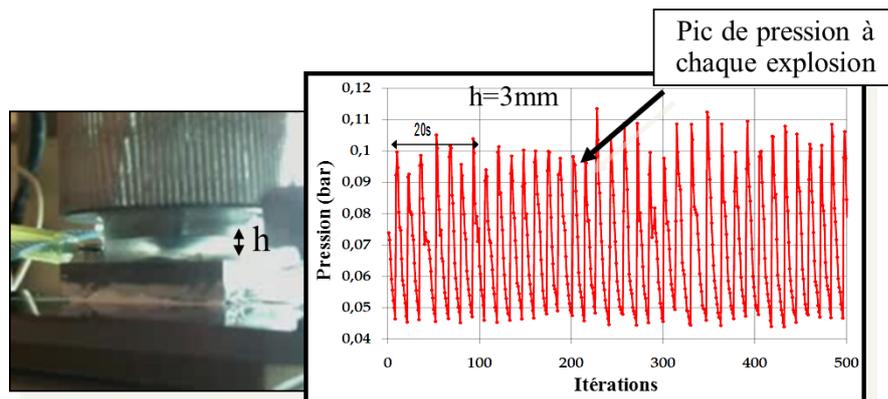


Figure 1.26: Preuve de concept pour les oscillations autoentretenues d'une goutte d'eau entre une surface chaude et une surface froide écartées de 3 mm.

Des prototypes ont été construits à partir de cette configuration, en remplaçant le détecteur à piézoélectrique par une membrane de plus grande surface. La structure retenue est composée de deux chambres reliées par un canal. La chambre en contact avec la source chaude permet de vaporiser les gouttes. La vapeur passe par le canal et se condense dans la chambre du haut. Une goutte se forme et une fois une masse suffisante atteinte, elle s'écoule dans la chambre d'évaporation.

Les deux chambres doivent être fabriquées en utilisant un matériau conducteur thermiquement (inox dans ce cas). Elles sont séparées par un isolant thermique qui permet de garder le gradient de température (Figure 1.27).

Un régime de fonctionnement autoentretenu a été obtenu avec des cellules de dimensions centimétriques. Les amplitudes des pics générés sont autour de 3V pour une cellule de 3.5 cm de côté et 1.5 V pour une cellule de 2 cm de côté (Figure 1.28). La mise en marche a été faite avec de l'eau sur une plaque chaude à 130°C .

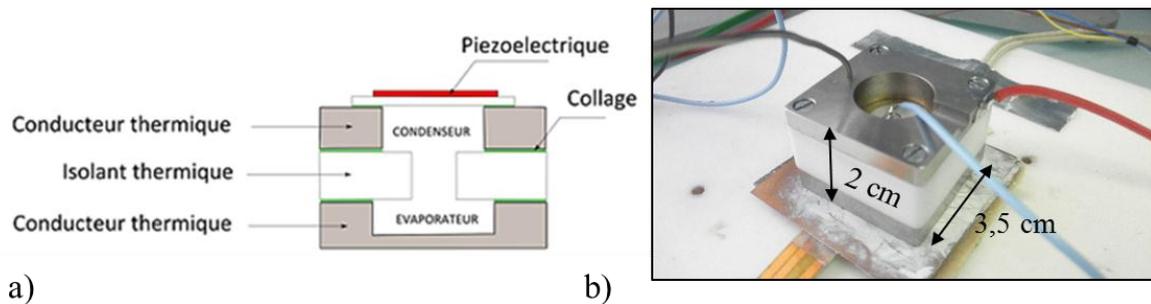


Figure 1.27: Prototype fonctionnant avec des gouttes de liquide : a) schéma montrant la séparation en deux chambres ; b) vue en perspective d'un prototype fabriqué (images offertes par U. Soupremanien/ CEA Liten).

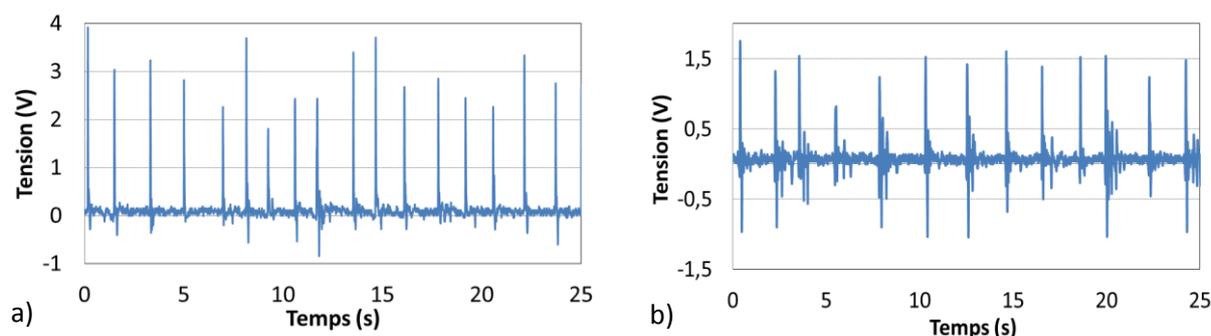


Figure 1.28: Signaux générés par des cellules fonctionnant avec des gouttes d'eau (impédance de mesure de 1 MΩ) : a) grande cellule, 3,5 cm de côté ; b) petite cellule 2 cm de côté (données offertes par U. Soupremanien/ CEA Liten).

Des matrices ont été créées en assemblant plusieurs cellules. Un arrangement 2x2 est présenté dans la Figure 1.29. Les dimensions de la matrice sont de 80x80x12 mm³. La plaque conductrice de chaleur du haut a une surface supérieure à celle des cellules, ce qui favorise l'évacuation de la chaleur.

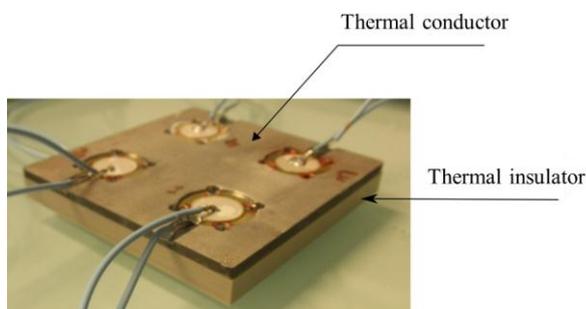


Figure 1.29: Matrice 2x2 fonctionnant avec de l'eau

Des travaux complémentaires ont été réalisés à l'Université de Sherbrooke, permettant la fabrication de prototypes à circulation horizontale de fluide [25]. Un prototype ayant une surface active de 1 cm² a été fabriqué (Figure 1.30). Il consiste d'une chambre d'expansion sur un substrat en silicium couverte par une membrane piézoélectrique. La hauteur interne de la chambre est de 0.5 mm et l'ensemble est encapsulé dans de l'époxy. Un tube capillaire permet d'introduire des gouttes de liquide qui explosent au contact avec le substrat chaud. La vapeur produite est évacuée par un second tube capillaire.

Des signaux supérieurs à 5 V ont été obtenus lors de la mise en marche du prototype (Figure 1.31). Le fonctionnement continu a été obtenu avec de l'eau déionisée, pour des débits de quelques dizaines de micro litres par seconde. Une puissance générée de 1.6 μW/cm² a été mesurée avec ce type de dispositif pour une résistance adaptée de 50 kΩ.

Ce sont donc des résultats obtenus avec un fonctionnement en cycle ouvert. La prochaine étape à réaliser est le fonctionnement en cycle fermé.

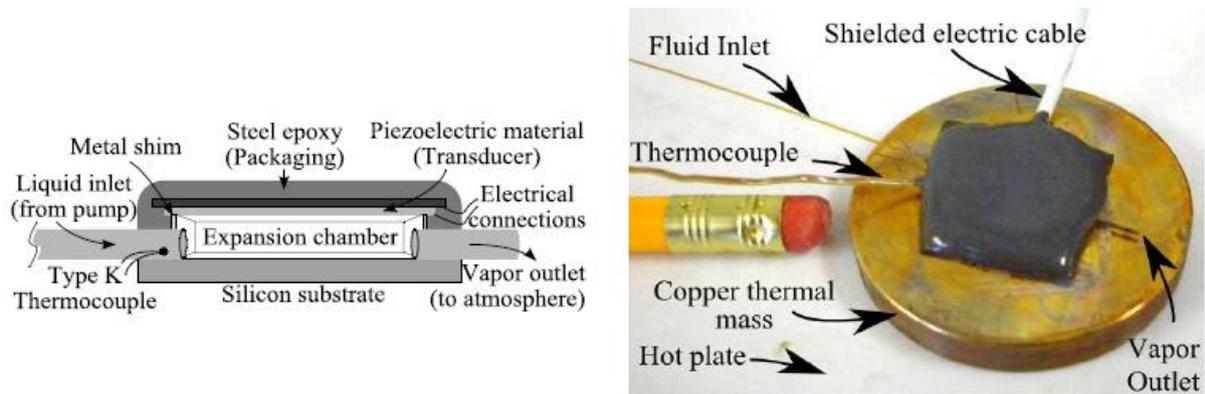
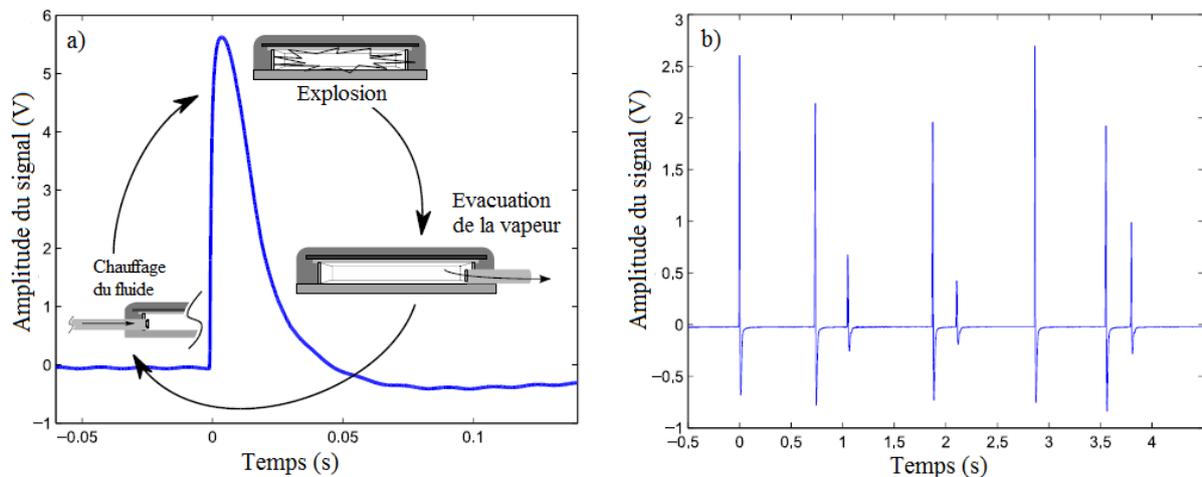


Figure 1.30: Schéma en section et photo d'un prototype à circulation horizontale de fluide. Des gouttes de liquide sont introduites par un tube capillaire et explosent au contact avec le substrat en silicium chauffé [25].



Les développements liés à la thermo fluidique ont donc amené à des preuves de concept concluantes. Des améliorations sont possibles en augmentant le confinement des gouttes et en optimisant la membrane piézoélectrique. Un des défis de cette technologie est d'assurer l'étanchéité des dispositifs pour permettre un fonctionnement autonome sans perte de liquide.

1.3.2 Conversion thermomécanique par alliages à mémoire de forme

Les alliages à mémoire de forme (AMF) représentent une autre voie prometteuse pour la conversion thermomécanique. Comparé à la voie thermo fluidique décrite précédemment, l'agent thermique est un solide, ce qui facilite sa manipulation. Un agent thermique solide convertit l'énergie thermique en énergie élastique.

A la différence des alliages classiques, les alliages à mémoire de forme manifestent des déformations plus importantes avec la température, dues à la transition entre une phase basse température (martensite) et une phase haute température (austénite). Cette transformation, appelée aussi martensitique, est équivalente à celle qui se produit dans un acier trempé à partir d'une haute température.

Une particularité de la transformation martensitique est la coexistence des deux phases pendant un certain intervalle de température dans lequel la proportion relative des deux vient créer un point d'équilibre. Il n'existe donc pas une température de transformation mais un intervalle de températures délimité par une température de début (start) et de fin (finish) de transformation. De plus une hystérésis implique un décalage des températures de transformation suivant que celle-ci a lieu

dans un sens ou dans l'autre. Il existe quatre températures caractéristiques pour les AMF, appelées MF (martensite finish), MS (Martensite start), AS (Austénite start) et AF (Austénite finish) (Figure 1.32). Chacune correspond à une rupture de pente sur le diagramme de la transformation.

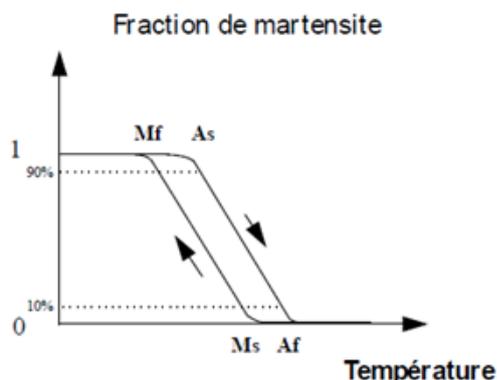


Figure 1.32: Diagramme des phases présentes en fonction de la température pendant une transformation martensitique.

Parmi les alliages qui présentent la mémoire de forme comptent les nuances de Ni-Ti et les alliages à base de cuivre : Cu-Al-Zn, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Be.

Une installation expérimentale a été développée à l'INSA de Lyon pour tester l'alliage Cu-Al-Be. Le but de l'étude a été d'éduquer un barreau d'alliage pour un fonctionnement autour de 60-80°C. L'installation est composée d'un levier sur pivot pourvu d'une tige qui vient contacter par le haut un barreau métallique à tester. L'échantillon est posé sur un module Peltier qui permet de contrôler sa température (Figure 1.33).

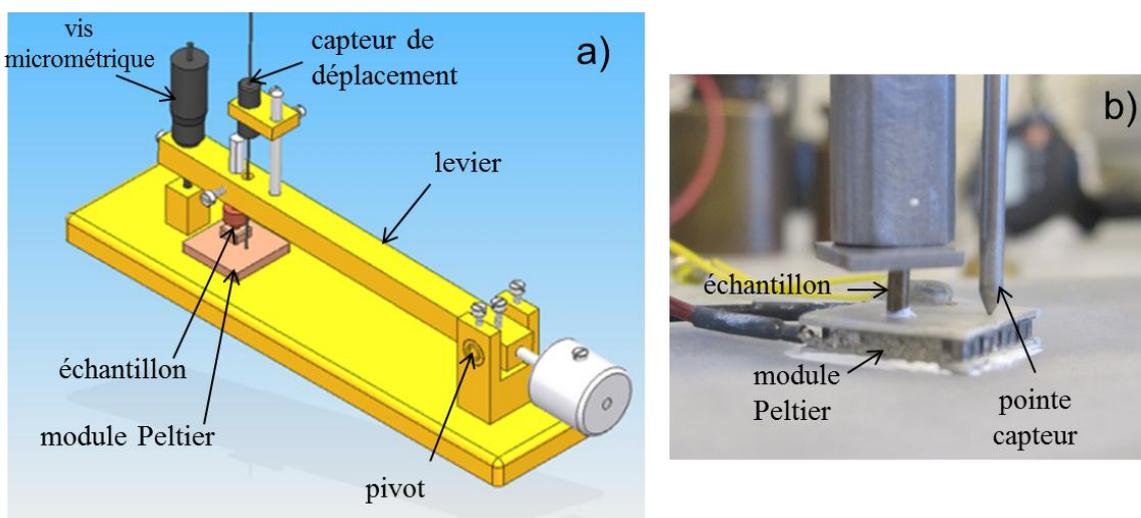


Figure 1.33: a) schéma du banc de test pour alliages à mémoire de forme ; b) vue d'un échantillon positionné pour les tests

Afin d'éduquer les échantillons, on leur impose des cycles de température sous charge. Ceci permet de régler le niveau de déformation voulu lors du chauffage. Des cycles d'éducation et le comportement ultérieur sont présentés dans la figure 1.32. L'éducation consiste en 10 cycles de chauffage et refroidissement sous une contrainte de 15 MPa. La contrainte est appliquée à l'aide d'une masse placée sur le levier. Des déformations de 2% ont ainsi été atteintes pour des variations de température entre 0°C et 140 °C, pour un échantillon cylindrique long de 4 mm et avec un diamètre de 2 mm. Après libération, l'échantillon manifeste un effet mémoire de forme avec des déformations de 1.5%. Il est capable de développer une force proche de 40 N.

Ce sont des valeurs intéressantes, et il existe la possibilité de les améliorer. Les AMF représentent donc une voie prometteuse pour induire des contraintes variables. Dans la configuration actuelle, les échantillons testés seraient utiles pour récupérer des variations temporelles de température, en étant couplés à des piézoélectriques, par exemple. Une association de ce type a été proposée dans [26] (Figure 1.35). L'énergie électrique disponible est estimée à 0.3 J par cycle de chauffage, pour un piézoélectrique de 2 mm d'épaisseur.

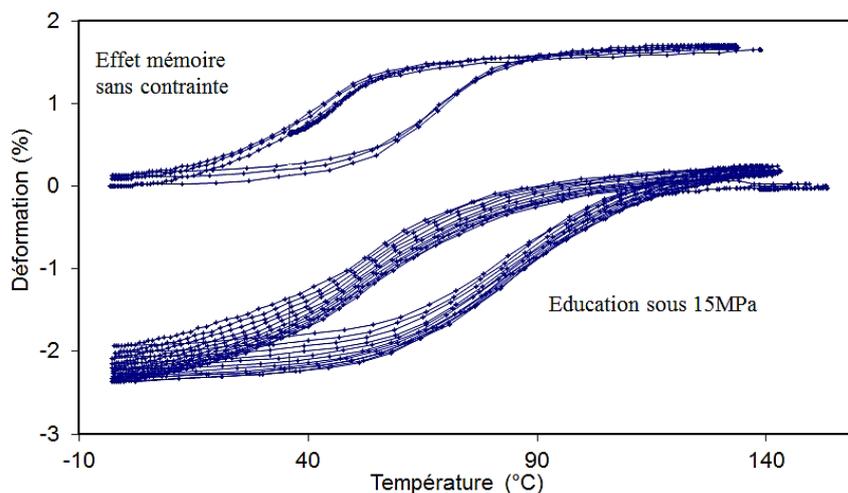


Figure 1.34: Cycles d'éducation sous contrainte et effet mémoire de forme obtenu sur un échantillon de Cu-Al-Be (mesures faites à l'INSA de Lyon).

Des travaux complémentaires sont nécessaires pour adapter une structure à base d'AMF à la récupération d'énergie à partir d'un gradient thermique spatial. Aussi, il sera nécessaire de développer des matériaux avec une hystérésis plus faible pour répondre aux cas d'usage rencontrés.

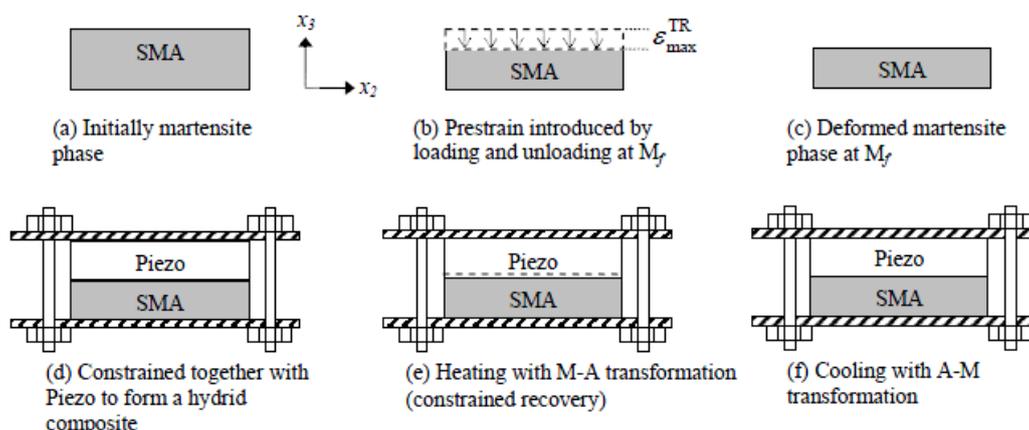


Figure 1.35: Mise en place et cycle de fonctionnement d'un alliage de mémoire de forme couplé à un matériau piézoélectrique [26] (L'abréviation SMA, de l'anglais « shape-memory alloy », correspond au terme « alliage à mémoire de forme »).

1.3.3 Conversion thermomécanique par bilames thermiques

Une autre voie de récupération de l'énergie à partir d'un gradient thermique, proposée par STMicroelectronics [27] et qui constitue l'objet de cette thèse consiste en une étape de conversion thermomécanique réalisée avec des bilames thermiques. C'est un mode de conversion innovant qui présente l'avantage d'être effectué avec des composants à l'état solide.

Les bilames thermiques sont composées de deux couches métalliques laminées, dont une à haut coefficient de dilatation thermique et une à bas coefficient de dilatation thermique (CDT). Quand une telle structure est chauffée, la première couche a tendance à se déformer plus que la seconde. La couche à haut CDT est mise en compression, car retenue dans sa dilatation. La couche à bas CDT à son tour est mise en traction, car étirée par la première. Globalement la structure se courbe, ce qui lui permet d'accommoder les contraintes thermiques créées (Figure 1.36). La couche à haut CDT, appelée aussi couche active, se retrouve à l'extérieur de la courbure, ce qui lui permet d'avoir une longueur plus grande. Le matériau à bas CDT est aussi appelé matériau passif.

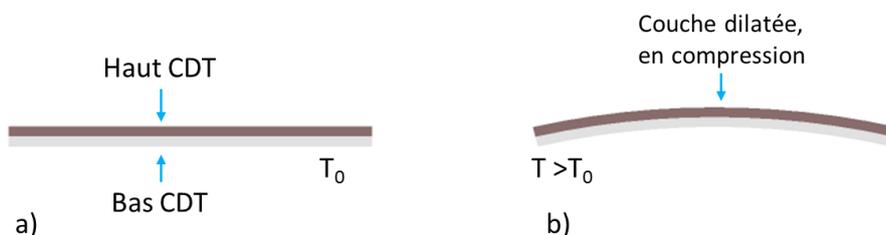


Figure 1.36: Déformation d'un bilame lors du chauffage : a) état initial plat ; b) état courbé quand la température augmente. La couche active (en marron) est à l'extérieur de la courbure.

Si un bilame sous forme de membrane est soumis au chauffage, il va se courber dans le sens de sa longueur, aussi bien que dans le sens de sa largeur (Figure 1.37). La forme obtenue va être proche de celle d'une calotte sphérique.

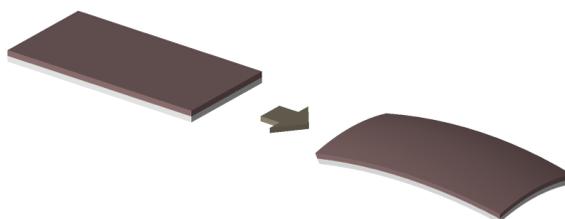


Figure 1.37: Déformation continue d'une membrane composée de deux métaux lors du chauffage. La courbure dans le sens de la longueur est accompagnée par une courbure dans le sens de la largeur

Un bilame qui est pré déformé, avec une courbure initiale, peut manifester un passage brusque entre deux états stables : un à basse température et un à haute température. Ce passage est également appelé cloquage et implique le changement du sens de la courbure. Ainsi, un tel bilame placé sur une plaque chaude va cloquer vers le haut. Si une plaque froide est placée au-dessus, il pourra se refroidir par contact et regagner son état initial en cloquant vers le bas. Un cycle d'oscillations sera ainsi créé et le bilame transportera une énergie mécanique à récupérer (Figure 1.38). Le bilame va chauffer et refroidir, ce qui veut dire qu'il va également transporter de la chaleur qui devra être évacuée par la plaque froide.

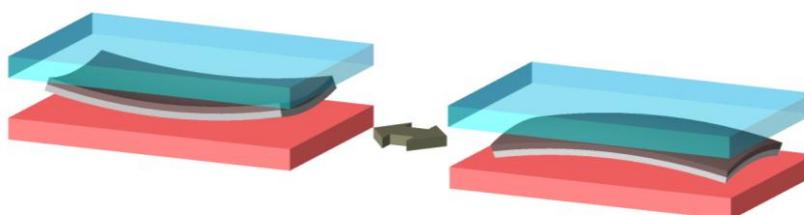


Figure 1.38: Oscillation d'un bilame cloquant entre une plaque chaude (en rouge) et une plaque froide (en bleu).

Afin de récupérer l'énergie mécanique due au cloquage du bilame, une des trois voies classiques de conversion mécano-électrique peut être utilisée. Les voies retenues sont la conversion piézo-électrique et la conversion électrostatique. Si un matériau piézoélectrique est associé au bilame, il va se faire déformer par impact, ce qui conduit à la création de pics de tension. En utilisant le bilame comme électrode dynamique d'une capacité variable, la voie électrostatique de récupération est mise en place. Les schémas des dispositifs utilisant ces principes de fonctionnement sont donnés dans la Figure 1.39 et la Figure 1.40.

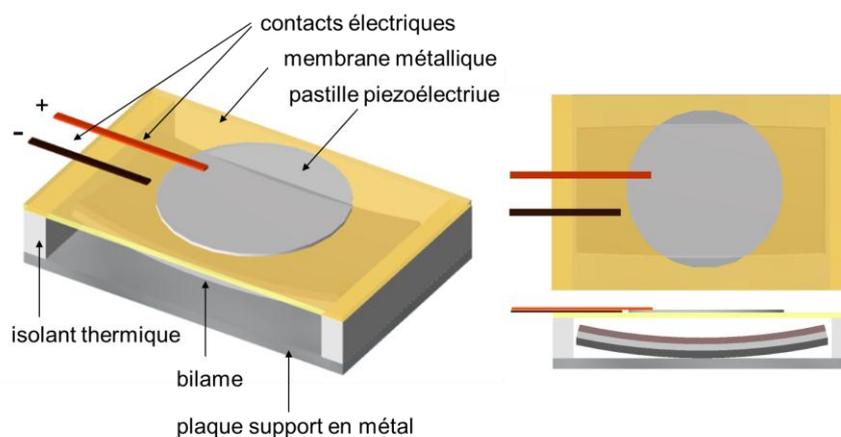


Figure 1.39: Schéma d'un dispositif de récupération d'énergie thermique à base de bilame et piézoélectrique. Vue en perspective (à gauche) et vue de dessus et de face (à droite).

Dans une approche générique le dispositif utilisant une membrane piézoélectrique est composé d'une plaque métallique sur laquelle le bilame est posé. La membrane piézoélectrique est montée au-dessus du bilame. Elle est composée d'une plaque métallique et d'une pastille piézoélectrique. Lors du cloquage le bilame frappe dans la plaque, dont la déformation est transmise au piézoélectrique. Le signal résultant est récupéré à l'aide de des contacts électriques. Un contact est posé sur la membrane métallique et un autre est posé sur le matériau piézoélectrique, qui est recouvert d'une électrode (non-représentée ici). L'écart spatial et en température entre la membrane piézoélectrique et la plaque support en métal est maintenu à l'aide d'un matériau isolant thermiquement.

Le schéma d'une structure typique à base d'électret est donné dans la Figure 1.40. La construction suit le même principe que pour la structure précédente. La différence est dans l'emplacement de la couche d'électret, déposée sous la membrane métallique qui recouvre le haut. Comme expliqué dans la section 1.1, l'électret fait office de source permanente de polarisation. Le bilame, à son tour fait office d'électrode mobile qui génère une variation de capacité. A l'état chaud, quand il est en contact avec l'électret, la capacité de l'ensemble capot-électret-bilame est maximale. En refroidissant le bilame cloque et se détache de l'électret, ce qui induit une diminution de capacité. Les charges externes à l'électret sont amenées à se redistribuer, ce qui induit un courant électrique.

Les contacts électriques dans ce système sont pris au niveau du bilame est du capot métallique qui recouvre le haut. Une couche d'isolant thermique entre le haut et le bas du dispositif est nécessaire ici aussi pour garder une différence de température suffisante.

Les deux schémas présentés ici restent génériques. Des variations autour de ces structures ont été faites afin d'améliorer les paramètres de fonctionnement. Un résumé sur les études faites sur les dispositifs à électret est fait dans le chapitre 3. Ces activités se sont déroulées au CEA LETI. Le système à piézoélectrique qui est l'objet du présent travail va être décrit en détail. Pour commencer une étude focalisée sur les bilames thermiques est proposée dans le chapitre 2.

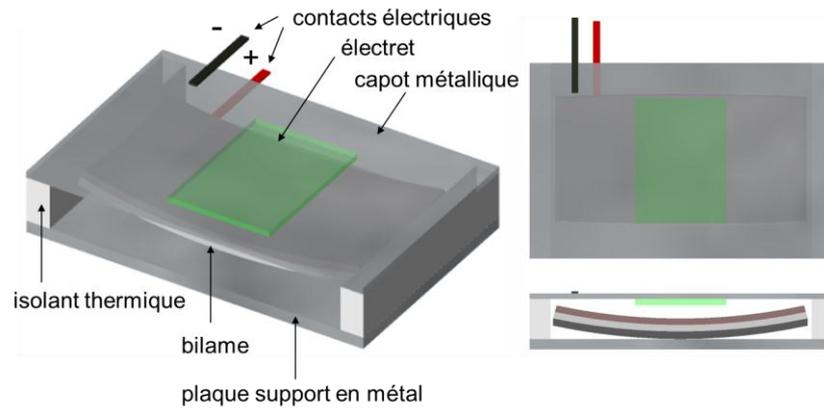


Figure 1.40: Schéma d'un dispositif de récupération d'énergie thermique à base de bilame et électret. Vue en perspective (à gauche) et vue de dessus et de face (à droite).

Chapitre 2: Les bilames thermiques

2.1 L'effet bilame. Les bilames cloquants.

Les bilames thermiques sont des éléments mécaniques utilisés dans une large gamme de dispositifs de nos jours. Le premier usage connu est la fabrication des montres. Les bilames étaient utilisés pour compenser les variations dans le fonctionnement qui survenaient avec la température dans les montres marines. C'est également pour ce cas de figure que la première étude théorique sur leur comportement a été faite [28].

Comme présenté dans le chapitre précédent, les bilames peuvent manifester deux types de déformation avec la température : déformation continue et déformation brusque. Les deux effets sont utilisés dans des produits industriels. La déformation continue est utilisée pour la fabrication des thermomètres à bilame. La déformation brusque est utilisée pour la fabrication d'interrupteurs pour une gamme de produits étendue : fers à repasser, bouilloires, thermostats, disjoncteurs, alarmes incendie.



Figure 2.1: Exemples de réalisations à base de bilames thermiques. L'usage des bilames en tant qu'interrupteurs est un des plus répandus.

Le présent chapitre résume les informations les plus importantes à propos des bilames, en passant par le procédé de fabrication, les équations du comportement et la modélisation numérique. Une étude du comportement en imagerie infrarouge est également proposée et des mesures de l'énergie mécanique sont présentées.

2.1.1 Modélisation analytique de l'effet bilame

Comme expliqué au chapitre 1, l'effet bilame consiste dans la courbure au chauffage d'un empilement composé d'un matériau à haut coefficient de dilatation thermique et d'un matériau à bas coefficient de dilatation thermique. L'étude de référence sur cet effet a été faite par S. Timoshenko [29], qui a analysé le comportement des bilames pour les thermostats.

Un bilame sous forme de poutre, encastré d'un côté et plat à l'état initial (Figure 2.2) prend une forme d'arc de cercle lorsque la température change. Le rayon de courbure est donné par l'expression suivante [29] :

$$\frac{1}{R_T} - \frac{1}{R_0} = \frac{6(\alpha_2 - \alpha_1)(1 + m)^2}{3(1 + m)^2 + (1 + mn)\left(m^2 + \frac{1}{mn}\right)} \cdot \frac{T - T_0}{s} \quad \text{Eq.(2.1)}$$

avec R_T – rayon de courbure à la température cible T , R_0 - rayon de courbure à la température de référence T_0 , $m = s_1/s_2$ – rapport des épaisseurs des deux couches, $n = Y_1/Y_2$ – rapport des modules de Young des deux couches, α_1, α_2 – coefficients de dilatation thermique (CDT). L'index 2 correspond à la couche à haute dilatation thermique, située en haut sur la Figure 2.2.

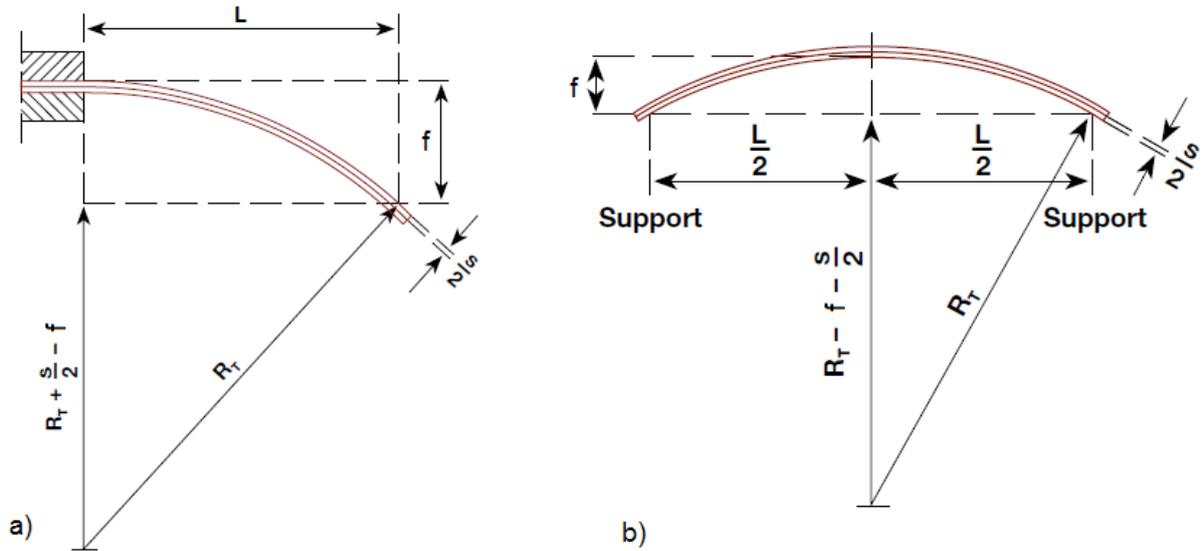


Figure 2.2: Déformation d'un bilame sous forme de poutre soumise à une variation de température :a) bilame encastré d'un côté ; b) bilame libre [30].

Dans le cas où le bilame est plat à la température de référence T_0 , et que les épaisseurs des couches, aussi bien que le modules de Young sont égaux, Eq. 2.1 peut être simplifiée vers :

$$\frac{1}{R_T} = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \cdot \frac{T - T_0}{s} \quad \text{Eq.(2.2)}$$

Le rayon de courbure d'un bilame soumis à une variation de température est donc inversement proportionnel à la différence de CDT, et à la variation même. Ceci veut dire qu'une grande différence de CDT ou de température implique une forte déformation. Un bilame de faible épaisseur se déformera plus qu'un bilame épais. On définit la courbure spécifique du bilame :

$$K = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \quad \text{Eq.(2.3)}$$

La flèche, ou déplacement maximal sur sa longueur se calcule selon :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{s} \quad \text{Eq.(2.4)}$$

C'est une expression valable dans le cas où la flèche est inférieure à 10% de la longueur du bilame.

Dans le cas où le déplacement du bilame est bloqué à son bout, il développe une force F calculée selon :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{4L} \quad \text{Eq.(2.5)}$$

Avec F_0 – force à la température de référence T_0 , égale le plus souvent à l'ambiante. La force est proportionnelle au rapport largeur sur longueur : l/L et au carré de l'épaisseur du bilame. Un bilame épais développe plus de force du fait de la raideur supérieure.

Un autre cas souvent rencontré en pratique est celui d'un bilame libre, ou simplement supporté (Figure 2.2 b). Dans ce cas, la flèche se calcule selon :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4s} \quad \text{Eq.(2.6)}$$

La flèche résultante est inférieure à celle d'une poutre encadrée d'un côté de la même longueur. Ceci est dû au fait que le déplacement correspondant est pris au centre, plutôt qu'à une extrémité libre.

Si une force est appliquée au centre du bilame de manière à limiter sa déformation, la flèche devient :

$$f = \frac{K}{2} \cdot \frac{(T - T_0)L^2}{4s} - \frac{(F - F_0)L^3}{4ls^3Y} \quad \text{Eq.(2.7)}$$

avec F_0 – force à la température de référence T_0 .

Pour annuler la flèche, il faut appliquer une force égale à :

$$F - F_0 = \frac{K}{2} \cdot \frac{Y(T - T_0)ls^2}{L} \quad \text{Eq.(2.8)}$$

C'est également la force maximale que le bilame peut développer lors du chauffage. Elle est quatre fois supérieure pour le bilame libre par rapport à un bilame encadré d'un côté. Ceci est dû à la raideur supérieure que la structure libre manifeste.

Un bilame sous forme de poutre qui est contraint au niveau de ses extrémités est capable de flamber lors du chauffage. L'étude du flambage d'un bilame serré entre deux blocs immobiles avec des liaisons pivot est faite dans [29]. Une forme initiale d'arc de sinus est considérée, avec la couche à haut coefficient de dilatation thermique en haut et une flèche f_0 vers le bas (Figure 2.3). Lors du chauffage la couche à haute dilatation thermique tire le bilame vers le haut et le met en compression. Pour une certaine flèche f_1 une position instable est atteinte. Si le bilame est chauffé plus, il flambe et change le sens de sa courbure. A ce stade il va avoir une flèche f_2 , orientée vers le haut. Si on continue à chauffer la structure, la flèche va continuer à augmenter dans le même sens.

La température de cloquage est donnée par :

$$T_u = \frac{1 + \frac{6f_0^2}{s^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{s^2}{f_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{L^2}{sf_0} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0 \quad \text{Eq.(2.9)}$$

La température de cloquage est d'autant plus grande que le rapport flèche initiale sur épaisseur (f_0/s) est grand. En effet le bilame devra se déformer plus pour se retourner et donc il y aura besoin de chauffer plus. Une forte différence de CDT implique une faible température de cloquage. Ceci est dû au fait qu'il faut chauffer moins pour avoir la déformation nécessaire au basculement.

Le cloquage permet au bilame de gagner un état stable. Si à partir de cet état on impose une baisse de température, le bilame va se déplacer vers le bas (Figure 2.3) et un nouveau état instable va être créé. Le bilame va cloquer vers le bas pour regagner le sens de courbure initial.

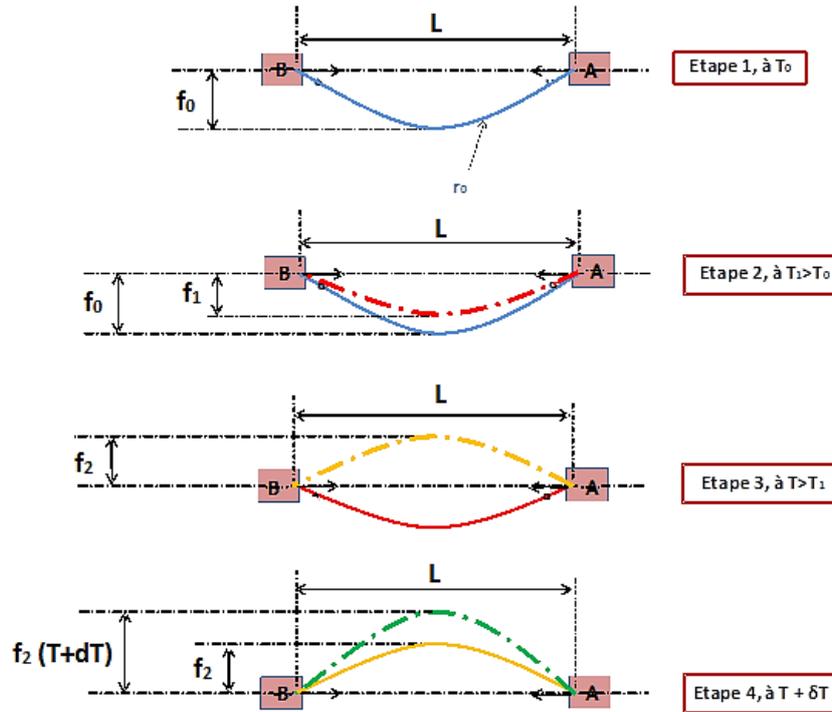


Figure 2.3: Déformation lors du chauffage d'un bilame à extrémités immobiles.

La température au décrochage est donnée par :

$$T_d = \frac{1 - \frac{6f_0^2}{s^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{s^2}{f_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{L^2}{sf_0} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0 \quad \text{Eq.(2.10)}$$

La seule différence entre les deux dernières expressions est un signe moins au numérateur. La différence entre les deux températures de fonctionnement d'un bilame cloquant est appelée hystérésis. La condition mathématique pour que les deux températures soient définies est :

$$3 \frac{f_0^2}{s^2} > 1 \quad \text{Eq.(2.11)}$$

En pratique, c'est la condition pour que le bilame puisse cloquer. Si elle n'est pas remplie, le comportement attendu est la déformation continue.

Un bilame sous forme de disque est capable de cloquer sans être retenu par les côtés. Les modèles analytiques développés dans la littérature [31], [32], permettent de déduire les températures caractéristiques. Ainsi, pour qu'un disque cloque, il faut lui imposer une température égale à :

$$T_u = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^2 \cdot f_u + T_0 \quad \text{Eq.(2.12)}$$

avec D – diamètre du disque, f_u – coefficient dépendant du rapport entre la flèche initiale du disque et son épaisseur (Figure 2.4 a).

La température de décrochage suit une loi de même type :

$$T_d = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^2 \cdot f_d + T_0 \quad \text{Eq.(2.13)}$$

avec f_d – coefficient dépendant de la géométrie.

Tout comme pour un bilame sous forme de poutre, une grande courbure spécifique K et donc une grande différence des coefficients de dilatation thermique implique une température de cloquage basse. Un disque à forte épaisseur cloquera à haute température. Les coefficients f_u et f_d prennent en compte la profondeur du disque. Un disque de profondeur importante cloque à haute température, car le facteur f_u augmente avec la profondeur. La température de décrochage, au contraire, diminue à partir d'une certaine profondeur. Ceci est dû au fait qu'il est nécessaire de refroidir le disque plus afin d'atteindre les contraintes nécessaires au décrochage.

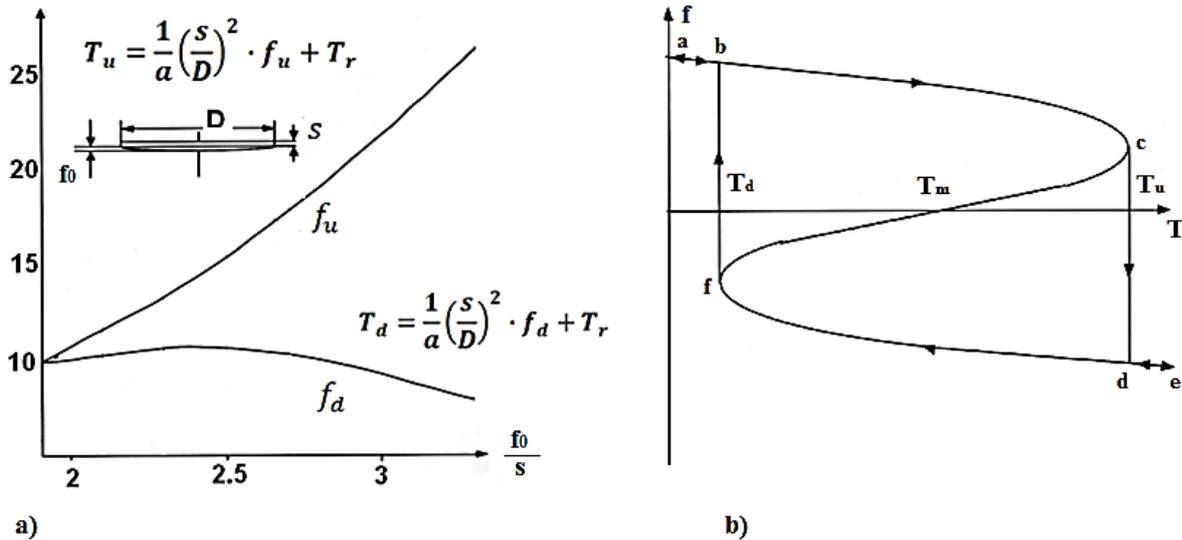


Figure 2.4: a) évolution des paramètres f_u et f_d avec le rapport flèche initiale/épaisseur ; b) flèche d'un disque cloquant en fonction de la température [30].

La solution analytique pour la flèche d'un disque cloquant en fonction de la température suit la courbe de la Figure 2.4 b. C'est une courbe générique, valable pour d'autres types de bilames cloquants à hystérésis. Le bilame ayant au départ une flèche positive (point a) se déforme de manière continue jusqu'à ce que la température T_u soit atteinte. Il se retrouve au point c qui est instable. Toute élévation ultérieure de la température implique une inversion de flèche avec passage au point d. Si la température continue d'augmenter, la trajectoire d-e est suivie. Dans le cas où la température diminue, la trajectoire d-f est suivie. Le point f correspond à la température de décrochage T_d . Après avoir atteint cet état le bilame bascule au point b et le cycle de déplacement ferme. Il s'agit donc d'un cycle à hystérésis. Le bilame manifeste deux positions stables mécaniquement pour toute température entre T_u et T_d . La position dans laquelle il se trouve dépend de son histoire thermique.

2.1.2 Energie stockée dans un bilame à déformation continue.

Lors du chauffage d'un bilame, une déformation se produit et des contraintes sont créées à l'intérieur. Ceci implique l'accumulation d'énergie mécanique sous forme élastique. La distribution des contraintes dans un bilame à déformation continue est donnée dans la Figure 2.5 [29].

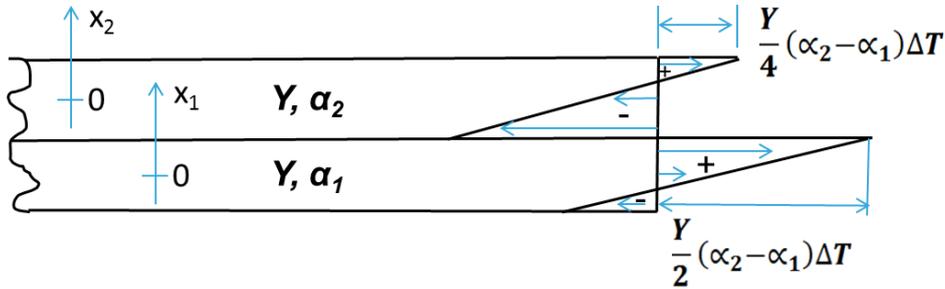


Figure 2.5: Distribution des contraintes thermiques dans un bilame

Elles sont calculées selon les formules :

$$\sigma_1(x_1) = \frac{3}{2} \left(\frac{x_1}{s} + \frac{1}{12} \right) Y (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \quad \text{Eq.(2.14)}$$

$$\sigma_2(x_2) = \frac{3}{2} \left(\frac{x_2}{s} - \frac{1}{12} \right) Y (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \quad \text{Eq.(2.15)}$$

avec x_1 et x_2 – coordonnées par rapport au milieu de chacune des couches.

Les contraintes les plus hautes sont créées à l'interface entre les deux matériaux constitutants. Il s'agit d'une contrainte de traction dans la couche à bas coefficient de dilatation thermique :

$$\sigma_{1max} = \frac{Y}{2} (\alpha_2 - \alpha_1) \Delta T \quad \text{Eq.(2.16)}$$

et d'une contrainte de compression égale en valeur absolue dans la couche à fort coefficient de dilatation thermique. Du côté libre chacune des couches subit des contraintes de signe opposé à celles qui se manifestent aux interfaces. Les contraintes se distribuent comme si chacune des couches était mise en flexion.

La densité d'énergie mécanique créée se calcule selon :

$$\rho_{elast} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{Y} \quad \text{Eq.(2.17)}$$

On déduit l'énergie emmagasinée dans une couche en multipliant la densité d'énergie par le volume de la couche. A partir de Eq.(2.14), Eq.(2.15) et Eq.(2.17) on déduit l'énergie emmagasinée dans tout le bilame :

$$E_{elast} = \frac{Y}{16} (\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta T^2 L l s \quad \text{Eq.(2.18)}$$

L'énergie mécanique créée est proportionnelle au module de Young des couches, au carré de la différence de CDT et au carré de la variation de température.

Un exemple numérique pour 3 matériaux est donné dans le graphe suivant :

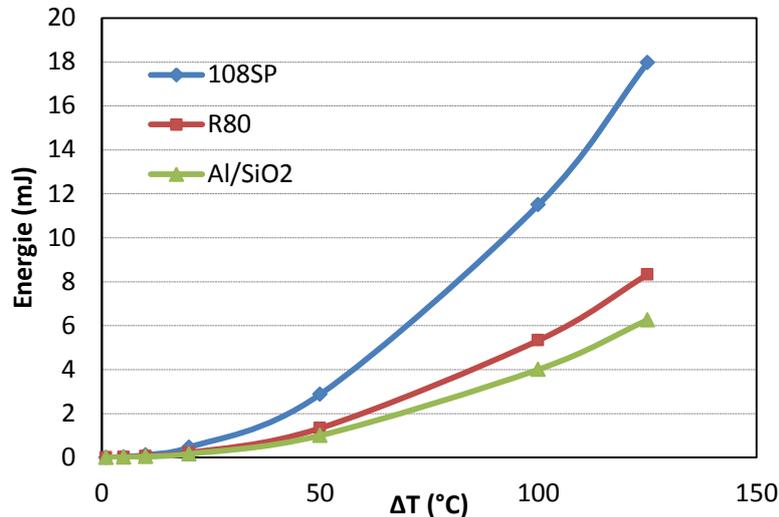


Figure 2.6: Energie emmagasinée dans différents types de bilame à déformation continue soumis à une variation uniforme de température dans le volume.

Les matériaux les plus communs pour les bilames macroscopiques utilisés sont le 108SP et le R80. Ce sont des bicouches métalliques à base d'alliages de Fe-Ni, dont la composition précise va être donnée dans les paragraphes suivants. Le couple Al/SiO₂ est préférable pour une réalisation à échelle microscopique. Les dimensions de bilames considérées sont de 36x18x0.3 mm³ et sont les mêmes pour tous les couples des matériaux pour les comparaisons.

Pour des variations de température de 10°C par rapport à la température ambiante l'énergie stockée est de l'ordre de 10μJ pour les 3 couples. C'est à partir de 20°C de différence de température que les énergies stockées deviennent intéressantes, car elles dépassent 100μJ pour dans les 3 cas. Quelques dizaines de micro joules d'énergie électrique suffisent pour envoyer un signal avec un capteur autonome à faible consommation. Il faudrait donc convertir l'énergie mécanique emmagasinée avec un rendement de quelques dizaines de pourcent pour arriver à ces fins.

Pour une variation de 50°C, l'énergie emmagasinée devient de l'ordre de 1 mJ. Si on chauffe de 100°C un bilame en 108SP, on stocke 11.5 mJ d'énergie. Cette énergie doit être libérée pour être convertie en électricité, d'où la nécessité d'utiliser des bilames cloquants.

2.1.3 Simulation numérique.

Des modèles thermoélastiques ont été mis en place sous COMSOL Multiphysics afin d'étudier le comportement au chauffage de poutres. Les modèles créés sont en deux dimensions pour simplifier l'analyse et réduire le temps de calcul.

Le flambage d'une poutre de dimensions centimétriques encastrée aux deux extrémités a été mis en évidence (Figure 2.7). Une structure de type Cu-Invar est considérée pour ces modèles. La couche de cuivre est située du côté concave (en haut) à l'état initial. Son CDT est de $16.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. La couche d'invar est du côté convexe, avec un CDT de $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. On peut remarquer sur la courbe de déplacement du centre que le bilame se déforme d'abord vers le bas lors du chauffage. En effet, c'est le sens attendu de la déformation d'une poutre encastrée d'un côté avec le même ordre des couches. Ensuite la flèche passe par un minimum avant que la structure flambe vers le haut. Le flambage correspond au segment vertical sur la courbe de déplacement du centre. Si la température augmente plus, le bilame se déforme de manière continue.

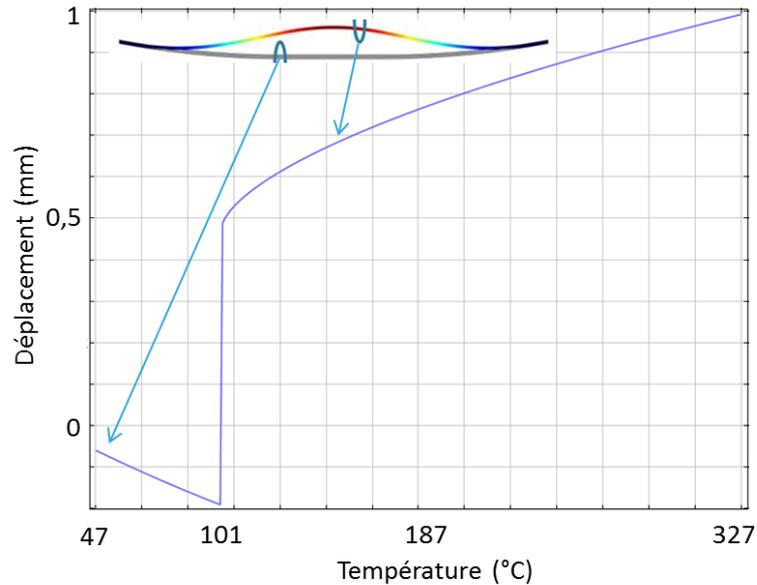


Figure 2.7: Déplacement du centre d'un bilame encastré aux extrémités avec la température. Le segment vertical correspond à la température de flambage.

Des lois de comportement en fonction des paramètres géométriques ont été déduites pour des bilames sous forme d'arc de cercle, aussi bien que pour des formes poinçonnées.

Les premiers bilames modélisés ont une forme d'arc de cercle avec une zone plate au milieu. Cette forme correspond à la section du milieu des bilames utilisés en pratique ayant la forme la plus simple. Pour un bilame de ce type ayant une longueur de 36 mm, et une flèche de 0.4 mm la température de flambage augmente de manière linéaire avec l'épaisseur, dans une gamme d'épaisseur de 0.1 à 0.3 mm. Les variations se font entre l'ambiante et 200°C. L'épaisseur du bilame est donc un paramètre géométrique d'intérêt pour l'ajustement de la température de fonctionnement.

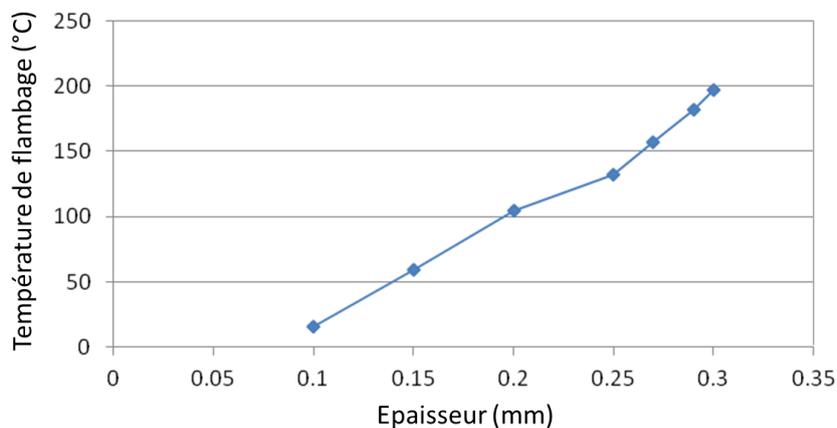


Figure 2.8: Evolution de la température de flambage d'un bilame sous forme d'arc de cercle avec l'épaisseur.

Une autre manière pour ajuster la température de fonctionnement est la variation du rapport des épaisseurs des couches (Figure 2.9). Plus la couche active est épaisse par rapport à la couche passive, plus la température de flambage est basse et l'inverse : une couche active peu épaisse implique une température de flambage haute. Comme attendu, la couche active facilite le cloquage.

Les deux derniers paramètres géométriques étudiés, l'épaisseur et le rapport des épaisseurs des couches contribuent de manière significative à la définition de la température de cloquage. Par contre, dans le cas où ce n'est pas possible de jouer sur ces paramètres, ou pas souhaitable pour des raisons économiques, une méthode efficace à mettre en place est le poinçonnage.

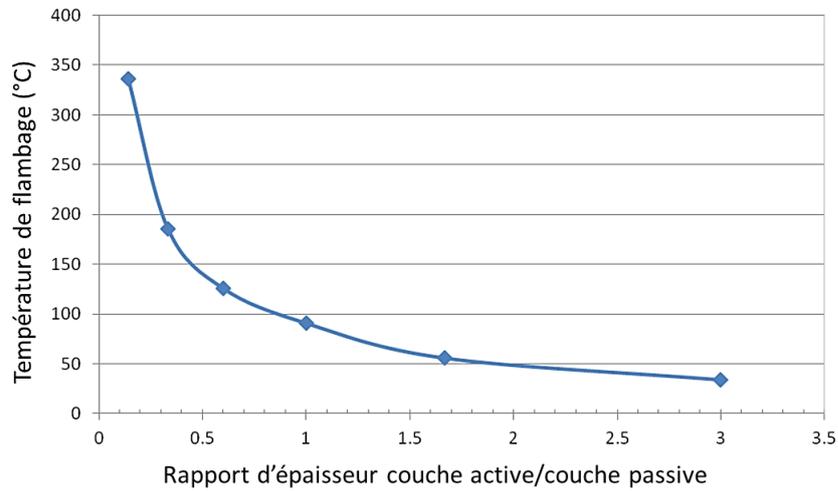


Figure 2.9: Température de flambage en fonction du rapport des épaisseurs de la couche active et la couche passive.

Des bilames poinçonnés ont été étudiés par modélisation numérique. Le poinçon considéré a une forme trapézoïdale et se situe au centre de la structure. L'évolution de la température de flambage en fonction de sa forme est donnée dans la Figure 2.10.

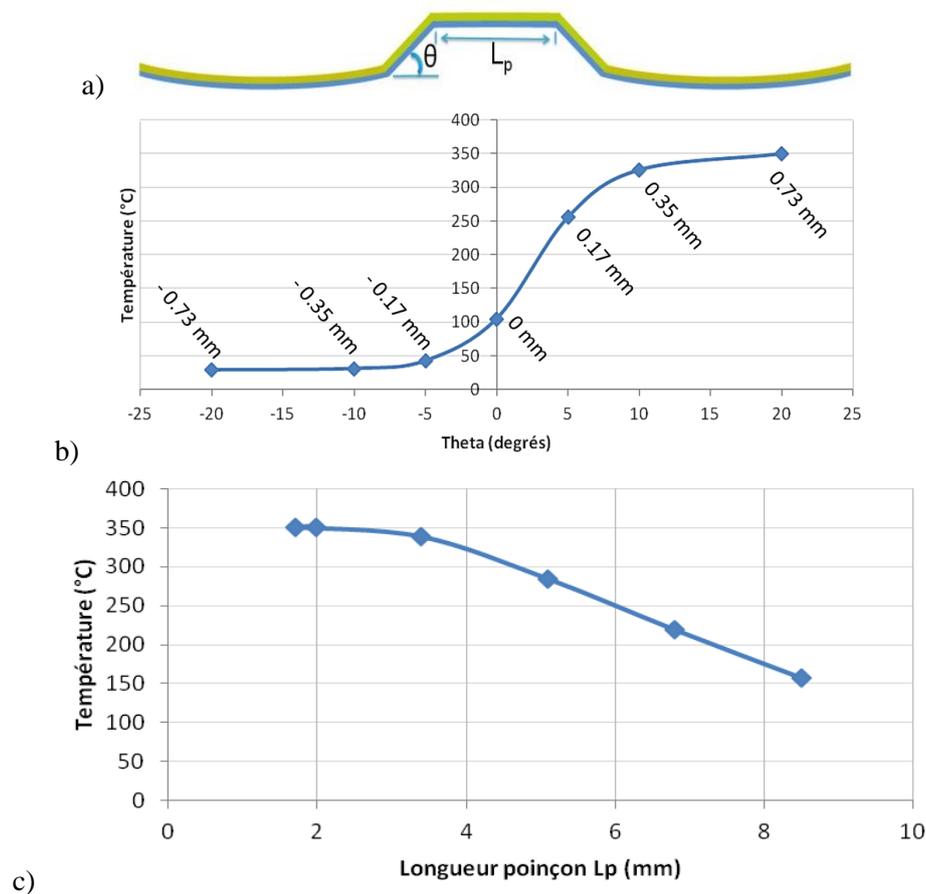


Figure 2.10: a) bilame avec poinçon, dont les paramètres sont l'angle à la base θ et la longueur L_p ; b) variation de la température de flambage avec l'angle θ , pour une longueur du bilame de 36 mm, les nombres associés aux points simulés représentent la hauteur du poinçon; c) variation de la température de flambage avec la longueur du poinçon pour $\theta = 20^\circ$.

Ainsi, en appliquant un poinçon au centre du bilame, la température de flambage peut être variée dans une gamme large. Plus le poinçon est prononcé, avec un angle dans le sens positif, plus la température de fonctionnement est haute. C'est également ce que l'on observe en pratique, un poinçon

prononcé étant nécessaire pour un fonctionnement à haute température pour une flèche initiale donnée. Un angle à la base de 20° est suffisant pour induire une variation de température de flambage de 250°C . La longueur du poinçon a un impact direct sur la raideur du bilame. L'augmenter revient à diminuer la raideur, ce qui implique une température de flambage plus basse.

2.2 Les bilames cloquants : fabrication et caractérisation.

2.2.1 Procédé de fabrication, formes et températures de fonctionnement.

Les bilames utilisés dans le cadre de ce travail sont fabriqués par la société Delta Concept. A l'origine ce sont des composants destinés à la régulation et à la sécurité thermique ou électrique. L'utilisation en tant qu'interrupteur est dominante parmi les applications. Le bilame peut actionner un contact électrique ou un clapet d'admission d'air ou de liquide. Le mouvement des bilames fabriqués peut être aussi bien cloquant que progressif. L'amplitude du mouvement peut être réglée en jouant sur la géométrie et les matériaux.

Les doubles couches métalliques utilisées pour les bilames sont fabriquées par des fondeurs. La composition des couches est ajustée à l'état liquide. L'adhésion des couches est assurée par colaminage à froid, avec des précautions spéciales prises pour assurer une bonne qualité d'interface, dépourvue de défauts [30]. Une ou plusieurs étapes de laminage peuvent suivre afin d'ajuster l'épaisseur. Le matériau est également soumis à des traitements de recuit thermique entre les étapes de mise en forme. L'enchaînement de ces étapes va déterminer les propriétés et la qualité des matériaux obtenus. Une fois la mise à l'épaisseur faite, les arrêtes sont fendues et ébarbées. Un marquage peut être appliqué sur la couche active. La bi-couche ainsi obtenue manifeste une déformation continue avec la température. Elle est commercialisée sous forme de bandes de différente largeur. Les bilames cloquants sont obtenus après découpe et poçonnage de segments de longueur voulue. Les bilames ainsi préformés sont soumis à un recuit thermique à la fin pour relaxer les contraintes résiduelles générées à l'emboutissage.

Comme décrit avant, les bilames sont composés d'une couche active et une couche passive. Pour avoir un effet bilame prononcé la couche passive est censée avoir le coefficient de dilatation thermique le plus bas possible. Parmi les métaux l'Invar est l'alliage le mieux placé de ce point de vue, avec $\alpha = 1.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Il est composé de Fe à 64% et Ni à 36%.

Les couples de matériaux appelés 108SP et R80 sont employés pour fabriquer la majorité des bilames utilisés dans le cadre de ce travail. Les compositions ont été mises au point par la société Imphy S.A. Dans les deux cas l'Invar fait office de couche passive. La couche active de la nuance 108 SP est faite en B72M (MnCu18Ni10). Pour le R80 c'est l'alliage NC4 (FeNi22Cr3) qui est employé. Les propriétés physiques de ces couches sont données dans le

Tableau 2.1 [33]. Certains bilames sont fabriqués en 140SP, matériau dont la courbure thermique est proche de celle de R80.

Propriété	108 SP	R80	140 SP
Intervalle de linéarité (°C)	-20 - +200	-20 - +200	-20 - +200
Température limite d'utilisation (°C)	350	450	350
Courbure thermique (1/K)	$39.0 \cdot 10^{-6} \pm 4\%$	$26.5 \cdot 10^{-6} \pm 4\%$	$28.6 \cdot 10^{-6} \pm 5\%$
Résistivité électrique (20°C) ($\mu\Omega \cdot m$)	$1.10 \pm 4\%$	$0.79 \pm 4\%$	$1.40 \pm 5\%$
Capacité thermique (20°C) (J/g·K)	0.46	0.46	0.46
Masse volumique (20°C) (g/cm ³)	7.6	8.1	7.4
Module de Young (20°C) (GPa)	135	172	134
Dureté Vickers : couche active (HV)	205	270	205
couche passive (HV)	210	210	210
Résistance en flexion (MPa)	200 MPa	200 MPa	150 MPa

Tableau 2.1 : Propriétés physiques des bicouches métalliques utilisées [33].

L'intervalle de linéarité pour chacune des nuances s'étend de 20°C à 200°C. C'est l'intervalle où la flèche du bilame est proportionnelle à la variation de température. Au-delà la déformation est non linéaire. Les matériaux sont utilisables jusqu'à des températures limite de 350 et 450 °C, à partir desquelles des déformations plastiques se manifestent. Le matériau 108 SP se démarque par sa courbure spécifique importante : $39 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, la plus haute parmi les nuances disponibles. Ceci correspond à une couche active de coefficient de dilatation thermique $\alpha_2 = 27.1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Pour le R80 $\alpha_2 = 18.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Les formes qu'un bilame peut prendre sont très variées : rectangle, disque, forme hélicoïdale (Figure 2.11 a). Des dérivées à partir de ceci peuvent être imaginées. La forme employée pour nos prototypes est le rectangle poinçonné (Figure 2.11 b). Les largeurs peuvent aller de 5 mm à 5 cm. Des poinçons de taille variable peuvent être pratiqués.

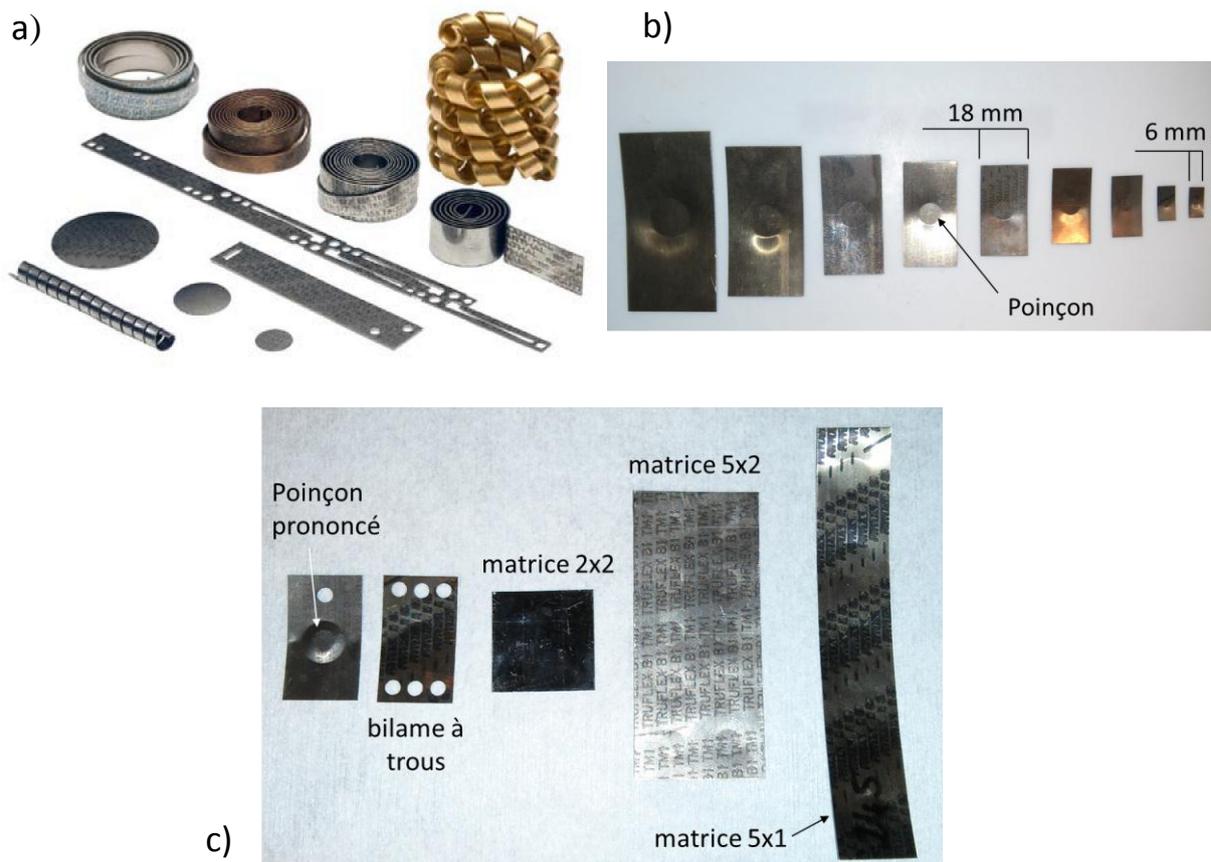


Figure 2.11: Diverses formes de bilame : a) disponibles dans le commerce ; b) série de bilames rectangulaires cloquants testés; c) bilames de forme spéciale.

Des formes spéciales de bilame ont été fabriquées et testées (Figure 2.11 c). Des bilames à poinçon prononcé ont pu être mis en marche entre une source chaude et une source froide. Deux régimes de fonctionnement ont ainsi pu être mis en évidence : oscillation du poinçon et oscillation du bilame entier. En faisant des trous dans les ailes d'un bilame, de la matière peut être économisée et le bilame peut être fixé à un support. Des bilames contenant des matrices de poinçons ont également été conçus. Les poinçons ont été disposés dans une configuration 2x2, 5x2 et 5x1. Le but de cette disposition est de faire osciller le bilame par zones. Les surfaces adjacentes à chaque poinçon peuvent bouger indépendamment une de l'autre ou interagir et s'entraider. Les poinçons en matrice peuvent être conçus de manière à cloquer à la même température ou à des températures différentes. Ce dernier type de comportement se manifeste pour la matrice 5x1 où les poinçons cloquent avec 10° de décalage l'un par rapport à l'autre. La matrice 5x2 a été conçue pour que les poinçons cloquent à la même température sans s'entraîner réciproquement. Ce mode de fonctionnement a été confirmé lors des tests.

2.2.2 Le cloquage en imagerie infrarouge.

Des images avec caméra infrarouge ont été faites sur plusieurs types de bilame afin d'avoir plus d'informations sur leur comportement lors du chauffage. Les températures de cloquage nominales, données par le fabricant correspondent à un chauffage uniforme dans le volume du bilame. Dans notre cas le chauffage est fait par contact sur une petite surface avec la plaque chaude. Il est donc intéressant de connaître la distribution de température dans le bilame pendant le régime transitoire et juste avant cloquage.

Les acquisitions d'image ont été faites avec la caméra infrarouge ThermoVision SC6000HS de Flir Systems. C'est une caméra rapide, capable de faire des acquisitions à une fréquence de 125 Hz pour une résolution d'image de 640x512. La fréquence d'acquisition peut monter à 1517 Hz pour une résolution de 192x100 pixels.

Des vidéos des étapes de chauffage et refroidissement ont été faites sur plusieurs types de bilame. Lors du chauffage la zone en contact avec la plaque chaude est le poinçon. La chaleur se propage depuis le poinçon (le plus souvent plat) vers les ailes, et une fois la distribution de température convenable atteinte, le bilame cloque.

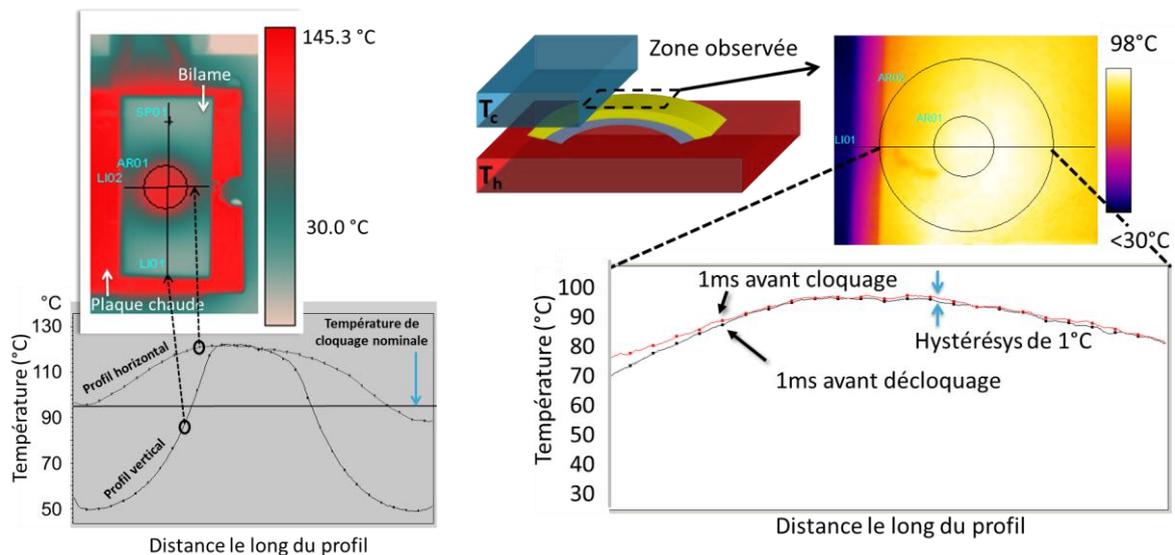


Figure 2.12: Images infra-rouges lors du chauffage de bilames : a) bilame 92-73 °C avant cloquage ; b) bilame 120-105 °C en oscillation autonome.

Les images thermiques révèlent le fait que la zone où le chauffage doit être concentré est le poinçon. Une distribution thermique ordinaire lors du chauffage est donnée dans la Figure 2.12 a. Il s'agit d'un bilame 92-73 °C ayant un poinçon plat, placé sur une source chaude à 137°C. L'image a été faite 20 ms avant le cloquage. Le profil thermique dans le sens de la longueur montre le fait que le poinçon est surchauffé d'environ 30 °C par rapport à la température nominale, tandis que les extrémités sont à une température aussi basse que 50°C. Il est donc nécessaire d'activer le poinçon pour avoir le cloquage. Les ailes jouent plutôt un rôle de support mécanique. La conséquence directe de ce fait est qu'il y a besoin de moins d'énergie thermique pour activer le bilame, comparé au cas du chauffage uniforme. Aussi, le temps de chauffage est raccourci car il n'y a pas besoin d'atteindre la température nominale de cloquage quand le bilame est chauffé par son centre.

La Figure 2.12 b montre une vue par-dessus d'un bilame 120-105 °C, utilisé pour les premières preuves de concept de nos composants. C'est un bilame à poinçon prononcé, qui a été mis en oscillation entre la plaque chaude à 137°C et un bloc métallique à 15°C. Le bilame est partiellement recouvert de la source froide, laissant le poinçon entièrement exposé à l'air. Un régime de cloquage autonome du poinçon a été obtenu, les autres parties du bilame restant statiques. Les profils de

température avant cloquage est avant décrochage donnent une différence de 1°C entre les deux états. Ceci est nettement moins comparé aux 15°C d'hystérésis nominal, dans le cas où le bilame est chauffé uniformément. Les images thermiques montrent donc bien le fait qu'un seul bilame peut osciller de manières différentes suivant les conditions de chauffage. Un grand poinçon favorise l'apparition de modes complémentaires.

D'autres images ont été faites avant cloquage sur deux bilames à dimensions et matériaux identiques, avec seule différence la présence de trous dans les ailes de l'un d'entre eux (Figure 2.13). Les bilames mesurent 35x20x0.3 mm³ dans les deux cas. Le matériau utilisé pour la fabrication est le R80. Le bilame sans trous cloque à 120 °C et décroque à 105 °C lors d'un chauffage uniforme.

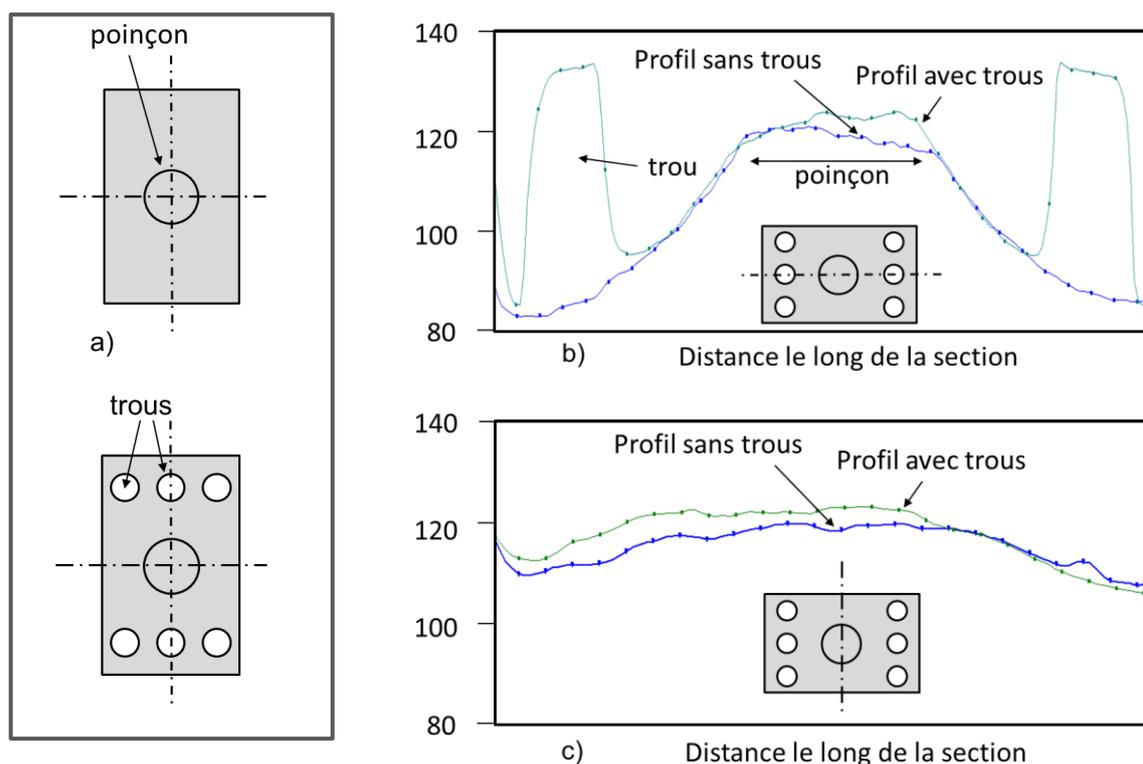


Figure 2.13: Profils thermiques de bilames sans trous et avec trous ayant les mêmes dimensions : a) bilames utilisés ; b) profils dans le sens de la longueur ; c) profils dans le sens de la largeur.

Les images thermiques révèlent deux détails intéressants dans le cas de ces deux séries. Le premier est le fait que lors du cloquage la surface du poinçon est à la température nominale de cloquage. Dans le cas de ces deux bilames il suffit donc de chauffer uniquement le poinçon pour provoquer le déclenchement. Le second détail intéressant est le fait que les 6 trous faits dans les ailes ne changent que très peu les températures de fonctionnement. Le décalage moyen mesuré avec les profils thermiques tracés est autour de 2°C. Ceci entre dans l'intervalle de variabilité entre les bilames lors de la fabrication. Il n'est donc pas nécessairement pénalisant de faire des trous dans les ailes des bilames pour économiser de la matière ou tout simplement pour pouvoir les fixer sur un support.

2.2.3 Energie mécanique mesurée.

Il est intéressant de connaître l'énergie mécanique développée par un bilame lors d'un cycle de fonctionnement. Le comportement d'un bilame est équivalent à celui d'un ressort comprimé. Pendant l'étape de chauffage, de l'énergie élastique s'accumule dans le volume (Eq. 2.18). Une fois le seuil nécessaire au cloquage atteint, cette énergie est libérée pendant que le bilame se met en mouvement.

L'énergie élastique est ainsi transformée en énergie cinétique. Pour remonter à cette dernière il est nécessaire de connaître la vitesse de mouvement du bilame.

Des mesures ont été faites avec un vibromètre laser pendant le cloquage. Il s'agit d'un modèle OFV produit par la société Polytec. C'est un appareil capable de mesurer des vitesses jusqu'à 20 m/s avec une fréquence de mesure allant jusqu'à 24 MHz. La précision sur le déplacement peut être de l'ordre du nanomètre ou plus.

Sachant que lors du cloquage la vitesse de déplacement du bilame pourrait ne pas être uniforme sur toute sa surface, des mesures dans plusieurs points ont été faites. Une première série de mesures a été faite sur des bilames de type 50-40 °C et 122-117 °C. Les bilames mesurent respectivement 28x28x0,2 mm³ et 35x20x0,3 mm³. Le bilame 50-40 °C contient 4 poinçons, afin de sensibiliser une plus grande partie de sa surface. Les mesures sont faites au centre et sur deux poinçons. Dans le cas du bilame 122-117°C, les mesures sont faites au centre, à mi-chemin entre le centre et le bord, et près du bord. Les vitesses par point sont données dans la (Figure 2.14).

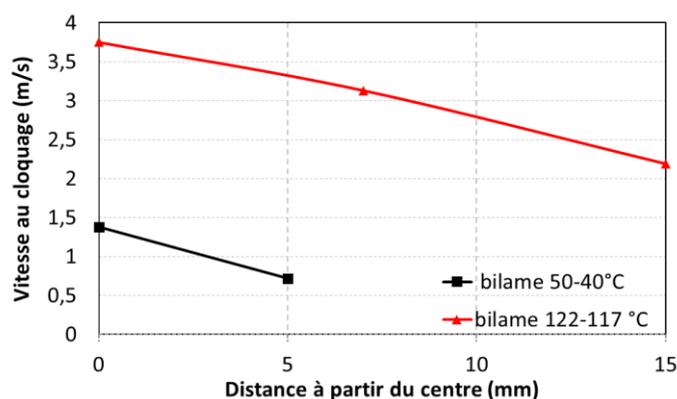


Figure 2.14: Vitesses au cloquage en fonction de la distance au centre pour un bilame 50-40 °C et un bilame 122-117 °C.

La vitesse développée au centre du bilame 122-117 est de 3,75 m/s. Elle diminue si on se rapproche du bord. L'énergie cinétique développée au cloquage se calcule selon:

$$E_k = \frac{m_b \langle v^2 \rangle}{2} \quad \text{Eq.(2.19)}$$

Avec m_b – masse du bilame, $\langle v^2 \rangle$ -vitesse quadratique moyenne dans les points de mesure. L'énergie résultante pour un bilame 122-117 °C est de 8,3 mJ au cloquage. Ceci est une valeur intéressante, qui va être supplémentée par l'énergie développée au décroquage.

Pour le bilame 50-40 °C la vitesse au centre est de 1,38 m/s. L'énergie cinétique au cloquage est de 0,29 mJ. Elle est moindre par rapport au bilame précédent. Ceci s'explique par le fait que le bilame 50-40 est chauffé de 25°C avant cloquage, alors que le bilame 122-117 °C d'environ 97 °C. Selon Eq. 2.18 Ceci implique 15 fois plus d'énergie dans le second cas pour le même volume de matière.

Des mesures ont également été faites sur une série de bilames plus étendue, utilisée dans la construction des prototypes. Ce sont des bilames qui mesurent 36x18x0.3 mm³ et pèsent autour de 1.5 g. Les températures de cloquage commencent à 50°C au plus bas, pour atteindre 115°C au plus haut. L'hystérésis est à chaque fois de 3°C, sauf pour les bilames cloquant à 115°C, et qui décroquent à 111°C. Le matériau 108SP est employé pour la fabrication de toute la série. L'énergie disponible a été mesurée au cloquage et au décroquage, toujours en trois points pour chaque échantillon, avec 3 échantillons mesurés par température de fonctionnement. Les résultats sont présentés dans la Figure 2.15.

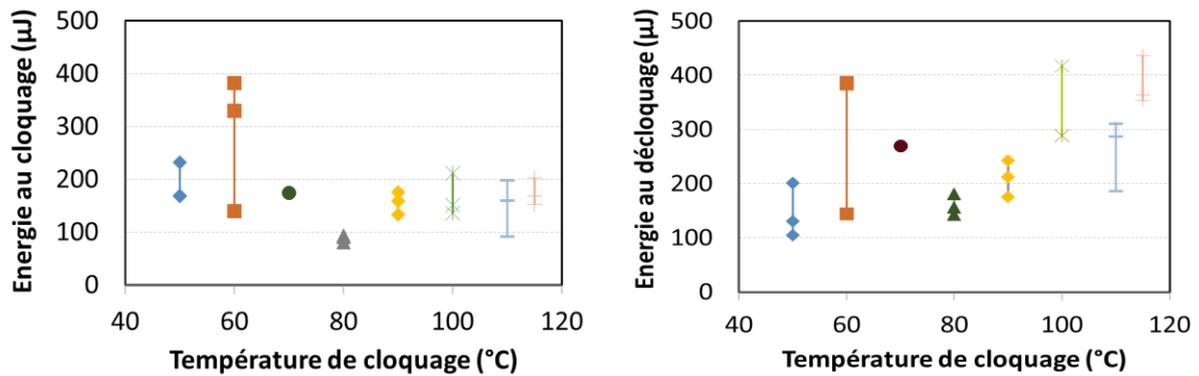


Figure 2.15: Energie développée au cloquage est au décroquage par des bilames de dimension $36 \times 18 \times 0.3 \text{ mm}^3$ ayant une hystérésis autour de 3°C . Les valeurs sont données en fonction de la température de cloquage.

On peut remarquer que la dispersion dans les énergies mesurées est importante pour certaines séries de bilames. Les mesures elles-mêmes sont reproductibles à quelques pourcent près. En effet en répétant la mesure de vitesse sur le même point d'un bilame plusieurs fois, peu de variation est observée. Ceci veut également dire que le mouvement de cloquage est lui-même reproductible pour un bilame donné.

Les valeurs moyennes des énergies mesurées par température de fonctionnement sont données dans la Figure 2.16. On peut remarquer que globalement l'énergie totale disponible par cycle de fonctionnement a tendance à augmenter avec la température. L'énergie moyenne disponible est d'environ $420 \mu\text{J}$, avec $168 \mu\text{J}$ disponibles au cloquage et $252 \mu\text{J}$ en moyenne au décroquage. Il y a donc plus d'énergie disponible dans le second cas. L'énergie maximale mesurée pour un bilame de cette série est de $770 \mu\text{J}$.

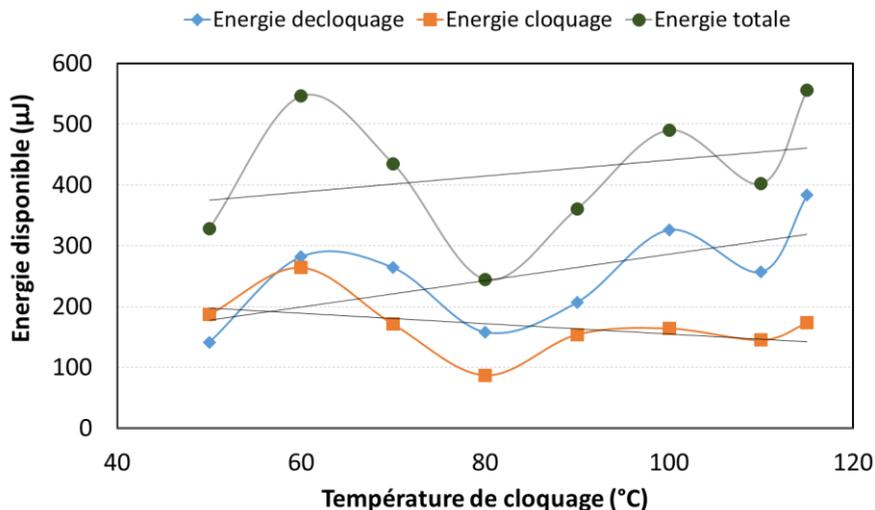


Figure 2.16: Energie disponible par cycle de fonctionnement pour des bilames de $36 \times 18 \times 0.3 \text{ mm}^3$.

L'énergie totale disponible augmente avec la température grâce au décroquage. L'énergie au cloquage a tendance à diminuer pour cette série de bilames. L'écart entre les deux augmente donc avec la température de fonctionnement. Le ratio correspondant est donné dans la Figure 2.17. Il atteint une valeur de 2.2 pour les bilames cloquant à 115°C . La différence entre l'énergie fournie au cloquage et au décroquage pourrait provenir d'une forme dissymétrique du bilame avant basculement vers le haut ou vers le bas. Les contraintes générées au refroidissement seraient donc plus grandes qu'au chauffage. L'augmentation de l'énergie au décroquage avec la température de fonctionnement pourrait s'expliquer par un refroidissement plus profond avant basculement dû à une différence de température supérieure entre le bilame et le milieu ambiant.

L'ordre de grandeur des valeurs d'énergie mesurée (100 μ J- 1 mJ) correspondent à un chauffage supérieur à 10°C pour un bilame à déformation continue de même volume. Pourtant, les bilames cloquants ont une hystérésis autour de 3°C à la fabrication. Ceci signifie que l'énergie emmagasinée par un bilame poinçonné au chauffage est supérieure à l'énergie emmagasinée par un bilame plat. Cet effet pourrait être dû à des contraintes supérieures dans la zone de distorsion, surtout au niveau des angles.

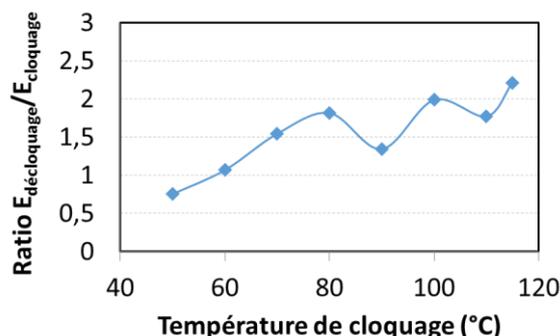


Figure 2.17: Ratio entre l'énergie de décrochage et l'énergie de cloquage en fonction de la température de fonctionnement.

L'énergie développée par les bilames est suffisante pour alimenter plusieurs types de dispositifs autonomes. Les estimations analytiques aussi bien que les mesures montrent que l'énergie disponible augmente avec la température de fonctionnement. Une grande hystérésis favorise également l'énergie disponible. En effet, parmi les bilames testés, ceux ayant une hystérésis de 5°C (122-117 °C) sont plus énergétiques que ceux ayant 3°C. Par contre ils nécessitent un gradient de température plus important pour fonctionner, ce qui peut s'avérer limitant pour la mise en marche dans le cas de certaines applications.

Un bilame qui fournit 420 μ J pendant un cycle de fonctionnement va transmettre 420 μ W de puissance mécanique en oscillant avec une fréquence de 1 Hz. La puissance électrique résultante sera dépendante du rendement de conversion mécano-électrique. Une des trois voies traditionnelles de conversion électromécanique peut être appliquée pour réaliser cette étape. Des estimations correspondant à chacune de ces voies sont données dans le Chapitre 3. La pertinence de chacune est discutée et les développements correspondants sont décrits.

Chapitre 3: La conversion mécano- électrique. Les piézoélectriques.

3.1 Voies pour la conversion mécano-électrique. Modèles et performances.

3.1.1 La conversion électromagnétique. Couplage avec les bilames.

Comme décrit dans le chapitre d'introduction, la conversion électromagnétique est la voie de conversion la plus mature, que l'on retrouve dans des nombreuses applications. Pour effectuer ce type de transformation, il faut disposer d'un aimant et d'une boucle ou bobine conductrice. Le fait de varier le flux traversant la boucle va induire une force électromotrice. La conversion électromagnétique suit la loi de Faraday :

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{Eq.(3.1)}$$

avec ε – force électromotrice générée, Φ_B – flux magnétique à travers la boucle.

Le flux magnétique est défini comme l'intégrale de l'induction magnétique sur la surface d'intérêt. Dans le cas où l'induction est constante sur la surface, on peut définir le flux simplement comme le produit des deux.

$$\Phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad \text{Eq.(3.2)} \quad \Phi = BS \quad \text{Eq.(3.3)}$$

On peut imaginer le couplage d'un bilame avec un aimant qui traverse une bobine. L'aimant peut être collé au centre du bilame, endroit où la vitesse est la plus grande. La bobine peut être placée du côté froid de la structure, de manière à ce que l'aimant puisse venir s'emboîter dedans à chaque étape de cloquage. Au décrochage, l'aimant pourra se retirer et générer un pic de tension additionnel.

On peut supposer un aimant de la taille d'un poinçon et donc environ 1 cm de diamètre, fabrique en NdFeB. L'induction magnétique générée sera autour de 1.3T. Le flux magnétique généré dans ces conditions est égal à 10^{-4} Wb. Sachant qu'un bilame cloque avec une vitesse de l'ordre de 1 m/s et en supposant une épaisseur de spire de 0.3 mm, on déduit la valeur du pic de tension généré :

$$|\varepsilon| = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{B \cdot \frac{\pi \cdot D_B^2}{4}}{\frac{h_B}{v_b}} = 0.34 V \quad \text{Eq.(3.4)}$$

avec h_B , D_B – épaisseur et diamètre de la spire et v_b – vitesse du bilame.

Les pics de tension que l'on pourrait générer ainsi ont une amplitude plutôt faible. Il sera difficile de les traiter en passant par des circuits de rectification. Au vu des tensions de seuil des diodes disponibles dans le commerce, la plus grande partie du signal risque de ne pas être récupérée. Il est nécessaire d'avoir des amplitudes supérieures à 1 V pour être en mesure de traiter le signal.

Une manière simple pour y arriver est de diviser la seule spire considérée en plusieurs spires entourant la même surface, mais de section plus petite. Ceci assurera un niveau de tension proportionnel au nombre de spires. Le gain en tension se fera au coût de l'augmentation de la résistance interne de l'ensemble suite à la diminution des sections des spires. La puissance délivrée dans une résistance adaptée sera donc moindre par rapport au cas d'une seule spire. La difficulté de cette approche est liée à la fabrication de bobines de petite taille.

Un autre point à discuter est le couplage électromagnétique. Afin d'avoir une conversion efficace, il faut que le bilame soit ralenti dans son mouvement suite à l'interaction entre l'aimant et la bobine. La possibilité de faire ceci tout en gardant le système compact est à démontrer.

L'approche électromagnétique peut donc s'avérer intéressante à condition de surmonter les difficultés technologiques mentionnées. La voie piézoélectrique et électrostatique semblent plus prometteuses à ce stade, surtout au vu des niveaux de tension qui peuvent être obtenus.

3.1.2 La conversion électrostatique. Le couplage électret-bilame.

La conversion de la chaleur en électricité en utilisant des bilames thermiques couplés à des électrets est une des idées innovantes proposées par STMicroelectronics et l'auteur du présent travail [34]. Comme présenté dans le paragraphe 1.1.3, l'électret fait office de source permanente de polarisation et le bilame fait office d'électrode mobile, qui induit une variation de capacité.

3.1.2.1 Information générale sur les électrets

Plusieurs types d'électrets existent. On peut donner comme exemple les électrets dipolaires, les électrets neutres à charges d'espace, ou les électrets à excès de charge. Les matériaux appartenant à la première catégorie possèdent des dipôles électriques dans le volume et sont globalement neutres. Les électrets appartenant à la seconde catégorie sont fabriqués par déplacement de charges à l'intérieur et restent également neutres. Les électrets à excès de charge se distinguent des catégories précédentes par le fait qu'ils contiennent une charge d'espace et ne sont pas neutres de point de vue électrique. C'est le type d'électret utilisé pour la fabrication de dispositifs à base de bilame.

La méthode la plus souvent utilisée pour la fabrication d'électrets à charge d'espace est la décharge Corona (Figure 3.1). Pour ce faire, un échantillon de diélectrique est placé sur une électrode plane, reliée à la masse. Une pointe à haut potentiel (plusieurs kV) est amenée au-dessus de l'échantillon. La pointe ionise l'air autour et les ions résultants sont accélérés par le champ électrique vers l'échantillon.

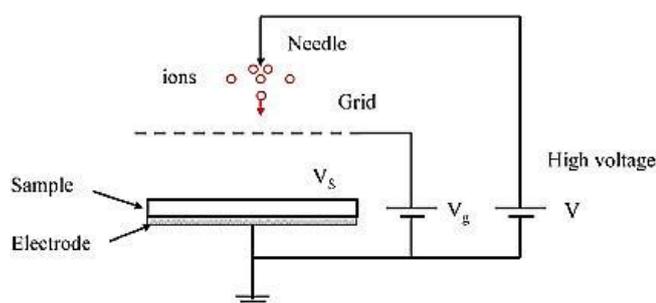


Figure 3.1: Chargement d'un diélectrique pour utilisation en tant qu'électret [35].

Une grille est intercalée entre les deux afin d'homogénéiser la distribution de la charge et de contrôler le potentiel de surface de l'échantillon, porté d'ordinaire à quelques centaines de volts. Ce potentiel va être proportionnel à la densité surfacique de charge :

$$V_s = \frac{\sigma d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad \text{Eq.(3.5)}$$

avec σ – densité surfacique de charge, d , ϵ_r – épaisseur et permittivité diélectrique relative de l'électret, ϵ_0 – permittivité diélectrique du vide.

Plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés comme électrets (Tableau 3.1). Les matériaux polymère sont souvent utilisés du fait de la facilité d’y insérer des charges. Le Teflon et le CYTOP font partie des polymères les plus étudiés à cette fin. L’oxyde de silicium seul ou en combinaison avec du nitrure de silicium est un autre matériau de choix.

L’épaisseur des couches chargées peut varier entre quelques centaines de nanomètres (SiO₂) et quelques millimètres (Téflon). Une des caractéristiques les plus importantes des électrets est leur capacité à maintenir la charge. A l’heure actuelle une stabilité confortable a pu être atteinte avec des électrets à base de SiO₂ et Teflon, avec des pertes de charge de quelques pourcent par an ou moins (Tableau 3.1).

Matériau	Stabilité	Potentiel de surface	Epaisseur
SiO ₂	>350 jours	-353 V	1 µm
SiO ₂ /Si ₃ N ₄	120 ans	250 V	500nm/100nm
Téflon PTFE	-4% /an		1,52 mm
Téflon FEP	-1 % / an		127 µm
Téflon AF	-3% en 6 semaines	-85 V	1,6 µm
CYTOP CTL-M	>4000 heures	-550 V	15 µm
Parylène HT	moyenne	-650 V	7.32 µm
PFCB	bonne	- 300 V	5 → 15 µm
TOPAS	>400 jours	500 V	24µm
PTFE speedfilm	bonne	- 180 V	2 µm

Tableau 3.1: Matériaux utilisés en tant qu’électrets ayant les meilleures performances [2].

En associant un électret à une électrode statique et une contre-électrode mobile, une structure de récupération de l’énergie mécanique est créée. Un modèle électrique équivalent a été proposé dans [10]. Le schéma électrique est donné dans la Figure 3.2.

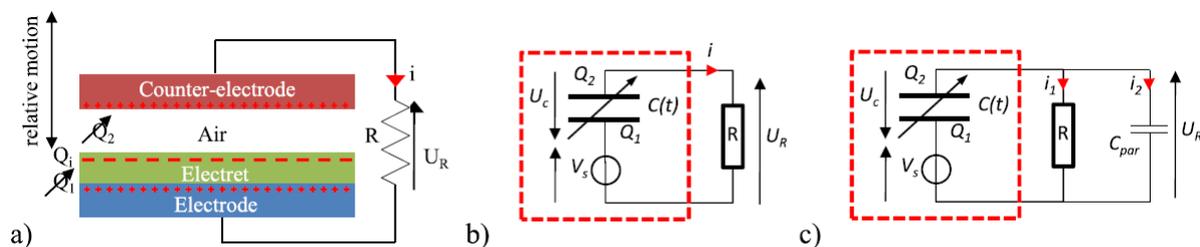


Figure 3.2: Récupérateur d’énergie mécanique à base d’électrets : a) schéma de la structure avec charge résistive en sortie ; b) modèle électrique équivalent ; c) modèle électrique avec capacité parasite [10].

Le mouvement de la contre-électrode par rapport à l’électret va induire un déplacement de charges:

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{V_s}{R} - \frac{Q_2}{C(t)R} \quad \text{Eq.(3.6)}$$

avec Q₂ – charge sur la contre-électrode, V_s – potentiel surfacique de l’électret, C – capacité de l’ensemble, R – résistance de charge. La puissance débitée dans la résistance sera égale à :

$$P(t) = R \left(\frac{dQ_2}{dt} \right)^2 \quad \text{Eq.(3.7)}$$

Les capacités parasites présentes dans le système vont modifier sa réponse. Comme une partie du courant est débitée dedans, la tension ainsi que la puissance fournie à la charge résistive va baisser. Cet effet est prononcé surtout pour des hautes résistances en sortie. Il est dû aux faibles valeurs des capacités actives : de l’ordre du pF.

3.1.2.2 Prototypes à base de bilames et électrets

Une des premières structures à base de bilame et électret contient deux couches d'électret, une en haut et une en bas (Figure 3.3). Chaque électret est associé à une électrode. Le bilame sert de contre-électrode, avec une prise de contact dessus. Une résistance est associée à chaque électret [36].

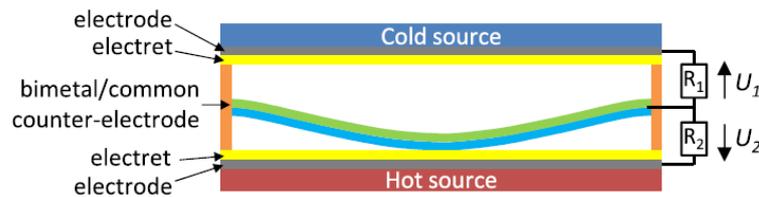


Figure 3.3: Structure générique à base de bilames et électrets avec résistances de charge [36].

Les prototypes à base de bilames et électrets ont été développés à travers une collaboration avec le CEA LETI. Le travail de mise en place a été fait par S. Boisseau.

Dans un premier temps des prototypes semi-flexibles ont été construits. Des électrets en Téflon d'une épaisseur de 25 μm ont été chargés à des tensions surfaciques entre 400 et 500 V. Ils ont été collés sur des membranes flexibles en acier de 75 μm d'épaisseur. Un bilame 47-42.5 $^{\circ}\text{C}$ en 108SP et d'une épaisseur de 115 μm a été utilisé pour mettre en marche l'ensemble. Le haut et le bas de la cavité où le bilame est placé sont séparés de 200 μm (Figure 3.4). La partie active des composants ainsi obtenus mesure 35x12x1.5 mm^3 (Figure 3.5).

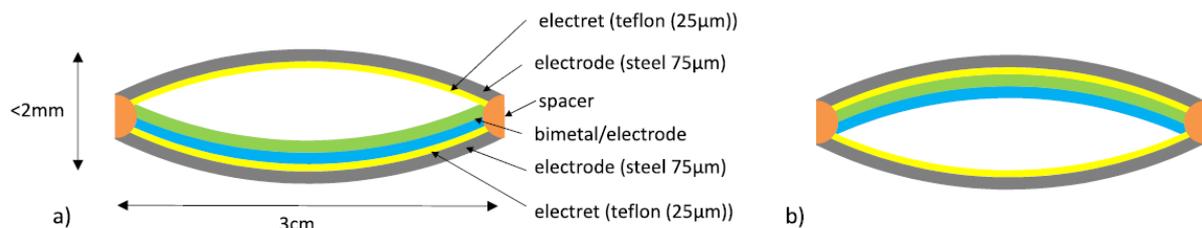


Figure 3.4: Schéma de la partie active d'un prototype à base d'un bilame 47-42.5 $^{\circ}\text{C}$ et électrets en Téflon : a) avant cloquage ; b) après cloquage [36].

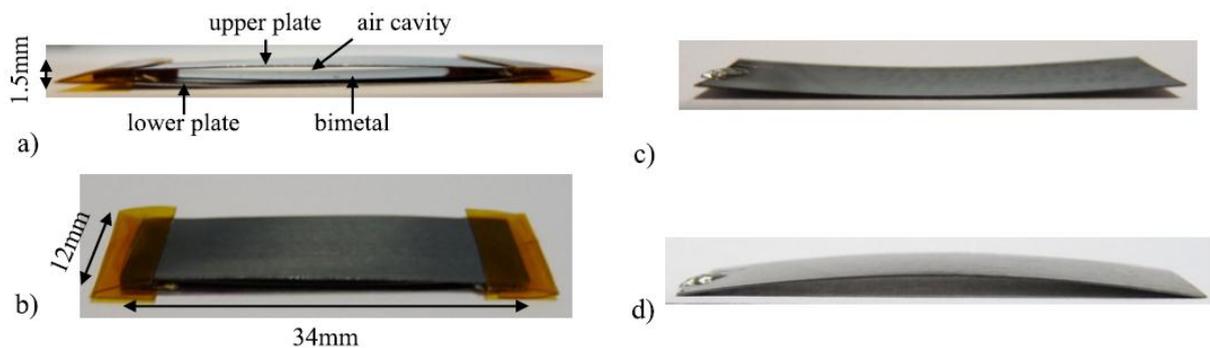


Figure 3.5: Prototype semi-flexible fabriqué : a) vue de profil ; b) vue de haut ; c) bilame utilisé à l'état décroqué ; d) bilame utilisé à l'état cloqué [36].

La mise en marche a été réalisée sur une plaque chaude à 60 $^{\circ}\text{C}$, avec l'association d'un radiateur (pas présent sur l'image). L'ensemble a été soumis à une convection forcée par ventilateur, de manière à ce que la température de la plaque du haut atteigne 36 $^{\circ}\text{C}$ [36]. Ceci est nécessaire pour que le bilame puisse être refroidi à sa température de décroquage dans un temps convenable. Une fréquence d'oscillation de 1 à 3 Hz est obtenue comme résultat.

Des tests ont été faits avec des électrets chargés à 400, 450 et 500 V, avec branchement à des résistances de 1 G Ω pour chacun. Le fait d'utiliser deux électrets : en haut et en bas permet d'obtenir

deux pics de tension à chaque mouvement du bilame. Au cloquage le premier pic est obtenu suite au détachement du bilame de l'électret du bas. Le second pic est obtenu suite à la mise en contact du bilame avec l'électret du haut. Un enchaînement de pics similaire se répète au décrochage. Les pics obtenus lors du cloquage ont une amplitude entre 350 et 450 V pour l'électret du haut. L'amplitude augmente avec la polarisation de surface. La puissance obtenue est supérieure dans tous les cas dans la résistance reliée à l'électret du haut. Ceci est dû au fait que ce dernier est flexible, contrairement à l'électret du bas qui touche la plaque chaude plate. La puissance totale obtenue dans le meilleur des cas est autour de $13,5 \mu\text{W}$. C'est une valeur compatible avec l'alimentation de capteurs autonomes.

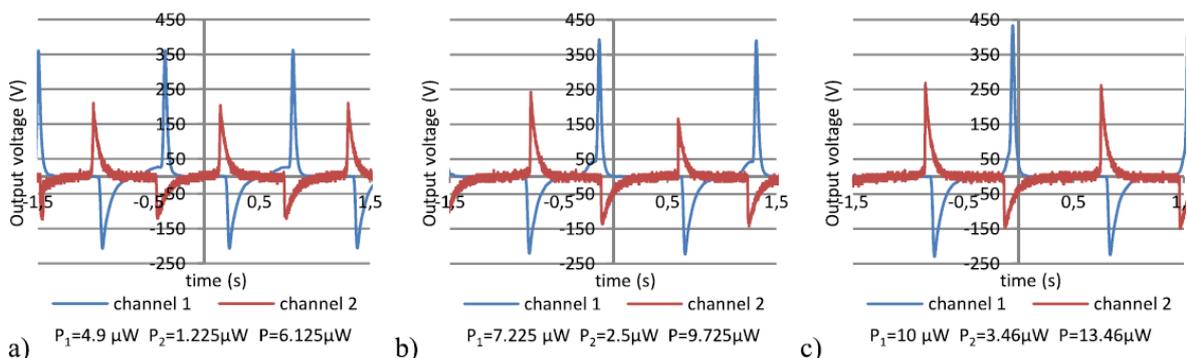


Figure 3.6: Signaux et puissances moyennes obtenues avec des électrets chargés à : a) 400 V ; b) 450 V ; c) 500 V [36].

Il est à noter que lors des expériences un fort couplage entre le bilame et les électrets a été constaté. En effet, le temps de chauffage d'un bilame avant cloquage devient plus important une fois qu'il est en contact avec l'électret, par rapport au chauffage sur plaque chaude simple. Ceci est dû au fait que le bilame doit vaincre la force électrostatique présente avant de pouvoir s'écarter. Par conséquent, la fréquence d'oscillation d'un bilame en présence d'électrets est inférieure à la fréquence mesurée sans leur présence.

Un circuit de gestion de puissance a été développé au CEA LETI pour traiter le signal et stocker l'énergie générée. La tension générée en sortie des dispositifs étant particulièrement haute, une conversion avec atténuation est nécessaire. Un convertisseur de type « flyback » a été choisi à cette fin. Il consiste en un transformateur dont chacune des branches est contrôlée par un interrupteur (Figure 3.7). Le récupérateur d'énergie est branché à la bobine primaire à travers deux diodes. La bobine secondaire est reliée à un condensateur de stockage [36].

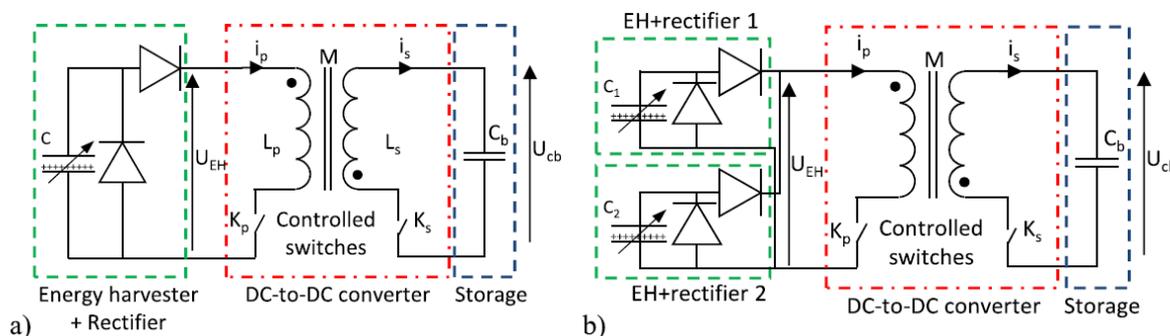


Figure 3.7: Circuit de gestion de la puissance pour les récupérateurs à base d'électrets et bilames : a) avec une seule structure branchée ; b) avec deux structures branchées [36].

Le principe de fonctionnement du circuit repose sur le transfert d'énergie entre un condensateur et une bobine au moment où un pic de tension est détecté. Cette dernière fonction est réalisée par un détecteur de pic, qui commande la fermeture de l'interrupteur K_p au moment où la tension U_{EH} générée par le récupérateur d'énergie est maximale. Un courant électrique est induit dans

la bobine primaire et atteint son maximum au bout d'un quart de la période du circuit LC formé. Au moment où la tension aux bornes de la capacité variable est nulle, et donc le courant dans la bobine maximal, l'enclenchement de l'interrupteur K_s est commandé. L'énergie accumulée dans la bobine primaire peut ainsi être transférée à la secondaire, qui charge la capacité de stockage.

Une capacité de $230 \mu\text{F}$ a pu être chargée jusqu'à $5,6 \text{ V}$ en branchant 3 prototypes au circuit de gestion de puissance (Figure 3.8). Ceci correspond à $10 \mu\text{W}$ de puissance utile, pour une énergie totale stockée d'environ $3,6 \text{ mJ}$. Les prototypes utilisés contiennent des électrets ayant une tension de surface de 500 V .

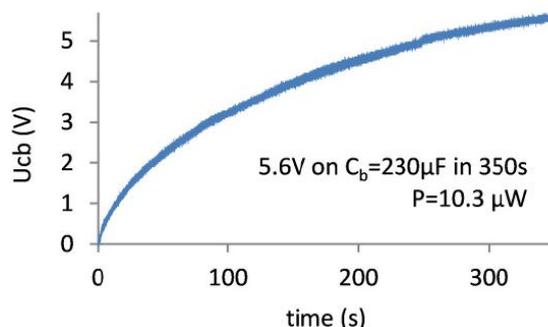


Figure 3.8: Courbe de chargement d'une capacité de stockage avec 3 prototypes semi-flexibles [36].

Le niveau de puissance ne représente qu'un quart de ce que 3 prototypes séparés sont capables de fournir. La différence s'explique par l'interaction électrique entre les prototypes, qui se voient entre eux comme des capacités parasites. D'autres capacités parasites sont introduites par le circuit de gestion de puissance. L'amélioration du rendement de transfert électrique représente donc un point de travail pour le futur.

Un autre aspect à améliorer est la gestion thermique des prototypes. Une nouvelle architecture a été conçue pour que les prototypes puissent fonctionner sans convection forcée (Figure 3.9) [37]. Le cadre du prototype a été épaissi afin d'écartier ses faces. Ceci permet de garder un meilleur gradient de température. L'amenée de la chaleur au bilame est faite à l'aide d'un cylindre en cuivre qui est en contact avec la source chaude. Seule la couche d'électret du côté froid est gardée. Elle est en contact avec un radiateur qui évacue la chaleur de l'ensemble.

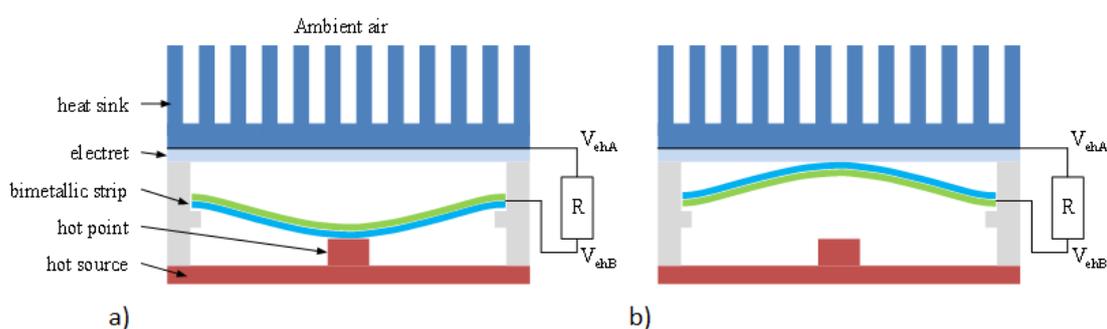


Figure 3.9: Prototype à gestion thermique améliorée : a) bilame à l'état décloqué ; b) bilame à l'état cloqué [37].

La mise en marche sans convection forcée a été réalisée sur une plaque chaude à 75°C , avec des bilames $47-43^\circ\text{C}$. L'étude de la puissance fournie en fonction de la tension de surface de l'électret a été réalisée afin de trouver le point de fonctionnement optimal. Un faible potentiel de surface résulte en une haute fréquence d'oscillation du bilame, avec des pics de faible amplitude et vice-versa : l'amplitude est plus grande pour un haut potentiel de surface, mais on perd en fréquence. La puissance générée sature à $6,4 \mu\text{W}$ pour un potentiel de surface de 600 V . Elle est inférieure à celle fournie par les prototypes précédents du fait de la présence d'une seule couche d'électret.

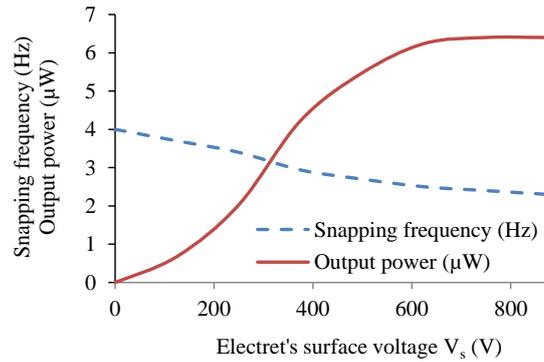


Figure 3.10: Puissance fournie par un prototype à gestion thermique améliorée (trait plein) et fréquence de cloquage du bilame (trait interrompu) en fonction du potentiel de surface de l'électret [37].

Les prototypes à base de bilames et électrets fournissent donc à l'heure actuelle des puissances de l'ordre du microwatt. Des efforts supplémentaires sont nécessaires pour améliorer le rendement du circuit de gestion de puissance est pour la mise en parallèle des générateurs. La possibilité de mise en marche sans radiateur est également à démontrer.

3.2 L'effet piézoélectrique : lois et matériaux

3.2.1 Historique et usages des piézoélectriques.

La piézoélectricité est la propriété que présentent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique (effet direct) et de se déformer lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique (effet inverse) [38].

Quand un échantillon piézoélectrique polarisé est sollicité en compression, une différence de potentiel dans le même sens que la tension de polarisation apparaît. Un échantillon sollicité en traction développera une différence de potentiel opposée. Ce comportement correspond à l'effet piézoélectrique direct.

Quand la différence de potentiel externe est imposée à l'échantillon il se déforme. Si la tension externe est dans le même sens que celle de polarisation initiale, l'échantillon est étiré. Dans le cas contraire, l'échantillon est mis en compression (Figure 3.11). Ce comportement correspond à l'effet piézoélectrique inverse.

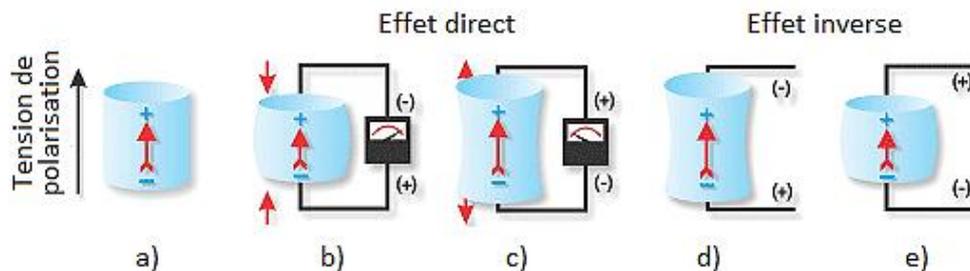


Figure 3.11: a) échantillon piézoélectrique polarisé. L'effet piézoélectrique direct : b) échantillon mis en compression ; c) échantillon mis en traction. L'effet piézoélectrique inverse : d) tension appliquée de même sens que la tension de polarisation ; e) tension appliquée de sens opposé à la tension de polarisation [39].

La première observation du phénomène de polarisation sous contrainte a été faite en 1817 par R. Haüy. La première étude théorique et expérimentale de l'effet piézoélectrique direct a été faite par les frères Jacques et Pierre Curie en 1880. L'existence de l'effet piézoélectrique inverse est suggérée en 1881 par Lippmann. Les propriétés pyroélectriques étaient connues bien avant, le terme de « pyroélectricité » apparaissant en 1824.

Une des premières applications des matériaux piézoélectriques a été l'émission des ultrasons, pour des usages militaires. Des oscillateurs et filtres à base de cristaux piézoélectriques ont été conçus pour des applications dans la téléphonie et la radiodiffusion. Le premier brevet pour l'application des piézoélectriques pour le contrôle non-destructif est déposé en 1942. La première sonde ultrasonore multiélément pour échographie médicale a été construite en 1967.

A l'heure actuelle l'usage des piézoélectriques peut être groupé en trois familles [40]: applications de puissance, applications de signal et les dispositifs d'allumage. Dans la première famille on trouve les sonars, les dispositifs d'usinage et découpe, les transformateurs et moteurs piézoélectriques (Figure 3.12). La seconde famille regroupe les sondes d'échographie, les dispositifs de contrôle non-destructif, aussi bien que les références de fréquence, les hauts parleurs et les microphones à base de piézoélectrique. Les dispositifs d'allumage constituent une famille à part. Le rôle du piézoélectrique est de générer une étincelle en étant mis sous contrainte.

Dans les différents domaines d'application cités, les piézoélectriques peuvent être utilisés en tant que capteurs (microphones, sondes d'échographie) ou actionneurs (moteurs, haut-parleurs). Les récupérateurs d'énergie à piézoélectrique représentent une nouvelle classe de dispositifs dans la famille des applications de puissance. On parle dans ce cas d'un usage des matériaux piézoélectriques en tant que transducteurs, avec le rendement de conversion d'énergie au premier plan.

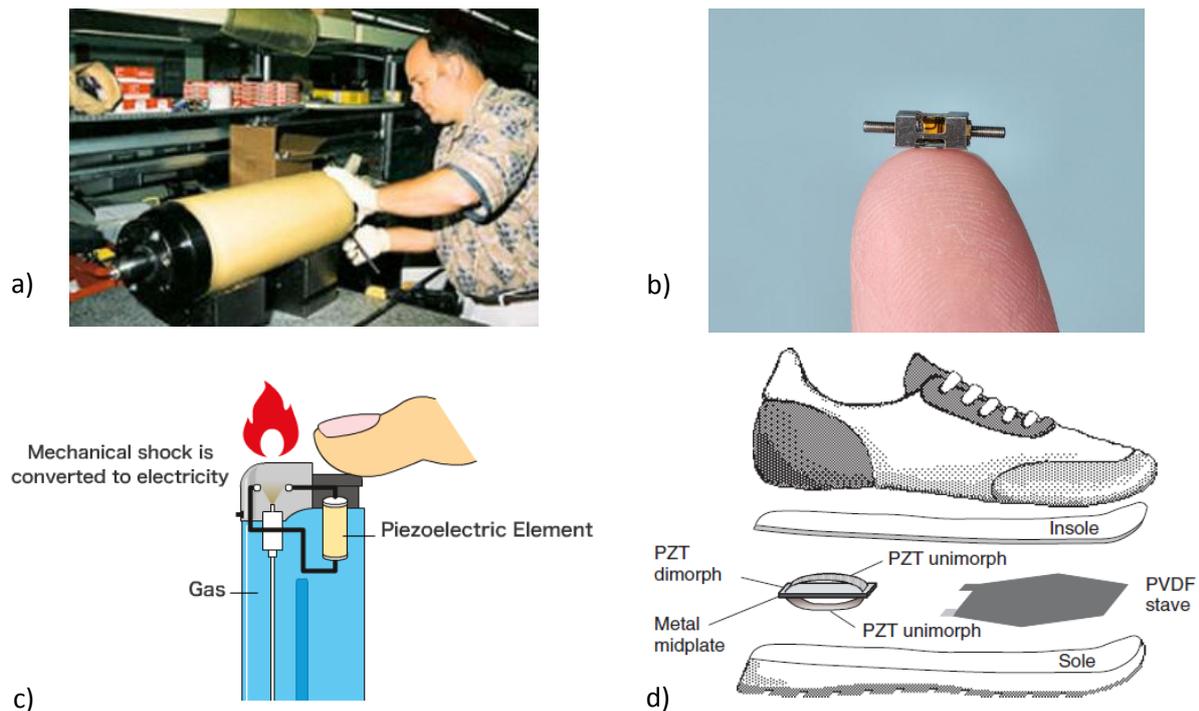


Figure 3.12: Exemples de réalisations avec utilisation de matériaux piézoélectriques : a) montage pour sonar [Materials Systems Inc.] ; b) moteur pour micro positionnement [New Scale Technologies] ; c) système d'allumage de gaz [Kyocera] ; d) récupérateur d'énergie pour chaussures [MIT].

3.2.2 Physique de la piézoélectricité

3.2.2.1 Classification

La manifestation de l'effet piézoélectrique est liée à la structure des matériaux à l'échelle atomique. Ainsi, peuvent être piézoélectriques uniquement les matériaux ayant une maille cristalline non-centrosymétrique. Sur les 32 classes cristallines existantes 21 présentent cette propriété. Parmi elles, 20 sont piézoélectriques.

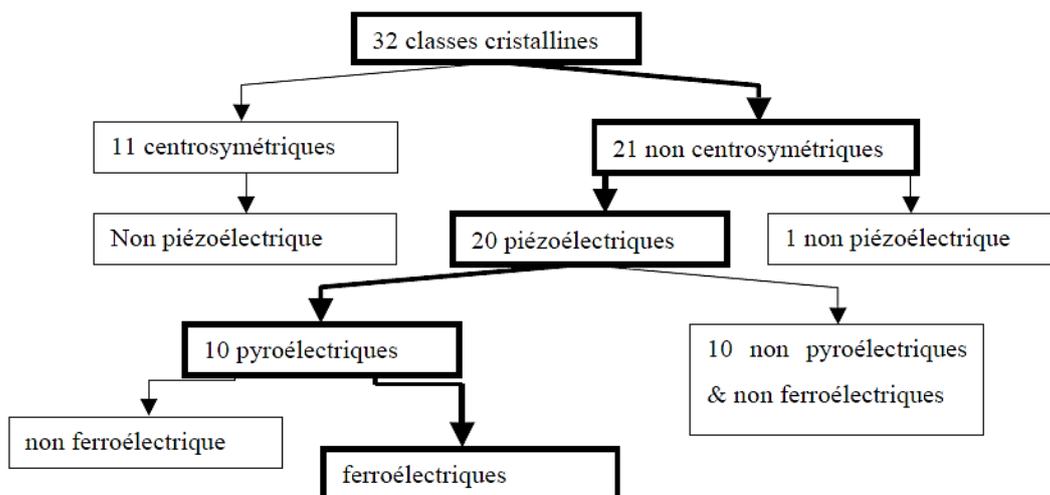


Figure 3.13: Nombre de classes cristallines en fonction des propriétés physiques (image reprise de [41]).

Parmi les 20 classes piézoélectriques on compte 10 pyroélectriques. L'effet piézoélectrique se manifeste uniquement dans les matériaux diélectriques. Certains matériaux piézoélectriques ont la

capacité de grader une polarisation permanente après avoir été soumis à un champ électrique. Cette propriété est appelée ferroélectricité et se manifeste dans une partie des classes cristallines pyroélectriques. La polarisation de ces matériaux peut changer de sens si un champ fort est appliqué. La dépendance entre la polarisation et le champ électrique appliqué est caractérisée par une boucle d'hystérésis.

3.2.2.2 Equations de la piézoélectricité

Les grandeurs physiques qui interviennent dans les phénomènes piézoélectriques sont la contrainte T , la déformation S , le champ électrique E et l'induction électrique D . Elles sont reliées par la souplesse s , la constante piézoélectrique d et la permittivité ϵ . Une manière simple pour établir les relations entre les grandeurs présentes est donnée dans la Figure 3.14.

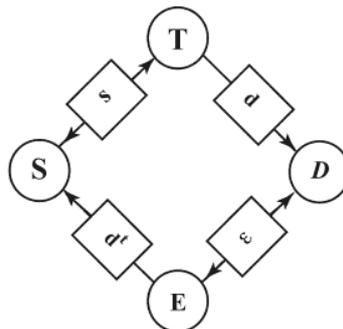


Figure 3.14: Grandeurs et constantes intervenant dans les phénomènes piézoélectriques [40].

Les relations fondamentales de la piézoélectricité s'écrivent sous forme matricielle :

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^t \mathbf{E} \quad \text{Eq.(3.8)}$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E} \quad \text{Eq.(3.9)}$$

Les lettres écrites en gras correspondent à chacune de grandeurs et constantes définies précédemment. La matrice des souplesses \mathbf{s}^E est donnée à champ électrique constant et la matrice de permittivités $\boldsymbol{\epsilon}^T$ est donnée à contraintes constantes. La matrice \mathbf{d}^t est la transposée de la matrice des constantes piézoélectriques \mathbf{d} .

L'équation 3.8 traduit le fait que la déformation du matériau S dépend de la contrainte appliquée T et du champ électrique E à l'intérieur du matériau. Le premier terme de l'expression correspond à la relation classique de l'élasticité, avec la souplesse en tant que constante de proportionnalité. Le second terme correspond à l'effet piézoélectrique direct. Dans l'équation 3.9 le premier terme correspond à l'effet piézoélectrique inverse, alors que le second représente la relation valable pour un diélectrique classique.

Les matrices \mathbf{S} et \mathbf{T} sont des matrices d'une colonne avec six lignes, prenant en compte tous les termes du tenseur de déformation et des contraintes. Les termes T_1, T_2 et T_3, S_1, S_2, S_3 , représentent les composantes des contraintes et déformations parallèles aux axes. T_4, T_5, T_6 et S_4, S_5, S_6 sont les contraintes et déformations de cisaillement autour de chaque axe (Figure 3.15). Les matrices \mathbf{D} et \mathbf{E} ont des dimensions de 3×1 . Les matrices $\mathbf{s}^E, \mathbf{d}, \boldsymbol{\epsilon}^T$ ont des dimensions $6 \times 6, 3 \times 6$ et 3×3 respectivement.

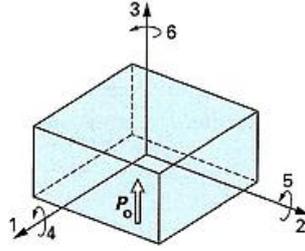


Figure 3.15: Directions pour la notation matricielle [38].

D'autres formes d'écriture des expressions de la piézoélectricité sont possibles, en fonction de grandeurs qu'on considère indépendantes:

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^t \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.10)} \quad \begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^D \mathbf{T} + \mathbf{g}^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -\mathbf{g} \mathbf{T} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{D} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.11)}$$

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} - \mathbf{e}^t \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon}^S \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.12)} \quad \begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^D \mathbf{S} - \mathbf{h}^t \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -\mathbf{h} \mathbf{S} + \boldsymbol{\beta}^S \mathbf{D} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.13)}$$

avec \mathbf{c} – matrice des rigidités, $\boldsymbol{\beta}$ – matrice des constantes d'imperméabilité inverse de la matrice des permittivités) et \mathbf{e} , \mathbf{h} , \mathbf{g} – matrices des constantes piézoélectriques. Les exposants T, S, E, D correspondent à des conditions de contrainte, déformation, champ électrique et induction électrique constante respectivement.

Pour un matériau élastique classique, les relations matricielles entre la contrainte et la déformation s'écrivent comme :

$$\mathbf{T} = \mathbf{cS} \quad \text{Eq.(3.14)}$$

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(3.15)}$$

A partir de l'Equation 3.12. Pour un matériau piézoélectrique on a :

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & c_{14}^E & c_{15}^E & c_{16}^E & -e_{11} & -e_{21} & -e_{31} \\ c_{21}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & c_{24}^E & c_{25}^E & c_{26}^E & -e_{12} & -e_{22} & -e_{32} \\ c_{31}^E & c_{32}^E & c_{33}^E & c_{34}^E & c_{35}^E & c_{36}^E & -e_{13} & -e_{23} & -e_{33} \\ c_{41}^E & c_{42}^E & c_{43}^E & c_{44}^E & c_{45}^E & c_{46}^E & -e_{14} & -e_{24} & -e_{34} \\ c_{51}^E & c_{52}^E & c_{53}^E & c_{54}^E & c_{55}^E & c_{56}^E & -e_{15} & -e_{25} & -e_{35} \\ c_{61}^E & c_{62}^E & c_{63}^E & c_{64}^E & c_{65}^E & c_{66}^E & -e_{16} & -e_{26} & -e_{36} \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} & \varepsilon_{11}^S & \varepsilon_{12}^S & \varepsilon_{13}^S \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} & \varepsilon_{21}^S & \varepsilon_{22}^S & \varepsilon_{23}^S \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} & \varepsilon_{31}^S & \varepsilon_{32}^S & \varepsilon_{33}^S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(3.16)}$$

La piézoélectricité introduit donc un grand nombre de constantes et de relations possibles. Un traitement des phénomènes piézoélectriques avec la totalité de ces constantes et donc avec des matrices complètes n'est nécessaire que dans le cas des monocristaux qui ne possèdent aucune symétrie (maille triclinique). Pour le reste des cas, des simplifications sont possibles vu que les termes des matrices ne sont pas tous indépendants.

Les céramiques PZT, qui figurent parmi les matériaux piézoélectriques les plus répandus, ont une structure similaire aux cristaux de type « 6mm ». Il s'agit d'un groupe ponctuel non centrosymétrique avec un axe de symétrie rotationnel d'ordre 6. Pour cette classe de cristaux, les matrices des différentes constantes deviennent :

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(3.17)} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(3.18)}$$

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{Eq.(3.19)}$$

La symétrie dans le cristal à comme conséquence la symétrie dans les matrices des constantes qui interviennent. La matrice d contient trois termes non-nuls, qui traduisent les modes principaux de sollicitation d'une céramique. En considérant que la polarisation est dans la direction 3, les modes sont les suivants (Figure 3.1) :

- le mode longitudinal, ou 33 : correspond à l'apparition d'une tension sur les électrodes perpendiculaires à l'axe 3 quand une déformation est appliquée le long du même axe ;
- le mode transversal, ou 31 : correspond à l'apparition d'une tension sur les électrodes perpendiculaires à l'axe 3 quand une déformation est appliquée le long de l'axe 1 ;
- le mode de cisaillement ou 15 : correspond à l'apparition d'une tension sur les électrodes perpendiculaires à l'axe 1 quand une déformation de cisaillement est appliquée autour de l'axe 2.

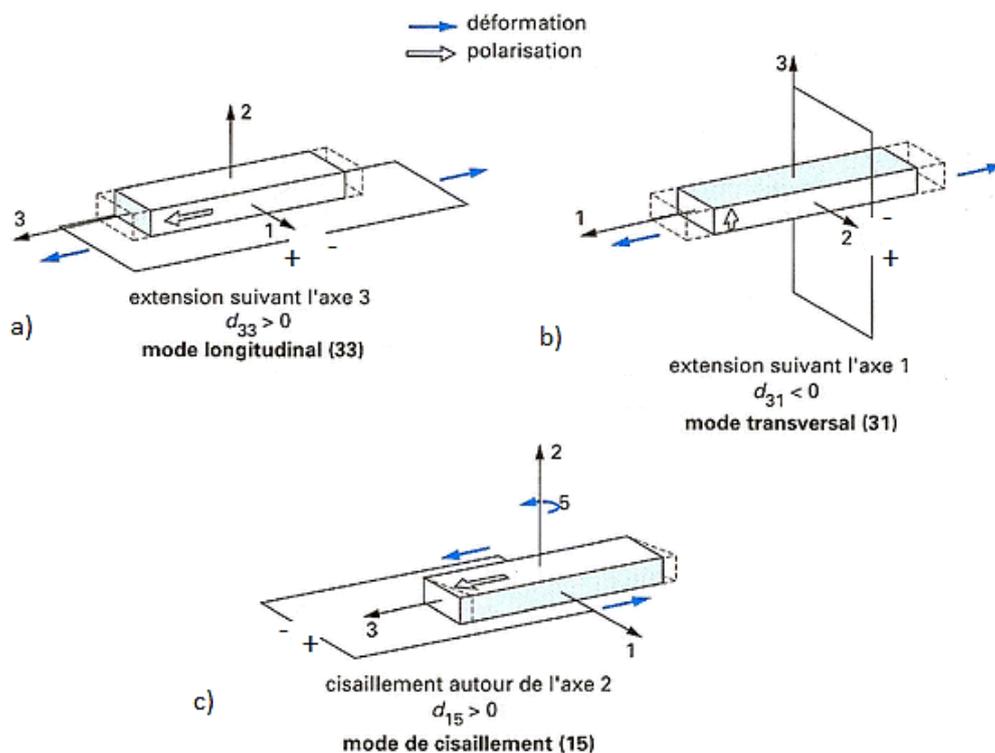


Figure 3.16: Modes de sollicitation d'une céramique (adapté d'après [38]).

Si une céramique est sollicitée selon les modes 33 ou 31, les équations de la piézoélectricité peuvent s'écrire de manière simple:

$$S = \frac{T}{Y} + dE \quad \text{Eq.(3.20)}$$

$$D = dT + \varepsilon E \quad \text{Eq.(3.21)}$$

avec Y - module de Young selon la direction de déformation. Toutes les constantes et grandeurs utilisées sont caractéristiques du mode donné.

3.2.2.3 Les grandeurs électriques

La relation entre l'induction électrique et le champ électrique est donnée par :

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \text{Eq.(3.22)}$$

avec \mathbf{P} – polarisation du matériau piézoélectrique.

L'induction électrique correspond à la densité surfacique des charges sur les électrodes. Ceci peut être facilement démontré avec la loi de Gauss :

$$\Phi_D = Q_f \quad \text{Eq.(3.23)}$$

$$\Phi_D = \oiint \vec{D} \cdot \vec{dA} \quad \text{Eq.(3.24)}$$

Le flux de l'induction électrique à travers une surface fermée (Φ_D) est égal à la charge libre (Q_f) contenue dans le volume que la surface (A) entoure. On peut appliquer la loi à un piézoélectrique sollicité mécaniquement ayant deux électrodes sur des faces opposées (Figure 3.17). Une certaine distribution de charges fixes va être générée à l'intérieur du matériau. Les charges externes vont se déplacer d'une électrode à l'autre, créant une distribution de charges libres.

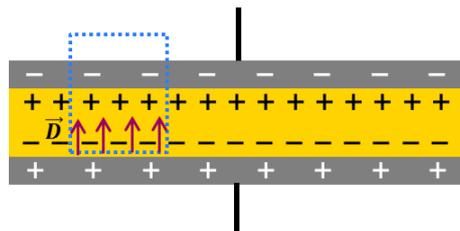


Figure 3.17: Distribution des charges dans un piézoélectrique sollicité mécaniquement.

La densité de charges fixes correspond à la polarisation du matériau :

$$P = \sigma_f \quad \text{Eq.(3.25)}$$

Considérons une surface fermée sous forme de parallélépipède, ayant un axe perpendiculaire aux faces du piézoélectrique et chevauchant une des électrodes. Si on considère que la couche de piézoélectrique est fine, ce qui est souvent le cas, l'induction électrique à l'intérieur de la couche sera parallèle à l'axe de sollicitation. Par conséquent, le flux du vecteur induction à travers les faces latérales de la surface considérée sera nul. Ce sera également le cas à l'extérieur de l'ensemble des matériaux, car l'induction est nulle dans cette zone. Le flux total sera donc déterminé par la face basse, perpendiculaire au vecteur induction :

$$\Phi_D = D \cdot A_{\perp} \quad \text{Eq.(3.26)}$$

La charge libre entourée par la surface de calcul n'est autre que la charge contenue sur la partie d'électrode chevauchée. En notant σ_{el} la densité de charges correspondante :

$$D \cdot A_{\perp} = \sigma_{el} \cdot A_{\perp} \quad \text{Eq.(3.27)}$$

Et par conséquence

$$D = \sigma_{el} = \frac{Q}{S} \quad \text{Eq.(3.28)}$$

L'induction électrique est donc égale à la densité des charges externes pour un piézoélectrique. Solliciter un piézoélectrique en circuit ouvert revient à solliciter sous une induction électrique constante ou nulle.

L'intensité du champ électrique et le potentiel sont reliés par :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} V \quad \text{Eq.(3.29)}$$

Une déformation constante à l'intérieur du piézoélectrique engendre un champ électrique constant. On peut donc écrire :

$$\Delta V = E \cdot h \quad \text{Eq.(3.30)}$$

avec h – épaisseur du piézoélectrique. Solliciter un piézoélectrique en court-circuit équivaut donc à le solliciter à champ nul.

En circuit ouvert, quand le piézoélectrique n'est pas préchargé, les charges externes sont empêchées de circuler et donc $D=0$. On peut déduire l'expression de la tension dans ce cas à partir de Eq.(3.11):

$$V_{OC} = -\frac{d}{\varepsilon} T h \quad \text{Eq.(3.31)}$$

Elle est donc proportionnelle à la contrainte T et à l'épaisseur de piézoélectrique h. La constante de proportionnalité - d/ε, également notée g, est appelée constante de tension.

3.2.2.4 Le coefficient de couplage

Un matériau piézoélectrique ne se déforme pas de la même manière s'il est sollicité en court-circuit ou en circuit ouvert. En effet, les souplesses ne sont pas les mêmes dans les deux cas, vu que le premier correspond à un champ électrique nul et le second à une induction électrique nulle. Cette différence de comportement est illustrée dans la Figure 3.18.

Quand un matériau piézoélectrique est sollicité mécaniquement en circuit ouvert, le champ électrique créé est directement proportionnel à la contrainte imposée. Le matériau emmagasine donc de l'énergie sous forme mécanique élastique et sous forme électrique. Quand le matériau est sollicité en court-circuit, il emmagasine de l'énergie uniquement sous forme mécanique, car le champ électrique reste nul. Si le matériau après déformation en circuit ouvert est branché à une charge électrique, il se vide de son énergie électrique et fournit un travail électrique. Le chemin correspondant à ce cycle d'énergie est le trajet A-B-C-A de la Figure 3.18.

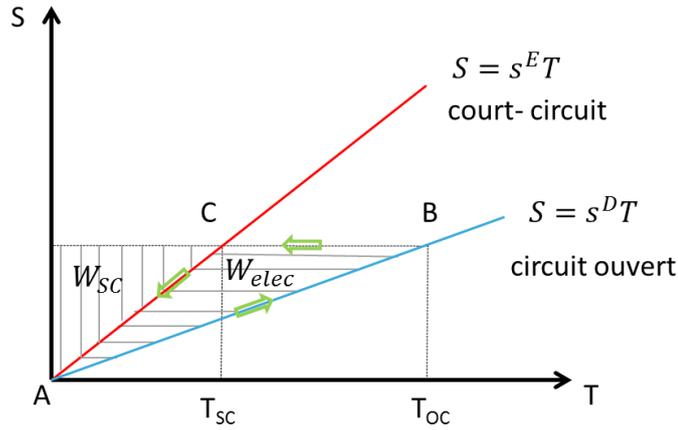


Figure 3.18: Déformation en court-circuit et en circuit ouvert d'un piézoélectrique. Décharge à déformation constante.

La constante piézoélectrique qui définit le rapport entre l'énergie totale emmagasinée et l'énergie électrique récupérable est le facteur de couplage k :

$$k^2 = \frac{W_{elec}}{W_{OC}} = \frac{W_{OC} - W_{SC}}{W_{OC}} \quad \text{Eq.(3.32)}$$

La densité volumique de l'énergie accumulée pour une contrainte donnée correspond à l'aire du triangle entre chaque courbe et l'axe des déformations:

$$w = \frac{1}{2}ST = \frac{1}{2}sT^2 \quad \text{Eq.(3.33)}$$

En introduisant cette expression dans Eq.(3.32), on déduit :

$$k^2 = 1 - \frac{s^D}{s^E} \quad \text{Eq.(3.34)}$$

Le coefficient de couplage définit donc le rendement mécano-électrique lors de la décharge à déformation constante. C'est un coefficient sans unité, permettant une comparaison facile des matériaux piézoélectriques. Il est caractéristique d'un mode de sollicitation donné. On peut également l'exprimer en fonction de la constante de charge d et de la permittivité diélectrique correspondant au mode recherché [42] :

$$k = \frac{d}{\sqrt{s^E \epsilon^T}} \quad \text{Eq.(3.35)}$$

Dans le cas où le piézoélectrique est sollicité en mode 31 ou 33, on peut définir k en fonction du module de Young, égal à l'inverse de la souplesse à champ constant :

$$k = d \sqrt{\frac{Y}{\epsilon^T}} \quad \text{Eq.(3.36)}$$

3.2.3 Matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques utilisés à présent sont de plusieurs types. On distingue des matériaux cristallins (quartz, PMN-PT, GaPO₄), céramiques (PZT, BaTiO₃, LiNbO₃), polymères (PVDF) ou composites (PZT-PVDF). Les céramiques sont les matériaux les plus utilisés. Ceci est dû aux constantes piézoélectriques fortes aussi bien qu'aux formes variées qui peuvent être conçues. Elles ont aussi des coefficients de qualité forts, ce qui implique des faibles pertes mécaniques.

Parmi les familles de céramiques existantes la plus utilisée a une structure de type pérovskite à haute température. Il s'agit d'une composition de formule générique ABO₃, avec une maille cubique. Les atomes de types A peuvent être du groupe Ba, Ca, Pb. Ceux de type B peuvent être du groupe Ti, Zr, Nb [40]. La maille est centro-symétrique au-dessus de la température limite d'utilisation, appelée aussi température de Curie. Le matériau ne manifeste pas de propriétés piézoélectriques dans ces conditions. Si la température baisse en dessous de T_{Curie}, la maille devient dissymétrique suite aux dislocations et acquiert des propriétés piézoélectriques. Ce changement de phase implique la séparation des barycentres de charge et l'apparition d'une polarisation (Figure 3.19). Les matériaux manifestant une polarisation spontanée sont appelés ferroélectriques.

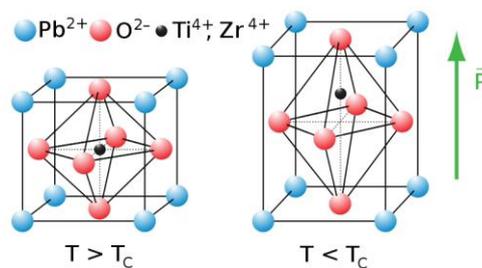


Figure 3.19: Structure de type pérovskite au-dessus (gauche) et en dessous (droite) de la température de Curie.

Sans traitement spécifique les mailles contiguës se regroupent en plusieurs domaines ayant des polarisations orientées dans des directions différentes et globalement le matériau n'est pas polaire. Pour qu'il acquière cette propriété il est nécessaire d'aligner les polarisations de tous les domaines dans le même sens. Ceci est fait en appliquant un fort champ électrique au matériau proche de sa température de Curie. L'effet de ce traitement est l'agrandissement des domaines à polarisation parallèle au champ électrique au détriment des autres. Une fois ce traitement fini, le matériau garde une polarisation permanente (Figure 3.20). A ce stade il est en état allongé dans la direction du champ appliqué.

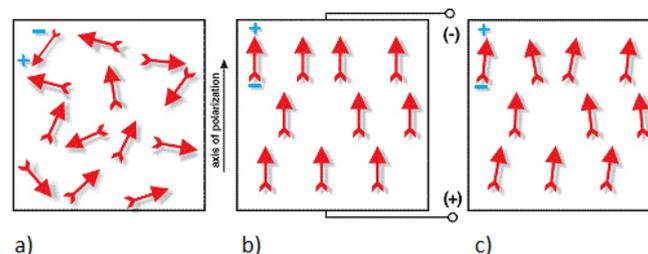


Figure 3.20: Etape de polarisation d'une céramique : a) orientation spontanée des domaines avant polarisation ; b) polarisation en imposant un champ électrique externe ; c) polarisation rémanente [39].

Si la direction du champ imposé est inversée, la polarisation va diminuer et s'inverser aussi. On peut ainsi générer une polarisation rémanente de sens différent. Somme faite, la polarisation évolue en fonction du champ imposé selon un cycle d'hystérésis (Figure 3.21 a). Pour rétablir une polarisation nulle à partir de cet état, il est nécessaire d'appliquer une intensité égale à celle du champ

coercitif E_c . L'évolution typique de la déformation du matériau soumis au champ de polarisation est donnée dans la (Figure 3.21b). En pratique on constate une élongation selon l'axe de polarisation et une contraction dans le plan perpendiculaire.

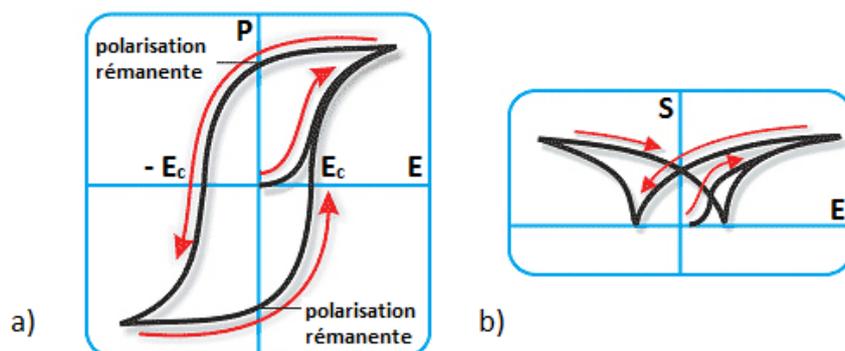


Figure 3.21: a) cycle d'hystérésis d'un céramique ferroélectrique ; b) déformation lors du cycle d'hystérésis en fonction du champ électrique appliqué [39].

Les céramiques piézoélectriques sont synthétisées par frittage. On part d'un mélange de poudres, qui est mis en forme en y ajoutant un ligand organique. Après le mélange est porté à haute température et mis sous pression. A l'issue de cette opération la densité souhaitée est atteinte. Les échantillons obtenus ainsi sont mis en forme selon les spécifications. On dépose après des électrodes sur les faces d'intérêt. Parmi les céramiques les plus utilisées on compte la PZT ($\text{Pb}[\text{Zr}(x)\text{Ti}(1-x)]\text{O}_3$) et le titanate de baryum (BaTiO_3).

Afin d'avoir des coefficients piézoélectriques supérieurs à ceux des céramiques, des matériaux monocristallins ont été synthétisés à partir d'éléments chimiques similaires. C'est le cas des monocristaux de type PMN-PT ($(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3] - x[\text{PbTiO}_3]$) et PZN-PT ($(1-x)[\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3] - x[\text{PbTiO}_3]$). La synthèse de ces matériaux peut se faire avec la méthode de Bridgman [43]. La contrepartie des coefficients piézoélectriques hauts est la fragilité et le coût élevé de fabrication. Aussi la température de Curie de ces matériaux est basse.

Les polymères piézoélectriques sont synthétisés par polymérisation de radicaux. Dans le cas du PVDF on cherche à former des chaînes de type $-\text{[CH}_2\text{-CF}_2\text{]}-$. La copolymérisation de radicaux de nature différente est possible.

Des nouveaux matériaux ont gagné en popularité ces dernières années, notamment dû à la possibilité de synthèse en couche mince et intégration à échelle microscopique. Il s'agit notamment du nitrure d'aluminium (AlN) et de l'oxyde de zinc (ZnO). Le nitrure d'aluminium se dépose par pulvérisation, et présente l'avantage des hauts coefficients de tension et d'une forte conductivité thermique ([44], [45]). Le ZnO a été synthétisé sous forme de nano-fils ([46], [47]). Outre les propriétés piézoélectriques, il peut être utilisé en tant que semi-conducteur. La combinaison des deux propriétés ouvre des nouvelles voies d'application. Des travaux sur le dépôt de PZT en couches minces ont également été faits [48].

Les propriétés des principaux matériaux piézoélectriques sont données dans le Tableau 3.2.

<i>Matériaux</i>		<i>Constantes</i>		ρ	Y	ϵ_{r33}	d_{33}	d_{31}	s_{33}	k_{33}	k_{31}	T_c	W_{max}	Référence
		kg/m ³	GPa		pC/N	pC/N	10 ⁻¹² m ² /N			°C	mJ/cm ³			
<i>Céramiques</i>	PZT-4	7650	60		335	-123	14.4	0.67	0.32	300	56	[49]		
	PZT-5	7400	65		620	-250	21.9	0.72	0.35	200				
	PZT-8	7650	93		230	-93	15.7	0.69	0.29	300				
<i>Polymères</i>	PVDF (mono-orienté)	1780	3.2		-20	20	89	0.16	0.11	135	0.06			
	PVDF (bi-orienté)	1800	2.5		-20	5				75				
	Copolymère PVDF-TrFE	1900	1.1		-24	6				110				
<i>Composites</i>	MFC		30		460	-200		0.6		66	30			
	AFC	2170			260		40							
<i>Monocristaux</i>	Quartz	2650		4.5	2.31	0.73							[50]	
	PMN-PT	8000				-569	25		0.73	120	500		[51]	
<i>Couches minces/nanofils</i>	AlN			10	6.8	2.63	0.31					[50]		
	ZnO			11	12.3	5.1		0.46	0.18					
	PZT			1160		2.63								

Tableau 3.2: Constantes piézoélectriques pour les différentes classes de matériaux

3.3 Comportement d'une poutre piézoélectrique sous une sollicitation en mode choc.

3.3.1 Modèles à constantes localisées. Equations du comportement.

Dans le cadre du présent travail les éléments piézoélectriques utilisés subissent des sollicitations sous forme de choc. Il est intéressant de modéliser leur comportement afin de comprendre l'influence des différents paramètres sur l'amplitude du signal généré et aussi sur le rendement mécano-électrique. Il existe divers modèles pour la simulation du comportement d'un convertisseur mécano-électrique. On distingue des modèles mécaniques, électriques et couplés. On les appelle des modèles à constantes localisées car ils séparent les systèmes en éléments, chacun correspondant à une propriété physique.

3.3.1.1 Modèle générique pour la conversion mécano-électrique.

Un des premiers modèles pour la conversion mécano-électrique a été proposé par Williams et Yates [52]. Il consiste en un système résonnant à base d'une masse, d'un ressort et d'un amortisseur. Ce dernier peut être séparé en deux amortisseurs : un tenant compte de l'amortissement mécanique et l'autre de l'amortissement électrique du système [53] (Figure 3.22).

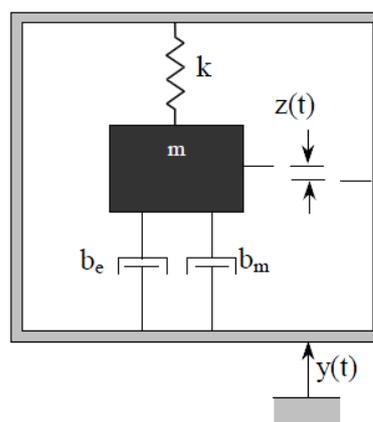


Figure 3.22: Modèle générique d'un convertisseur mécano-électrique [53].

L'équation correspondant à ce modèle est la suivante:

$$m\ddot{z} + (b_e + b_m)\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad \text{Eq.(3.37)}$$

avec m – masse équivalente, b_m et b_e – coefficients d'amortissement mécanique et électrique (ou viscosités) et k –raideur du ressort. Le déplacement du cadre où le tout est fixé est noté $y(t)$ et le déplacement de la masse par rapport au cadre $z(t)$.

Ce modèle est convenable dans le cas d'une sollicitation vibratoire. En effet, l'équation du système à une solution simple si le déplacement imposé $y(t)$ est sinusoïdal. Si on suppose que la fréquence cyclique de sollicitation est ω et en passant dans l'espace de Laplace, on obtient [50] :

$$Z(\omega) = \frac{-\frac{1}{\omega_0^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} + j\left(\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_e}\right)\frac{\omega}{\omega_0}} A_{in} \quad \text{Eq.(3.38)}$$

avec $A_{in}(\omega) = -\omega^2 Y(\omega)$ – accélération imposée, ω_0 – fréquence propre du système, Q_m – facteur de qualité mécanique, Q_e – facteur de qualité électrique. Ces constantes s'expriment comme :

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \\ Q_m = \frac{\sqrt{km}}{b_m} \\ Q_e = \frac{\sqrt{km}}{b_e} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.39)}$$

La puissance débitée dans la charge électrique s'écrit comme :

$$P(\omega) = -b_e \omega^2 Z^2(\omega) \quad \text{Eq.(3.40)}$$

La puissance maximale est atteinte quand la fréquence de sollicitation est égale à la fréquence propre du système. L'oscillateur entre en résonance avec la sollicitation externe. La puissance résultante s'écrit comme :

$$P(\omega_0) = \frac{\frac{1}{Q_e}}{\left(\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_e}\right)^2} \cdot \frac{A_{in}^2 \sqrt{km}}{\omega_0^2} \quad \text{Eq.(3.41)}$$

La puissance électrique à la résonance est donc proportionnelle au carré de l'amplitude de l'accélération. Elle est maximisée lorsque le facteur de qualité mécanique est égal au facteur de qualité électrique. C'est un des résultats importants du modèle. Ceci veut dire qu'un circuit électrique qui absorbe l'énergie de manière plus efficace que l'amortissement mécanique n'est pas avantageux. En effet, un tel circuit freinerait trop la masse et l'empêcherait de développer un déplacement convenable. Ce résultat est valable dans le cas des oscillations sinusoïdales entretenues. On verra par la suite que ce n'est pas le cas pour une excitation en mode choc.

3.3.1.2 *Modèle pour les convertisseurs piézoélectriques. Oscillations et chocs.*

Afin d'analyser le comportement d'un piézoélectrique, il est nécessaire de disposer d'un modèle analytique regroupant les constantes mécaniques et électriques et faisant le passage entre les deux domaines. Le modèle le plus adapté à notre étude ([53], [54], [55]) permet de représenter une poutre piézoélectrique comme un circuit à deux branches : mécanique et électrique, avec un transformateur entre les deux (Figure 3.23).

Le raisonnement pour la mise en circuit des paramètres mécaniques repose sur l'équivalence avec des paramètres électriques qui découle des équations caractéristiques. Ainsi, la masse (m) se comporte comme une bobine, le ressort comme un condensateur dont la capacité est inversement proportionnelle à la raideur (k). L'amortisseur mécanique (b_m) est équivalent à une résistance. Tous ces paramètres composent la branche mécanique et sont reliés en série. La branche électrique est

composée de la capacité du piézoélectrique (C_p) et de l'impédance de charge (Z_L). Le transformateur qui relie les deux branches est caractérisé par la constante de conversion Γ . Dans ce modèle le déplacement du piézoélectrique (z) est équivalent à une tension et la vitesse (\dot{z}) à une intensité.

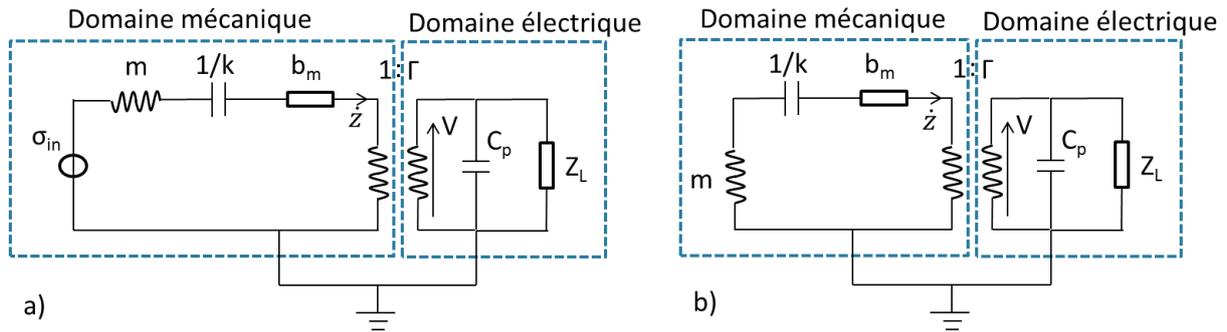


Figure 3.23: Circuit équivalent d'un piézoélectrique : a) en sollicitation mécanique entretenue ; b) en mode choc (adapté de [53], [55]).

Dans le cas où le piézoélectrique est sollicité de manière continue, un générateur de contraintes peut être introduit dans la branche mécanique (σ_{in}) (Figure 3.23 a). Si la sollicitation est sous forme de choc, ceci équivaut à l'apparition instantanée d'une vitesse v_0 dans la branche mécanique. Si la charge branchée est purement résistive (R_L) les équations du système s'écrivent :

$$\begin{cases} m\ddot{z} + b_m\dot{z} + kz + \Gamma V = 0 \\ \Gamma\dot{z} - C_p\dot{V} - \frac{V}{R_L} = 0 \end{cases} \quad \text{Eq.(3.42)}$$

avec V – tension dans la branche électrique. Le choc considéré ici est bref, la structure piézoélectrique étant libre de vibrer après. On considère que le point d'application du choc est choisi de manière à exciter le mode fondamental de vibration de la structure.

Différents cas de figure sont possibles en mode choc en fonction de la résistance branchée. Trois de ces cas présentent un intérêt particulier: le court-circuit, la résistance optimale en sortie et le circuit ouvert. Les trois ont été traités dans le cadre de ce travail. Le calcul de la tension en sortie et du déplacement en fonction du temps ont été faits pour chacune de ces situations. Le cheminement suivi ainsi que les conclusions qui en découlent sont présentées dans les paragraphes qui suivent.

Il est à mentionner que dans certains cas plusieurs modes de vibration peuvent être excités suite à un choc sur un piézoélectrique. Des oscillations mécaniques ayant des différentes fréquences se superposeront alors dans la même structure. Une manière d'analyser ceci est d'introduire dans le schéma équivalent plusieurs branches mécaniques avec un transformateur dédié pour chacune. Ce type de description a déjà été utilisé par certains auteurs pour des oscillations forcées [56]. Dans le cadre de ce travail, la plupart des signaux électriques recueillis présentent un seul mode d'oscillation, et par conséquent une seule branche mécanique est suffisante pour la modélisation.

3.3.2 Cas particulier : comportement en court-circuit.

Quand un piézoélectrique est mis en court-circuit, la résistance en sortie est nulle : $R_L=0$ et la tension aussi : $V(t)=0$. Il résulte que la seule équation nécessaire pour caractériser le système est :

$$m\ddot{z} + b_m\dot{z} + kz = 0 \quad \text{Eq.(3.43)}$$

Mettre le piézoélectrique en court-circuit revient à réduire son comportement à celui d'une simple poutre élastique. L'expression du déplacement en fonction du temps résultante est :

$$z(t) = \frac{2mv_0}{\sqrt{4mk - b_m^2}} \cdot e^{-\frac{b_m}{2m}t} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{4mk - b_m^2}}{2m} \cdot t\right) \quad \text{Eq.(3.44)}$$

Afin de donner un meilleur sens physique à l'écriture on peut définir un nouveau groupe de paramètres, plus généraux [55] :

Paramètre	Expression
Fréquence angulaire propre de l'oscillateur	$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$
Fréquence angulaire de coupure du circuit RC	$\omega_e = \frac{1}{R_L C_p}$
Ratio des fréquences angulaires mécanique et électrique	$\Psi = \frac{\omega_0}{\omega_e}$
Facteur de qualité mécanique	$Q_m = \frac{\sqrt{km}}{b_m}$
Facteur de couplage généralisé	$K_g = \frac{\Gamma}{\sqrt{kC_p}}$
Facteur de couplage équivalent	$K_e = \sqrt{\frac{K_g^2}{1 + K_g^2}}$

Tableau 3.3: Paramètres caractéristiques d'une structure piézoélectrique

Le carré du facteur de couplage généralisé correspond au rapport entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique emmagasinée dans une structure piézoélectrique sollicitée en circuit ouvert. Le facteur de couplage équivalent est défini de la même manière que pour un piézoélectrique et est valable pour une structure contenant une couche piézoélectrique est une couche support.

L'expression du déplacement devient alors :

$$z(t) = \frac{v_0}{\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_m^2}}} \cdot e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_m}} \cdot \sin\left(\omega_0 t \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_m^2}}\right) \quad \text{Eq.(3.45)}$$

Par conséquent, dans le cas d'un court-circuit, le mouvement de la poutre après choc consiste en une oscillation amortie. Les constantes piézoélectriques n'ont pas d'influence sur le résultat. L'amplitude du mouvement est directement proportionnelle à la vitesse initiale. Le facteur de qualité mécanique est en lien direct avec le taux d'amortissement. La poutre est faiblement amortie si Q_m est grand. Il a également un impact sur la fréquence angulaire des oscillations qui est plus faible que la fréquence propre, sans amortissement. Dans le cas où le facteur de qualité est supérieur à 10 l'expression du déplacement peut être simplifiée à:

$$z(t) = \frac{v_0}{\omega_0} \cdot e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_m}} \cdot \sin(\omega_0 t) \quad \text{Eq.(3.46)}$$

Dans ce cas le facteur de qualité ne se répercute que sur le taux d'amortissement.

3.3.3 Cas particulier : comportement en circuit ouvert

Un autre cas particulier d'intérêt est le comportement de la structure piézoélectrique en circuit ouvert. Dans ce cas la résistance de charge est infinie : $R_L = \infty$. En appliquant la transformation de Laplace et sachant que $V/R_L=0$, Eq.(3.42) devient :

$$\begin{cases} m(s^2 \bar{z} - v_0) + D_v s \bar{z} + k \bar{z} + \Gamma \bar{V} = 0 \\ \Gamma s \bar{z} - C_p s \bar{V} = 0 \end{cases} \quad \text{Eq.(3.47)}$$

avec \bar{V} et \bar{z} – tension et déplacement dans l'espace de Laplace. Par conséquence, la transformée de la tension s'exprime comme :

$$\bar{V} = \frac{m v_0 \Gamma}{m C_p s^2 + D_v C_p s + k C_p + \Gamma^2} \quad \text{Eq.(3.48)}$$

A partir de cette équation on peut déduire l'expression de la tension en fonction du temps en passant par une transformée inverse de Laplace :

$$V(t) = \frac{v_0 \Gamma}{C_p \sqrt{\frac{k}{m} + \frac{\Gamma^2}{m C_p} - \left(\frac{D_v}{2m}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{t}{\frac{2m}{D_v}}} \cdot \sin\left(t \sqrt{\frac{k}{m} + \frac{\Gamma^2}{m C_p} - \left(\frac{D_v}{2m}\right)^2}\right) \quad \text{Eq.(3.49)}$$

En utilisant des paramètres modifiés la tension s'exprime comme :

$$V(t) = v_0 \sqrt{\frac{m}{C_p}} \cdot \frac{K_g}{\sqrt{1 + K_g^2 - \frac{1}{4Q_m^2}}} \cdot e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_m}} \cdot \sin\left(\omega_0 t \sqrt{1 + K_g^2 - \frac{1}{4Q_m^2}}\right) \quad \text{Eq.(3.50)}$$

D'après cette expression l'amplitude de la tension en mode choc est donc directement proportionnelle à vitesse initiale imprimée au piézoélectrique. L'amortissement se produit uniquement de manière mécanique, ce qui est mis en évidence par l'exposant de la partie exponentielle. Un facteur de couplage généralisé nul implique une tension nulle en sortie. Plus le facteur de couplage K_g est grand, plus l'amplitude de la tension est grande, ce qui est un résultat attendu. La fréquence angulaire d'oscillation se voit modifiée par rapport au cas d'un court-circuit. Elle augmente avec le facteur de couplage généralisé K_g .

Dans le cas où le facteur de qualité mécanique est supérieur à 10, situation la plus souvent rencontré avec nos dispositifs, la tension s'écrit :

$$V(t) = v_0 \sqrt{\frac{m}{C_p}} \cdot K_e \cdot e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_m}} \cdot \sin\left(\omega_0 t \sqrt{1 + K_g^2}\right) \quad \text{Eq.(3.51)}$$

Le premier pic de tension aura une valeur :

$$V_{max1} = v_0 \sqrt{\frac{m}{C_p}} \cdot K_e \quad \text{Eq.(3.52)}$$

L'énergie électrique stockée dans le piézoélectrique lors du premier pic est :

$$E_1 = \frac{C_p V_{max1}^2}{2} = K_e^2 \cdot \frac{m v_0^2}{2} = K_e^2 E_{k0} \quad \text{Eq.(3.53)}$$

avec E_{k0} – énergie cinétique initiale. L'énergie électrique correspondant au premier pic de tension est donc égale au produit entre l'énergie cinétique initiale de la structure piézoélectrique et le carré du facteur de couplage équivalent. C'est un résultat important pour la caractérisation d'une structure piézoélectrique après choc. En connaissant le facteur de couplage équivalent et la capacité de l'élément étudié, il suffit de mesurer la valeur du premier pic de tension pour remonter à l'énergie cinétique injectée.

Le déplacement du piézoélectrique en fonction du temps peut être calculé à partir de l'expression pour la tension. On déduit de Eq.(3.42) qu'en circuit ouvert le déplacement est proportionnel à la tension :

$$z(t) = \frac{C_p}{\Gamma} \cdot V(t) \quad \text{Eq.(3.54)}$$

L'expression du déplacement est la suivante :

$$z(t) = \frac{v_0}{\omega_0 \sqrt{1 + K_g^2 - \frac{1}{4Q_m^2}}} \cdot e^{-\frac{\omega_0 t}{2Q_m}} \cdot \sin\left(\omega_0 t \sqrt{1 + K_g^2 - \frac{1}{4Q_m^2}}\right) \quad \text{Eq.(3.55)}$$

A partir de cette dernière équation et de Eq.(3.45) on peut écrire les expressions de la fréquence d'oscillation en court-circuit et en circuit ouvert :

$$\begin{cases} f_{sc} = f_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_m^2}} \\ f_{oc} = f_0 \sqrt{1 + K_g^2 - \frac{1}{4Q_m^2}} \end{cases} \quad \text{Eq.(3.56)}$$

avec f_{SC} – fréquence d’oscillation en court-circuit, f_{OC} – fréquence d’oscillation en circuit ouvert. La relation entre la fréquence d’oscillation et la fréquence angulaire est $f = \omega / 2\pi$.

Il résulte la relation suivante pour le facteur de couplage généralisé, pour tout facteur de qualité mécanique:

$$K_g^2 = \frac{f_{OC}^2 - f_{SC}^2}{f_0^2} \quad \text{Eq.(3.57)}$$

avec f_0 – fréquence propre d’oscillation.

Pour un facteur de qualité mécanique supérieur à 10:

$$K_g^2 = \frac{f_{OC}^2 - f_{SC}^2}{f_{SC}^2} \quad \text{Eq.(3.58)}$$

Dans ce cas le facteur de couplage équivalent de la structure s’exprime comme :

$$K_e^2 = \frac{f_{OC}^2 - f_{SC}^2}{f_{OC}^2} \quad \text{Eq.(3.59)}$$

Cette expression coïncide avec celle déduite pour les piézoélectriques sollicités avec des vibrations forcées. Elle offre un moyen simple pour le calcul expérimental du facteur de couplage d’une structure à piézoélectrique. En effet, il suffit de mesurer les fréquences après excitation en circuit ouvert et en court-circuit pour y remonter.

3.3.4 Cas particulier : comportement avec une impédance adaptée

Vu qu’un piézoélectrique fournit une énergie électrique nulle dans les deux cas extrêmes : impédance en sortie nulle et impédance infinie, il existe forcément une valeur d’impédance en sortie pour laquelle la valeur de l’énergie fournie est maximale. Pour déduire son expression on peut partir de la transformée de Laplace de la tension dans le cas général [55]:

$$\bar{V} = \frac{v_0}{\omega_0} \cdot \frac{R_L \Gamma \frac{s}{\omega_0}}{1 + \left[\Psi(1 + K_g^2) + \frac{1}{Q_m} \right] \cdot \frac{s}{\omega_0} + \left(1 + \frac{\Psi}{Q_m} \right) \cdot \frac{s^2}{\omega_0^2} + \Psi \frac{s^3}{\omega_0^3}} \quad \text{Eq.(3.60)}$$

Il a été montré que si $Q_m \gg 1/K_g^2$ et pour une résistance de charge telle que $\Psi/Q_m \ll 1$, l’amortissement mécanique peut être négligé dans l’expression de la tension:

$$\bar{V} = \frac{v_0}{\omega_0} \cdot \frac{R_L \Gamma \frac{s}{\omega_0}}{1 + [\Psi(1 + K_g^2)] \cdot \frac{s}{\omega_0} + \frac{s^2}{\omega_0^2} + \Psi \frac{s^3}{\omega_0^3}} \quad \text{Eq.(3.61)}$$

Dans ce cas, la structure perd de l’énergie uniquement par le travail électrique effectué. Parmi toutes les résistances de charge possibles, la résistance optimale sera celle qui permet de drainer l’énergie du

piézoélectrique le plus rapidement. L'expression de la résistance optimale, de la fréquence angulaire et de la tension correspondantes sont les suivantes [55]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{opt} = \frac{1}{\omega_0 C_p \left(1 + \frac{K_g^2}{2}\right)} \\ \omega_{opt} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{K_g^2}{2} \left(1 - \frac{K_g^2}{8}\right)} \\ V(t) = -\frac{v_0 \Gamma}{2C_p \omega_0} e^{-\omega_0 t} + \frac{v_0 \Gamma}{2C_p} e^{-\frac{K_g^2 \omega_0}{4} t} \cdot \left(\frac{\cos(\omega_{opt} t)}{\omega_0} + \left(1 - \frac{K_g^2}{2}\right) \frac{\sin(\omega_{opt} t)}{\omega_{opt}} \right) \end{array} \right. \quad \text{Eq.(3.62)}$$

Pour des valeurs de $K_g^2 < 0.1$, ce qui est souvent le cas en pratique, l'expression de la résistance optimale est proche de la valeur absolue de l'impédance correspondant à la capacité C_p sollicitée à la fréquence propre ω_0 :

$$R_{opt} \approx \frac{1}{C_p \omega_0} \quad \text{Eq.(3.63)}$$

Dans cette approximation on peut dire que l'adaptation d'impédance se fait par rapport à la capacité du piézoélectrique.

L'expression de la tension $V(t)$ correspond à des oscillations amorties. Le déplacement en fonction du temps peut être calculé à partir de Eq.(3.42):

$$z(t) = \frac{C_p}{\Gamma} \cdot V(t) + \frac{1}{\Gamma R_{opt}} \cdot \int V dt \quad \text{Eq.(3.64)}$$

Dans le cas où $K_g^2 < 0.1$ on a :

$$z(t) = \frac{v_0}{\omega_0} e^{-\frac{K_g^2 \omega_0}{4} t} \cdot \sin(\omega_0 t) \quad \text{Eq.(3.65)}$$

Le déplacement de la structure est amorti uniquement de manière électrique. Quasiment toute l'énergie mécanique insérée sera transformée en énergie électrique, car l'amortissement mécanique est négligeable. A partir de cette expression on peut définir un facteur de qualité électrique dans le cas d'une résistance optimale en sortie:

$$Q_e = \frac{2}{K_g^2} \quad \text{Eq.(3.66)}$$

3.3.5 Le rendement mécano-électrique

Les équations dans les cas extrêmes d'intérêt étant déduites, il est intéressant de connaître le rendement mécano-électrique qu'un piézoélectrique peut assurer en fonction de ses paramètres. Une évaluation numérique a été faite en premier temps.

Supposons un piézoélectrique avec les paramètres suivants : $m = 1 \text{ g}$, $k = 600 \text{ N/m}$, $C_p = 70 \cdot 10^{-9}$.

Ce sont des caractéristiques proches des cas pratiques rencontrés. Le rendement mécano-électrique a été évalué avec le logiciel Mathematica, en supposant une vitesse après impact de 10 cm/s. Le calcul a été fait à partir de la transformée de Laplace de la tension.

Pour commencer, le rendement a été calculé en fonction du facteur de de qualité mécanique et de la résistance en sortie, pour un $K_g = 0.3$, ce qui est proche des cas pratiques rencontrés. Le graphique correspondant est donné dans la Figure 3.24. On remarque le fait que le rendement augmente avec le facteur de qualité mécanique. L'augmentation est rapide pour les petites valeurs de Q_m et devient plus lentes ensuite. La dépendance de la résistance passe par un maximum, qui correspond à la résistance optimale. Il a été vérifié de manière numérique cette dernière ne dépend pas du facteur de qualité mécanique.

La résistance étant fixée à sa valeur optimale, le calcul du rendement mécano-électrique a été fait en fonction du facteur de couplage généralisé et du facteur de qualité mécanique. Le graphe correspondant est donné dans la Figure 3.25. On remarque le fait que le rendement augmente avec le facteur de couplage généralisé.

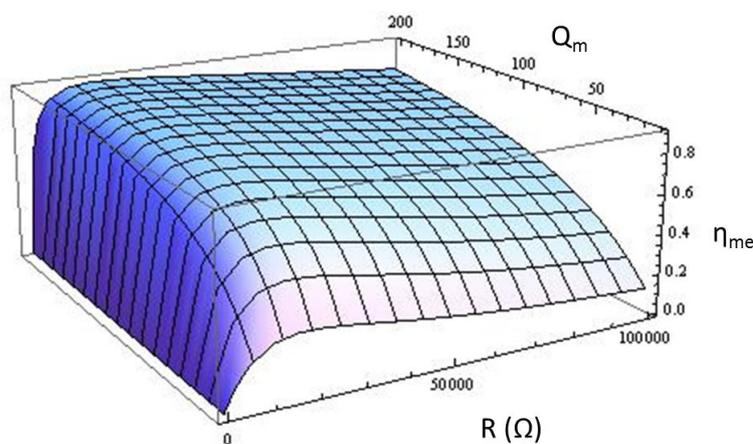


Figure 3.24 : Rendement mécano-électrique en fonction de la résistance et du facteur de qualité mécanique pour $K_g = 0.3$.

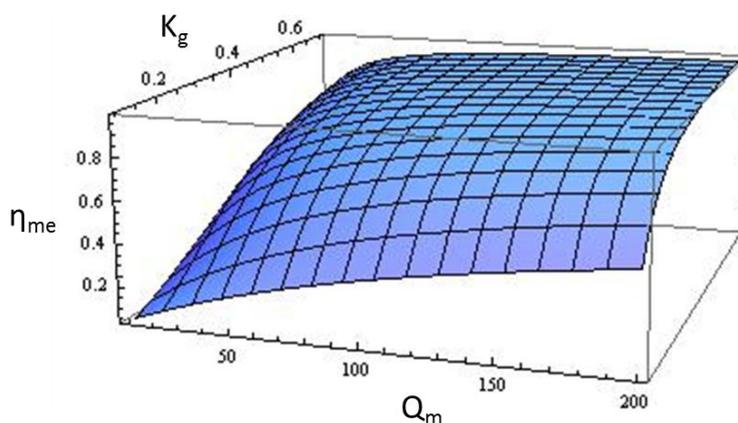


Figure 3.25: Rendement mécano-électrique en fonction du facteur de couplage généralisé et du facteur de qualité mécanique pour une résistance optimale en sortie.

On se rend donc compte que les paramètres dominant le rendement de conversion sont le facteur de qualité mécanique et le facteur de couplage généralisé. Il serait utile d'avoir à disposition

une expression analytique reliant les trois. Pour la déduire, il est possible de partir de l'expression du rendement en fonction des différentes énergies :

$$\eta_{me} = \frac{E_{el}}{E_m + E_{el}} = \frac{b_{el}}{b_m + b_{el}} \quad \text{Eq.(3.67)}$$

avec E_{el} – énergie amortie de manière électrique et E_m – énergie amortie de manière mécanique, b -coefficient d'amortissement correspondant à chacun des cas. Cette expression peut être écrite en fonction des facteurs de qualité mécanique et électrique:

$$\eta_{me} = \frac{\frac{1}{Q_{el}}}{\frac{1}{Q_m} + \frac{1}{Q_{el}}} \quad \text{Eq.(3.68)}$$

Le dernier étant donné pour une résistance optimale par l'Eq. 3.66, on peut écrire :

$$\eta_{me} = \frac{K_g^2 Q_m}{2 + K_g^2 Q_m} \quad \text{Eq.(3.69)}$$

Le rendement mécano-électrique dépend donc du produit $K_g^2 Q_m$, qui peut être utilisé comme facteur de mérite de la structure piézoélectrique. Le graphique correspondant est donné dans la Figure 3.26.

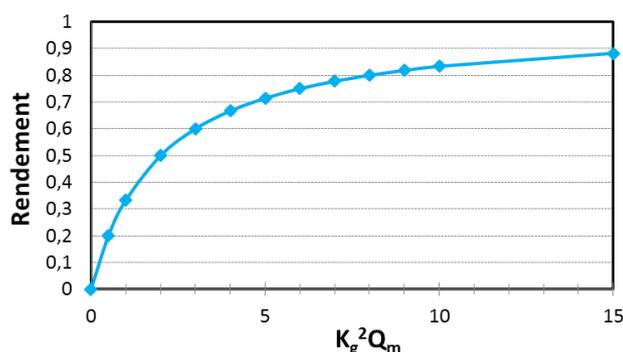


Figure 3.26: Rendement mécano-électrique pour une résistance optimale en fonction du produit entre le carré du facteur de couplage généralisé et le facteur de qualité mécanique.

Plus le produit $K_g^2 Q_m$ est grand, plus le rendement de conversion est important. Ainsi, pour une résistance optimale et un produit $K_g^2 Q_m$ égal à 0.5, le rendement est autour de 20%. Il faut avoir un produit égal à 3 pour un rendement de 60% et 15 pour approcher les 90%. Pour augmenter le rendement il faut donc limiter les pertes mécaniques dans la structure et utiliser des piézoélectriques à fort coefficient de couplage.

3.4 Les circuits de gestion de puissance. Stockage de l'énergie.

Le circuit de la gestion de puissance a le rôle de convertir le signal fourni par le piézoélectrique en énergie stockée. Il est donc nécessaire de faire une conversion AC-DC vu qu'un piézoélectrique vibrant fournit un signal alternatif. On peut distinguer deux catégories de circuits capables d'exercer ce type de fonction. La première est constituée par les circuits passifs. Ce sont des circuits qui n'ont pas besoin d'être alimentés. La deuxième est constituée par les circuits actifs, qui eux ont besoin d'être alimentés pour analyser le signal entrant et réagir en fonction de son évolution temporelle.

Une fois la conversion AC-DC faite, il est nécessaire d'accumuler l'énergie sur un élément de stockage. Des solutions très diverses peuvent être envisagées pour réaliser cette fonction. Quelques méthodes de traitement de signal et stockage sont discutées dans les paragraphes qui suivent. Les solutions développées par STMicroelectronics sont également présentées.

3.4.1 Les circuits passifs

L'exemple le plus simple de circuit passif est la résistance. Elle offre un moyen simple pour mesurer la puissance délivrée par un piézoélectrique vibrant. En effet, il suffit de trouver la résistance adaptée et de faire l'analyse du signal débité dedans. L'inconvénient d'une résistance est qu'elle ne permet pas de faire du stockage d'énergie, car la puissance incidente est dissipée par effet Joule.

La méthode la plus simple pour assurer le stockage est de brancher le piézoélectrique à une diode et un condensateur (Figure 3.27 a). Dans ce cas très simple, le courant ne peut passer que dans un seul sens et les charges seront gardées sur le condensateur. Ceci assure une récupération de l'énergie à partir de la moitié du signal généré. En ajoutant à ce montage une diode en parallèle avec le piézoélectrique (montage de type « voltage doubler ») il est possible d'augmenter les pics de tension fournis (Figure 3.27 b). Il s'agit ici de la tension mesurée en circuit ouvert. L'explication est le changement de référence pour la tension quand une diode est branchée en parallèle avec le piézoélectrique. Ainsi, par exemple, les pics négatifs peuvent être limités à la tension de seuil de la diode, sans que l'amplitude crête à crête change. Par conséquent, les pics positifs vont être plus importants et plus d'énergie pourra être récupérée par rapport à la configuration précédente. Si le seuil de la diode est bas, les pics positifs pourront même doubler en amplitude.

Afin de récupérer l'énergie électrique produite à l'aller aussi bien qu'au retour de la poutre pendant son oscillation il est possible de la brancher à un pont de diodes et un condensateur (Figure 3.27 c). Le comportement d'un piézoélectrique branché à ce type de circuit et la performance résultante a été étudiée dans [57].

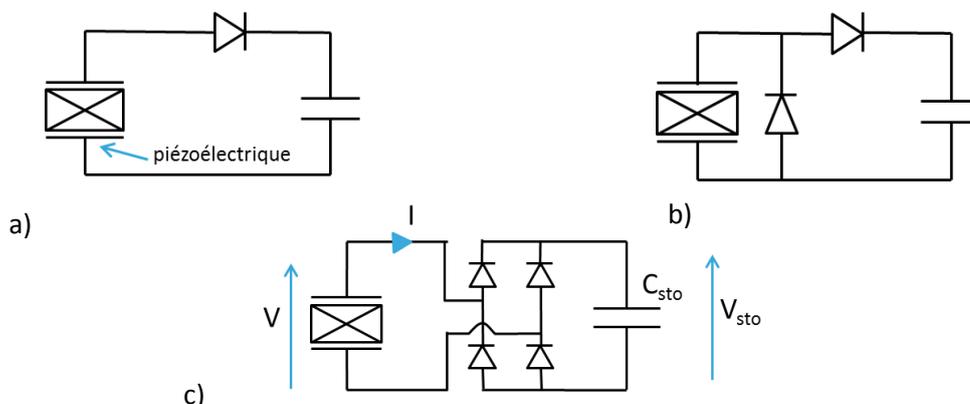


Figure 3.27: Circuits passifs de gestion de puissance : a) diode et condensateur ; b) montage avec doublement de tension ; c) pont de diodes et condensateur.

Le signal fourni par le piézoélectrique, aussi bien que la tension de stockage dans le cas d'un branchement à un pont de diodes et un condensateur est donné dans la Figure 3.28. On peut observer que le déplacement du piézoélectrique est une oscillation amortie, alors que le signal à l'entrée du pont de diodes augmente d'abord en amplitude et passe par un maximum avant de s'atténuer avec l'amortissement. L'évolution de la tension sur le condensateur en fonction du temps correspond à l'enveloppe de la tension développée par le piézoélectrique dans la phase croissante.

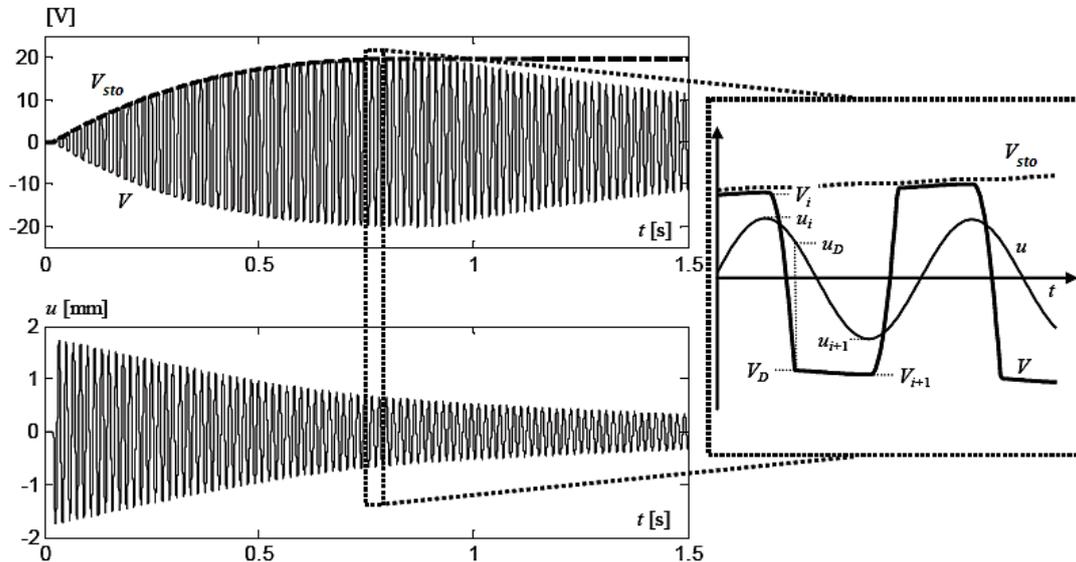


Figure 3.28: Tension en sortie et déplacement en fonction du temps pour un piézoélectrique branché à un pont de diodes et un condensateur [57].

La tension sur le condensateur sature au moment où les pics de tension en sortie du piézoélectrique branché sont maximaux. C'est le moment qui marque la fin de la récupération de l'énergie (Figure 3.29 a).

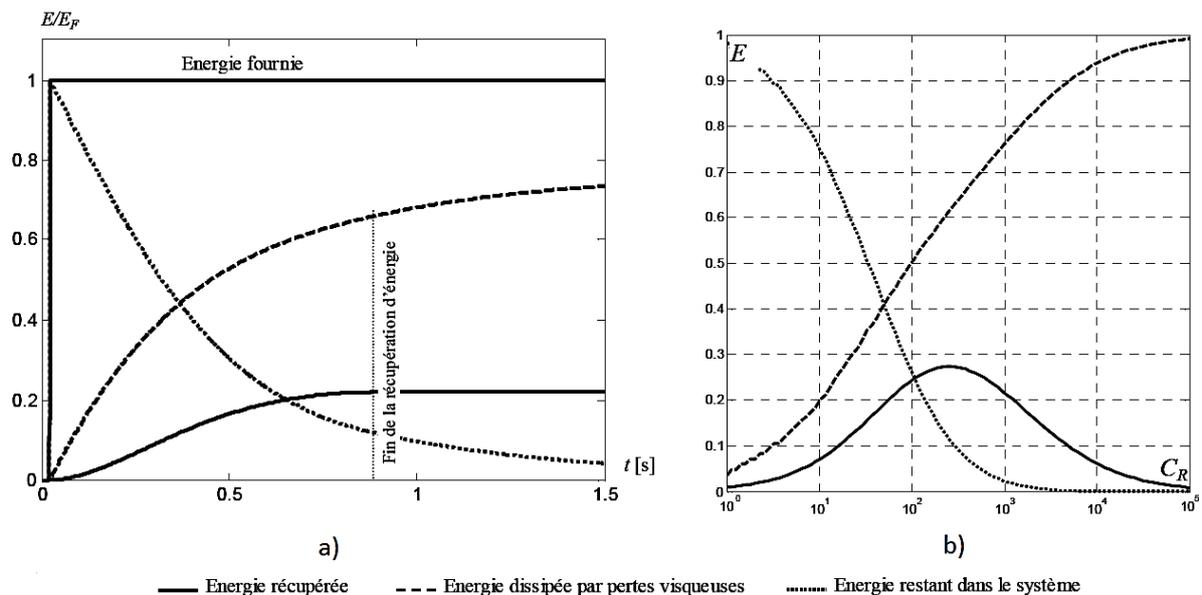


Figure 3.29: Evolution des différentes énergies dans une structure piézoélectrique à $K_e^2 Q_m = 2.3$: a) en fonction du temps avec une capacité proche de l'optimum; b) en fonction de la capacité en sortie ; l'énergie restant dans le système est donnée au moment de la fin de la récupération ; C_R représente le rapport entre la capacité de stockage et la capacité du piézoélectrique [57].

Il a été montré par modélisation numérique que le rendement de ce type de circuit dépend du produit $K_e^2 Q_m$, aussi bien que de la valeur de la capacité de stockage. Pour tout produit entre le carré du facteur équivalent de couplage et le facteur de qualité mécanique il existe une valeur optimale de capacité à mettre en sortie pour augmenter le rendement de conversion. Un exemple d'adaptation de capacité est donné dans la Figure 3.29 b.

Comme dans le cas d'une résistance en sortie, en un haut produit $K_e^2 Q_m$ contribuera à un meilleur rendement de récupération. Cette dépendance est illustrée dans la Figure 3.30. Ainsi il serait possible d'atteindre 45% de rendement de conversion avec une structure à $K_e^2 Q_m$ de 6. En pratique il s'avère difficile de dépasser $K_e^2 Q_m = 3$, car un encastrement ferme est nécessaire, ce qui impose un grand volume des brides de serrage. Il est possible d'atteindre 27% de rendement de récupération pour $K_e^2 Q_m = 2.3$.

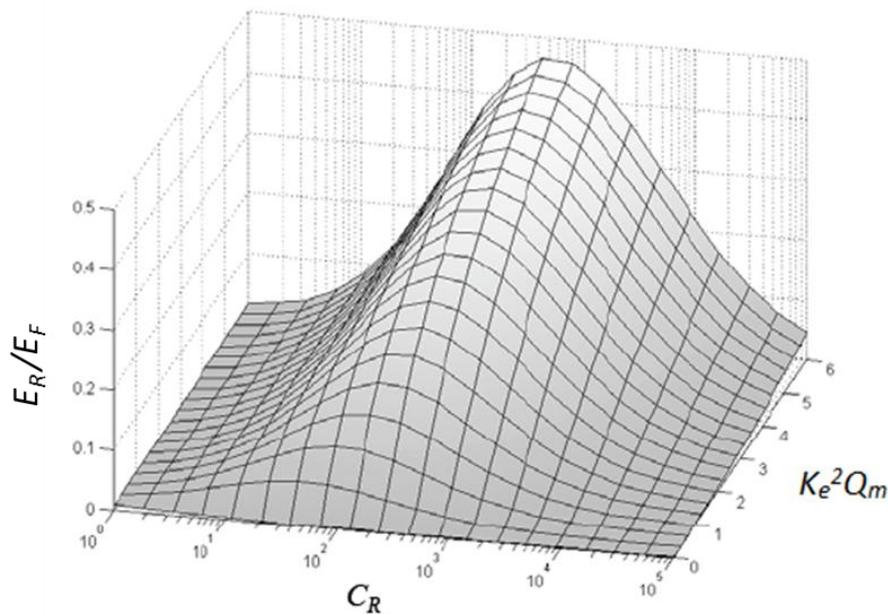


Figure 3.30: Rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie insérée dans une structure piézoélectrique lors d'un choc en fonction du produit $K_e^2 Q_m$ et du rapport C_R entre la capacité de stockage et la capacité du piézoélectrique [57].

3.4.2 Les circuits actifs

Les circuits actifs de gestion de puissance sont capables d'analyser et s'adapter au signal incident. Ils ont été conçus pour permettre un meilleur rendement de récupération par rapport aux circuits passifs. A la différence de ces derniers, ils ont besoin d'être alimentés pour fonctionner.

3.4.2.1 Les techniques SSH

Plusieurs techniques actives de récupération ont pu être mises en place et sont décrites dans la littérature. Parmi elles on compte les techniques de type SSH, de l'expression anglaise « Synchronized Switch Harvesting ». Leur principe de fonctionnement repose sur la fermeture d'un interrupteur au moment où le piézoélectrique fournit un maximum ou un minimum de tension. On distingue les techniques SSHI et SECE. L'abréviation SSHI provient de « Synchronized Switch Harvesting on Inductor ». Cette technique se décline en deux méthodes: série et parallèle (Figure 3.31). Dans les deux cas un interrupteur et une bobine sont branchés au piézoélectrique en série ou en parallèle respectivement. En mode pulsé la technique SSHI parallèle se montre plus efficace [19].

L'interrupteur mis en parallèle avec le piézoélectrique ferme à chaque fois qu'un maximum ou minimum de tension est détecté. Le piézoélectrique est ainsi mis en contact avec l'inductance et un circuit LC se forme. Une oscillation de charge est induite. Après un temps correspondant à la moitié d'une période d'oscillation la tension sur le piézoélectrique s'inverse. L'interrupteur est à nouveau ouvert à ce moment. Un tel traitement du signal provenant du piézoélectrique permet d'augmenter la tension en sortie et donc de mieux extraire l'énergie.

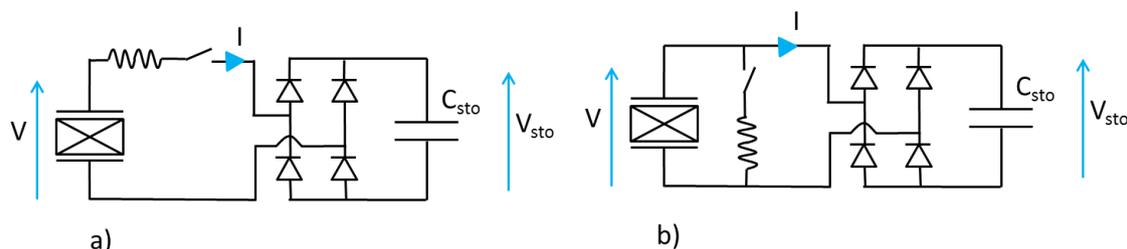


Figure 3.31: Schémas des circuits de conversion de l'énergie : a) technique SSHI série ; b) technique SSHI parallèle.

Un exemple d'évolution des énergies mises en jeu pendant la récupération avec un circuit SSHI parallèle est donné dans la Figure 3.32. Par rapport au cas d'un circuit passif à pont de diodes le rendement de récupération est bien plus important. Une nouvelle composante apparaît dans le diagramme des énergies. Elle correspond aux pertes dans le circuit d'inversion.

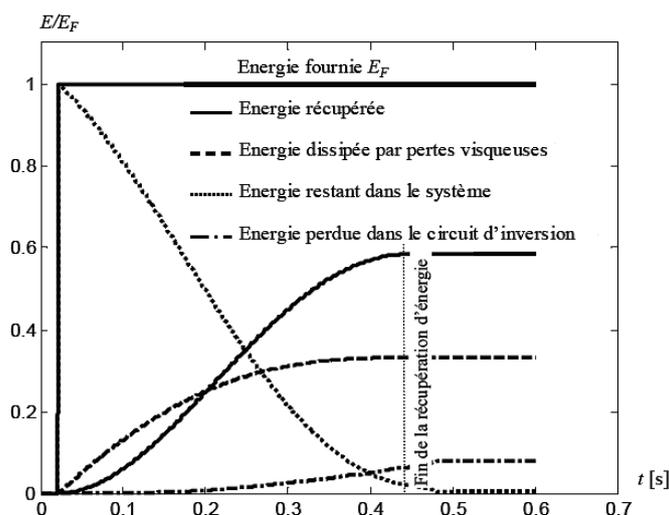


Figure 3.32: Evolution temporelle des énergies pendant la récupération avec un circuit SSHI parallèle, pour un piézoélectrique à $K_e^2 Q_m = 2.3$ [57].

Le rendement de conversion en régime pulsé en fonction du produit $K_e^2 Q_m$ et de la capacité de stockage est donné dans la Figure 3.33. Il peut dépasser 70% pour $K_e^2 Q_m = 6$, comparé à 45% pour le circuit passif à pont de diodes. La différence la plus grande peut être observée pour des $K_e^2 Q_m$ faibles, avec un rapport de 2 entre les deux techniques facilement atteignable.

Une autre technique de récupération est la SECE, de l'anglais « Synchronous Electric Charge Extraction ». Le principe de fonctionnement repose sur le couplage du piézoélectrique à un pont de diodes suivi d'un transformateur relié à un transistor (Figure 3.34) [19]. Le transistor (T) est à l'état bloqué la plupart du temps. Au moment où la tension du piézoélectrique passe par un maximum ou un minimum, le transistor devient passant et permet le passage de courant et d'énergie entre le piézoélectrique et le transformateur. Quand la tension aux bornes du piézoélectrique devient nulle, le transistor passe à nouveau à l'état bloqué.

L'avantage dans ce type de circuit consiste dans le fait que la puissance récupérée n'est pas censée dépendre des caractéristiques de l'élément de stockage utilisé.

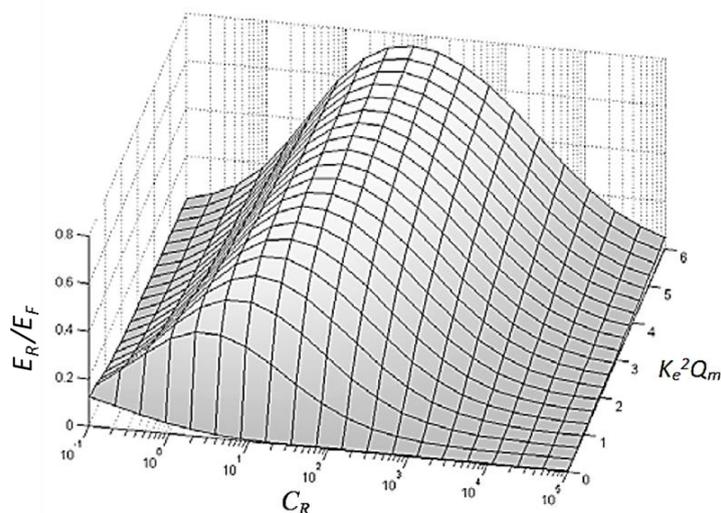


Figure 3.33: Rendement de conversion en régime pulsé en fonction du produit $K_e^2 Q_m$ et du rapport entre la capacité de stockage est celle du piézoélectrique pour la technique SSHI parallèle.

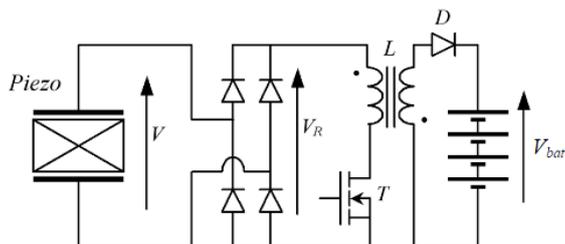


Figure 3.34: Circuit pour la technique SECE. Le piézoélectrique transmet son énergie au transformateur L , commandé par le transistor T [19].

3.4.2.2 Le circuit dédié de STMicroelectronics

Une technique de récupération similaire au SECE a été développée par STMicroelectronics. Le principe de fonctionnement ainsi que le circuit d'origine sont décrits dans [58]. La conversion repose sur le transfert de l'énergie stockée sur le piézoélectrique à une bobine qui fait ultérieurement le transfert vers un condensateur ou autre élément de stockage. Dans la version générique la circulation du courant dans le circuit est commandée à l'aide de trois interrupteurs pour une récupération demi-onde (Figure 3.35). Le piézoélectrique est branché en parallèle à un interrupteur S_1 . Dans le schéma présenté ici le piézoélectrique est réduit à un générateur de tension alternatif en série avec la capacité C_{piezo} . La tension générée V_{in} est proportionnelle à la déformation du piézoélectrique. C'est la tension qu'on mesurerait en circuit ouvert. Lors de son oscillation le piézoélectrique génère des maxima de tension V_{piezo} , qui sont décelés par un détecteur de pics. Une fois un pic détecté, la fermeture de l'interrupteur S_2 est commandée, ce qui permet l'établissement d'un courant à travers la bobine L . Les autres interrupteurs sont ouverts à cette étape, tout comme la plupart du temps. Les charges qui circulent neutralisent le piézoélectrique. L'énergie électrostatique présente sur le piézoélectrique est ainsi transférée à la bobine. Cet état est détecté par le comparateur à la masse, après quoi l'interrupteur S_2 passe à l'état ouvert et les interrupteurs S_1 et S_3 ferment. Ceci permet de mettre la bobine L en parallèle avec le condensateur de stockage C_{sto} . Elle lui transfère son énergie et une charge électrique est stockée. Quand le courant à travers la bobine devient nul, toute l'énergie est transférée et l'interrupteur S_3 ouvre. L'interrupteur S_1 reste fermé et le piézoélectrique continue sa course en court-

circuit pour atteindre un maximum de déformation de signé opposé. A partir de cet instant l'interrupteur ouvre et le piézoélectrique peut accumuler de l'énergie électrique jusqu'à ce qu'il atteigne un nouveau pic de tension. Le cycle de récupération de l'énergie est ainsi accompli.

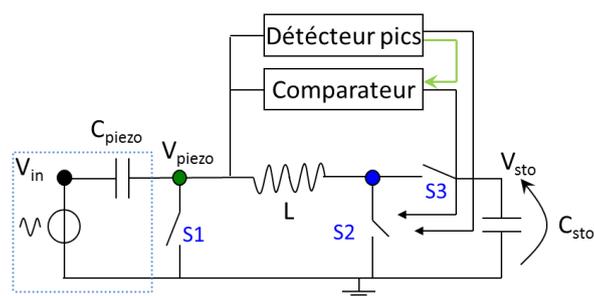


Figure 3.35: Circuit dédié de STMicroelectronics

L'avantage de ce circuit de gestion de puissance consiste dans le fait qu'à chaque cycle toute l'énergie électrostatique présente sur le piézoélectrique peut être transférée à l'élément de stockage, tout comme pour la technique SECE. Quelques étapes d'optimisation par rapport au schéma d'origine ont été implémentées pour augmenter la performance du circuit. Ainsi, les interrupteurs S_1 et S_3 ont été remplacés convenablement par des diodes. Ceci permet d'éviter les dépenses d'énergie nécessaires à leur contrôle et aussi d'avoir un démarrage à tension nulle sur la capacité de stockage. En effet, la partie active du circuit ne démarre que si elle peut être alimentée par le condensateur.

Deux versions du circuit ont pu être utilisées avec des prototypes: à redressement simple et double alternance (Figure 3.36). Dans les deux cas la partie active est intégrée sur silicium, en technologie BCD6, alors que les diodes, la bobine et le condensateur de stockage sont discrets. La rectification double alternance est faite avec un pont actif. Les deux circuits s'alimentent à partir du condensateur de stockage et ont une consommation de l'ordre de quelques centaines de nano ampères. Ils démarrent pour une tension sur le condensateur autour de 1V.

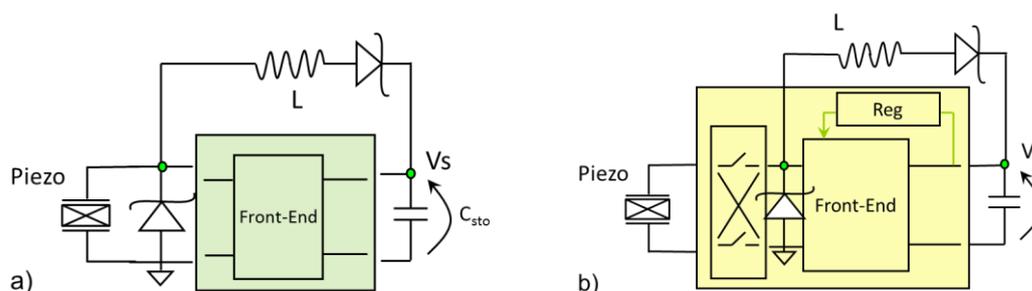


Figure 3.36 : Circuits de gestion de la puissance : a) circuit à rectification simple alternance ; b) circuit à rectification double alternance.

3.4.3 Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est un des points clés de la chaîne de récupération. Il va avoir un grand impact sur le rendement de récupération et les applications possibles du système entier. Plusieurs types d'éléments de stockage existent, des condensateurs jusqu'aux batteries en passant par les supercondensateurs et les batteries fines. Ils peuvent être classés selon plusieurs critères, en commençant par la capacité de stockage. D'autres critères sont introduits dans le Tableau 3.4 pour différents éléments.

Les condensateurs sont les éléments les plus simples à charger. Les condensateurs les plus adaptés au stockage d'énergie sont de type électrochimique car ils ont des capacités relativement

grandes : jusqu'à quelques dizaines de milli farad. Ils résistent à plusieurs millions de cycles, avec des fréquences de sollicitation hautes. Les courants de charge/ décharge qu'ils peuvent tolérer montent au-dessus de 100 mA, ce qui est convenable pour subvenir aux besoins d'un capteur autonome pendant les pics de consommation. Les condensateurs sont capables de fonctionner à des températures allant jusqu'à 175°C [59]. Par contre, leur durée de vie est limitée à dix mille heures, ceci à 85°C. Une autre limite des condensateurs est dans la densité d'énergie qu'ils sont capables de stocker, bien inférieure aux autres solutions. Un condensateur de 3.3 mF chargé à 1,1 V emmagasine une charge de 1 μ Ah, pour une forme cylindrique de 20 mm de diamètre et 25 mm de hauteur. Au vu de ces valeurs, le condensateur sera très encombrant par rapport à une batterie fine de même capacité. En plus, un condensateur ne fournit pas de tension stabilisée en sortie. Pour que ceci soit le cas il faut disposer d'une forte capacité et de faibles pics de consommation. Les condensateurs sont donc intéressants comme éléments de stockage pour alimenter des systèmes peu gourmands. Dans la situation optimale dans le cas d'un capteur autonome l'information transmise concerne la source d'énergie récupérée (exemple : un capteur de température). Dans ce cas l'énergie électrique est puisée dans le même temps qu'elle est générée, ce qui permet d'utiliser un condensateur en tant qu'élément de stockage, tout en gardant un niveau de tension fournie stable.

Pour des applications plus gourmandes il est nécessaire d'avoir des éléments de stockage à plus forte capacité. La solution classique est amenée par les batteries lithium-ion. Ce sont des batteries qu'on peut retrouver dans des applications très diverses. On peut penser aux piles bouton rechargeables, trouvées dans les montres ou calculatrices, ou aux batteries d'ordinateurs portables. Les piles bouton rechargeables disponibles sur le marché ont des capacités de l'ordre de 10-100 mAh, pour une tension en sortie autour de 3.6 V. D'une épaisseur typique de 3 mm et un diamètre de 20 mm, elles ont un encombrement adapté pour les petits dispositifs. Les batteries Li-ion ont également une bonne densité d'énergie (Tableau 3.4) et ont une durée de vie qui peut atteindre 5 ans. Leur inconvénient le plus important consiste dans le fait qu'elles ne peuvent pas fonctionner à haute température. La température au chargement recommandée ne dépasse pas 45°C pour les modèles commerciaux. C'est une limite importante à prendre en compte, sachant que les récupérateurs de chaleur doivent fonctionner à des températures bien plus hautes. Les piles Li-ion ne sont donc pas une bonne solution de stockage pour nos cas d'usage, dans la mesure où on ne peut pas envisager de les déporter par rapport à la source chaude, ce qui est peu pratique.

Les supercondensateurs sont une solution de stockage, connaissant un développement accéléré de nos jours. Ayant des capacités allant jusqu'à 5 kF, ils bénéficient d'un temps de charge et de décharge court, allant de 1 à 10 s. Ils ont une densité d'énergie supérieure aux condensateurs classiques et peuvent subir 1 million de cycles tout en fournissant de pulses de courant élevés. Leur inconvénient consiste dans les fuites élevées. Un supercondensateur perd environ 50% de la charge stockée en un mois, comparé aux 5% par an pour une batterie Li-ion. Aussi leur densité d'énergie est bien plus faible (20 à 40 fois), ce qui implique un encombrement plus important. Ainsi, un condensateur de 10 F trouve sur le marché à une forme cylindrique de 13 mm de diamètre et 34 mm de hauteur. Les supercondensateurs sont donc intéressants pour un stockage de courte durée avec des décharges pulsées. Leur limite pour le couplage avec les récupérateurs thermiques sera imposée par la température de fonctionnement, inférieure à 65°C.

Une autre solution de stockage innovante est représentée par les batteries en couche mince. Ce sont des éléments de stockage à base de lithium, avec tous les composants à l'état solide, y compris l'électrolyte. Le matériau de choix pour l'électrolyte est le LiPON, de « lithium phosphorus oxynitride ». La capacité de ces batteries est située entre 1 μ Ah et 1 mAh. Leur pertes sont très faibles, inférieures à 15% par an, ce qui les rend utiles pour stocker des faibles quantités d'énergie pendant des longues périodes. Elles ont un facteur de forme plat, avec des épaisseurs inférieures à 200 μ m, ce qui

les rend flexibles. Les courants de décharge continue tolérés sont de quelques milli ampères, ce qui est satisfaisant pour alimenter un nœud autonome, mais reste inférieur aux piles bouton. Toutes ces caractéristiques, couplées à une durée de vie annoncée pouvant atteindre 10 ans [60], rendent les batteries en couche mince très intéressantes comme éléments de stockage pour les récupérateurs thermiques. Par contre, ces batteries manifestent quelques inconvénients à prendre en compte. Le premier est la tension relativement élevée, 3.8-3.9 V. Il faut donc développer une tension de 4 V ou plus pour la charge. Aussi, la température de fonctionnement annoncée par les fabricants est limitée à 85°C dans le meilleur des cas. C'est une meilleure valeur par rapport aux piles bouton rechargeables. Par contre ceci peut s'avérer insuffisant dans les milieux où on place les récupérateurs thermiques.

Il existe donc plusieurs solutions pour stocker l'énergie récupérée. Elles amènent toutes leurs avantages et inconvénients. Le choix final sera déterminé par le cas d'usage et les caractéristiques du récupérateur d'énergie. Quelques exemples de chargement d'éléments de stockage avec les dispositifs à bilame et piézoélectrique sont montrés dans le chapitre suivant.

Caractéristiques	Condensateurs électrochimiques [59]	Supercondensateurs [61]	Batteries couche mince ([62], [63], [60])	Batteries Li-ion (piles bouton) [61]
Temps de charge	< 1s	1-10 s	10-20 min	10-60 min
Courant de décharge (continu)	< 50-120 mA (68 µF/6.3 V)	4-7 A [64]	5-30 mA max	70 mA [65]
Courant décharge pic (pulsé)	50-120 mA (68µF/6.3 V)	30 A [64]	100 mA	
Fuites		50% par mois	<15 % par an	5% par mois
Durée de vie (cycles)	> 1 mln cycles	1 mln	1000-8000	environ 500
Tension	4 - 450 V max	2.3 - 2.75 V	3.8-3.9 V	3.6 to 3.7 V
Capacité	200 nF – 22 mF	< 5 kF	1 uAh – 1 mAh	10-200 mAh
Densité d'énergie	0.22 (Wh/L)	5 (Wh/kg)	250 (Wh/kg)	100-200 (Wh/kg)
Densité de puissance (W/kg)		environ 10000	2500	1000-3000
Coût par Wh		20 \$ typique		0.5-1 \$ (grand système)
Durée de vie	5000 – 10000 h @85°C	10- 15 ans	< 10 ans	5 - 10 ans
Température de fonctionnement (°C)	< 125-175 °C	-40 to 65 °C	< 85°C	0 to 46 °C
Taille	20x25 mm DxH pour 3.3 mF	28.5x17x1.7 mm ³ pour 1.1 F [64]	25x25 mm ² pour 1 mAh. H< 200 µm	20x3 mm DxH pour 35 mAh [65]

Tableau 3.4: Eléments de stockage de l'énergie électrique et leurs caractéristiques.

Chapitre 4: Dispositifs à base de bilames et piézoélectriques

4.1 Preuve de concept et premiers prototypes. Fonctionnement avec point froid forcé.

Les dispositifs à base de bilame et piézoélectriques ont été déclinés sous plusieurs formes dans le cadre de ce travail. Plusieurs prototypes ont été construits et testés. La première preuve de concept a été faite avec des composants discrets, placés entre une plaque chauffante et un bloc solide refroidi à l'eau. Ultérieurement la mise en prototype a été réalisée, d'abord avec un fonctionnement à refroidissement forcé, sous air ventilé, et puis à l'air statique ambiant. Des dispositifs sur substrat flexible ont également été construits, démontrant le fonctionnement matriciel. La mise en œuvre des prototypes à chacune de ces étapes et les tests effectués sont exposés dans ce chapitre. Le travail mené sur la modélisation thermique est également présenté.

4.1.1 Configurations et éléments piézoélectriques pour la construction de prototypes

4.1.1.1 Configurations pour la construction des prototypes

Plusieurs configurations peuvent être mises en œuvre pour la construction de dispositifs à bilames et piézoélectriques. Dans tous les cas le piézoélectrique sera sollicité en mode pulsé, vu qu'on cherche à lui transmettre l'énergie du bilame développée lors du flambage.

On peut associer l'élément piézoélectrique et le bilame dans une structure verticale (Figure 4.1 a). Dans cette configuration le piézoélectrique est placé par-dessus le bilame. Ceci permet d'économiser la surface et également de travailler avec une amplitude faible de déplacement. En effet, la flèche maximale en sollicitation du piézoélectrique est inférieure à la course du bilame. C'est donc une configuration intéressante qui permet de limiter l'espace nécessaire au fonctionnement. Elle est utilisée dans un grand nombre d'essais grâce également à la facilité de mise en œuvre. Vu que le piézoélectrique doit être en mesure de se déformer, il faut qu'il soit légèrement écarté du bloc froid dans le cas où il y en a besoin pour le fonctionnement. Ceci limite la vitesse transfert thermique depuis le piézoélectrique et aussi depuis le bilame. La conséquence directe de ce fait est une fréquence d'oscillation du bilame amoindrie dans le cas où un bloc froid est utilisé. Par contre, ce n'est pas le cas quand la source froide est l'air ambiant, car il recouvre tout le piézoélectrique par défaut.

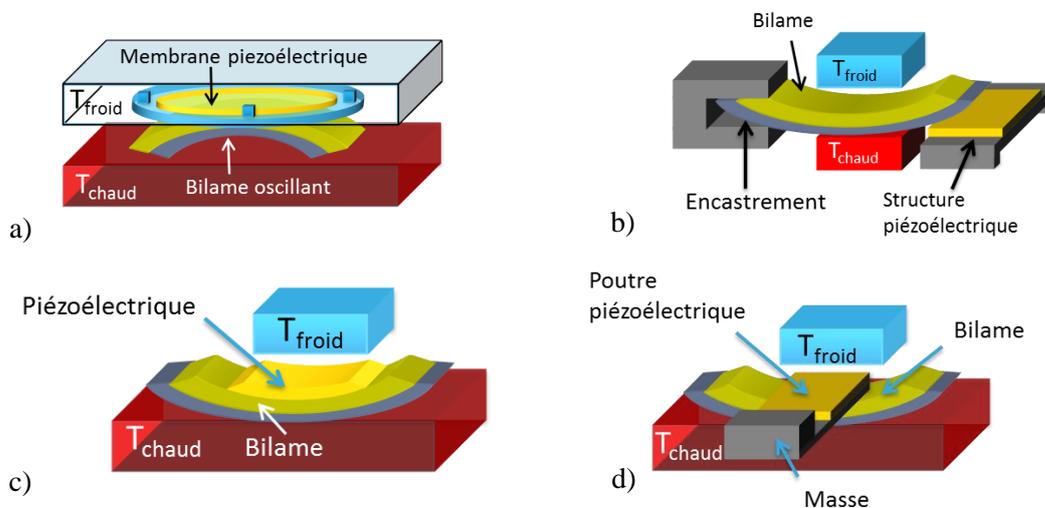


Figure 4.1 : Configurations possibles associant un piézoélectrique et un bilame : a) configuration verticale ; b) configuration à piézoélectrique déporté ; c) configuration à piézoélectrique déposé sur le bilame ; d) configuration avec piézoélectrique en poutre vibrante.

Une autre configuration possible repose sur une sollicitation d'une structure piézoélectrique par l'extrémité du bilame (Figure 4.1 b). Cette dernière peut être une membrane ou une poutre. L'avantage de cette structure consiste dans le fait que le bilame entre en contact direct avec la surface chaude et la surface froide. Il peut se chauffer et refroidir rapidement et donc osciller avec une fréquence élevée.

Une troisième configuration possible consiste dans le dépôt/collage du matériau piézoélectrique sur le bilame. C'est une structure plus difficile à réaliser que les précédentes vu la surface incurvée du bilame. Aussi le dépôt implique le changement des propriétés du bilame. Cette approche est rendue délicate par le fait que les piézoélectriques que nous utilisons sont en céramique PZT et présentent donc une certaine fragilité. Il est difficile, voire impossible de coller de manière conforme une membrane PZT sur la zone active d'un bilame à poinçon. L'avantage de cette configuration pour les prototypes consiste dans le fait que l'énergie mécanique développée par le bilame est transmise directement au matériau piézoélectrique, sans partage avec la couche en métal qu'on retrouve dans les membranes utilisées habituellement et qui fait office de support mécanique.

Une quatrième configuration possible consiste dans la sollicitation du piézoélectrique sans impact, en l'accélérant et en lui associant une masse sismique. Ceci peut être obtenu en attachant une poutre piézoélectrique au bilame, de manière à ce qu'elle soit actionnée à chaque basculement (Figure 4.1 d). Le piézoélectrique se comporte dans ce cas comme une poutre vibrante. On peut penser à l'attacher à la partie centrale du bilame ou aux extrémités.

Les configurations présentées ci-dessus ont pu être testées en pratique. Chacun de ces montages peut être reproduit plusieurs fois sur le même support de manière à générer une matrice. D'autres montages peuvent bien évidemment être proposés, tout en veillant à ce que la structure résultante reste fine, que le bilame oscille avec une bonne fréquence et que l'élément piézoélectrique ait la possibilité de se déformer. La dernière condition est nécessaire pour avoir une bonne amplitude de tension en sortie. De ce fait, le type de déformation préféré pour le piézoélectrique est la flexion. En effet ceci permet de générer une déformation importante pour une force donnée. Des essais de sollicitation en compression par choc ont été conduits, les pics de tension résultants se révélant difficilement exploitables.

4.1.1.2 Éléments piézoélectriques utilisés

Les éléments piézoélectriques utilisés pour ce travail sont en grande partie des membranes. La majorité est disponible dans le commerce pour un coût relativement bas. Ce sont des membranes utilisées couramment dans les dispositifs sonores comme les alarmes ou les haut-parleurs. Leurs références sont données dans le Tableau 4.1. Même si ce n'est pas spécifié dans les fiches techniques, en jugeant d'après les performances et l'aspect, le matériau piézoélectrique utilisé est la PZT dans tous les cas. Les membranes utilisées sont de deux types : à une et à deux couches de céramique. Celles qui ont une seule couche de céramique (Kingstate, Kepo) possèdent un support mécanique en laiton, qui fait également office d'électrode. Il est d'environ 100 μm (Kingstate) et 200 μm (Kepo) d'épaisseur, avec une couche de céramique autour de 110 μm . Les capacités associées sont de 60 et 70 nF respectivement.

Les piézoélectriques à deux couches de céramique (Murata) sont fabriqués sur une membrane en alliage de nickel qui mesure entre 50 et 60 μm en épaisseur. Les couches de matériau piézoélectrique ont des épaisseurs du même ordre et sont disposés de part et d'autre de cette membrane. De point de vue électrique elles sont connectées en parallèle. Ce type de branchement couplé avec la finesse des couches résulte en une haute valeur de capacité: 220 nF pour deux pastilles piézoélectriques de 19.7

mm de diamètre et 422 nF pour deux pastilles de 25 mm. Toutes les membranes utilisées peuvent être découpées pour l'intégration dans les prototypes.

D'autres types de piézoélectriques ont pu être testés, notamment des céramiques plus épaisses (Fuji), mesurant 800 μm en épaisseur avec les électrodes et sans support en métal. Une poutre fabriquée sur mesure pour la récupération d'énergie a également été utilisée. Elle a une épaisseur de 225 μm , avec une couche de céramique rectangulaire de 32x9 mm^2 .

Membranes sous forme de disque							
Fabricant	Nombre de couches piezo.	Matériau support	Diamètre support (mm)	Diamètre céramique (mm)	Épaisseur support (μm)	Épaisseur totale (μm)	Capacité à T_{amb} (nF)
Kingstate	1	laiton	44	25	103	217	60
Kepo	1	laiton	50	25	200	310	70
Murata	2	alliage nickel	39	25	53	185	422
Murata	2	alliage nickel	27	19.7	58	170	220
Piézoélectriques rectangulaires							
Fabricant	Type	Matériau support	Dimensions support (Lxl mm)	Dimensions céramique (Lxl mm)	Épaisseur support	Épaisseur totale	
Fuji	monocouche	-	-	30x30	-	800	
Poutre sur mesure	Une couche de piézo./une couche de métal	-	54x13	32x9	100	225	

Tableau 4.1: Piézoélectriques utilisés pour les tests.

4.1.2 Fonctionnement avec refroidissement à l'eau. Preuve de concept.

4.1.2.1 Bilames cloquant à haute température

La première preuve de concept pour les récupérateurs à base de bilames et piézoélectriques a été faite avec des composants discrets, sans assemblage en prototype. Les tests ont été faits sur des plaques thermiques à résistance, avec un point froid assuré par un bloc métallique avec de l'eau froide circulant dedans. Les premiers bilames utilisés ont des dimensions de 36x20x0.14 mm^3 et sont fabriqués en 140SP. Ils cloquent à 120°C et décloquent à 105°C. Un ou deux bilames ont pu être associés avec un piézoélectrique Kingstate. La mise en marche a été faite à une température de plaque chaude autour de 145°C et un bloc froid à 15°C.

Les bilames 120-105 utilisés ici ont des poinçons prononcés et manifestent 2 types d'oscillations possibles. Ils peuvent osciller en faisant des retournements complets de la forme initiale concave à une forme convexe. Dans ce cas les impacts sur le piézoélectrique sont forts, tout comme les pics électriques générés. Les bilames peuvent également osciller seulement au niveau du poinçon, les ailes restant immobiles. Dans ce cas les oscillations sont plus rapides et les impacts moins forts. Les pics de tension ont une moindre amplitude mais sont générés avec une fréquence plus importante. Cet effet est illustré dans la Figure 4.2 qui présente le montage utilisé ainsi que les deux types de pics générés. En faisant un agrandissement temporel sur un pic de haute amplitude on se rend compte qu'il

est constitué d'une oscillation amortie (Figure 4.3). En effet, une certaine énergie est communiquée au piézoélectrique à l'impact et se dissipe avec le temps.

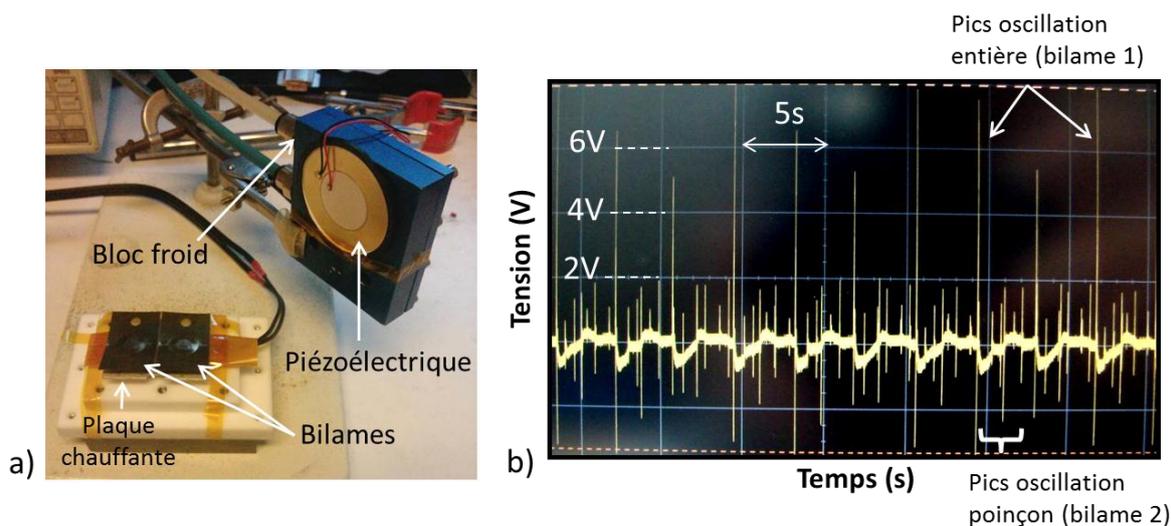


Figure 4.2: a) Montage à l'état ouvert avec deux bilames 120-105 et un piézoélectrique Kingstate. Le piézoélectrique est appuyé contre les bilames en fonctionnement ; b) signal généré quand un bilame fait des oscillations entières et l'autre des oscillations au niveau du poinçon. On observe des pics de forte amplitudes et basse fréquence correspondant aux oscillations entières et des pics de basse amplitude et haute fréquence correspondant aux oscillations du poinçon.

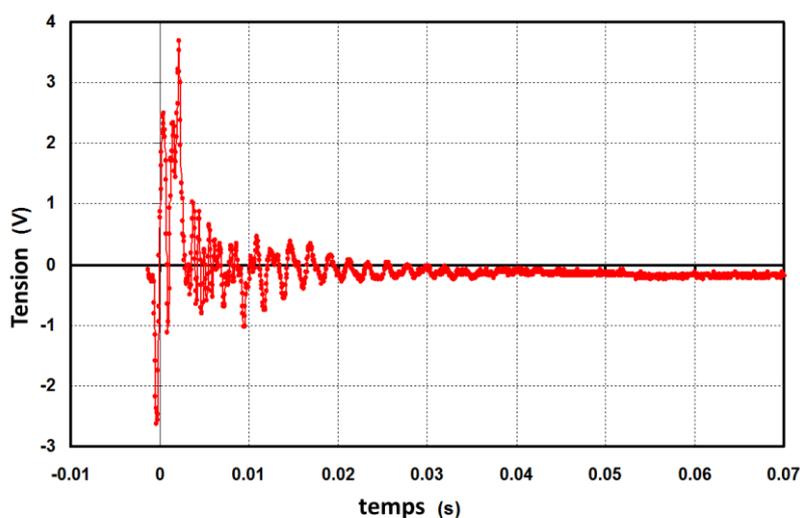


Figure 4.3: Pic généré par un bilame 120-105°C au cloquage après impact sur un piézoélectrique Kingstate.

4.1.2.2 Bilame cloquant à basse température

Un bilame cloquant à basse température a également été testé pour faire la preuve de concept. Il s'agit d'un élément qui cloque à 40°C et décroque à 25°C fabriqué à partir du matériau R80. La mise en marche a été faite sur une plaque chauffante à 73°C et un bloc froid à 15°C (Figure 4.4 a). Un piézoélectrique rond a été intercalé entre le bilame et le bloc froid. Le signal obtenu est une oscillation de 1.6 V crête à crête avec une fréquence de 3Hz (Figure 4.4 b). C'est une oscillation avec une fréquence intéressante, qui prouve le fait que le système peut bien être mis en marche avec un bilame cloquant à basse température.

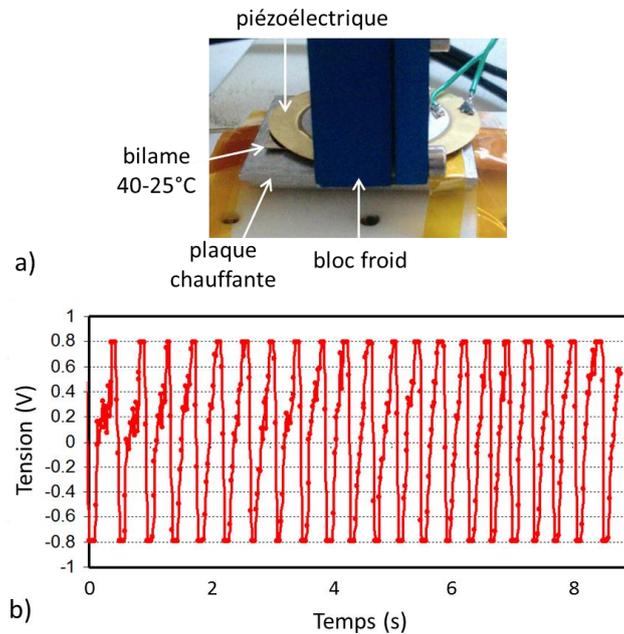


Figure 4.4: a) dispositif avec bilame 40-25°C ; b) signal obtenu.

4.1.3 Amélioration des performances, stockage de l'énergie.

4.1.3.1 Bilames cloquant à haute température, interaction en mode choc.

Plusieurs étapes d'amélioration ont pu être faites par rapport aux premières expériences qui ont servi de preuve de concept. L'idée directrice dans ces étapes est d'augmenter la puissance générée et d'être capable de stocker une énergie utile.

Avec un bilame 120-105°C les pics de tension de grande amplitude sont produits avec une fréquence d'environ 0.14 Hz. Les temps de chauffage et de refroidissement sont d'autant plus grands que l'hystérésis du bilame l'est. Il est donc intéressant de tester des bilames à faible hystérésis pour avoir une meilleure fréquence de cloquage.

En premier temps des tests ont été faits avec des bilames 121-118°C. Un piézoélectrique Kingstate a été utilisé pour faire les premières mesures. La configuration choisie est verticale avec une plaque chaude à 150°C et le bloc froid à 15°C. Le signal obtenu a une amplitude crête à crête autour de 7V avec une fréquence d'oscillation du bilame de 1.75 Hz (Figure 4.5 a), ce qui est environ 12 fois supérieur au cas des bilames 120-105°C pour des amplitudes de pic du même ordre de grandeur. Afin de stocker l'énergie générée, le piézoélectrique a été branché à la carte dédiée de STMicroelectronics. Comme décrit avant, la carte contient deux entrées utiles pour le traitement du signal provenant du piézoélectrique. La première entrée fait une rectification simple alternance et la seconde une rectification double alternance. Le branchement à chacune des entrées a été fait, la seconde permettant de mieux stocker l'énergie avec le dispositif de récupération décrit ici. Dans les deux cas le stockage est fait en chargeant un condensateur avec une capacité de 10 μ F. La puissance fournie par le piézoélectrique est donc suffisante pour alimenter le circuit de gestion de puissance et stocker de l'énergie le condensateur. Une courbe typique de chargement depuis une tension nulle est donnée dans la Figure 4.5 b. Le chargement de la capacité de 0.5 à 1.4 V se fait en 2.5s, ce qui correspond à un courant de charge de 3.6 μ A et une puissance générée de 3.6 μ W autour de 1V. La tension maximale stockée est de 2.5V.

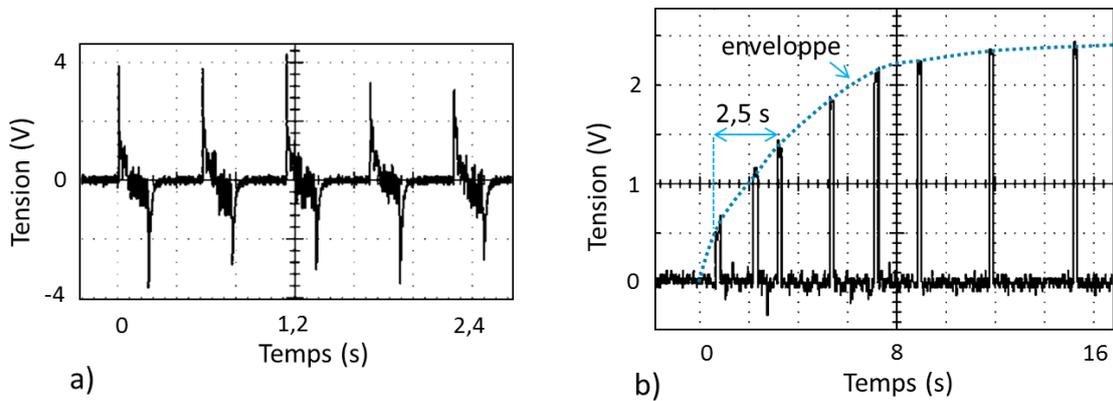


Figure 4.5: a) signal fourni par un bilame 121-118°C et un piézoélectrique Kingstate ; b) chargement de condensateur 10 µF avec le circuit dédié de STMicroelectronics, entrée avec rectification double alternance.

Le courant de charge est calculé selon la formule:

$$I = \frac{C_{sto}\Delta V}{\Delta t} \quad \text{Eq.(4.1)}$$

avec C_{sto} – capacité du condensateur de stockage et ΔV – variation de tension pendant le temps Δt .

Les mesures de tension sur le condensateur se font de manière ponctuelle afin d'éviter la consommation de l'énergie par la sonde de mesure, dont l'impédance est de 1 MΩ. Afin de réaliser ceci le branchement à la sonde se fait à travers un interrupteur qui est enclenché à chaque fois qu'une mesure doit être faite. Quand l'interrupteur ferme, un pic apparaît à l'oscilloscope, son amplitude correspondant à la tension sur le condensateur. L'enveloppe de ces pics traduit la montée en tension avec le temps.

En gardant les mêmes conditions de température, un piézoélectrique Murata de 27 mm de diamètre a été monté à la place du piézoélectrique Kingstate. Ce premier est moins encombrant et possède une capacité bien plus haute : 220 nF au lieu de 60 nF. Il a deux couches de matériau piézoélectrique d'une épaisseur équivalente à celle du support métallique, ce qui est censé permettre une meilleure conversion de l'énergie. Le chargement de condensateur a été fait en utilisant chacune des deux entrées de la carte dédiée. L'entée à rectification double alternance permet une meilleure récupération d'énergie, tout comme dans le premier cas. L'évolution de la tension sur le condensateur de 10 µF est donnée dans la Figure 4.6.

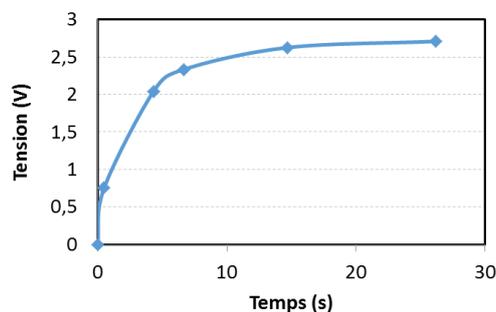


Figure 4.6: Chargement du condensateur 10 µF avec un bilame 121-118°C et un piézoélectrique Murata 220 nF.

Le chargement de 0 à 2 V se fait en 4 s, ce qui correspond à un courant moyen de 4.7 µA. C'est un courant plus grand que dans le cas du piézoélectrique Kingstate à capacité de 60 nF. La

tension maximale atteinte passe à 2.7V. Ceci confirme donc le fait que le piézoélectrique Murata version petite taille est plus performant pour la conversion de l'énergie.

Afin de mieux comprendre l'influence de l'hystérésis du bilame sur l'énergie produite par impact, des bilames 122-117°C ont été placés dans les mêmes conditions que pour cas précédent : température de plaque chaude de 150°C et température de bloc froid de 15°C, avec le même piézoélectrique. Ce sont des bilames qui mesurent 35x20x0,3 mm³, fabriqués en R80. Ils ont le même volume que les bilames 121-118°C, mais leur hystérésis est plus importante.

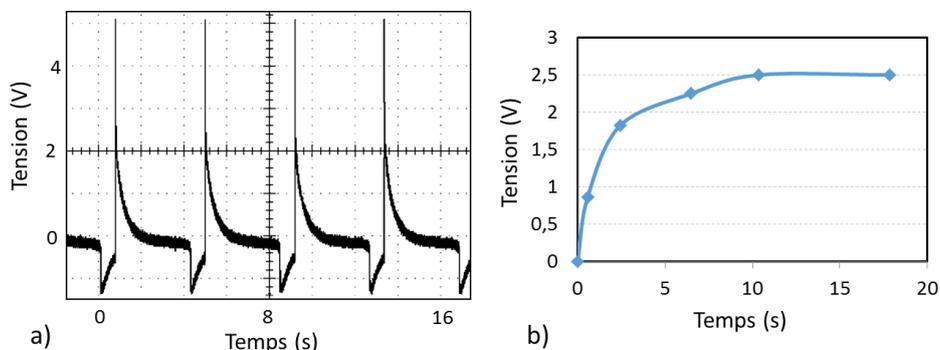


Figure 4.7: Chargement du condensateur 10 µF avec un bilame 122-117°C et un piézoélectrique Murata 220 nF.

Un signal représentatif généré dans une telle configuration est donné dans la Figure 4.7 a. Des pics de grande amplitude (5V) sont générés au cloquage et des pics d'amplitude plus basse (1.3 V) sont générés au décrochage. Ces derniers pics sont dus au fait que le piézoélectrique est relâché par le bilame. La vitesse de chargement du condensateur est plus grande que celle développée dans le cas précédent avant les 2V, malgré une fréquence inférieure de cloquage : 0.25 Hz contre 0.8 Hz dans le cas précédent. Le chargement de 0 à 1.8V se fait avec une intensité de 7.5 µA. Les bilames avec une hystérésis de 5°C transmettent donc plus d'énergie à chaque basculement par rapport aux bilames à 3°C d'hystérésis.

Afin d'augmenter la puissance produite, deux dispositifs à bilame 122-117°C et piézoélectrique Murata 220 nF ont été branchés en parallèle à l'entrée à rectification double alternance de la carte électrique dédiée. L'évolution de la tension sur le condensateur dans ce cas est donnée dans la Figure 4.8.

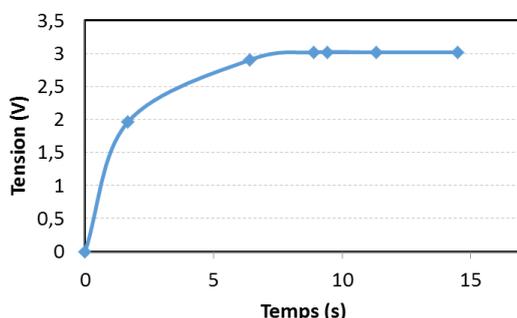


Figure 4.8: Chargement du condensateur 10 µF avec deux dispositifs à bilame 122-117°C et piézoélectrique Murata 220 nF.

Le chargement du condensateur de 0 à 2 V se fait avec un courant moyen de 11.8 µA, qui est donc plus grand que pour le cas précédent, où un seul dispositif était branché. Ceci prouve l'avantage de la mise en parallèle, malgré le branchement des deux piézoélectriques directement sur la

même entrée, sans les isoler électriquement l'un de l'autre. La tension maximale au chargement passe de 2.5 à 3V.

4.1.3.2 Chargement de batterie en couche mince

Outre les condensateurs, il est possible de stocker l'énergie générée par les dispositifs sur des batteries de petite capacité. Vu que la tension stabilisée que les dispositifs décrits ci-dessus génèrent est limitée à 3V il est possible de charger une batterie dont la tension nominale est inférieure. Pour faire ceci une micro-batterie d'une capacité de 2 μ Ah développée par STMicroelectronics en partenariat avec le CEA a été choisie. Elle a l'avantage d'une petite taille, ne mesurant que 5x5 mm² (Figure 4.9 a). La plage de cyclage nominale est entre 1.7 et 2.6V, mais elle peut subir des décharges profondes, jusqu'à 0 V.

Pour effectuer l'expérience de chargement, un dispositif de récupération d'énergie à deux bilames 122-117°C et deux piézoélectriques Murata de 27 mm de diamètre a été branché sur l'entrée à rectification double alternance de la carte électrique. Le signal généré par un piézoélectrique est donné dans la Figure 4.9 b. Le condensateur 10 μ F a été gardé en sortie du circuit pour stabiliser la tension fournie. La prise de contact sur la micro-batterie a été faite avec des pointes, avec branchement en parallèle sur le condensateur (Figure 4.9 c). Un multimètre de haute précision (Keithley 2001) est utilisé pour faire les mesures de tension. Une fois le récupérateur en marche et la batterie branchée, une tension de 1V est mesurée aux bornes de cette dernière, contrairement à 3V sans elle. Ceci témoigne du fait qu'une charge est débitée.

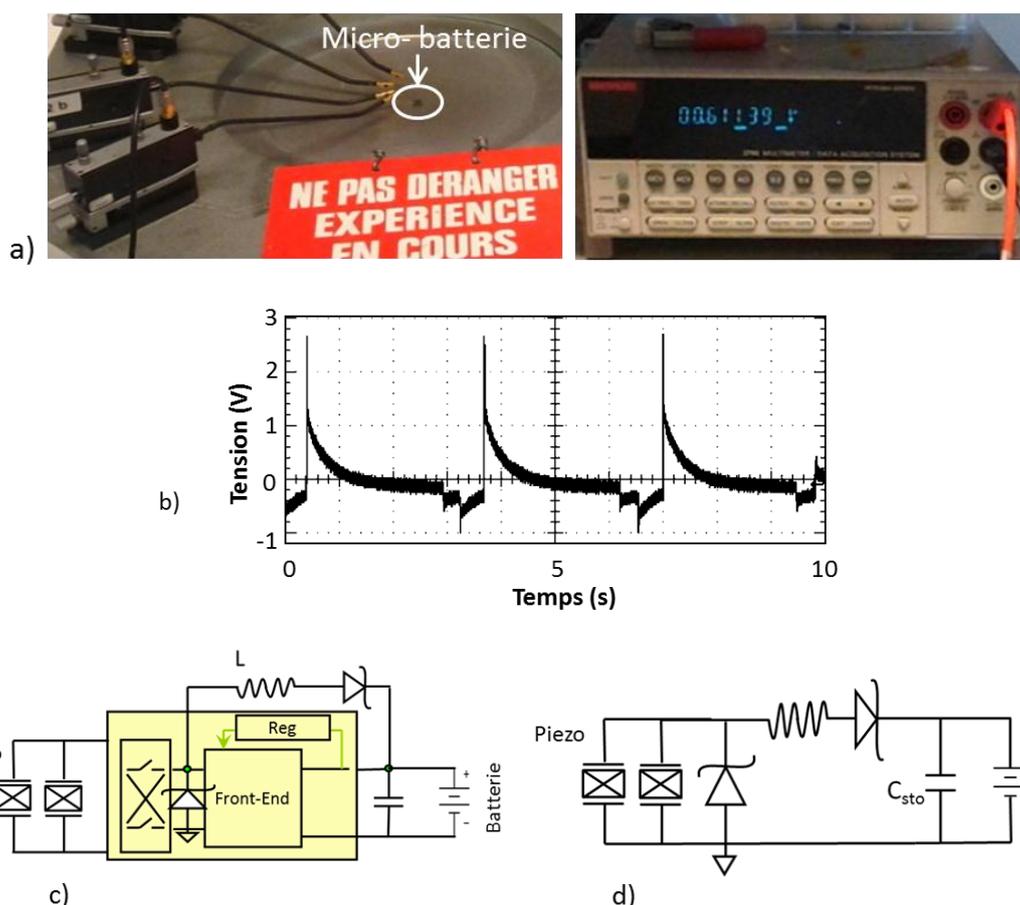


Figure 4.9: a) micro-batterie sous pointes et mesure de sa tension ; b) signal généré par un seul piézoélectrique; c) montage électrique pour chargement jusqu'à 1 V ; d) montage pour chargement au-delà de 1 V.

En première étape un chargement depuis 0.52 V à 0.83 V a été réussi en 5 minutes. La montée au-dessus de 0.83 V est lente suite au fait que la tension de charge est de 1V. Afin d'augmenter cette dernière, il a été décidé de brancher le récupérateur à un circuit à doublement de tension avec bobine (partie passive de l'entrée à récupération simple alternance, Figure 4.9 d). La consommation de la partie active du circuit étant évitée, il a été possible de charger la micro-batterie jusqu'à 1.8V.

4.1.3.3 Bilame cloquant à basse température.

Des essais de chargement de condensateur ont également été effectués avec des bilames cloquant à 40°C et décroquant à 25°C. Vu que la température de décroquage est basse, il a été nécessaire d'assurer un contact direct entre le bloc froid et le bilame pour que le refroidissement se fasse en un temps raisonnable. Par conséquent il a été décidé d'actionner le piézoélectrique par le bord du bilame (Figure 4.10 a). L'élément sous forme de poutre rectangulaire s'est avéré les plus performant dans ce cas de figure. Le signal obtenu contient plus d'oscillations par pic que dans le cas du piézoélectrique Murata 220 nF (Figure 4.10 b). En branchant le piézoélectrique à l'entrée à rectification simple alternance de la carte électrique en configuration passive, le condensateur de 10 μF a pu être chargé jusqu'à 5V. L'intensité du chargement de 0 à 2 V est de 5.6 μA . Le chargement de 2 à 4 V se fait avec une intensité de 2.7 μA . Ceci correspond à une puissance de 8.2 μW autour de 3V. Ce montage est donc mieux optimisé que les précédents pour un fonctionnement autour des 3 V, tension d'alimentation de nombreux circuits. L'inconvénient de cette configuration consiste dans la surface plus grande occupée, aussi bien que l'espace nécessaire à la mise en vibration de la poutre. Pour ces raisons la configuration à empilement vertical a été préférée pour la construction des prototypes.

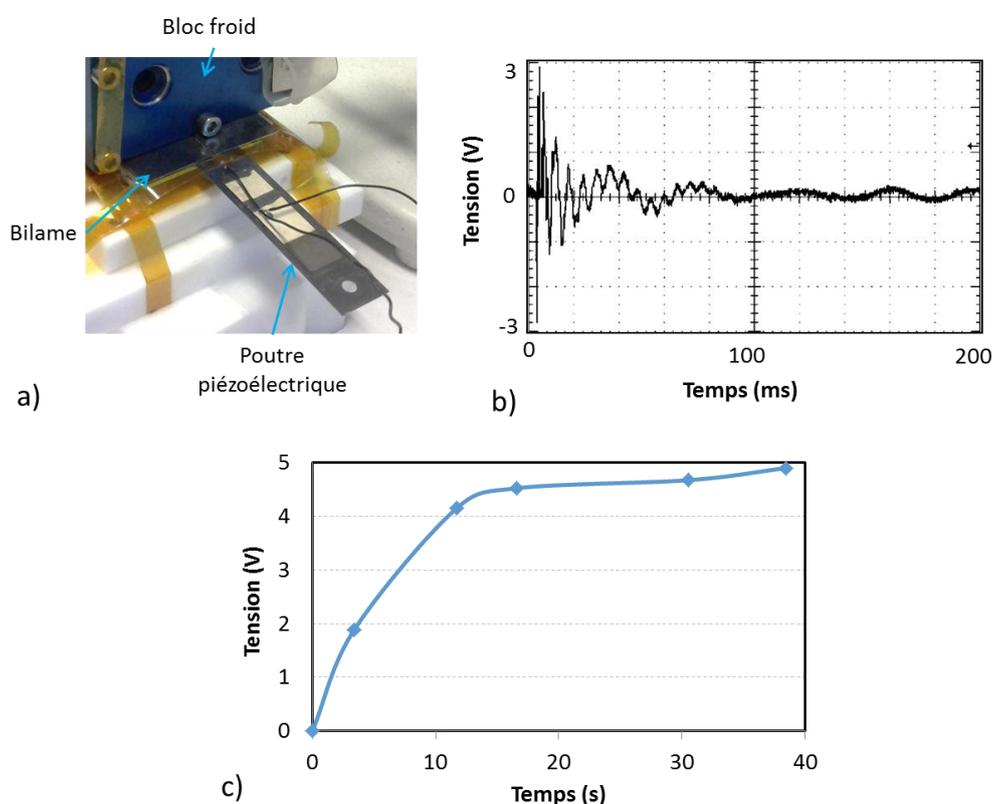


Figure 4.10: a) piézoélectrique sous forme de poutre actionné par un bilame 40-25°C ; b) signal généré ; c) chargement d'un condensateur 10 μF .

4.1.3.4 Allumage de diode avec dispositif à bilame

La configuration décrite précédemment a été utilisée pour allumer une diode électroluminescente rouge. Ceci est une démonstration visuelle de la puissance générée et aussi une potentielle application pour les dispositifs à bilame et piézoélectriques.

Ainsi, le condensateur de 10 μ F a été chargé à 5V puis déchargé dans une DEL ayant un seuil à 1.4V. Comme résultat la DEL clignote une fois et la tension sur le condensateur chute pour devenir égale à sa tension de seuil. Ceci peut être visualisé sur la Figure 4.11. Après le clignotement, le condensateur commence à être rechargé et un nouveau pulse de lumière peut être généré environ 10 secondes après le premier. Il est à noter que la sonde de l'oscilloscope, dont l'impédance est de 1 M Ω , consomme de l'énergie pendant la mesure de la tension sur le condensateur.

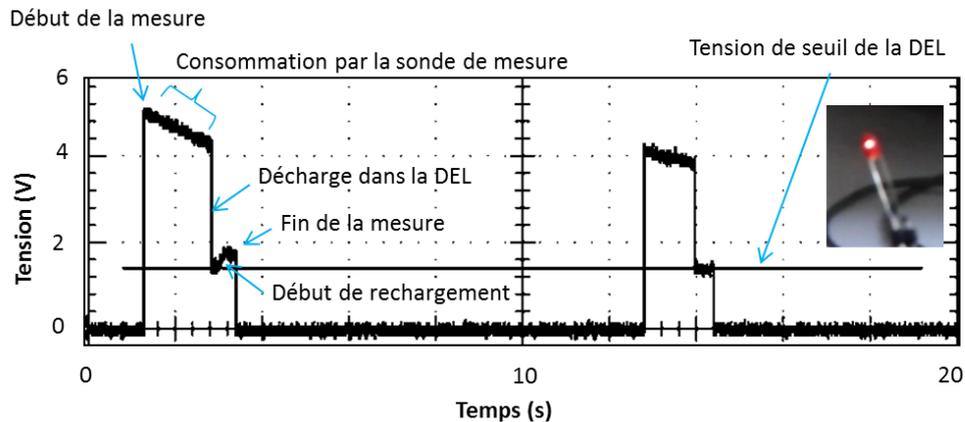


Figure 4.11: Mesure de tension sur le condensateur de stockage lors de l'allumage d'une DEL et photo du clignotement.

L'énergie stockée sur un condensateur et qui correspond à une variation de tension de V_1 à V_2 se calcule selon la formule :

$$E = \frac{C_{sto}(V_2^2 - V_1^2)}{2} \quad \text{Eq.(4.2)}$$

Pour un condensateur de 10 μ F qui est chargé de 2 à 4 V cette énergie est de 60 μ J. Cette quantité est générée par le dispositif décrit ci-haut en moins de 8s, et peut servir pour allumer une diode, aussi bien que pour envoyer un signal avec un capteur autonome asynchrone à petite distance.

4.1.4 Mise en prototype, fonctionnement avec refroidissement à l'air ambiant

La preuve de concept ainsi que les premières expériences avec les dispositifs à base de bilames et piézoélectriques ont été faites avec des composants discrets, sans mise en prototype, et en présence d'un bloc froid. En pratique, pour être capable de satisfaire la plupart des cas d'usage il est nécessaire de fonctionner avec un refroidissement à l'air ambiant. C'est une condition plus contraignante, car l'extraction de la chaleur est moins efficace. Des prototypes sur substrat dur capables de fonctionner dans ces conditions ont été construits et testés, les résultats étant présentés dans ce paragraphe.

4.1.4.1 Prototype fin fonctionnant avec convection forcée

La première mise en prototype a été faite pour un fonctionnement à une température autour de 50°C. Les bilames utilisés sont des 43-35°C et des 50-40°C. Les premiers sont fabriqués en R80 et mesurent 36x18x0,22 mm³ (Figure 4.12 a). Les derniers sont fabriqués en 108 SP et mesurent 28x28x0,2 mm³ (Figure 4.12 b). Plusieurs configurations ont été testées pour une mise en marche dans les nouvelles conditions. Celle qui a été retenue comprend une membrane piézoélectrique Kepo de diamètre 50 mm (Figure 4.12 c). Le prototype est construit sur une plaque en aluminium d'une épaisseur de 2 mm. Elle assure une bonne conduction de la chaleur de la plaque chaude vers le bilame, qui est placé sur la plaque. La membrane piézoélectrique est montée au-dessus du bilame. Elle est maintenue en place par des vis en nylon. C'est un matériau à basse conductivité thermique, ce qui permet de garder une bonne isolation entre le haut et le bas du prototype. Le diamètre des vis est de 3 mm.

Des cales en cuivre sont collées contre la face basse de la membrane au niveau de la zone d'impact du bilame. Leur rôle est de permettre de garder un écart raisonnable entre la membrane et le support en aluminium pour la gestion thermique tout en permettant au bilame d'exercer l'impact au cloquage et de rester en contact lors du refroidissement. La membrane piézoélectrique, qui fait également office de plaque froide doit garder une température suffisamment basse pour pouvoir refroidir le bilame. Avec tous ces facteurs pris en compte, l'épaisseur totale du prototype est de 5 mm (Figure 4.12 d).

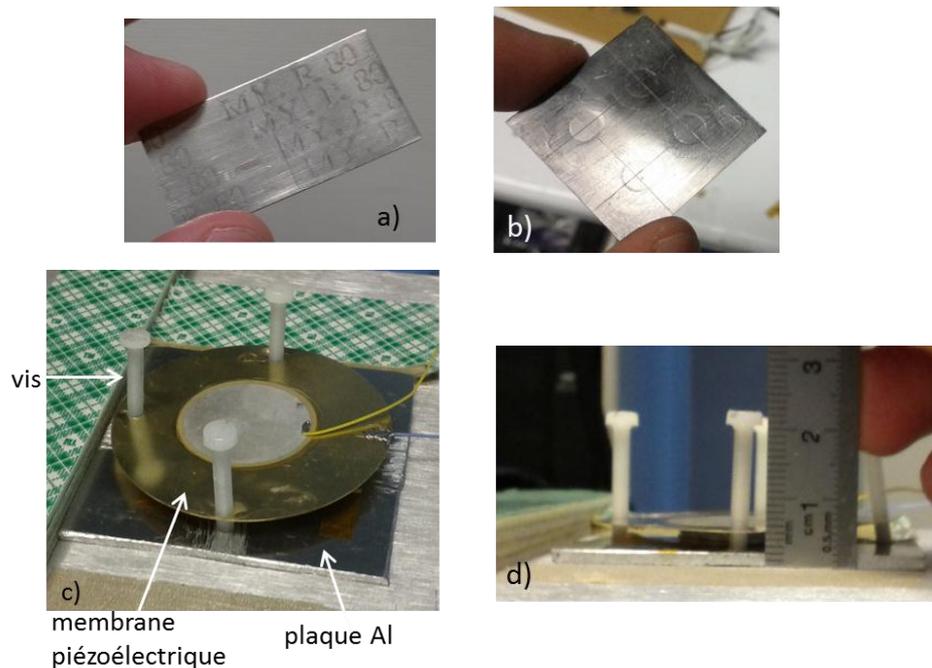


Figure 4.12: a) bilame 43-35 °C ; b) bilame 50-40°C ; c) prototype fin à refroidissement par convection, vue en perspective ; d) vue de profil : épaisseur de 5 mm.

La mise en marche avec le bilame 43-35°C a été faite sur une plaque chaude réglée autour de 55°C et avec convection forcée par ventilateur. Les signaux obtenus peuvent être vus dans la Figure 4.13. Il a été constaté que le signal varie avec la distance entre la membrane piézoélectrique et la plaque support (appelée aussi entrefer). Ainsi pour un petit entrefer un signal de 7 V d'amplitude crête à crête a été obtenu, avec une fréquence de 1.1 Hz (Figure 4.13 b). Pour un entrefer un peu plus grand l'amplitude du signal est de 10 V, avec une fréquence de 0.5 Hz (Figure 4.13 c).

La mise en marche avec le bilame 50-40°C a été faite à une température de plaque chaude de 60°C. Le signal obtenu a une amplitude de 13 V crête à crête avec une fréquence de cloquage de 0.4 Hz (Figure 4.13 d).

La force développée par le bilame 43-35 °C lors du choc a été mesurée avec un capteur de force. Il a été constaté que lors de l'impact du bilame sur le capteur une force proche de 3 N est transmise. Après l'impact la force oscille autour d'une position d'équilibre et se stabilise autour de 0.5 N (Figure 4.14).

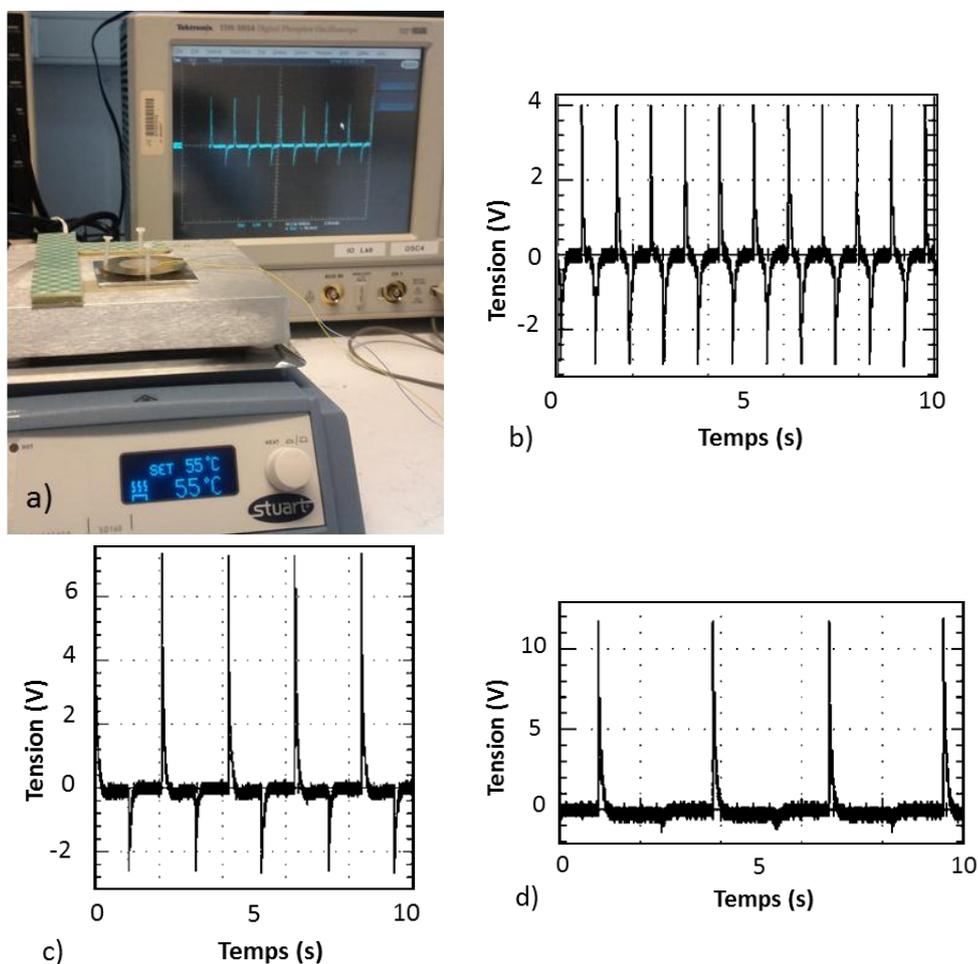


Figure 4.13: a) prototype sur plaque chauffante et acquisition de signal ; b) signal pour un faible entrefer avec bilame 43-35°C ; c) signal pour un grand entrefer avec bilame 43-35°C ; d) signal pour un bilame 50-40 °C.

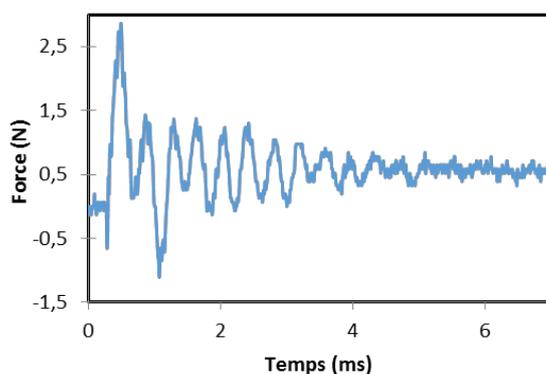


Figure 4.14: Force développée par un bilame 43-35°C après choc.

4.1.4.2 Analyse du comportement lors du cloquage

Une analyse plus approfondie du comportement du prototype décrit ci-dessus lors du choc a été menée afin de mieux comprendre l'allure des signaux acquis. En premier temps une acquisition synchronisée du déplacement et de la tension fournie par le piézoélectrique lors du choc ont été faits. La mesure du déplacement a été réalisée au vibromètre. L'acquisition est faite de manière à avoir un cloquage et un décroquage, avec un bilame 50-40°C. Les signaux peuvent être visualisés dans la Figure 4.15.

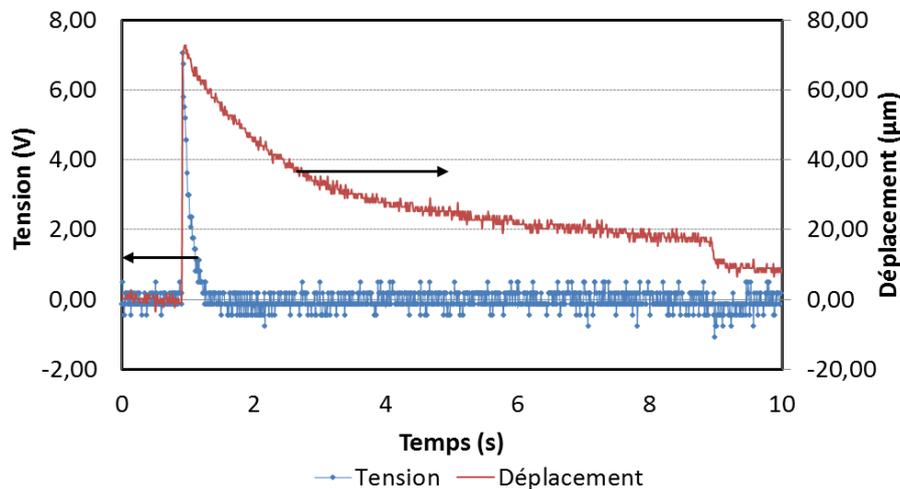


Figure 4.15: Evolution de la tension aux bornes du piézoélectrique et son déplacement au centre en fonction du temps.

La mesure de tension est faite avec une sonde d'impédance de 2 MΩ. On peut voir sur la courbe acquise qu'au moment du cloquage la tension monte brusquement, pour descendre après vers zéro avec une relaxation exponentielle.

La courbe de déplacement est tracée pour le centre de la membrane piézoélectrique. On peut voir qu'un bond du centre a lieu au moment de l'impact. Après le piézoélectrique se déplace lentement vers le bas. Cette relaxation est due au refroidissement du bilame, accompagné d'une déformation continue à ce stade. Une fois la bonne température atteinte, le bilame décroque et le centre du piézoélectrique se déplace brusquement vers le bas, mais avec une moindre amplitude qu'au cloquage. Le piézoélectrique ne récupère pas sa position initiale immédiatement après le décroquage. Ceci pourrait être dû aux contraintes thermiques rémanentes.

La relaxation de la tension a donc lieu plus vite que la relaxation thermique avant décroquage. Ceci est dû à la consommation de la sonde de mesure, qui permet le passage des charges et la neutralisation du piézoélectrique.

Il faut préciser que ces mesures ont été faites avec une résolution d'acquisition basse, de manière à avoir le signal sur une durée relativement longue. Des mesures complémentaires, à haute résolution ont été faites pour mieux comprendre ce qui se passe juste après l'impact. Pendant ces dernières le piézoélectrique a été branché à un ampèremètre afin de visualiser le courant généré. Ceci revient à faire une analyse en court-circuit.

Le déplacement au centre, la vitesse, ainsi que le courant ont été enregistrés simultanément. La charge stockée aux bords du piézoélectrique est calculée par intégration de l'intensité.

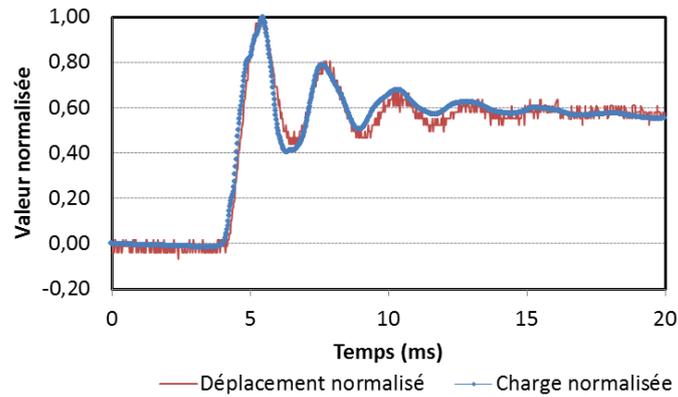


Figure 4.16: Déplacement et charge sur les électrodes après impact normalisés.

La Figure 4.16 donne l'évolution du déplacement au centre et de la charge stockée sur une durée de 15 ms après cloquage. On peut voir que les deux signaux sont très proches de la superposition. Dans ce cas on est donc dans la zone linéaire de sollicitation car la charge stockée en court-circuit est proportionnelle au déplacement du piézoélectrique. La charge maximale est de 860 nC et le déplacement maximal 111 μm . Sachant que la capacité du piézoélectrique est de 70 nF, on peut déduire l'énergie électrique stockée au premier pic selon la formule :

$$E_{sto} = \frac{Q_{max}^2}{2C_p} \quad \text{Eq.(4.3)}$$

avec Q_{max} – charge maximale stockée et C_p – capacité du piézoélectrique. L'énergie résultante est de 5.3 μJ .

La courbe de déplacement témoigne du fait qu'après l'impact le bilame et le piézoélectrique entrent en oscillation amortie. A la fin de l'oscillation les deux se stabilisent à environ 60 μm de la position initiale du piézoélectrique. La suite du mouvement est déterminée par le refroidissement du bilame.

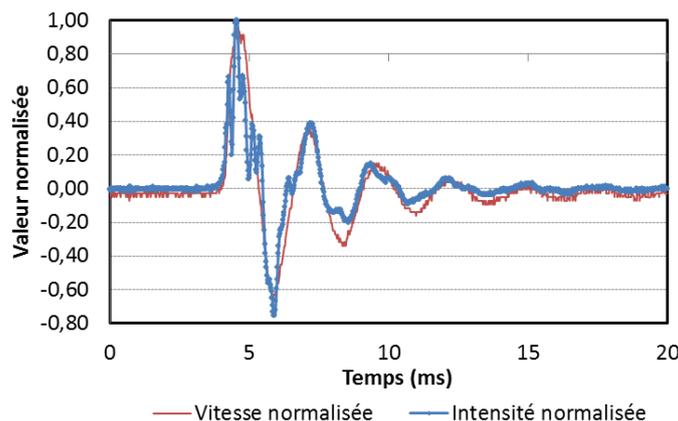


Figure 4.17: Vitesse au centre et intensité normalisées.

La Figure 4.17 donne la vitesse au centre et l'intensité en court-circuit. Comme dans le cas précédent, les deux sont en phase et évoluent de la même manière selon une oscillation amortie. La différence est dans le fait que l'intensité présente des modes secondaires d'oscillation. Ceux-ci peuvent être dus à des modes de vibration du piézoélectrique qui ne se répercutent pas sur le mouvement du centre. L'intensité maximale en court-circuit est de 1.5 mA.

4.1.4.3 Prototype fin fonctionnant avec convection naturelle

Pour qu'un dispositif à base de bilame puisse fonctionner il est nécessaire que l'intervalle d'hystérésis soit encadré par la température de la surface chaude du dispositif et la température de la surface froide (Figure 4.18 a). En effet il faut que la température de surface chaude puisse être supérieure à la température de cloquage pour que le bilame puisse être chauffé suffisamment pour cloquer. Aussi, il faut que la température de la surface froide soit inférieure à la température de décroquage pour que le bilame puisse être refroidi. Si ce n'est pas le cas (Figure 4.18 b), le bilame restera dans une des positions stables cloquée ou décroquée.

Un des défis de la construction des prototypes consiste dans la capacité de garder une différence de température suffisamment grande aux bords pour que le bilame puisse osciller. Pour le même corps de prototype cette différence est plus grande si la température de chauffage est importante. Il est donc plus facile de faire une mise en marche avec convection naturelle à haute température qu'à basse température pour une hystérésis de bilame donnée.

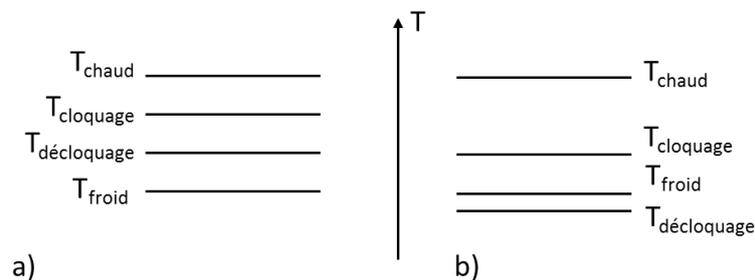


Figure 4.18: Distribution des températures: a) oscillation du bilame possible ; b) oscillation impossible.

Aussi, la mise en marche est d'autant plus facile que l'hystérésis du bilame est basse. En effet, ceci implique une moindre différence de température nécessaire et donc des moindres contraintes par rapport à l'évacuation de la chaleur.

Ces deux dernières conditions ont été recherchées pour une première mise en marche avec refroidissement par convection naturelle. Pour faire ceci, un bilame à faible hystérésis, pouvant osciller dans des conditions contraignantes a été fabriqué. Il fonctionne entre 83 et 81 °C. Le corps du prototype décrit précédemment a été porté à 95 °C, avec un tel bilame à l'intérieur. Le signal résultant a une amplitude de 1,5 V, avec une fréquence de 0,8Hz (Figure 4.19 a).

La mise en marche a été donc faite sans radiateur ni ventilateur, ceci étant la première preuve de concept dans ces conditions. L'amélioration de ces résultats et l'extension des températures de fonctionnement ont été recherchées. En premier temps un bilame et un piézoélectrique supplémentaires ont été rajoutés dans le prototype. Ceci a permis de doubler le niveau de tension (Figure 4.19 b), car les deux piézoélectriques sont actionnés en même temps quand un bilame cloque. La fréquence n'a pas été doublée pour autant car le refroidissement pour chaque bilame a été ralenti du fait de la présence d'un seconde membrane piézoélectrique. Néanmoins, le signal a été amélioré tout en gardant le volume global du prototype constant.

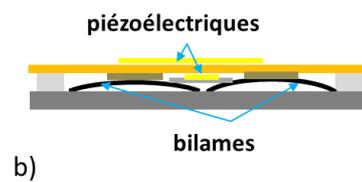
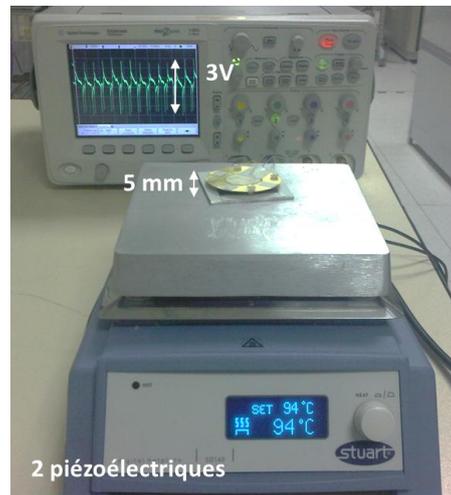
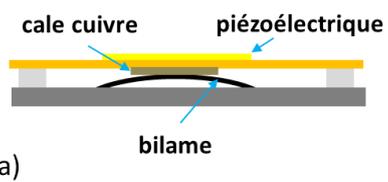
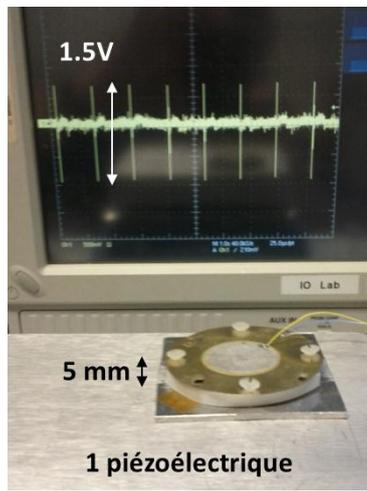


Figure 4.19: Prototypes fonctionnant avec refroidissement par convection naturelle : a) prototype à un bilame et un piézoélectrique, photo en fonctionnement et schéma en section ; b) prototype à deux bilames et deux piézoélectriques, photo en fonctionnement et schéma en section.

4.2 Prototypes sur substrat flexible. Fonctionnement matriciel.

Les convertisseurs thermoélectriques ont connu un développement accéléré la dernière décennie, avec notamment une recherche poussée au niveau des matériaux. La mise sur substrat flexible n'a pas pour autant été un axe prioritaire. A l'heure actuelle les dispositifs à effet Seebeck sont vendus comme des blocs rigides avec des surfaces non-déformables. Dans la majorité ce sont des dispositifs plats, avec quelques exceptions, ou l'adaptation à une surface incurvée a été réalisée. On peut citer dans ce sens le système de conversion thermoélectrique sous forme d'anneau de Marlow Industries (Figure 4.20). Des modules de tellure de bismuth sont montés sur des plaques sous forme d'arc de cercle en aluminium, qui font la transition géométrique entre la surface d'un tuyau et la surface d'un module. Des radiateurs sont associés aux modules pour l'évacuation de la chaleur.

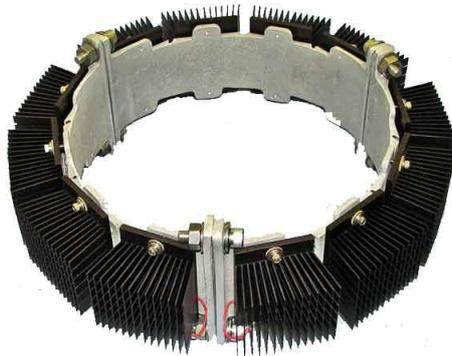


Figure 4.20: Système de conversion thermoélectrique sous forme d'anneau [Marlow Industries].

Cet exemple de réalisation comprend une adaptation de surface sans flexibilité intrinsèque. Si le diamètre du tuyau change, le dispositif doit être réadapté. Il est donc intéressant de développer des dispositifs flexibles capables de s'adapter à des surfaces de forme complexe et couvrir par ceci un nombre important d'applications. C'est une des directions de recherche les plus importantes qui ont orienté ce travail. Les prototypes flexibles conçus, aussi bien que les résultats des tests sont présentés dans cette section.

La fabrication sur substrat flexible permet de réaliser des structures matricielles, avec des cellules pouvant être optimisées pour les mêmes conditions de fonctionnement ou pour des conditions différentes. Un dispositif flexible réalisé avec des matériaux bas coût peut ouvrir la voie vers des applications grande surface.

4.2.1 Mise en œuvre sur substrat flexible

Le substrat choisi pour réaliser des prototypes flexibles est le Téflon. En couche aussi mince qu'un millimètre il a l'avantage de pouvoir être plié, sous un angle de 90° ou plus au besoin. Si la couche est de quelques millimètres d'épaisseur elle est plutôt rigide.

Le substrat flexible pour les prototypes a été usiné à partir d'une couche de 5 mm d'épaisseur. La première réalisation a été une matrice 3x3 (Figure 4.21). Les neuf cellules ont été séparées les unes des autres par de tranchées de 4 mm de largeur. Au fond des tranchées l'épaisseur du Téflon est de 1 mm. Ceci permet d'avoir de la flexibilité à ce niveau et de plier les cellules une par rapport à l'autre.

Une cavité de 0.8 mm a été creusée dans chacune des cellules afin de loger les bilames (Figure 4.22). La cavité est légèrement plus grande que $36 \times 18 \text{ mm}^2$. Le Téflon restant à ses bords sert de support mécanique pour le piézoélectrique.

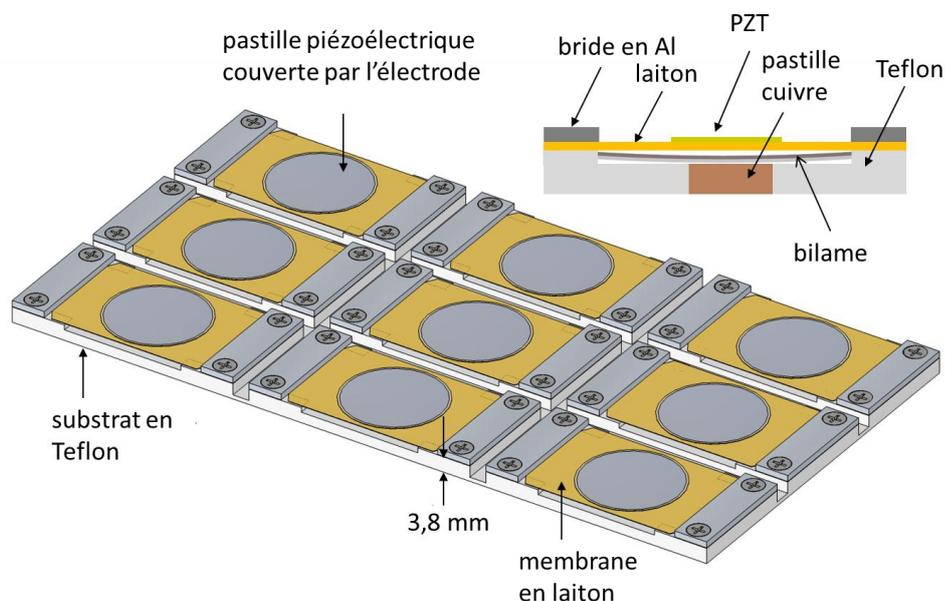


Figure 4.21: Matrice 3x3 sur substrat flexible avec vue en coupe d'une cellule.

Un trou traversant circulaire est creusé au niveau du centre de chaque logement pour les bilames et une pastille en cuivre y est insérée. Son rôle est de canaliser le flux de chaleur arrivant sur le poinçon, zone sensible du bilame. Ainsi les ailes du bilame sont chauffées moins, ce qui permet un meilleur contrôle au refroidissement. La pastille peut présenter une rainure ou un profil angulaire sur son périmètre afin de pouvoir être insérée et tenir mécaniquement dans le Téflon.

Le piézoélectrique est posé par-dessus le bilame. Il est séré avec deux brides en aluminium et des vis en nylon qui traversent le Téflon. Des trous filetés sont prévus à cet effet. Un insert métallique est introduit dans chaque filetage pour assurer une meilleure tenue mécanique. Les membranes piézoélectriques utilisées pour la fabrication de ces prototypes sont la Kepo de 50 mm de diamètre et la Kingstate de 44 mm de diamètre. Des cales en cuivre sont collées au niveau du centre de chaque membrane et font office de pont thermique entre le piézoélectrique et le bilame. Les membranes piézoélectriques servent également de surfaces froides.

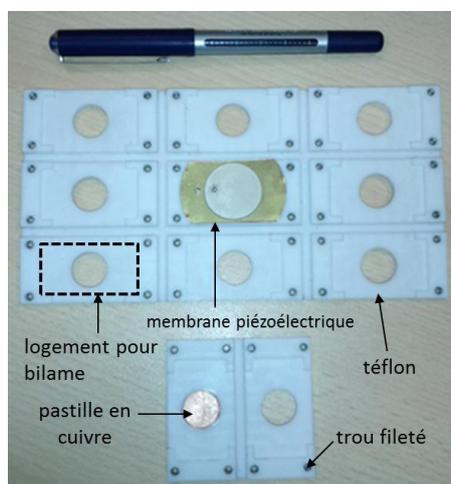


Figure 4.22: Substrats en Téflon usinés pour une matrice 3x3 et une matrice 2x1.

4.2.2 Mise en œuvre de la connectique flexible

Chaque cellule faisant partie d'une matrice génère un signal de manière indépendante des autres une fois la mise en marche faite. Les pics fournis par plusieurs cellules sont déphasés car les bilames n'oscillent pas forcément de manière synchronisée. Il est donc nécessaire de faire des connexions électriques en sorte que les trois critères suivants soient respectés :

- le traitement du signal provenant de chaque piézoélectrique doit être possible
- les interférences destructives entre piézoélectriques doivent être évitées
- une seule sortie électrique pour toute la matrice doit être mise en place
- les pistes de connexion doivent être flexibles

Une manière simple pour arriver à satisfaire ces critères de point de vue électrique est d'associer un pont de diodes à chaque piézoélectrique (Figure 4.23). En effet, le signal provenant de chacun est ainsi rectifié et après cette étape tous les signaux générés par les cellules peuvent être envoyés vers la même sortie.

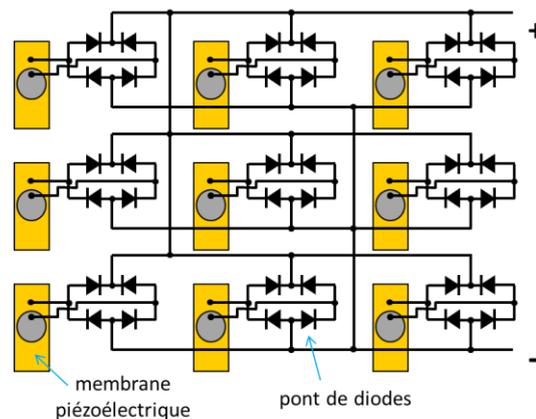


Figure 4.23: Schéma de connexion avec un pont de diodes par piézoélectrique

La fabrication des pistes électriques est faite à partir d'une feuille contenant une couche en Kapton avec deux couches de cuivre d'une part et d'autre. C'est un empilement flexible utilisé couramment dans la fabrication des cartes électriques. Un motif permettant l'association sur une matrice 3x3 est découpé dedans (Figure 4.24).

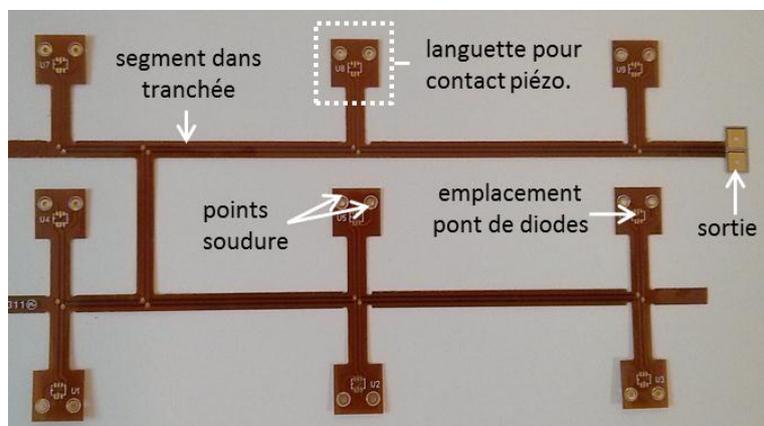


Figure 4.24: Photo des pistes de connexion flexibles.

Les pistes sont collées au fond des tranchées de la matrice. Des languettes contenant des points de soudure se lèvent des tranchées pour la prise de contact sur les piézoélectriques. Elles contiennent également des emplacements pour la soudure des ponts de diodes.

Les pistes en cuivre sont dessinées sur deux niveaux, d'une part et de l'autre du Kapton, avec des vias traversants pour faire l'interconnexion. Elles sont organisées de manière à avoir une seule sortie électrique. Un vernis est appliqué à l'extérieur pour protéger le métal.

Des ponts de diodes intégrés ont été utilisés pour la rectification du signal. Ils ont été choisis de manière à avoir des petites fuites et la possibilité de fonctionner à haute température. Ils contiennent des diodes Schottky avec une tension de seuil de 0.4V. Les fuites sont de 100 nA pour une tension inverse de 50V. Elles peuvent opérer jusqu'à une température de 125°C. Le boîtier de chaque pont de diodes mesure environ 2x2x1 mm². C'est donc des composants compacts.

La matrice sur Téflon 3x3 a pu être assemblée avec les pistes flexibles. La Figure 4.25 montre le prototype disposé sur un tuyau de 8 cm de diamètre. L'assemblage réalisé montre la flexibilité des prototypes et valide la possibilité d'intégration avec la connectique souple. Cependant, la mise en marche et les tests électriques ont été faits sur des modules avec moins de cellules, pour gagner du temps et pour mieux répondre aux cas d'usage.

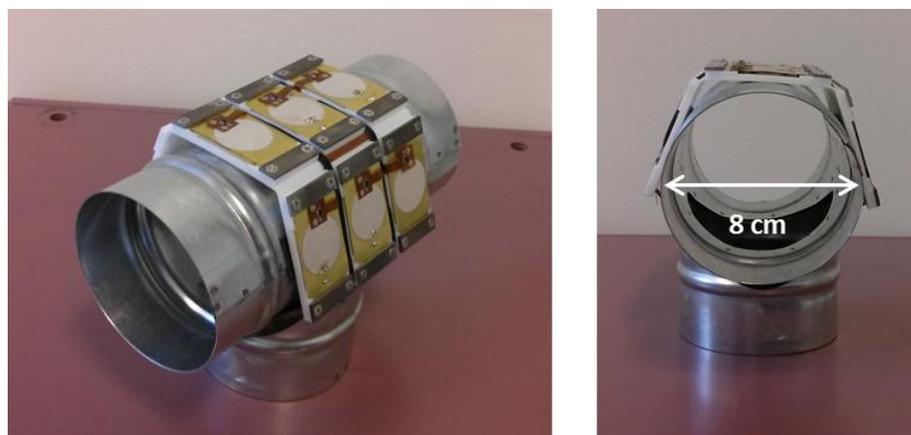


Figure 4.25: Matrice 3x3 avec pistes d'interconnexion flexibles disposée sur un tuyau de 8 cm de diamètre. Vue en perspective et de profil.

4.2.3 Fonctionnement d'une cellule et d'une matrice

4.2.3.1 Tests avec des cellules unitaires

Un des avantages de la matrice 3x3 fabriquée est le fait qu'on peut découper à partir d'elle des modules ayant un nombre de cellules inférieur, voire des cellules unitaires. Ces dernières permettent de trouver les bons réglages et de faire des tests rapides avant d'assembler des matrices. Ainsi des cellules unitaires ont été testées à des différentes températures, en commençant par 58°C, jusqu'à 150°C.

Les premiers tests ont été réalisés à 58°C et 98°C. Dans le premier cas un bilame 43-35 °C a été inséré dans la cellule. Un ventilateur est nécessaire pour la mise en marche. Des pics de tension jusqu'à 5V ont été obtenus au cloquage sur une sonde d'une impédance de 1 MΩ (Figure 4.26). La mise en marche à 98°C a été faite avec un bilame 84-81°C de 220 μm d'épaisseur. Le signal typique fourni dans ce cas est de 4 V crête à crête. Vu la faible hystérésis du bilame 84-81°C la mise en marche est faite sans ventilateur, avec refroidissement uniquement par convection naturelle.

Ce dernier prototype unitaire a été adapté pour un fonctionnement sur une surface verticale. Le bilame mis à l'intérieur est tenu à ses extrémités pour éviter qu'il s'incline dans la cavité ou qu'il se

décale lors du fonctionnement. Les premiers tests sur surface verticale ont été effectués à une température de 95°C, le signal restant le même que celui d'un bilame non-contraint qui travaille horizontalement.

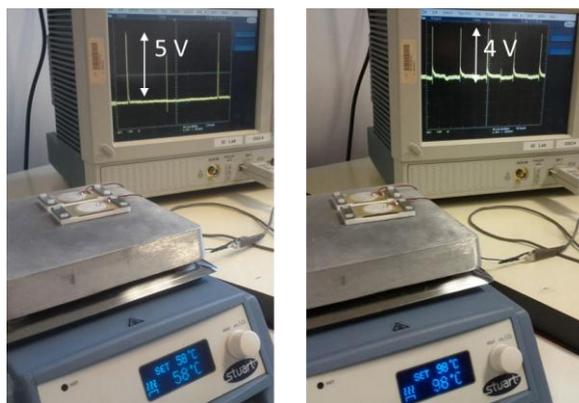


Figure 4.26: Prototypes unitaires fonctionnant à 58 et 98°C.

Des configurations très diverses ont été essayées pour la construction des prototypes. Ainsi, des poutres ont pu être découpées à partir des membranes piézoélectriques et placées de manière à ce que la pastille piézoélectrique soit proche de l'encastrement. Des tests avec un bilame et une, deux ou quatre poutres ont été faits. L'évolution des signaux est montrée dans la Figure 4.27.

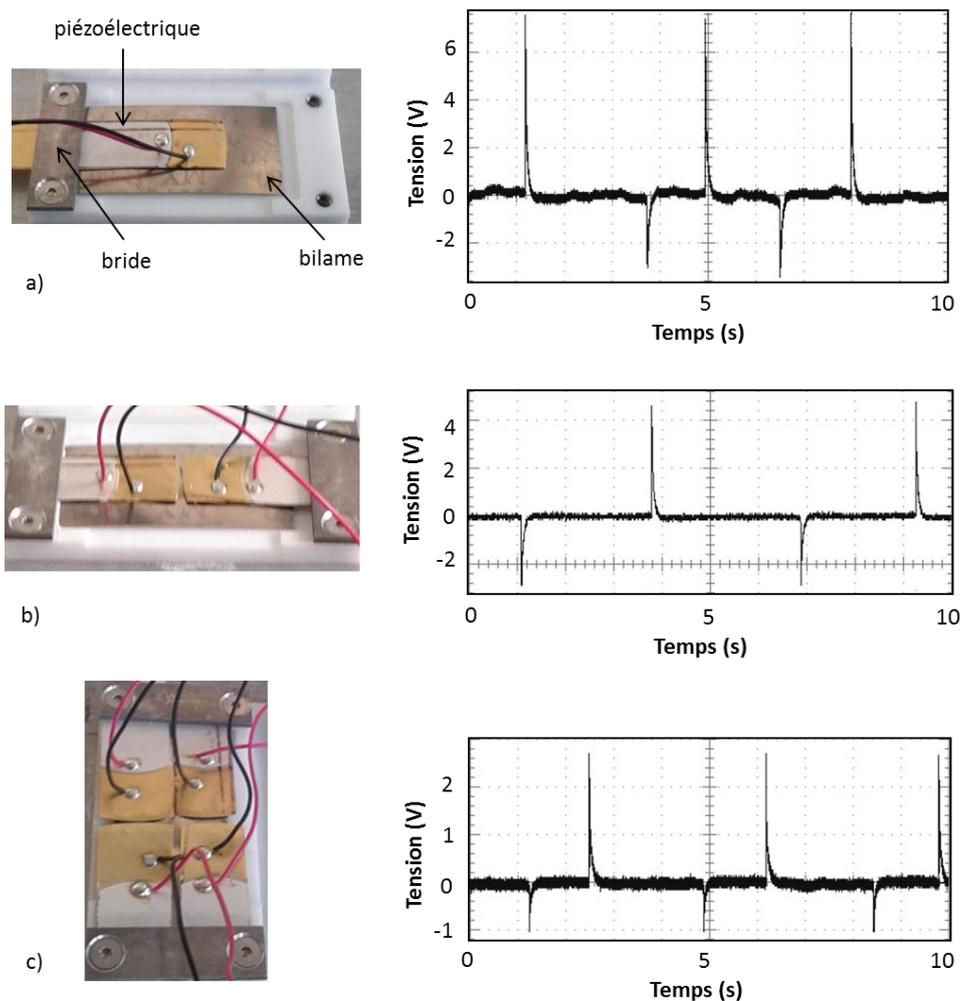


Figure 4.27: Configurations avec une cellule en Téflon et poutres piézoélectriques: a) une poutre ; b) deux poutres ; c) quatre poutres. Le signal est donné pour une seule poutre à chaque fois.

Dans chacun de cas présentés la mise en marche est faite avec un bilame 83-81°C. Si une seule poutre est montée au-dessus du bilame, il y a besoin d'un ventilateur pour le fonctionnement. Le signal obtenu est d'amplitude relativement grande : 11.4V crête à crête. La fréquence des oscillations est d'environ 0.3 Hz. Si le dispositif n'est pas refroidi par le ventilateur, le bilame reste à l'état haut après cloquage. Si une seconde poutre est rajoutée dans l'assemblage, il est possible de faire la mise en marche avec convection naturelle. Le signal obtenu est de 7.6 V crête à crête, avec une fréquence de 0.17 Hz. L'amplitude de la tension est moins importante que dans le cas précédent car cette fois-ci le bilame déforme deux poutres au lieu d'une et donc induit moins de déformation dans chacune. Si la mise en marche est faite avec 4 poutres, l'amplitude des pics baisse à 3.7 V crête à crête, par contre la fréquence remonte à 0.3 Hz, avec refroidissement par convection naturelle.

Cet enchaînement de tests montre bien les compromis à chercher pour faire marcher le dispositif. Il est nécessaire que le bilame entre en contact avec une membrane froide pour osciller. Plus sa surface est grande, plus le refroidissement est efficace. Par contre, moins sa déformation sera importante pour une épaisseur donnée, tout comme le signal résultant.

Afin d'augmenter l'énergie développée au cloquage par rapport au cas précédent il a été décidé d'augmenter l'épaisseur de 100 μm et l'hystérésis de 1°C. Des mesures d'énergie mécanique ont été faites sur l'élément qui cloque à 83-81°C de 220 μm utilisé précédemment et sur un élément de 300 μm d'épaisseur fonctionnant à 80-77 °C. Ainsi le premier développe autour de 106 μJ , tandis que le second autour de 245 μJ sur un cycle d'oscillation. L'énergie mécanique est plus que doublée avec les nouvelles caractéristiques. L'autre détail qui change entre les deux cas est la forme du poinçon. Dans le second cas il est plat, tandis que dans le premier son centre est légèrement surélevé. L'avantage amené par la nouvelle géométrie étant mis en évidence, une série de bilames avec des températures de fonctionnement dans une gamme étendue a été fabriquée. Les températures de cloquage s'étalent de 50°C à 110°C, avec 3°C d'hystérésis à chaque fois. Des bilames 115°C avec une hystérésis moyenne mesurée de 4°C ont également été fabriqués. Les énergies mécaniques pour cette série ont été mesurées et sont présentées dans le paragraphe 2.2.3.

Un prototype fonctionnant entre 140 et 150°C a été mis au point en utilisant un bilame 115-111°C et un piézoélectrique Kepo 50 mm. Le dispositif en marche est montré dans la Figure 4.28. Le signal généré est d'environ 13 V crête à crête. La température mesurée au centre du prototype sur la membrane piézoélectrique est de 90°C, avec convection naturelle. Ceci veut dire que la différence de température que le prototype garde entre le haut et le bas est de 50°C. C'est une valeur intéressante sachant qu'elle obtenue sans radiateur.

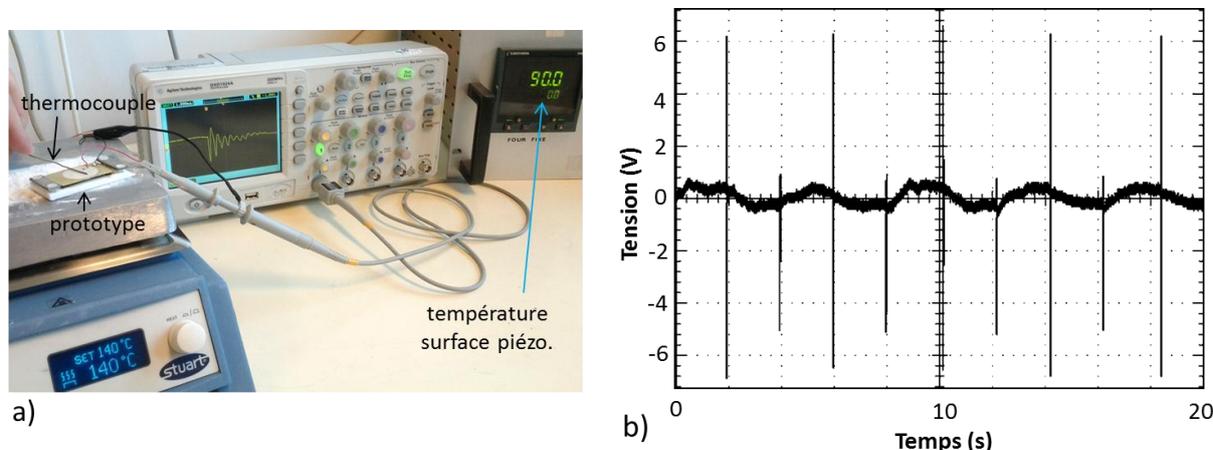


Figure 4.28: Prototype fonctionnant à 140°C : a) banc de test ; b) signal mesuré.

Le même bilame a été utilisé pour une mise en route aux mêmes températures avec une membrane piézoélectrique de type Murata de diamètre 39 mm. La membrane a été encastrée d'un côté sur sa partie métallique entre deux brides en aluminium (Figure 4.29 a). Un agrandissement sur un pic obtenu au cloquage est donné dans la Figure 4.29 b. Son amplitude est de 6 V crête à crête et donc 2 fois inférieure au cas précédent. Par contre, la capacité du piézoélectrique utilisé est bien supérieure.

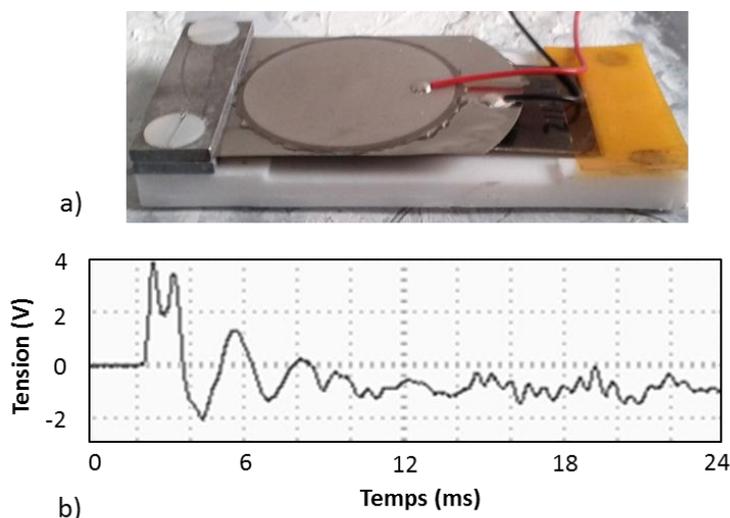


Figure 4.29: Prototype fonctionnant à 140°C avec piézoélectrique encastré d'un côté : a) photo ; b) agrandissement sur un pic de cloquage.

4.2.3.2 Estimation de l'énergie fournie par pic

L'amplitude des pics de tension et leur fréquence sont des caractéristiques importantes pour décrire les signaux générés par nos dispositifs de récupération. Une autre information qu'il est intéressant de savoir extraire à partir de ces pics est l'énergie électrique disponible ainsi que l'énergie mécanique à l'origine.

En cloquant le bilame développe une certaine énergie cinétique qu'il transmet partiellement au piézoélectrique. De manière générale le choc entre les deux est plastique. Après impact les deux vibrent tout en restant en contact. Comme vu précédemment le déplacement après choc correspond à une oscillation amortie. Il est donc intéressant de déduire à partir de cette forme l'énergie mécanique injectée dans le piézoélectrique aussi bien que l'énergie électrique qu'il est possible d'extraire.

Il a été vu dans le paragraphe 3.2.2.4 que lors d'une sollicitation en circuit ouvert l'énergie est injectée dans le piézoélectrique sous forme mécanique et sous forme électrique. Le rapport entre cette dernière et l'énergie totale injectée correspond au carré du facteur de couplage. Il suffit donc de faire le calcul inverse pour déduire l'énergie totale :

$$E_{tot} = \frac{E_{el}}{K_e^2} \quad \text{Eq.(4.4)}$$

avec K_e – coefficient de couplage équivalent de la structure piézoélectrique, E_{el} – énergie électrique emmagasinée calculée selon la formule :

$$E_{el} = \frac{C_{piezo} V^2}{2} \quad \text{Eq.(4.5)}$$

Si le piézoélectrique est mis en court-circuit une fois un pic de tension atteint, il est possible de récupérer l'énergie électrique stockée. Ceci fait partie du principe des techniques de récupération de type SSH, décrites dans le paragraphe 3.4.2. Le piézoélectrique mis en court-circuit est neutralisé de point de vue électrique. La position à laquelle cela se passe devient une nouvelle référence de tension.

Supposons maintenant que la gestion de puissance est faite avec une technique de type SECE, ce qui correspond au circuit dédié de STMicroelectronics. Un premier pic de tension va être créé lors de l'impact du bilame avec le piézoélectrique. Il sera détecté et l'énergie électrique stockée va être drainée. A l'issue de cette étape le piézoélectrique aura une tension nulle a ses bords, tandis qu'il sera à son maximum de déplacement. A partir de ce point la structure se déplacera vers le bas pour atteindre un minimum de déplacement. Vu que la polarisation interne du piézoélectrique va changer avec le déplacement, un nouveau pic de tension va être créé. Sa valeur correspondra à la chute de tension mesurée en circuit ouvert. Cette nouvelle énergie électrique stockée pourra elle aussi être récupérée. La structure continuera son oscillation et se déplacera vers le haut en créant un nouveau pic de tension. Il sera donc possible de récupérer de l'énergie électrique tant que la structure vibre. L'énergie maximale récupérable avec cette approche peut donc être calculée selon :

$$E_{el\ max} = \sum \frac{C_{piezo} \Delta V_{max-min}^2}{2} \quad \text{Eq.(4.6)}$$

avec $\Delta V_{max-min}$ – différence entre un maximum et un minimum consécutifs. La somme est faite sur tout le signal. Un exemple de traitement est donné dans la Figure 4.30. La tension en circuit ouvert se présente comme une vibration amortie avec départ à zéro et amortissement autour d'une position d'équilibre haute. Cette position est due au fait que le bilame maintient le piézoélectrique en déformation après cloquage. Quand le premier pic de tension est détecté le piézoélectrique est neutralisé (premier segment vertical rouge). Son énergie est transmise à une bobine. Si le circuit est à rectification double alternance, la position à laquelle le premier maximum est créé devient la référence de tension et un autre pic positif peut être créé quand le piézoélectrique se déplace dans le sens opposé. Quand le second pic est détecté, le piézoélectrique est à nouveau vidé de son énergie. Ainsi, toute variation de tension en circuit ouvert sera retranscrite en valeur absolue dans le signal obtenu avec le circuit de gestion de puissance. Les oscillations vont continuer avec transfert d'énergie à chaque pic.

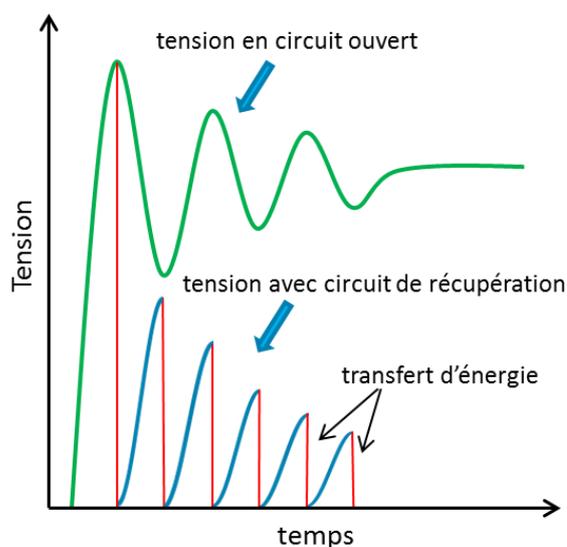


Figure 4.30: Signal en circuit ouvert et avec circuit de gestion de puissance idéal (principe SECE).

Il est donc possible d'estimer l'énergie électrique récupérable à partir de ce traitement. Il suffit de mesurer les différences entre les maxima et les minima et utiliser Eq.(4.6). Ce calcul donne, bien évidemment une approximation de l'énergie récupérable avec une technique de type SECE. Il ne prend pas en compte le seuil de rectification et la consommation du circuit. Une autre approximation faite porte sur le signal lui-même, qui est censé être amorti plus qu'en circuit ouvert une fois le circuit de gestion de puissance branché. Cette dernière approximation est justifiée par le fait que le rapport entre l'énergie électrique et l'énergie totale insérée dans une membrane piézoélectrique utilisée est typiquement de 10%, et que le taux d'amortissement mécanique est plus significatif que le taux d'amortissement électrique pour l'instant.

Aussi, il est important de rappeler que l'énergie électrique extraite dépendra de la technique de récupération appliquée. Comme décrit dans la section 3.3, le taux d'amortissement électrique est mis en concurrence avec le taux d'amortissement mécanique. Il est donc nécessaire que le premier soit aussi grand que possible.

Pour la suite l'énergie électrique disponible sera calculée selon la méthode décrite ci-dessus sachant que le fonctionnement du circuit dédié de STMicroelectronics repose sur le même principe. L'énergie transmise au piézoélectrique sera calculée selon Eq.(4.4), à partir du premier pic de tension généré.

4.2.3.3 Matrice 2x2

Des matrices 2x2 et 3x1 ont été fabriquées et mises en marche. Les tests ont été faits sur surface plane, aussi bien que sur un tuyau, en profitant de la flexibilité des prototypes.

La matrice 2x2 a été assemblée pour un fonctionnement autour de 75°C. Les bilames utilisés sont des 70-67°C en 108SP, avec des dimensions de 36x18x0.3 mm³. Les piézoélectriques utilisés sont des membranes découpées à partir des éléments Kepo. La première mise en marche a été faite sur une surface plane (Figure 4.1 a). Ultérieurement la matrice a été testée sur un tuyau de 8 cm de diamètre avec circulation d'eau chaude à l'intérieur. Ces essais ont été faits pour un cas d'usage intéressant un potentiel intégrateur de notre solution. La température ambiante était d'environ 23°C. Les signaux générés par les quatre cellules sont montrés dans la Figure 4.31 b. Chacune des cellules est branchée à une voie séparée de l'oscilloscope pour faire la mesure. On peut remarquer le fait que les signaux ont des amplitudes crête à crête allant de 8 à 16 V. La fréquence des pics est d'environ 2.4 Hz. Les bilames oscillent à une fréquence jusqu'à 0.5 Hz pour une seule cellule, avec une moyenne à 0.3 Hz.

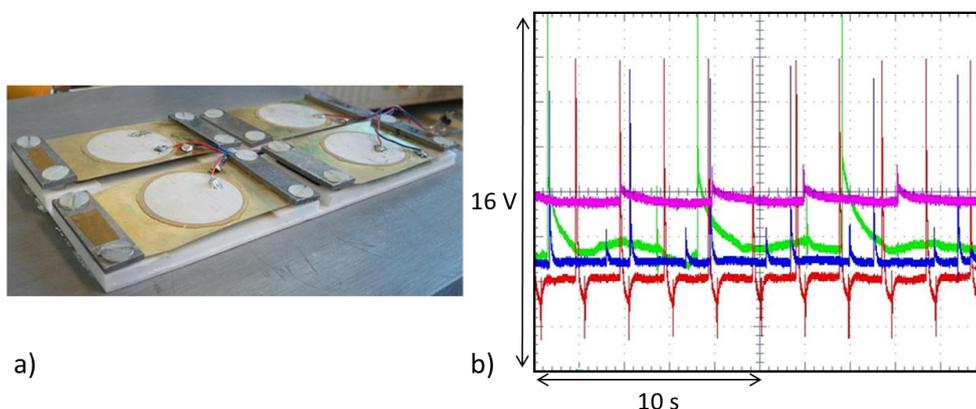


Figure 4.31: a) matrice 2x2 ; b) signal de la matrice sur tuyau à 75°C.

On peut remarquer le fait que les amplitudes des signaux aussi bien que les fréquences ne sont pas les mêmes pour toutes les cellules. Une certaine variabilité existe au niveau des signaux générés. Plusieurs facteurs en sont la cause, en commençant par la précision sur les températures caractéristiques des bilames. Pour la série utilisée ici, la précision à la fabrication est de +/- 5°C. On peut se rendre compte de l'impact de cette source de variabilité en mesurant les énergies développées par les bilames (voir paragraphe 2.2.3), qui peuvent varier du simple au triple pour la même température de fonctionnement visée. Une autre source de variabilité provient de l'étape d'assemblage. En effet le montage est manuel, ce qui ne permet pas d'avoir une haute précision sur les réglages. Cet effet est mis en évidence par les agrandissements temporels sur les pics de cloquage (Figure 4.32).

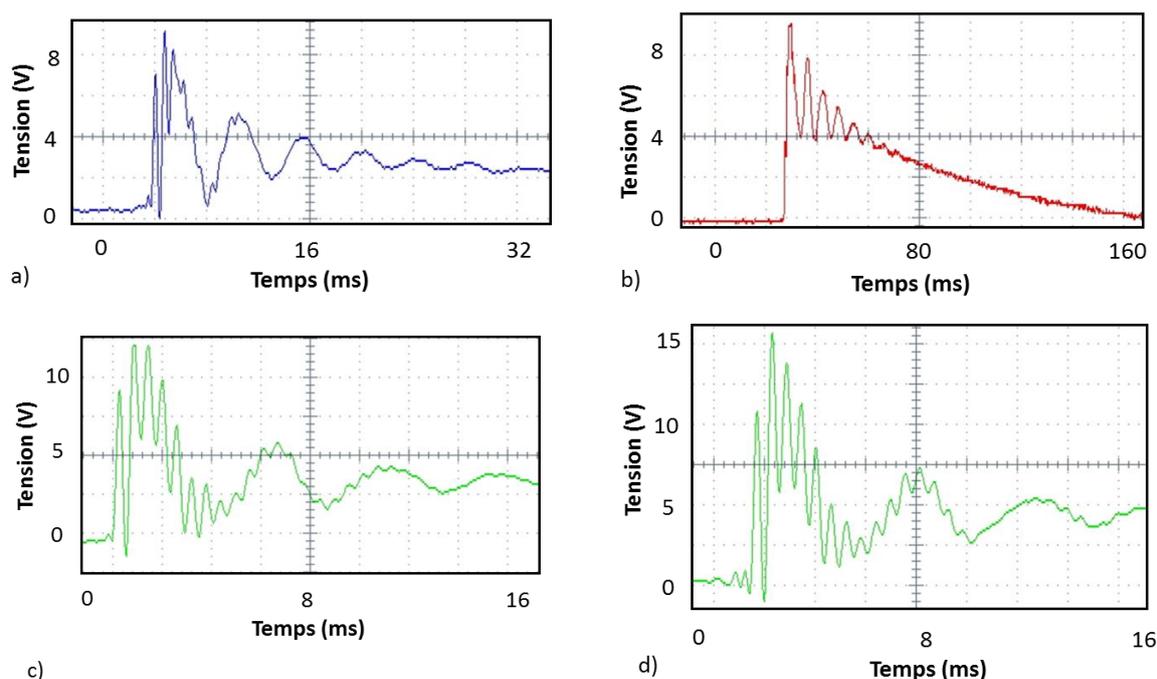


Figure 4.32: Agrandissements temporels sur les signaux générés par les cellules d'une matrice 2x2 au cloquage : a) cellule 1 ; b) cellule 2 ; c) cellule 3 ; d) cellule 3 optimisée.

On peut remarquer que les oscillations après cloquage ne sont pas les mêmes pour toutes les cellules. Le piézoélectrique de la cellule 1 (pics bleus) oscille selon deux modes amortis, un ayant une basse fréquence et l'autre une haute fréquence. Pour la cellule 2 le signal contient un seul mode. On peut voir très clairement la superposition de l'oscillation amortie due aux vibrations après choc avec l'exponentielle décroissante due à la consommation de la sonde de mesure. Dans la cellule 3 les oscillations contiennent deux modes d'amplitude importante. Le mode à haute fréquence est plus riche en énergie que le mode à basse fréquence car il est moins amorti.

Des mesures de fréquence, énergie et puissance ont été faites pour les 3 cellules et sont présentées dans le Tableau 4.2. Le calcul de l'énergie électrique développée par pic de cloquage est fait avec la méthode décrite dans le paragraphe précédent, tout comme le calcul de l'énergie transmise au piézoélectrique. L'énergie déduite varie entre 6 et 25.7 μJ par pic. Si la température de plaque chaude est légèrement augmentée le pic de cloquage généré par la cellule 3 passe de 14 à 16,5 V d'amplitude, pour une énergie de 31 μJ (Figure 4.32 d). Les pics à deux modes d'oscillation portent des énergies plus importantes que le pic à un seul mode. L'énergie transmise au piézoélectrique varie entre 33 et 71 μJ . Le rendement mécano-électrique intrinsèque au piézoélectrique peut être déduit en faisant le rapport entre ces deux séries de valeurs. Il varie entre 16.7 et 36.8%. La puissance électrique disponible est entre 2.9 et 3.9 μW par cellule.

L'énergie mécanique développée par le bilame inséré dans la cellule 2 a été mesurée. Elle est de 171 μJ au cloquage et 264 μJ au décroquage, ce qui correspond à un total de 435 μJ . Cette mesure permet de mieux se rendre compte de pertes dans la cellule. Ainsi, sur les 171 μJ développés au cloquage, uniquement 36 μJ sont transmis au piézoélectrique. Ceci correspond à un taux de transmission de 21%. Sur les 36 μJ au plus 6 peuvent être convertis en énergie stockée avec la technique à disposition. Le rendement mécano-électrique global au cloquage est de 3.5 %. Les pics générés au décroquage sont dus au fait que le bilame relâche le piézoélectrique. Par contre, l'énergie cinétique générée par le bilame pendant cette étape n'est pas récupérée. Le bilame frappe la pastille en cuivre en basculant, vu qu'il n'y a pas de piézoélectrique du côté de la source chaude. En plaçant un second élément piézoélectrique il serait possible d'améliorer le rendement de récupération et la puissance électrique générée.

Paramètre mesuré	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3
Energie électrique par pic de cloquage (μJ)	11,2	6	25,7
Energie transmise au piézoélectrique (μJ)	33	36	71
Fréquence d'oscillation du bilame (Hz)	0,26	0,52	0,15
Fréquences d'oscillation du piézoélectrique (Hz)	208/1250	150	167/1750
Puissance électrique (μW)	2,9	3,1	3,9
Puissance mécanique transmise au piézoélectrique (μW)	8,6	18,6	10,6
Rendement électromécanique associé (%)	34	16,7	36,8

Tableau 4.2: Energie et puissances développées par les cellules de la matrice 2x2.

4.2.3.4 Matrice 3x1

Une matrice 3x1 a été assemblée et optimisée pour un fonctionnement autour de 70°C. Les bilames utilisés sont des 60-57 °C, avec des dimensions de 36x18x0.3 mm³. Le matériau de fabrication, comme dans le cas de la matrice 2x2 est le 108SP. La mise en marche a été faite sur surface plane et aussi sur tuyau. Une vue de la matrice sur un tuyau de 8 cm de diamètre est donnée dans la Figure 4.33.

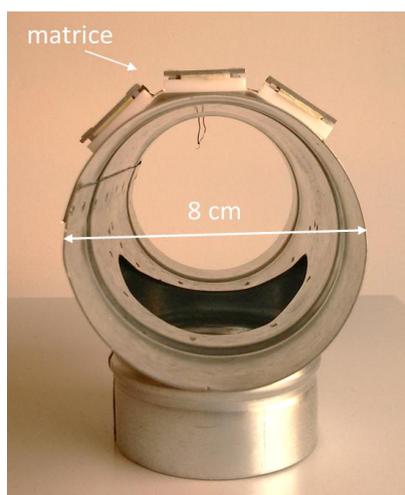


Figure 4.33: Matrice 3x1 sur tuyau de 8 cm de diamètre.

La mise en marche dans ce dernier cas de figure a été faite avec deux cellules branchées au circuit flexible avec ponts de diodes. La troisième cellule a été branchée directement à l'oscilloscope, ce qui a permis de voir la différence amenée par la rectification. Les signaux peuvent être vus dans la

Figure 4.34. On peut observer que le signal rectifié reste toujours positif, tandis que celui non-rectifié présente des pics négatifs. Comme dans le cas de la matrice 2x2, les bilames dans les différentes cellules n'oscillent pas à la même fréquence. Ainsi, dans la cellule isolée la fréquence est deux fois supérieure par rapport aux autres cellules. Les pics générés au cloquage ont une amplitude allant de 6,5 à 13,5 V. Les derniers développent une énergie d'environ 11 μ J.

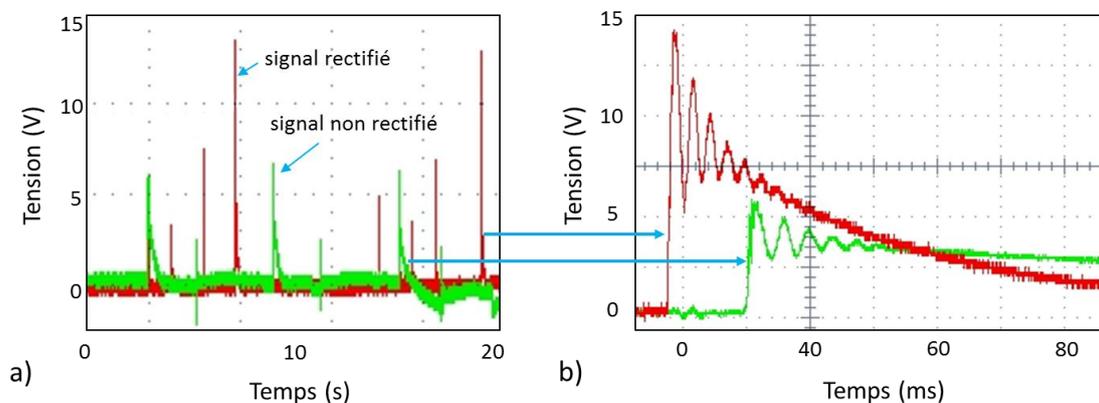


Figure 4.34: Signaux générés par une matrice 3x1: a) acquisition sur plusieurs périodes ; b) agrandissement sur les pics de cloquage.

4.2.3.5 Matrice avec plusieurs points de fonctionnement

La matrice 2x2 a été adaptée pour un fonctionnement à plusieurs températures. Chacune des cellules a été modifiée pour démarrer à une température spécifique. La première cellule contient un bilame 70-67°C et démarre autour de 75°C. La seconde contient un bilame 80-77°C pour un démarrage autour de 82°C. Les deux dernières ont été assemblées avec des bilames 90-87°C et 100-97°C et démarrent autour de 105 et 125°C.

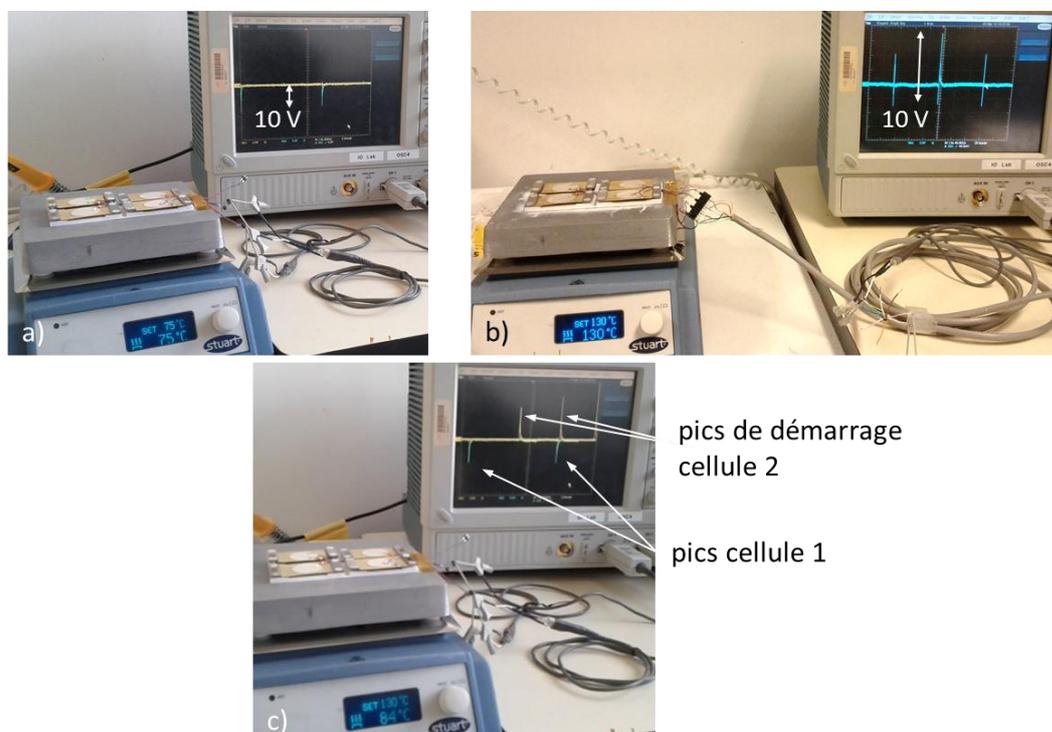


Figure 4.35: Matrice avec 4 points de fonctionnement : a) fonctionnement à 75°C ; b) fonctionnement à 130°C ; c) chevauchement des signaux générés par deux cellules lors d'une rampe de température.

Les tests de cette matrice ont pu être faits à chaque point de fonctionnement en régime stationnaire et aussi en imposant une rampe de température. Les cellules génèrent des signaux allant de 8 à 12 V crête à crête. Quelques images des tests sont données dans la Figure 4.35. On peut voir la matrice fonctionner en régime stabilisé à 75°C et 130°C. Lors d'une rampe de température les cellules démarrent consécutivement. La Figure 4.35 c montre le chevauchement des signaux des cellules 1 et 2 pendant la rampe. On peut observer l'augmentation graduelle de l'amplitude des signaux de la cellule 2 après un départ à zéro.

Ces expériences reflètent l'avantage d'une structure matricielle, où chacune des cellules peut être optimisée pour un point de fonctionnement voulu. Une plage de température peut ainsi être couverte. On peut également penser à viser des points de fonctionnement éloignés avec des signaux qui ne se chevauchent pas forcément, mais avec un fonctionnement assuré une fois les températures de consigne atteintes. Ceci est possible car le démarrage de chaque cellule se fait pour une température donnée, supérieure à la température de cloquage du bilame.

4.3 Propriétés thermiques des dispositifs sur substrat flexible.

La connaissance des propriétés thermiques des dispositifs à base de bilames et piézoélectriques est un des points clés dans la compréhension de leur fonctionnement. La différence de température qu'un prototype garde entre le haut et le bas a un impact direct sur sa performance. Le but du travail étant de concevoir des prototypes capables de générer de l'électricité sans radiateur, il est important que l'isolation thermique entre le point chaud et le point froid soit la meilleure possible.

Un modèle thermique a été mis en place pour comprendre le fonctionnement d'un prototype sur substrat en Téflon et pour permettre d'optimiser la structure. Le cheminement suivi ainsi que les étapes d'amélioration sont présentés dans cette section.

4.3.1 Mise en place du modèle à résistances thermiques équivalentes pour une cellule.

Les systèmes dont le fonctionnement repose sur les transferts thermiques peuvent être modélisés en utilisant des circuits thermiques équivalents. Dans le cas d'une étude stationnaire un schéma à résistances suffit pour approximer le fonctionnement. Pour rappel, cette méthode est analogue à celle utilisée pour la description des circuits électriques, le couple tension/intensité étant équivalent au couple différence de température/flux thermique (Figure 4.36). L'équation reliant ces deux derniers est :

$$\Delta T = \Phi R \quad \text{Eq.(4.7)}$$

avec Φ – flux thermique et R – résistance correspondant au type de transfert thermique observé.

Les transferts thermiques ont lieu selon 3 mécanismes: la conduction, la convection et la radiation. Pour chacun de ces mécanismes il est possible de calculer une résistance thermique équivalente. Les expressions correspondantes sont données dans le Tableau 4.3.

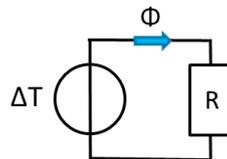


Figure 4.36: Circuit thermique simple.

Mécanisme de transfert	Conduction	Convection	Radiation
Résistance associée	$R_{cd} = \frac{s}{kA}$	$R_{cd} = \frac{1}{h_{cv}A}$	$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A}$
Paramètres	s – épaisseur A – surface k – conductivité du matériau	h_{cv} – coefficient de transfert convectif A – surface de transfert	h_{rad} – coefficient de transfert radiatif A – surface de transfert

Tableau 4.3: Résistances et paramètres pour les différents mécanismes de transfert thermique.

Le transfert de chaleur par conduction est fait grâce à la diffusion et collision de particules ou quasi-particules au niveau microscopique. Pour calculer la résistance équivalente dans ce cas il est nécessaire de connaître la conductivité thermique des matériaux. Le transfert convectif est fait par mouvement de fluides. C'est le mécanisme dominant dans les liquides et les gaz. Ce type de transfert se manifeste souvent aux interfaces entre solides et fluides. Pour calculer la résistance équivalente il est nécessaire de connaître le coefficient de transfert par convection h_{cv} . Il dépend du type de fluide et de sa vitesse par rapport à la surface dans le cas d'un mouvement forcé. Le transfert radiatif est fait par l'intermédiaire des photons. Il se manifeste entre les surfaces à températures différentes qui sont en regard. Dans ce cas il est également possible d'exprimer une résistance thermique, qui est inversement proportionnelle au coefficient de transfert radiatif. Dans le cas de deux surfaces parallèles rapprochées ce dernier s'exprime comme :

$$h_{rad} = \frac{4\sigma T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{Eq.(4.8)}$$

avec T_m – la moyenne des températures absolues des deux surfaces, ε_1 et ε_2 – émissivités des surfaces, σ - constante de Stephan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). A partir de cette expression il est facile de comprendre que plus les émissivités sont importantes, plus le coefficient de transfert est haut et plus le flux thermique associé est important.

Afin de comprendre le comportement d'un dispositif à base de bilame et piézoélectrique il a été décidé de faire une première modélisation du corps d'une cellule sans le bilame. Ceci est utile pour connaître la qualité de l'isolation thermique assurée entre la surface chaude et la surface froide avec lesquelles le bilame va entrer en contact.

Pour construire le modèle thermique pour une cellule il a été nécessaire de segmenter son corps en deux branches. On distingue une branche centrale qui regroupe la lame d'air à l'intérieur du prototype et les éléments solides en haut et en bas par rapport à elle (Figure 4.37 a). On distingue également une branche latérale qui regroupe les parties solides sur les côtés. Les résistances thermiques de ces deux branches peuvent être considérées comme connectées en parallèle.

La résistance thermique du segment central est déterminée par chacun des matériaux de l'empilement. Ainsi la résistance du Téflon ($R_{\text{téflon}1}$) est en parallèle avec la résistance du plot en cuivre (R_{cuivre}). Les deux sont branchées à la résistance équivalente de la lame d'air de l'intérieur de la cellule ($R_{\text{air}1}$). Celle-ci est en contact avec le piézoélectrique qui peut être divisé en deux parties : le volume correspondant à l'empilement laiton-colle-céramique et le laiton hors de l'empilement (Figure 4.37).

La résistance thermique de la branche latérale est déterminée par la résistance du Téflon qui joue le rôle de support mécanique ($R_{\text{téflon}2}$), la résistance des brides de serrage ($R_{\text{aluminium}}$) et du laiton qui se trouve en dessous ($R_{\text{laiton}2}$). La cellule étant exposée à l'air, les deux branches thermiques sont connectées à la résistance d'interface avec l'air ($R_{\text{air}2}$). L'ensemble est soumis à la différence de température externe $T_{\text{chaud}} - T_{\text{ambient}}$.

Les transferts thermiques au niveau de la lame d'air peuvent avoir lieu par l'intermédiaire de plusieurs mécanismes (Figure 4.38). Bien que faible ($0,026 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), la conductivité de l'air n'est pas négligeable. Une partie de la chaleur va être transmise au piézoélectrique par conduction. Une autre partie de la chaleur est transmise par radiation. Une résistance de transfert correspondant à ce mode est donc à calculer. La convection joue un rôle important pour des couches d'air épaisses. Elle est à limiter pour assurer une bonne isolation. Par contre, quand la couche est de quelques millimètres, ce qui est le cas dans notre dispositif, le transfert par convection est négligeable.

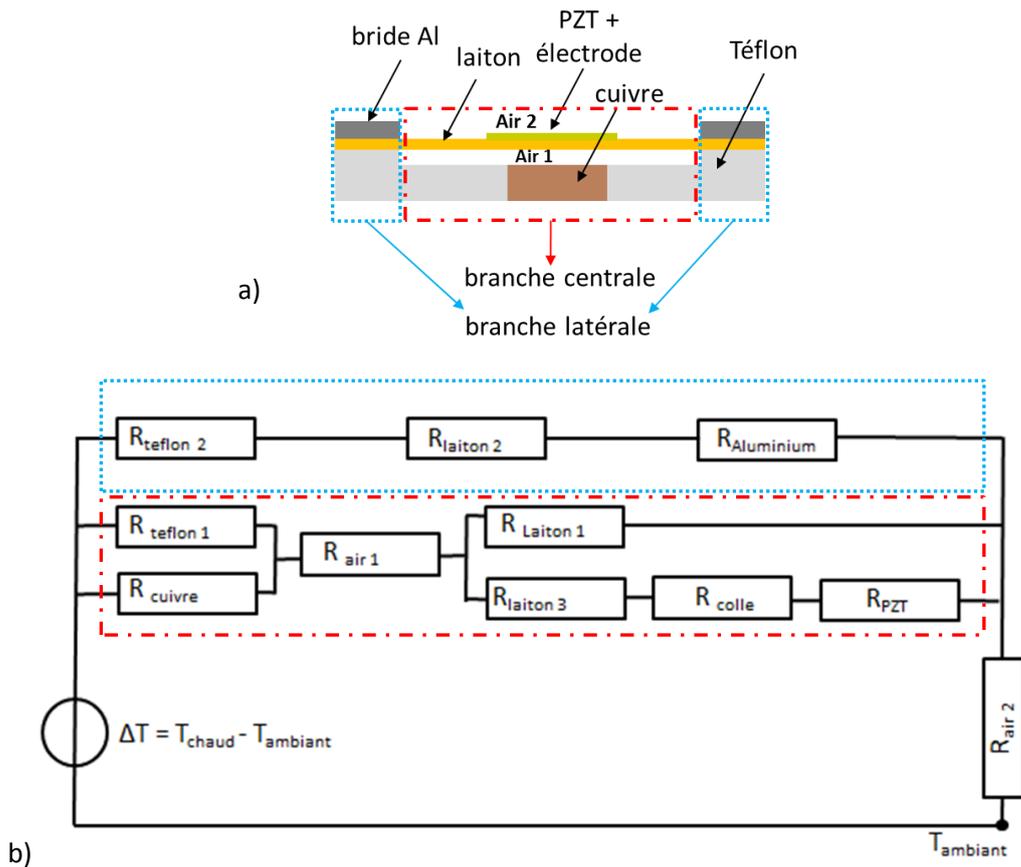


Figure 4.37: a) Segmentation d'une cellule pour la construction du modèle thermique ; b) modèle thermique équivalent.

La résistance thermique de la lame d'air peut donc être calculée par la mise en parallèle de la résistance de conduction et la résistance de radiation.

Les transferts thermiques au niveau de l'interface du prototype avec l'air ont lieu par convection et radiation. Les résistances thermiques correspondant aux deux doivent être mises en parallèle après calcul tout comme dans le cas de la lame d'air.

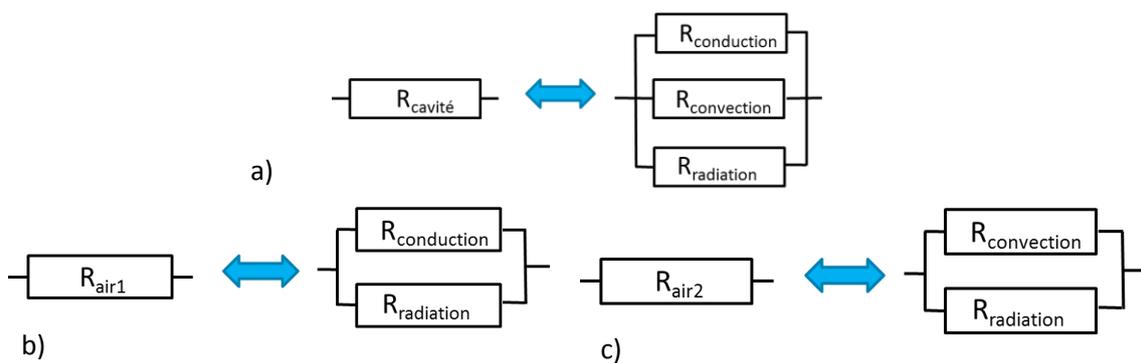


Figure 4.38: Résistances thermiques équivalentes : a) cavité, cas général ; b) lame d'air fine ; c) interface prototype avec air.

4.3.2 Calcul des résistances et comparaison aux mesures

4.3.2.1 Résistances de transfert par conduction

Chacune des résistances présentées plus haut a été calculée. Pour évaluer une résistance de conduction il est nécessaire d'introduire les dimensions et la conductivité de chaque couche. Les conductivités thermiques utilisées pour chacun des matériaux sont données dans le Tableau 4.4.

<i>Matériau</i>	<i>k (W·m⁻¹·K⁻¹)</i>
Téflon	0.25
Laiton	121
Aluminium	237
Colle	2
Céramique	25
Cuivre	390
Air	0.0262

Tableau 4.4: Conductivités thermiques des matériaux utilisés

Il est facile de comprendre à partir de ces données que les parties les plus isolantes sont la lame d'air et le Téflon. Les dimensions et les résistances thermiques de conduction des différentes couches, y compris celle de la lame l'air sont données dans le Tableau 4.5. On peut observer le fait que les résistances significatives correspondent à cette dernière et au Téflon dans la branche centrale et la branche latérale. Les autres parties ont des résistances très petites, de l'ordre de quelques millièmes ou centièmes de Kelvin par watt. Ceci est dû épaisseurs fines (matériaux de la membrane piézoélectrique) et/ou à la conductivité élevée (pastille en cuivre, brides en aluminium). Ces valeurs confirment le fait que le choix des matériaux pour la fabrication des prototypes est correct.

<i>Couche</i>	<i>Surface (cm²)</i>	<i>Epaisseur (mm)</i>	<i>Résistances d'échanges conductifs (K/W)</i>
Téflon 1	8.4	3	14.3
Téflon 2	4.9	4.2	34.1
Laiton 1	6.3	0.18	$2.4 \cdot 10^{-3}$
Laiton 2	4.4	0.18	$3.4 \cdot 10^{-2}$
Laiton 3	5	0.18	$3.0 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	4.4	2	$1.9 \cdot 10^{-2}$
Céramique	5	0.12	$9.6 \cdot 10^{-3}$
Colle	5	0.03	$3.0 \cdot 10^{-2}$
Cuivre	1.5	3	$5.1 \cdot 10^{-2}$
Lame d'air	9.9	1.2	46.1

Tableau 4.5: Dimensions et résistances thermiques de conduction des différentes couches.

4.3.2.2 Résistances de transfert radiatif

Un calcul a également été fait pour les résistances des échanges radiatifs au niveau de la lame d'air et de l'interface avec l'environnement. Les émissivités des différents matériaux sont données dans le Tableau 4.6.

<i>Matériau</i>	<i>Emissivité (300K)</i>
Cuivre	0,03
Laiton	0,04
Téflon	0,85

Tableau 4.6: Emissivités des matériaux.

Les émissivités des métaux sont petites. Ils irradient peu de chaleur à basse température et en absorbent peu aussi. Quelques valeurs de coefficient d'échange et de résistances thermiques sont données dans le Tableau 4.7. Le calcul est fait pour les échanges dans la lame d'air. Les résistances correspondantes sont de l'ordre de quelques milliers de Kelvin par watt.

<i>Température chaude (°C)</i>	<i>Température surface froide (°C)</i>	<i>Coefficient d'échange radiatif ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)</i>	<i>Résistance d'échange radiatif (K/W)</i>
40	36,8	0,27	$3,67 \cdot 10^3$
50	44,8	0,29	$3,37 \cdot 10^3$
60	52,1	0,32	$3,11 \cdot 10^3$
70	59,9	0,34	$2,87 \cdot 10^3$
80	67,7	0,37	$2,66 \cdot 10^3$
90	75,3	0,40	$2,46 \cdot 10^3$
100	82,3	0,43	$2,30 \cdot 10^3$

Tableau 4.7: Coefficients d'échange radiatif dans la lame d'air et résistances correspondantes pour différentes températures.

Ceci est le cas également pour la résistance d'échange radiatif avec l'environnement. La résistance radiative équivalente est d'environ 720 K/W à 100°C et plus grande pour des températures inférieures. Le calcul a été fait en considérant une émissivité de 0.9 pour l'électrode. L'échange radiatif se déroule en parallèle avec l'échange convectif. La résistance correspondant à ce dernier n'est pas calculée à ce stade, car le coefficient de convection est utilisé comme paramètre d'ajustement du modèle par rapport aux mesures.

4.3.2.3 Ajustement par rapport aux mesures.

La température sur le haut d'une cellule a été mesurée au thermocouple pour des températures de plaque chaude allant de 40 à 100°C. La différence de température entre le haut et le bas a été tracée par la suite. Le même tracé a été fait en utilisant le modèle à résistances équivalentes avec les mêmes températures aux limites. Le coefficient de convection a été ajusté de manière à avoir une bonne correspondance entre le modèle et les mesures. Sa valeur a été réglée à $8.5 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ et gardée par la suite. Elle correspond bien aux valeurs trouvées dans la littérature pour l'air statique [66]. Les courbes correspondant aux deux cas sont données dans la Figure 4.39.

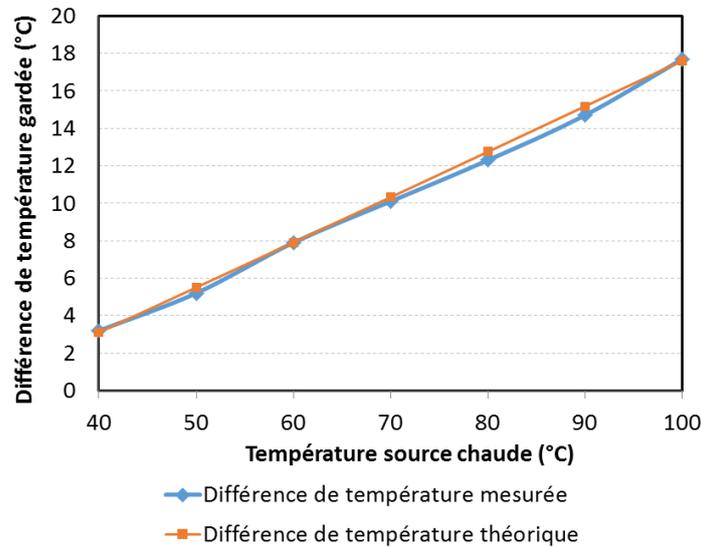


Figure 4.39 : Différence de température mesurée et théorique pour différentes températures de source chaude ($h_{cv}= 8.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

La différence de température qu'un prototype est capable de garder augmente linéairement avec la température de source chaude. Elle est de 10°C pour une température chaude de 70°C et de 17.6 °C pour une source chaude à 100°C. Il est nécessaire que l'hystérésis du bilame soit inférieure à cette différence de température pour qu'un prototype puisse fonctionner. Plus température de source chaude est haute, moindre est la contrainte sur les températures de fonctionnement du bilame. La mise en marche à basse température est plus difficile car une très faible hystérésis est nécessaire.

La résistance des échanges surfaciques avec prise en compte de la convection et de la radiation s'élève à 63 K/W. La radiation a une faible contribution avec les matériaux et aux températures choisies, malgré une haute émissivité considérée pour l'électrode. La modification qu'elle apporte est de quelques dixièmes de Kelvin par watt.

La résistance équivalente du prototype avec prise en compte de tous les modes de transfert est d'environ 19.5 K/W. Elle est donc plus faible que la résistance de l'interface avec l'air. La relation suivante est respectée entre les différences de température et les résistances :

$$\frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_{int}} = \frac{\Delta T_{proto}}{\Delta T_{ext}} \quad \text{Eq.(4.9)}$$

avec R_{eq} – résistance équivalente du corps de la cellule, R_{int} – résistance de l'interface avec l'air et ΔT_{ext} – différence de température externe, entre la source chaude et la source froide. Plus la résistance équivalente du prototype est importante plus la différence de température qu'il est capable de garder à ses bords est grande. Une cellule sur Téflon telle que décrite ci-haut est capable de garder 24% du ΔT externe.

Au vu des valeurs des différentes résistances thermiques, il est possible de simplifier le modèle pour ne garder que les résistances qui ont le plus grand impact : $R_{teflon2}$, $R_{lame \text{ air}}$, $R_{interface}$. Ce sont les résistances sur lesquelles il faut jouer pour augmenter la différence de température gardée. L'approche classique pour obtenir ceci est l'utilisation d'un radiateur pour diminuer la résistance d'interface par rapport à la résistance du dispositif. C'est une solution applicable dans notre cas, mais elle ne peut que conduire à l'augmentation de l'épaisseur des prototypes. D'autres solutions ont donc été recherchées afin d'y parvenir et sont présentées par la suite.

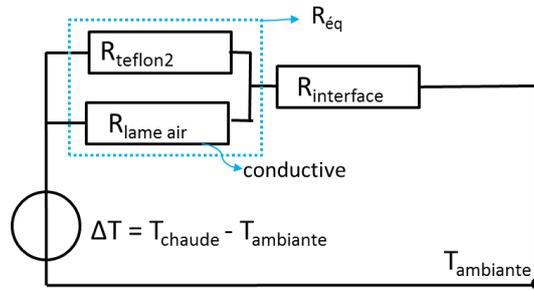


Figure 4.40: Modèle thermique simplifié.

4.3.3 Optimisation des propriétés thermiques

Pour augmenter la différence de température gardée par le prototype, il est nécessaire d'augmenter le rapport entre sa résistance équivalente et la résistance d'interface. Pour faire ceci il est possible de jouer sur les deux.

Un des objectifs de notre étude a été de diminuer la résistance d'interface sans augmenter l'épaisseur des prototypes. Vu que le coefficient de convection est fixé, la seule solution est d'augmenter le coefficient de transfert radiatif. Ceci passe par une augmentation d'émissivité de surface. La manière la plus efficace pour y parvenir est l'application d'une peinture noire mate sur la surface exposée à l'air. Une fois le changement fait, la différence de température passe de 10 °C à 14°C pour une source chaude à 70°C et de 17.7 à 24.5 °C pour un prototype chauffé à 100°C (Figure 4.42).

Une autre manière d'améliorer la différence de température est d'augmenter la résistance équivalente du prototype. Pour y parvenir il est possible de jouer sur la résistance de la lame d'air, qui peut être augmentée en creusant le Téflon sur le fond de la cavité. La résistance du Téflon sur les côtés peut être augmentée en minimisant sa surface. En gros la résistance équivalente du corps de la cellule peut être augmentée en maximisant le volume d'air se trouvant dedans. Une cellule creuse est aussi la plus isolante. Il faut néanmoins garder un minimum de matière solide afin d'assurer le maintien du bilame et du piézoélectrique. Le prototype a été donc creusé, le résultat étant présenté dans la Figure 4.41.

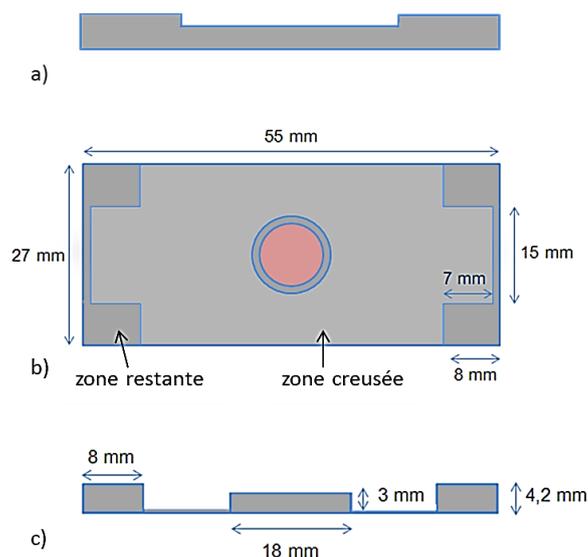


Figure 4.41: Optimisation thermique du prototype : a) profil initial ; b) vue de haut après avoir creusé ; c) profil final.

Le Téflon a été enlevé sur les côtés et au niveau du logement pour le bilame. Une couche très fine a été gardée au niveau du fond comme support mécanique. Quelques millimètres ont également été laissés autour de la pastille en cuivre, dans le sens de son rayon, pour être en mesure de l'insérer et la maintenir. Avec cette approche on a réussi à gagner 6 °C en différence de température pour une température de source chaude de 70°C et 10°C pour une source chaude à 100°C (Figure 4.42). Dans ce dernier cas la différence de température devient 27.8°C.

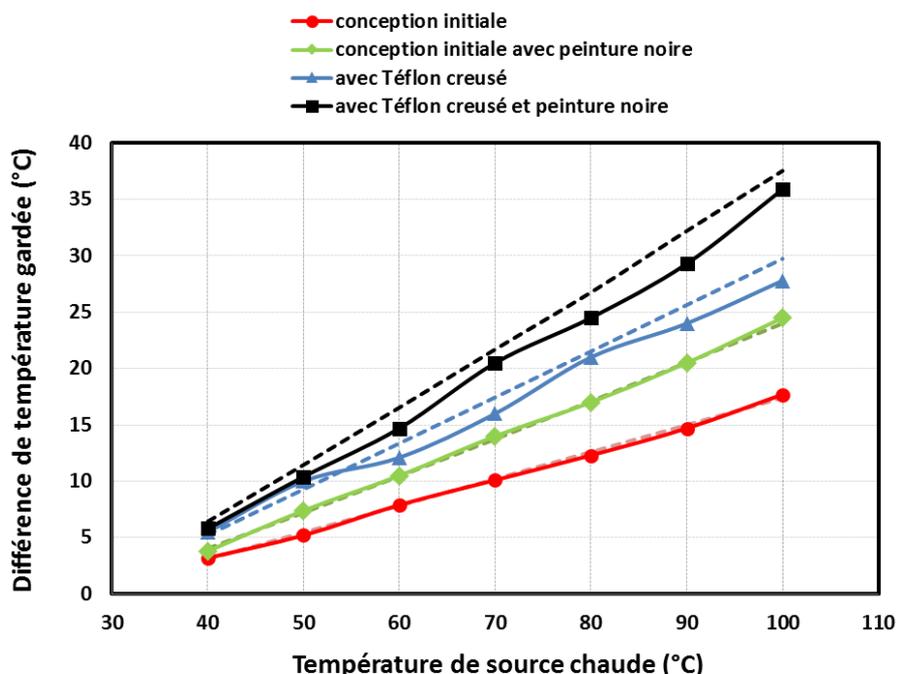


Figure 4.42: Différence de température gardée par le corps d'une cellule en fonction des étapes d'optimisation. Les traits pleins correspondent aux mesures et les traits interrompus correspondent au modèle analytique.

En combinant les deux approches : bloc en Téflon creusé et peinture noire sur la surface haute, il a été possible d'augmenter le gain en différence de température par rapport aux cas précédents. Ainsi, 10 °C sont gagnés pour une source chaude à 70°C et 18°C pour un chauffage à 100°C. La différence de température gardée a été doublée par rapport à la configuration initiale.

Les courbes théoriques ont été tracées pour chaque étape et ont servi de guides pour l'optimisation. On peut observer la bonne correspondance entre ces courbes et les mesures, ce qui est un indice de la robustesse du modèle analytique utilisé. Pour rappel, l'unique paramètre d'ajustement : le coefficient de convection a été établi lors des mesures sur le prototype original et a été gardé pour la suite.

Comme la différence de température gardée dépend du rapport entre la résistance de la cellule et la résistance d'interface, un bon compromis entre l'épaisseur du prototype et la qualité de l'isolation thermique sera atteint si les deux résistances sont égales. Tout comme dans les circuits électriques, il s'agit d'une adaptation d'impédance. Dans ce cas la moitié de la différence de température externe sera mesurée aux bords du prototype. Or, c'est bien ce que l'on observe après la dernière étape d'optimisation : 36°C sont gardés sur 73°C de différence de température externe ($T_{\text{chaud}} = 100^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ambiant}} = 27^{\circ}\text{C}$).

Chapitre 5: Lois d'échelle

5.1 Le gain en densité de puissance mécanique avec la miniaturisation.

Une des questions importantes pour notre système est le comportement à petite échelle. Le corps de métier de STMicroelectronics étant la fabrication des circuits intégrés il est intéressant de savoir s'il est avantageux de décliner la technologie à base de bilames et piézoélectriques en une version à échelle microscopique. Pour répondre à cette question une étude théorique a été menée pour prédire le comportement des dispositifs avec la miniaturisation. Les étapes suivies ainsi que les lois qui en découlent sont présentées dans ce chapitre.

5.1.1 Modèle analytique. Résolution de l'équation de la chaleur.

5.1.1.1 Solution générale pour une plaque chauffée.

Une première question qui peut être posée porte sur le temps nécessaire pour qu'un bilame chauffe jusqu'à une température de consigne à partir d'une température donnée. Il est intéressant de savoir si ce temps change avec l'échelle. Afin d'avoir une estimation analytique, le plus pratique est de partir d'un modèle de chauffage à une dimension pour une plaque posée sur une surface chaude.

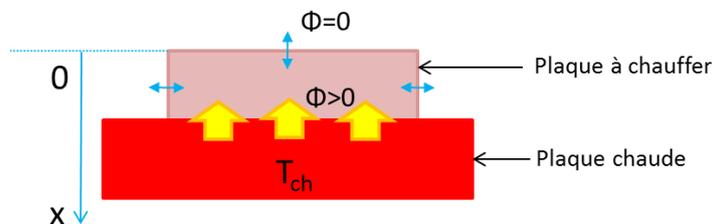


Figure 5.1: Chauffage d'une plaque posée sur une surface chaude. Les flèches jaunes indiquent un flux de chaleur non nul. Les flèches bleues à double sens indiquent un flux de chaleur nul.

On considère une plaque à profil rectangulaire, dont une surface est en contact avec une source chaude à température uniforme T_{ch} (Figure 5.1). On considère qu'initialement la plaque est froide, à une température uniforme T_{fr} inférieure à T_{ch} . Une fois le contact fait un flux de chaleur Φ se met en place. La température dans la plaque en fonction du temps et de la position peut être déduite à partir de l'équation de la chaleur :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{D_t} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Eq.(5.1)}$$

avec T – la température et D_t – la diffusivité thermique du matériau, qui s'exprime comme :

$$D_t = \frac{k_t}{\rho c_p} \quad \text{Eq.(5.2)}$$

où k_t et c_p représentent la conductivité et la capacité thermique du matériau respectivement et ρ sa masse volumique.

Pour simplifier le calcul le flux de chaleur au niveau des surfaces qui ne sont pas en contact avec la source de chaleur est considéré nul. L'axe Ox a l'origine au niveau de la surface haute de la plaque à chauffer et lui est perpendiculaire.

La loi de Fourier peut être appliquée pour écrire les conditions aux limites :

$$\vec{\varphi} = -k_t \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad \text{Eq.(5.3)}$$

avec φ – la densité de flux de chaleur, qui est directement proportionnelle au gradient spatial de température. Sachant que le calcul est fait avec une seule dimension la loi de Fourier peut s'écrire comme :

$$\varphi = -k_t \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{Eq.(5.4)}$$

Le flux est positif s'il est dans le sens de l'axe Ox et négatif dans le cas contraire. Le flux au niveau de la surface de contact peut être écrit comme :

$$\varphi = h_{ct} \cdot [T(e, t) - T_{ch}] \quad \text{Eq.(5.5)}$$

avec h_{ct} - le coefficient de transfert par contact et e – épaisseur de la plaque . Le coefficient de transfert par contact est égal à l'inverse du produit entre la résistance thermique de contact R_{ct} et la surface de contact :

$$h_{ct} = \frac{1}{R_{ct}S} \quad \text{Eq.(5.6)}$$

Sachant que le flux de chaleur est nul en $x = 0$, et qu'au début la température est T_{fr} dans toute la plaque les conditions aux limites peuvent être écrites comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, 0) = T_{fr} \\ \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=0} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x}|_{x=e} = -\frac{h_{ct}}{k_t} \cdot [T(e, t) - T_{ch}] \end{array} \right. \quad \text{Eq.(5.7)}$$

Afin de résoudre l'équation de la chaleur avec ces conditions aux limites, il est plus simple d'opérer avec des variables sans unité (pour plus de détails voir la résolution donnée dans [66]. On définit donc une température, une coordonnée spatiale et un temps sans unité :

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta^* = \frac{T - T_{ch}}{T_{fr} - T_{ch}} \\ x^* = \frac{x}{e} \\ t^* = \frac{D_t \cdot t}{e^2} \end{array} \right. \quad \text{Eq.(5.8)}$$

La définition du temps sans unité correspond à la définition du nombre de Fourier, Fo , qui caractérise la rapidité de pénétration de la chaleur dans un corps :

$$Fo = \frac{D_t t}{e^2} \quad \text{Eq.(5.9)}$$

L'épaisseur de la plaque e , joue le rôle de longueur caractéristique pour le transfert thermique. Une autre grandeur intéressante est le nombre de Biot, qui s'écrit de la manière suivante dans notre cas:

$$Bi = \frac{h_{ct} e}{k_t} \quad \text{Eq.(5.10)}$$

Le nombre de Biot est un indicateur de la vitesse de transfert de la chaleur à la surface par rapport à l'intérieur de la plaque. Si le nombre de Biot est supérieur à 1, le transfert de la chaleur en surface est plus rapide que dans le solide et le gradient de température à l'intérieur doit être pris en compte. Pour un nombre de Biot bien inférieur à un la température dans la plaque peut être considérée quasi-constante.

Avec les nouvelles variables, il est possible de réécrire l'équation de la chaleur et les conditions aux limites [66] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 \theta^*}{\partial x^{*2}} = \frac{\partial \theta^*}{\partial Fo} \\ \theta^*(x^*, 0) = 1 \\ \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \Big|_{x=0} = 0 \\ \frac{\partial \theta^*}{\partial x^*} \Big|_{x=1} = -Bi \cdot \theta^*(1, t^*) \end{array} \right. \quad \text{Eq.(5.11)}$$

La température sans unité peut donc être exprimée en fonction des autres variables sans unité:

$$\theta^* = f(x^*, Fo, Bi) \quad \text{Eq.(5.12)}$$

La solution exacte de Eq.(5.11) est la suivante [66] :

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\zeta_n^2 Fo) \cos(\zeta_n x^*) \quad \text{Eq.(5.13)}$$

avec les constantes ζ_n et C_n définies selon :

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_n \cdot \tan(\zeta_n) = Bi \\ C_n = \frac{4 \sin(\zeta_n)}{2\zeta_n + \sin(2\zeta_n)} \end{array} \right. \quad \text{Eq.(5.14)}$$

Les constantes ζ_n sont les solutions positives de la relation qui les relie au nombre de Biot. Elles sont exprimées en radians. La représentation graphique de la relation est donnée dans la Figure 5.2. On remarque le fait que les constantes ζ_n augmentent avec le nombre de Biot et tendent de manière asymptotique vers des multiples impairs de $\pi/2$. A partir du graphe on peut conclure que pour une valeur du nombre de Biot de 15, les ζ_n sont proches à environ 90% de celles correspondant à un nombre de Biot infini. Sachant que ce dernier augmente avec le coefficient de transfert au contact h_{ct} , ceci revient à dire qu'il n'y a pas besoin d'avoir une interface parfaite pour un bon transfert de la

chaleur vers la plaque. Ceci est dû au fait que le transfert de chaleur sera limité par la conduction dans le volume, dans le cas où l'interface est bonne.

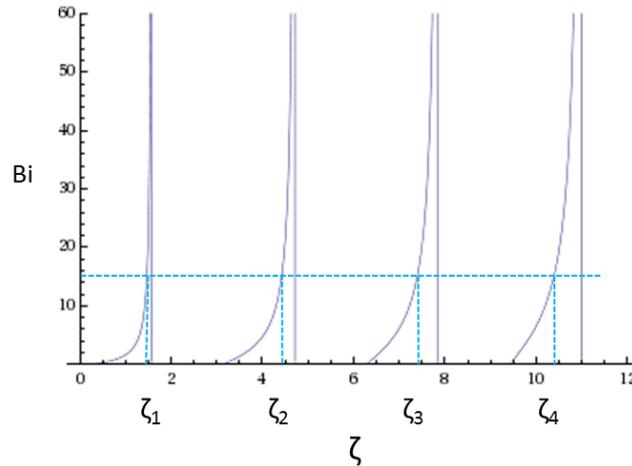


Figure 5.2: Courbes montrant la dépendance entre le nombre de Biot et les constantes ζ_n .

En supposant qu'on a une bonne interface au contact, il est possible d'écrire les constantes ζ_n et C_n de la manière suivante :

$$\begin{cases} \zeta_n = n\pi - \frac{\pi}{2} \\ C_n = \frac{4 \cdot (-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \end{cases} \quad \text{Eq.(5.15)}$$

avec n – nombre entier supérieur à 1. La température sans unité devient :

$$\theta^* = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \cdot (-1)^{n+1}}{(2n-1)\pi} \cdot \exp\left(-\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2 Fo\right) \cos\left(\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right) x^*\right) \quad \text{Eq.(5.16)}$$

On observe que la composante spatiale et temporelle de la température sont séparées. Pour connaître la température moyenne dans la plaque à un temps donné il est donc possible d'intégrer les composantes spatiales figurant dans la sommation:

$$\int_0^1 \cos\left(\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right) x^*\right) \cdot dx^* = \frac{(-1)^{n+1}}{n\pi - \frac{\pi}{2}} \quad \text{Eq.(5.17)}$$

A partir des deux dernières équations on peut exprimer la température adimensionnelle moyenne dans la plaque:

$$\bar{\theta}^* = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp\left(-\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2 Fo\right) \quad \text{Eq.(5.18)}$$

La température adimensionnelle moyenne dépend donc uniquement du nombre de Fourier. Pour mieux comprendre le sens de cette relation on peut introduire à nouveau les grandeurs avec dimensions:

$$\frac{\bar{T}(t) - T_{ch}}{T_{fr} - T_{ch}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp\left(-\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{D_t t}{e^2}\right) \quad \text{Eq.(5.19)}$$

d'où l'expression de la température moyenne dans la plaque :

$$\bar{T}(t) = T_{ch} + (T_{fr} - T_{ch}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp\left(-\left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{D_t t}{e^2}\right) \quad \text{Eq.(5.20)}$$

Cette relation montre le fait que la température moyenne dépend des températures aux limites et du nombre de Fourier. Ce dernier contient la diffusivité, le temps et l'épaisseur au carré. Si le matériau et les conditions aux limites sont fixés, le seul terme dont la température dépend est le rapport entre le temps et l'épaisseur au carré:

$$\bar{T} = \bar{T}\left(\frac{t}{e^2}\right) \quad \text{Eq.(5.21)}$$

Afin de chauffer deux plaques d'épaisseur différente à la même température de consigne les temps de chauffage doivent respecter la relation:

$$\bar{T}_1 = \bar{T}_2 \equiv \frac{t_1}{e_1^2} = \frac{t_2}{e_2^2} \quad \text{Eq.(5.22)}$$

Cela signifie que si l'épaisseur e_2 est k fois inférieure à e_1 , le temps de chauffage t_2 est k^2 fois inférieur à t_1 :

$$\frac{e_1}{e_2} = k \equiv \frac{t_1}{t_2} = k^2 \quad \text{Eq.(5.23)}$$

En d'autres mots la réduction d'échelle va accélérer les transferts thermiques de manière importante. *Si on note k – le facteur d'échelle, alors il résulte que le temps de chauffage sera réduit du carré du facteur d'échelle.* C'est une conclusion importante, qui va être reprise souvent par la suite.

Il est possible de simplifier l'écriture des expressions déduites ci-haut dans l'approximation d'un nombre de Fourier supérieur à 0.2. Dans ces conditions le premier terme de la série définissant la température suffit pour faire une bonne approximation. A partir de Eq.(5.16), en utilisant des grandeurs à dimensions on obtient :

$$\frac{T - T_{ch}}{T_{fr} - T_{ch}} = \frac{4}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{D_t t}{e^2}\right) \cos\left(\frac{\pi x}{2e}\right) \quad \text{Eq.(5.24)}$$

La moyenne de la température dans la plaque devient :

$$\bar{T}(t) = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{D_t t}{e^2}\right) (T_{fr} - T_{ch}) + T_{ch} \quad \text{Eq.(5.25)}$$

5.1.1.2 Solution de l'équation de la chaleur pour un bilame. La fréquence d'oscillation.

Maintenant supposons qu'un bilame est en contact avec la surface chaude à température constante T_{ch} (Figure 5.3). Supposons que la zone en contact est une petite aire au centre et que ses ailes sont isolées thermiquement, tout comme l'étaient les faces de la plaque à chauffer dans l'exemple d'avant. La chaleur se propagera depuis la zone en contact vers les extrémités dans le sens de la longueur, qui sera la direction principale de transfert thermique.

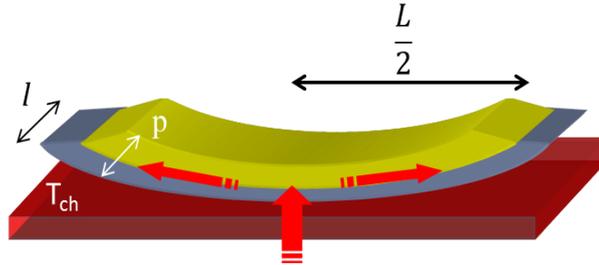


Figure 5.3: Bilame posé sur une surface chaude. Les flèches de couleur correspondent aux directions de propagation de la chaleur.

Pour déduire l'expression de la température dans ce cas, il est nécessaire de remplacer l'épaisseur de plaque du cas précédent par la demi-longueur du bilame, qui devient la longueur caractéristique pour le transfert thermique. Aussi, la température T_{fr} ne sera autre que la température de décrochage du bilame. Dans le cas d'un bon contact thermique avec la zone chaude :

$$\bar{T}(t) = T_{ch} + (T_d - T_{ch}) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8}{(2n-1)^2 \pi^2} \cdot \exp\left(-4 \left(n\pi - \frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{D_t t}{L_b^2}\right) \quad \text{Eq.(5.26)}$$

avec L_b – la longueur du bilame et T_d – la température de décrochage.

Le temps de chauffage du bilame jusqu'à une température de consigne sera donc directement proportionnel au carré de sa longueur. Ce sera aussi le cas pour le temps de refroidissement depuis une température donnée, vu que les deux étapes sont gérées par la même équation. On peut donc écrire :

$$t_{ch} \sim t_r \sim L_b^2 \quad \text{Eq.(5.27)}$$

avec t_{ch} – temps de chauffage et t_r – temps de refroidissement.

La période d'oscillation du bilame entre une plaque chaude et une plaque froide est composée de quatre segments de temps:

$$t_{osc} = t_{ch} + t_r + t_{cl} + t_{dcl} \quad \text{Eq.(5.28)}$$

avec t_{cl} – temps de cloquage et t_{dcl} – temps de décrochage. Ces deux derniers sont les temps nécessaires au basculement du bilame entre deux positions extrêmes. Ils sont de l'ordre de la milliseconde pour les bilames centimétriques, tandis que le temps de chauffage et le temps de refroidissement sont de l'ordre de la seconde. La fréquence d'oscillation du bilame s'exprime comme :

$$f_{osc} = \frac{1}{t_{osc}} = \frac{1}{t_{ch} + t_r + t_{cl} + t_{dcl}} \quad \text{Eq.(5.29)}$$

Pour connaître son évolution avec l'échelle il est nécessaire de déduire l'évolution de chacun des segments de temps dont l'oscillation est composée. Pour être en mesure de déduire ces tendances il faut répondre à deux questions : comment évoluent la température de cloquage et la température de décroquage avec l'échelle ? et comment varie la vitesse de cloquage dans ce même contexte? En effet si les températures de fonctionnement du bilame varient avec l'échelle cela signifie que la relation de proportionnalité entre le temps de chauffage et le carré de la longueur déduite précédemment ne sera plus valable.

5.1.2 Evolution des températures et vitesses au cloquage

5.1.2.1 Evolution des températures caractéristiques des bilames avec l'échelle.

Afin d'avoir une estimation analytique sur l'évolution de la température de cloquage et décroquage d'un bilame on peut revenir aux équations données dans le paragraphe 2.1.1. Le Tableau 5.1 rappelle ces expressions dans le cas d'un bilame sous forme de poutre avec des liaisons pivot à ses extrémités et dans le cas d'un disque libre.

	<i>Température de cloquage</i>	<i>Température de décroquage</i>
Poutre contrainte	$T_u = \frac{1 + \frac{6f_0^2}{p^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{p^2}{f_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{L^2}{pf_0} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0$	$T_d = \frac{1 - \frac{6f_0^2}{p^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{p^2}{f_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{L^2}{pf_0} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0$
Disque libre	$T_u = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{p}{D}\right)^2 \cdot f_u + T_0$	$T_d = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{p}{D}\right)^2 \cdot f_d + T_0$

Tableau 5.1: Températures de cloquage et décroquage pour une poutre contrainte et un disque libre.

Dans ses dernières expressions f_0 correspond à la flèche initiale du bilame, p à son épaisseur et K à la courbure spécifique. D est le diamètre du disque et T_0 – la température de référence.

Supposons maintenant que toutes les dimensions d'un bilame sous forme de poutre sont divisées par un facteur k . Ceci correspond à une réduction d'échelle intégrale sur la géométrie. En supposant que les coefficients de dilatation thermique ne subissent pas de variation, la température de cloquage à petite échelle s'écrit comme:

$$T_{upe} = \frac{1 + \frac{6 \left(\frac{f_0}{k}\right)^2}{\left(\frac{p}{k}\right)^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{\left(\frac{p}{k}\right)^2}{\left(\frac{f_0}{k}\right)^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{\left(\frac{L}{k}\right)^2}{\frac{p}{k} \cdot \frac{f_0}{k}} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0 = \frac{1 + \frac{6f_0^2}{p^2} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{9} \frac{p^2}{f_0^2}\right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{3}{16} \cdot \frac{L^2}{pf_0} \cdot (\alpha_2 - \alpha_1)} + T_0 = T_{uge} \quad \text{Eq.(5.30)}$$

Après simplification on se rend compte que la température de cloquage théorique à petite échelle (T_{upe}) coïncide avec la température de cloquage à grande échelle (T_{uge}). En reprenant l'expression de la température de décroquage il est facile de se rendre compte qu'elle ne varie pas non plus.

La même loi théorique peut être déduite dans le cas d'un disque, en supposant que le paramètre K qui tient compte des coefficients de dilatation thermique ne change pas avec l'échelle :

$$T_{upe} = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{p}{\frac{k}{D}} \right)^2 \cdot f_u + T_0 = \frac{2}{K} \cdot \left(\frac{p}{D} \right)^2 \cdot f_u + T_0 = T_{uge} \quad \text{Eq.(5.31)}$$

Pour rappel, les paramètres f_u et f_d dépendent du rapport flèche initiale sur épaisseur. Les courbes montrant cette dernière dépendance sont données dans le paragraphe 2.1.1. Les paramètres f_u et f_d ne sont donc pas censés changer avec l'échelle.

La modélisation numérique a été utilisée pour vérifier la dépendance de la température de cloquage de l'échelle pour des géométries plus complexes. Plusieurs formes ont été simulées, dont notamment le bilame avec poinçon trapézoïdal au centre, introduit au paragraphe 2.1.3 (Figure 5.4). Les températures de cloquage ont été calculées pour différents angles à la base du poinçon et pour des facteurs d'échelle allant jusqu'à 1000. Les résultats montrent que pour un angle donné la température de cloquage ne varie pas avec l'échelle. Ceci est valable également pour les bilames à poinçon plat (angle à la base du poinçon nul).

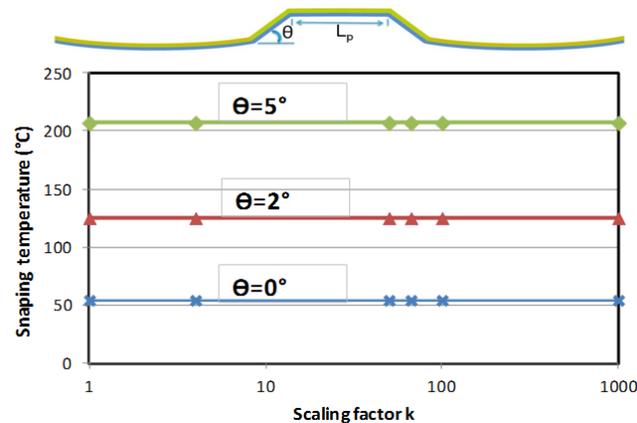


Figure 5.4: Températures de cloquage pour différents facteurs d'échelle et angles à la base du poinçon.

Les modèles numériques et analytiques montrent la même tendance : les températures de fonctionnement d'un bilame ne changent pas avec l'échelle lors d'une réduction homothétique des dimensions. Ceci s'avère très utile pour la fabrication, vu qu'un bilame peut être conçu à une échelle donnée (par exemple centimétrique) et ensuite sa géométrie peut être reproduite à toute autre échelle sans changement dans les températures de fonctionnement.

5.1.2.2 Evolution des vitesses de cloquage avec l'échelle.

Un autre paramètre à examiner est l'évolution de la vitesse au cloquage avec l'échelle. Le temps nécessaire au basculement va en dépendre. Cette évolution peut être déduite à partir des énergies mises en jeu. Ainsi, l'énergie cinétique du bilame lors du basculement peut être écrite comme :

$$E_k = \frac{m_b \langle v^2 \rangle}{2} \quad \text{Eq.(5.32)}$$

avec m_b – la masse et $\langle v^2 \rangle$ - la moyenne du carré de la vitesse sur la surface. On peut réécrire cette expression en fonction des dimensions du bilame :

$$E_k = \frac{\rho_b L l p \langle v^2 \rangle}{2} \quad \text{Eq.(5.33)}$$

avec ρ_b – la masse volumique moyenne.

L'énergie élastique accumulée dans le bilame avant basculement est proportionnelle au module de Young moyen des matériaux, au carré de la différence des CDT, au carré de la variation de température et au volume du bilame :

$$E_{elast} \sim Y(\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta T^2 L l p \quad \text{Eq.(5.34)}$$

L'énergie cinétique développée lors du cloquage est proportionnelle à l'énergie élastique accumulée :

$$E_k \sim E_{elast} \quad \text{Eq.(5.35)}$$

En combinant les trois dernières expressions on peut écrire :

$$\frac{\rho_b V_b \langle v^2 \rangle}{2} \sim Y(\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta T^2 V_b \quad \text{Eq.(5.36)}$$

avec V_b – le volume du bilame. En simplifiant on déduit que la vitesse quadratique moyenne lors du basculement dépend des matériaux et de la différence de température imposée.

$$\langle v^2 \rangle \sim \frac{Y}{\rho_b} (\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta T^2 \quad \text{Eq.(5.37)}$$

Sachant que la moyenne du carré de la vitesse est déduite par intégration sur le volume de l'expression de la vitesse on peut faire le cheminement inverse et écrire pour cette dernière:

$$v \sim \sqrt{\frac{Y}{\rho_b} (\alpha_2 - \alpha_1)^2 \Delta T^2} \quad \text{Eq.(5.38)}$$

La vitesse de basculement ne dépend donc pas de l'échelle car les dimensions du bilame ne figurent pas dans son expression.

5.1.3 Evolution théorique et expérimentale de la fréquence d'oscillation des bilames

5.1.3.1 Evolution théorique de la fréquence d'oscillation d'un bilame avec l'échelle.

Comme expliqué avant, afin de déduire l'évolution de la fréquence d'oscillation du bilame avec l'échelle il est nécessaire de regarder l'évolution des temps dont l'oscillation est composée. Reprenons pour ceci Eq.(5.27) et Eq.(5.29) :

$$t_{ch} \sim t_r \sim L_b^2 \quad \text{Eq.(5.27)}$$

$$f_{osc} = \frac{1}{t_{osc}} = \frac{1}{t_{ch} + t_r + t_{cl} + t_{dcl}} \quad \text{Eq.(5.29)}$$

Dans l'étude faite avant il est mentionné que le temps de chauffage du bilame jusqu'à une température de consigne est directement proportionnel à sa longueur au carré. C'est également le cas pour le refroidissement jusqu'à une température donnée. En considérant que les températures de consigne ne sont autres que la température de cloquage et la température de décroquage, et en sachant qu'elles ne dépendent pas de l'échelle, on déduit que le temps de chauffage et le temps de refroidissement d'un bilame sont inversement proportionnels au carré du facteur d'échelle :

$$t_{ch} \sim t_r \sim \frac{1}{k^2} \quad \text{Eq.(5.39)}$$

Cela signifie que si les dimensions sont diminuées d'un facteur 10, le temps de chauffage et de refroidissement vont diminuer d'un facteur 100.

Sachant que la flèche du bilame est inversement proportionnelle au facteur d'échelle k et que la vitesse de basculement ne varie pas quand toutes les dimensions diminuent, on déduit que le temps de basculement est inversement proportionnel au facteur d'échelle :

$$t_{cl} \sim t_{dcl} \sim \frac{1}{k} \quad \text{Eq.(5.40)}$$

Sachant qu'à échelle centimétrique le rapport entre la durée des étapes thermiques et la durée des étapes de basculement est de l'ordre de 10^3 , il y a besoin de réduire l'échelle du même facteur pour que ces différents temps mis en jeu soient comparables. Pour un facteur d'échelle jusqu'à 100 ce sont les étapes thermiques qui dominent, donc on peut déduire que la période des oscillations du bilame est inversement proportionnelle au carré du facteur d'échelle :

$$t_{osc} \sim \frac{1}{k^2} \quad \text{Eq.(5.41)}$$

Ceci revient à dire qu'en réduisant toutes les dimensions d'un bilame d'un facteur k, sa fréquence d'oscillation sera multipliée par k^2 (Figure 5.5) :

$$f_{osc} \sim k^2 \quad \text{Eq.(5.42)}$$

Figure 5.5: Réduction d'échelle pour un bilame : a) grand bilame ; b) bilame k fois plus petit, avec fréquence accélérée.

5.1.3.2 Preuve expérimentale de l'accélération en fréquence avec la miniaturisation

La confirmation expérimentale de la loi déduite auparavant a été recherchée. Pour faire ceci une série de bilames avec 3 dimensions différentes a été fabriquée. Plusieurs échantillons ont été testés pour chaque dimension. Le matériau utilisé est le 108SP. Les échantillons le plus grands mesurent $36 \times 18 \times 0.3 \text{ mm}^3$ et les suivants $24 \times 12 \times 0.2 \text{ mm}^3$ et $14 \times 7 \times 0.115 \text{ mm}^3$. Les bilames des deux dernières séries représentent des reproductions homothétiques des ceux de la première série. Toutes les dimensions, y compris le diamètre du poinçon et la flèche ont été réduites du même facteur, comme suggéré par le modèle analytique.

Au vu des épaisseurs des matériaux disponibles pour les bilames, les facteurs d'échelle choisis sont de 1.5 et 2.6 par rapport aux bilames de grandes dimensions. Les températures de cloquage visées sont autour de 80°C .

La mise en marche pour les mesures de fréquence a été réalisée entre une plaque chaude à 132°C et un bloc froid à 15°C . Les mesures ont été faites pour chacun des échantillons, la moyenne des fréquences obtenues pour chaque dimension étant donnée dans la Figure 5.6.

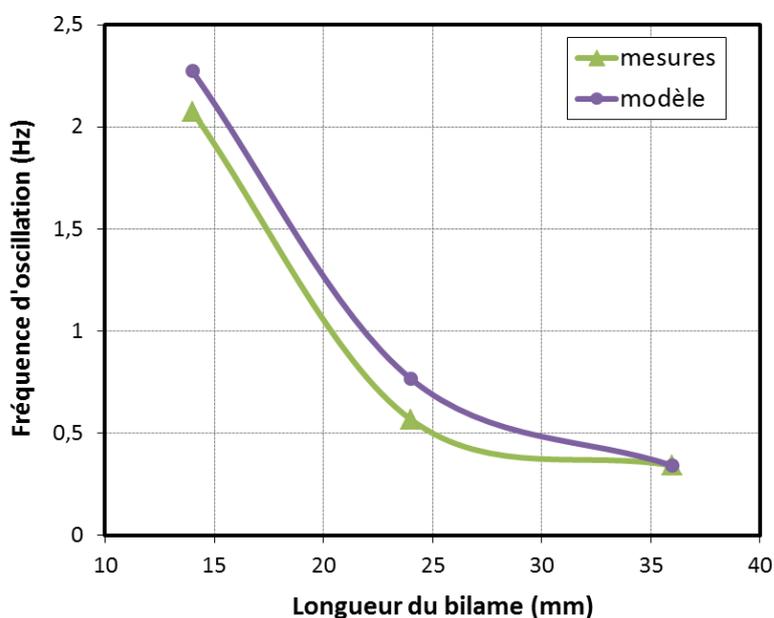


Figure 5.6: Evolution expérimentale et théorique des fréquences d'oscillation des bilames en fonction de la taille.

Les points théoriques ont été calculés par rapport à la fréquence moyenne d'oscillation des bilames de 36 mm de longueur, en la multipliant par le carré du facteur d'échelle k . On observe que les deux courbes sont proches, la tendance théorique étant bien suivie. Ceci apporte une preuve expérimentale pour l'accélération en fréquence des bilames avec la réduction d'échelle prévue par le modèle analytique.

5.1.4 Evolution de la densité de puissance mécanique et du flux thermique transporté.

5.1.4.1 Augmentation de la densité de puissance mécanique avec la miniaturisation

Un des points les plus intéressants à vérifier lors de la réduction de l'échelle est l'évolution de la densité de puissance mécanique transportée. La question qui se pose est s'il serait avantageux de

remplacer un grand bilame par plusieurs petits occupant la même surface. En faisant ceci on réduit la masse active, car l'épaisseur de chacun des petits bilames est inférieure à celle du grand.

Afin de répondre à cette question on peut calculer la puissance générée dans les deux cas. De manière générale la puissance mécanique disponible au cloquage peut être écrite comme le produit entre l'énergie cinétique maximale au cloquage et la fréquence d'oscillation:

$$P_m = E_{kmax} \cdot f_{osc} \quad \text{Eq.(5.43)}$$

Pour un bilame de grande taille on peut écrire :

$$P_{mg} = E_{kmaxg} \cdot f_{oscg} = \frac{m_g \langle v^2 \rangle_{max}}{2} f_{oscg} \quad \text{Eq.(5.44)}$$

Dans le cas d'un bilame de petite taille, en introduisant le facteur d'échelle:

$$P_{mp} = E_{kmaxp} \cdot f_{oscp} = \frac{m_p \langle v^2 \rangle_{max}}{2} f_{oscp} = \frac{m_g \langle v^2 \rangle_{max}}{k^3} \cdot k^2 f_{oscg} \quad \text{Eq.(5.45)}$$

Un petit bilame a une masse k^3 fois plus petite, par contre, la vitesse de basculement est la même et la fréquence d'oscillation k^2 fois plus grande. Par conséquent, la puissance mécanique développée par un petit bilame n'est que k fois moindre par rapport à celle développée par un grand :

$$P_{mp} = \frac{1}{k} P_{mg} \quad \text{Eq.(5.46)}$$

Ce même raisonnement peut être refait pour la puissance mécanique développée au décroquage. Sachant que la puissance au cloquage et au décroquage s'additionnent, on déduit que la dernière expression obtenue est valable également pour la puissance mécanique totale.

Si on remplace un grand bilame par plusieurs avec des dimensions k fois plus petites et occupant la même surface, on va avoir k^2 petits bilames (Figure 5.7).

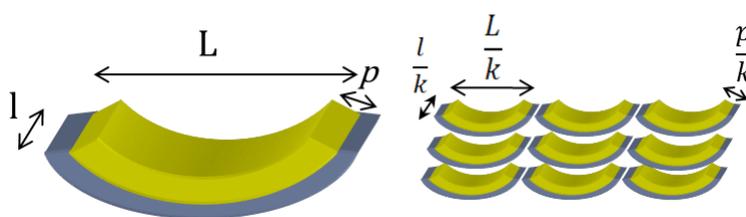


Figure 5.7: Remplacement d'un bilame de grande taille par plusieurs petits occupant la même surface.

La relation entre la puissance mécanique totale développée par les petits bilames et celle développée par un grand bilame peut donc être écrite en multipliant Eq.(5.46) des deux côtés par k^2 :

$$P_{mptot} = k \cdot P_{mg} \quad \text{Eq.(5.47)}$$

La puissance mécanique développée par les bilames miniaturisés d'un facteur k est donc k fois plus grande que celle développée par un grand bilame pour la même surface. On a donc un gain de puissance dû à la réduction d'échelle. Ce gain se manifeste malgré la réduction du volume actif. Il est dû essentiellement à l'augmentation de la fréquence d'oscillation des bilames. Pour généraliser

l'expression précédente, on peut dire que la densité de puissance mécanique générée est proportionnelle au facteur d'échelle :

$$p_m \sim k \quad \text{Eq.(5.48)}$$

5.1.4.2 Evolution de la chaleur transmise par les bilames avec la réduction de l'échelle

L'augmentation de la densité de puissance mécanique avec la réduction d'échelle est un résultat encourageant, qui mérite d'être exploité. Afin d'avoir un tableau plus complet des phénomènes associés, il est intéressant d'investiguer le flux de chaleur passant par les bilames.

Comme le bilame oscille en absorbant de la chaleur et en créant du travail mécanique, il peut être traité comme un moteur thermique. On peut donc écrire la relation valable pour un cycle thermique :

$$Q_{ch} = Q_{fr} + W \quad \text{Eq.(5.49)}$$

avec Q_{ch} – quantité de chaleur absorbée de la source chaude, Q_{fr} – quantité de chaleur transmise à la source froide et W – travail produit par cycle.

Un bilame prend de la chaleur depuis la source chaude jusqu'à atteindre sa température de cloquage et la restitue à la surface froide jusqu'à atteindre sa température de décroquage. Le rendement de Carnot correspondant se calcule selon :

$$\eta_{Carnot} = \frac{T_u - T_d}{T_u} \quad \text{Eq.(5.50)}$$

avec T_u et T_d – températures moyennes absolues au cloquage et au décroquage. Sachant que l'hystérésis des bilames utilisés le plus souvent est de 3 Kelvin, il résulte que le rendement de Carnot dans notre cas est de l'ordre de 1%. Par conséquent, on peut considérer que la chaleur restituée à la surface froide par cycle est proche de la chaleur absorbée :

$$Q_{fr} \approx Q_{ch} = m_b c_p \Delta T_{hyst} \quad \text{Eq.(5.51)}$$

avec m_b – la masse du bilame, c_p – capacité calorifique moyenne, ΔT_{hyst} – hystérésis du bilame. Le flux de chaleur correspondant peut être calculé en multipliant la quantité de chaleur mise en jeu par cycle par la fréquence d'oscillation du bilame :

$$\Phi = Q_{fr} \cdot f_{osc} \quad \text{Eq.(5.52)}$$

La densité de flux thermique transporté est égale à :

$$\phi = \frac{Q_{fr} \cdot f_{osc}}{A_b} \quad \text{Eq.(5.53)}$$

avec A_b – aire du bilame. En utilisant cette expression et Eq.(5.51) on calcule le rapport entre la densité de flux de chaleur transmis par un petit bilame et la densité de flux transmis par un grand bilame :

$$\frac{\phi_p}{\phi_g} = \frac{Q_{frp}}{Q_{frg}} \cdot \frac{f_{oscp}}{f_{oscg}} \cdot \frac{A_{bg}}{A_{bp}} = \frac{m_{bp}c_{pp}\Delta T_{hystp}}{m_{bg}c_{pg}\Delta T_{hystg}} \cdot \frac{f_{oscp}}{f_{oscg}} \cdot \frac{A_{bg}}{A_{bp}} \quad \text{Eq.(5.54)}$$

L'aire d'un grand bilame est k^2 fois plus grande que celle d'un petit. En sachant que les températures de fonctionnement ne varient pas avec l'échelle et en supposant que les propriétés des matériaux ne changent pas non plus on déduit :

$$\frac{\phi_p}{\phi_g} = k \quad \text{Eq.(5.55)}$$

La densité de flux de chaleur est censée augmenter avec la réduction d'échelle d'un facteur k . L'accélération fréquentielle du bilame sera accompagnée de l'accélération des transferts thermiques. C'est un facteur à prendre en compte lors de la conception des dispositifs, car il faut que la chaleur transmise puisse être évacuée sans engendrer une augmentation de la température de la surface froide. Dans les dispositifs actuels le bilame transmet sa chaleur au piézoélectrique. Sa température doit être gardée en dessous de la température de décrochage du bilame pour que le dispositif puisse marcher. L'accélération des transferts thermiques impliquerait une augmentation de la température de la membrane piézoélectrique et une baisse de la fréquence de cloquage. Pour éviter ce phénomène il faudrait améliorer l'évacuation de la chaleur en augmentant l'aire de la membrane.

Le rendement thermomécanique du bilame est égal au rapport entre la densité de puissance mécanique (p_m) et la densité de puissance thermique transférée:

$$\eta_{tm} = \frac{p_m}{\phi} \quad \text{Eq.(5.56)}$$

Comme les deux valeurs sont proportionnelles au facteur d'échelle, on déduit que le rendement de conversion n'en dépend pas :

$$\eta_{tm} = \text{const} \quad \text{Eq.(5.57)}$$

<i>Grandeurs</i>	<i>Symbole</i>	<i>Loi d'échelle</i>
Dimensions (longueur, largeur, épaisseur etc.)	L, l, p etc.	$\sim \frac{1}{k}$
Fréquence d'oscillation	f_{osc}	$\sim k^2$
Température de cloquage	T_u	const.
Température de décrochage	T_d	const.
Vitesse de basculement	v	const.
Densité de puissance mécanique	p_m	$\sim k$
Densité de flux thermique	ϕ	$\sim k$
Rendement thermomécanique	η	const.

Tableau 5.2: Evolution des différentes grandeurs liées aux bilames avec l'échelle. L'accélération en fréquence avec la miniaturisation engendre un gain en densité de de puissance mécanique transportée.

Le changement d'échelle n'est pas censé changer le rendement thermomécanique. Bien évidemment ceci est valable pour des propriétés des matériaux qui ne varient pas. Le contraire peut

arriver, sachant que la microstructure des matériaux à petite échelle peut être différente de celle à grande échelle. Par contre, il est peu probable que ces variations se fassent en défaveur du rendement d'un facteur aussi important que le facteur d'échelle.

La conversion thermomécanique est suivie de la conversion mécano-électrique. Il est donc intéressant de savoir si le gain en densité de puissance mécanique prévu peut être reproduit au niveau de la densité de puissance électrique. Pour se rendre compte il est nécessaire de décrire l'interaction du piézoélectrique avec le bilame et son évolution avec l'échelle. Cette étude est présentée dans la section suivante. Un récapitulatif des lois d'échelle déduites jusqu'à présent est donné dans le Tableau 5.2.

5.2 Gain en densité de puissance électrique générée avec la miniaturisation.

La présente section est focalisée sur l'évolution avec l'échelle des contraintes mécaniques induites dans le piézoélectrique, de l'amplitude du signal électrique associé et de la puissance électrique qui en résulte. Pour commencer, l'interaction mécanique entre le bilame et le piézoélectrique est étudiée.

5.2.1 Evolution de la raideur et de la force d'interaction.

Après cloquage le bilame entre en contact avec le piézoélectrique et le déforme. Dans la majorité des cas vus en pratique, les deux restent en contact après choc et vibrent ensemble. En deux dimensions l'interaction entre le bilame et le piézoélectrique peut être assimilée au contact entre une poutre sous forme d'arc de cercle tenue par la surface chaude et une poutre plane encastree des deux côtés (Figure 5.8). Dans les cas observés en pratique il s'agit d'un contact sur une très petite surface, qu'on peut considérer ponctuel.

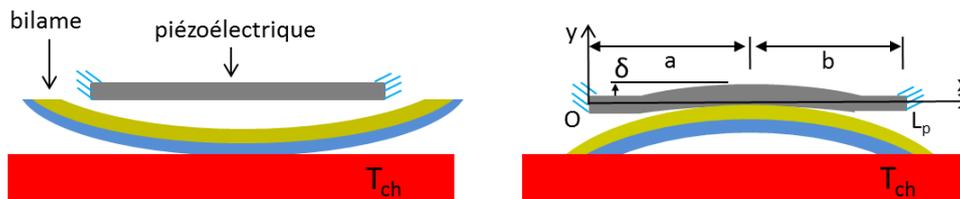


Figure 5.8 : Déformation du piézoélectrique par le bilame. Etat avant (à gauche) et après cloquage (à droite).

On va examiner l'évolution du déplacement et des contraintes dans le piézoélectrique avec l'échelle. Pour commencer on définit un système d'axes : Ox qui passe par le milieu de la poutre piézoélectrique parallèlement à la longueur, avec l'origine à son extrémité, Oy, ou axe vertical et Oz sortant du plan de l'image (Figure 5.8).

Considérons d'abord un cas généralisé, où le bilame agit sur le piézoélectrique avec une force F, au niveau d'un point situé à une distance a de l'extrémité gauche et une distance b de l'extrémité droite. Le point d'application de la force a donc les coordonnées (a, -p/2, 0). Si on note δ_p le déplacement du piézoélectrique on peut écrire [67] :

$$\delta_p(x) = \frac{F}{6YI} \cdot \left(\frac{3ab^2x^2}{L_p^2} + \langle x - a \rangle^3 - \frac{b^2x^3}{L_p^3} (L_p + 2a) \right) \quad \text{Eq.(5.58)}$$

avec Y – module de Young, I – moment d'inertie de la poutre. La fonction $\langle x - a \rangle^n$ est définie de la manière suivante :

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} 0, & \text{si } x < a \\ (x - a)^n, & \text{si } x \geq a \end{cases} \quad \text{Eq.(5.59)}$$

Eq. 5.58 est valable pour des petites déformations. C'est bien le cas dans nos dispositifs, où le déplacement au centre du piézoélectrique est de l'ordre de 10-100 μm , tout comme son épaisseur. Le déplacement au point d'application de la force est :

$$\delta_{pF} = \frac{F}{3YI} \cdot \frac{a^3 b^3}{L_p^3} \quad \text{Eq.(5.60)}$$

Il est connu que pour un ressort de raideur χ la relation entre la force et le déplacement est :

$$F = \chi \delta \quad \text{Eq.(5.61)}$$

A partir de cette formule, la raideur du piézoélectrique s'exprime comme :

$$\chi_p = \frac{3YI \cdot L_p^3}{a^3 b^3} \quad \text{Eq.(5.62)}$$

En considérant la section de la poutre rectangulaire, le moment d'inertie s'écrit :

$$I = \frac{l_p p^3}{12} \quad \text{Eq.(5.63)}$$

avec l_p – largeur du piézoélectrique. On déduit l'expression de la raideur du piézoélectrique en fonction des dimensions :

$$\chi_p = \frac{Y L_p^3 l_p p^3}{4 a^3 b^3} \quad \text{Eq.(5.64)}$$

Pour connaître l'effet de la miniaturisation sur la raideur, supposons que toutes les dimensions, y compris a et b , sont réduites du même facteur k . La raideur de la poutre de petite taille s'écrit :

$$\chi_{pp} = \frac{Y \left(\frac{L_p}{k}\right)^3 \left(\frac{l_p}{k}\right) \left(\frac{p}{k}\right)^3}{4 \left(\frac{a}{k}\right)^3 \left(\frac{b}{k}\right)^3} \quad \text{Eq.(5.65)}$$

En simplifiant on déduit :

$$\chi_{pp} = \frac{1}{k} \cdot \frac{Y L_p^3 l_p p^3}{4 a^3 b^3} = \frac{1}{k} \chi_{pg} \quad \text{Eq.(5.66)}$$

La raideur du piézoélectrique de petite taille est k fois plus petite que la raideur du piézoélectrique de grande taille. Il résulte donc que la raideur du piézoélectrique est inversement proportionnelle au facteur d'échelle :

$$\chi_p \sim \frac{1}{k} \quad \text{Eq.(5.67)}$$

Bien évidemment ce résultat est valable pour toute poutre de section rectangulaire encastree de deux cotés, qu'elle soit piézoélectrique ou non. La loi d'échelle déduite ne dépend pas du point d'application de la force, vu que les coefficients a et b n'interviennent pas dans son expression.

D'après le principe des actions réciproques, la force exercée sur le piézoélectrique par le bilame est également exercée sur ce dernier. On considère une force F appliquée par le piézoélectrique au sommet du bilame dans le sens négatif de l'axe Oy. En sachant que le bilame à une forme d'arc de cercle et qu'il est tenu par la surface chaude l'expression de la flèche s'écrit:

$$f = \frac{L_b^2}{8R} - \frac{FL_b^3}{4l_b p_b^3 Y} \quad \text{Eq.(5.68)}$$

avec L_b , l_b , p_b – longueur, largeur et épaisseur du bilame, R – rayon de courbure initial. La flèche du bilame à l'état cloqué, sans interaction avec le piézoélectrique, est écrite comme $L_b^2/8R$, dans l'hypothèse d'une faible courbure ($2R \gg L$), ce qui notre cas. La variation de flèche due à l'interaction avec le piézoélectrique s'écrit :

$$\Delta f = -\frac{FL_b^3}{4Y l_b p_b^3} \quad \text{Eq.(5.69)}$$

La raideur du bilame peut être calculée comme le rapport entre la force appliquée et la valeur absolue de la variation de la flèche. Il résulte :

$$\chi_b = \frac{4Y l_b p_b^3}{L_b^3} \quad \text{Eq.(5.70)}$$

La raideur est donc proportionnelle au module de Young, à la largeur et au cube du rapport épaisseur sur longueur. D'après cette relation il est évident que si les dimensions du bilame sont réduites d'un facteur k, sa raideur diminuera du même facteur, tout comme dans le cas du piézoélectrique :

$$\chi_b \sim \frac{1}{k} \quad \text{Eq.(5.71)}$$

Le déplacement du piézoélectrique au point d'application de la force évolue comme les dimensions et sera donc inversement proportionnel au facteur d'échelle :

$$\delta \sim \frac{1}{k} \quad \text{Eq.(5.72)}$$

D'après Eq.(5.61), la force exercée est égale au produit entre la raideur et le déplacement. Sachant que la raideur des éléments est inversement proportionnelle au facteur d'échelle et que le déplacement après déformation l'est également il résulte:

$$F \sim \frac{1}{k^2} \quad \text{Eq.(5.73)}$$

La force d'interaction entre le bilame et le piézoélectrique est inversement proportionnelle au carré du facteur d'échelle. Cette loi prédit donc la diminution de la force avec la miniaturisation et il est intéressant d'en connaître les conséquences.

5.2.2 Evolution avec l'échelle des contraintes et de la tension générée.

Afin de déterminer les contraintes on reste dans l'hypothèse d'un piézoélectrique sous forme de poutre encastree des deux côtés. On va faire le calcul dans le cas le plus général, avec un force F appliquée à une distance a de l'origine de la poutre (Figure 5.9 a). L'évolution du moment fléchissant autour de l'axe Oz en fonction de la coordonnée est donnée par [67]:

$$M_{fz}(x) = \frac{Fab^2}{L_p^2} - \frac{Fb^2x}{L_p^3}(L_p + 2a) + F(x - a)^1 \quad \text{Eq.(5.74)}$$

L'illustration correspondant à cette expression est donnée dans la Figure 5.9 b. Le moment fléchissant présente deux maxima au niveau de l'encastrement et un minimum négatif au niveau du point d'application de la force. L'évolution entre les extrema est linéaire.

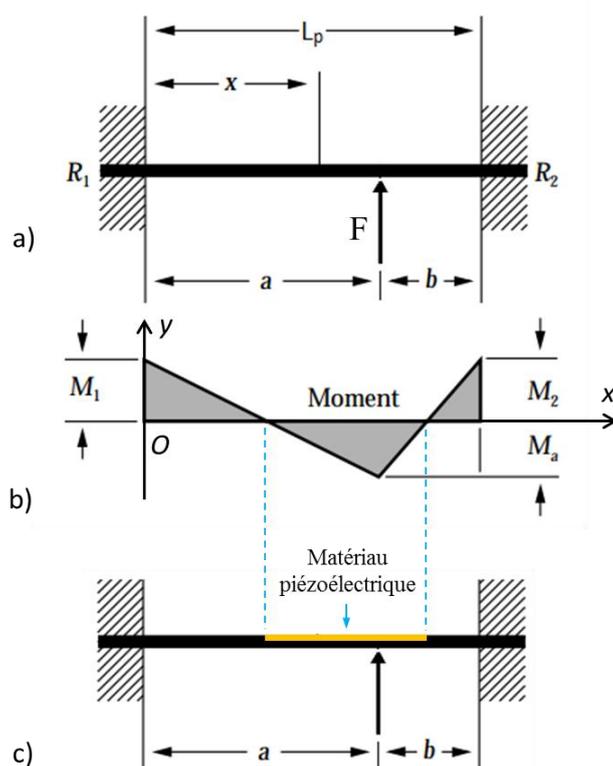


Figure 5.9: Sollicitation d'une poutre encastree des deux côtés : a) application d'une force à une distance a de l'encastrement gauche ; b) évolution du moment fléchissant ; c) choix de placement pour le matériau piézoélectrique (figure adaptée de [68]).

L'expression du moment au point d'application de la force est :

$$M_{fz}(a) = -\frac{2Fa^2b^2}{L_p^3} \quad \text{Eq.(5.75)}$$

La distribution des contraintes peut être déterminée avec la formule de Bresse :

$$T_{xx}(x, y) = \frac{M_{fz}(x)}{I_z} \cdot y \quad \text{Eq.(5.76)}$$

avec T_{xx} – contrainte selon l’axe Ox, I_z – moment d’inertie selon l’axe Oz. La contrainte de flexion dans un point donné dépend du moment fléchissant dans la section et de l’ordonnée du point. La contrainte va donc changer de signe avec l’ordonnée et le moment.

Dans le paragraphe 3.2.2.3 l’expression suivante a été démontrée pour la différence de potentiel entre les faces d’un piézoélectrique et la contrainte, considérée constante :

$$V_{OC} = -\frac{d_{31}}{\varepsilon} \cdot T \cdot p_p \quad \text{Eq.(5.77)}$$

avec V_{OC} – différence de potentiel en circuit ouvert, d_{31} – constante piézoélectrique de charge en mode 31, ε – permittivité diélectrique du matériau. La différence de potentiel est directement proportionnelle à la contrainte à l’intérieur piézoélectrique. Il y a donc intérêt à ce que cette dernière soit du même signe dans tout son volume. Autrement, le signal va être affaibli par compensation entre les zones à contraintes de signe opposé. Un placement intelligent de la couche piézoélectrique et des électrodes à l’intérieur de la structure est donc requis pour que le signal en sortie soit fort.

Afin de comprendre l’influence de la miniaturisation sur la tension développée on suppose une couche piézoélectrique placée entre les deux points à moment fléchissant nul, dans la partie à ordonnée positive (Figure 5.9 c). Afin de simplifier les calculs, on suppose que le module de Young de la couche est égal à celui du reste de la poutre, qui joue un rôle de support mécanique et masse électrique. Dans la zone choisie pour la couche piézoélectrique, la contrainte ne change pas de signe. Sa valeur moyenne peut être calculée par intégration à partir de la formule de Bresse Eq.(5.76) :

$$\overline{T_{xx}(x, y)} = \frac{\iint \frac{M_{fz}(x)}{I_z} \cdot y \cdot dx \cdot dy}{L_p p_p} \quad \text{Eq.(5.78)}$$

avec L_p et p_p – longueur et épaisseur de la couche piézoélectrique. Après intégration on obtient l’expression suivante:

$$\overline{T_{xx}} = -\frac{3Fa^2b^2}{L_p^3 l_p p_p^2} \quad \text{Eq.(5.79)}$$

La contrainte moyenne est donc proportionnelle à la force appliquée à la structure. Si cette dernière est miniaturisée d’un facteur k et sachant que la force diminue d’un facteur k^2 , la contrainte moyenne devient:

$$\overline{T_{xxp}} = -\frac{3\left(\frac{F}{k^2}\right)\left(\frac{a}{k}\right)^2\left(\frac{b}{k}\right)^2}{\left(\frac{L_p}{k}\right)^3\left(\frac{l_p}{k}\right)\left(\frac{p_p}{k}\right)^2} = \overline{T_{xxg}} \quad \text{Eq.(5.80)}$$

avec $\overline{T_{xxp}}$, $\overline{T_{xxg}}$ – contrainte moyenne dans une petite et une grande structure respectivement. Les deux dernières sont égales, ceci voulant dire que la contrainte moyenne induite dans le piézoélectrique ne change pas avec l'échelle :

$$\bar{T} = \text{const} \quad \text{Eq.(5.81)}$$

La relation entre la contrainte et la déformation pour un piézoélectrique en circuit ouvert est :

$$S = s_D T \quad \text{Eq.(5.82)}$$

avec s_D - souplesse à induction électrique constante. En tenant compte des deux dernières expressions et en supposant que la souplesse ne varie pas avec l'échelle, il résulte de même pour la déformation moyenne :

$$\bar{S} = \text{const} \quad \text{Eq.(5.83)}$$

En revenant à la tension générée aux bords du piézoélectrique, on peut l'écrire en fonction de la contrainte moyenne :

$$V_{OC} = -\frac{d_{31}}{\varepsilon} \cdot \bar{T} \cdot p_p \quad \text{Eq.(5.84)}$$

En supposant que les constantes des matériaux ne sont pas impactées par le facteur d'échelle, le seul facteur influencé par la miniaturisation dans la dernière expression est l'épaisseur. Il résulte que :

$$V_{OC} \sim \frac{1}{k} \quad \text{Eq.(5.85)}$$

La tension générée par le piézoélectrique en circuit ouvert est inversement proportionnelle au facteur d'échelle. Il faut donc s'attendre à ce que la tension baisse en faisant une miniaturisation parfaite du système. Il y a donc intérêt à travailler à petite échelle avec des matériaux à haut coefficient de tension (tel le nitrure d'aluminium).

5.2.3 Evolution de la densité de puissance électrique

La question la plus importante liée à la miniaturisation des dispositifs à base de bilames et piézoélectriques concerne l'évolution de la densité de puissance électrique générée avec l'échelle. Pour établir cette dépendance, partons de la densité volumique d'énergie stockée sur un piézoélectrique déformé par le bilame (Eq. (3.33)) :

$$w_{OC} = \frac{1}{2} ST$$

Il s'agit ici de la densité d'énergie totale insérée dans le piézoélectrique en circuit ouvert. Elle est donc proportionnelle au produit entre la contrainte et la déformation. Sachant qu'aucune des deux n'est pas censée varier avec l'échelle, il résulte de même pour la densité d'énergie :

$$w_{OC} = const \quad \text{Eq.(5.86)}$$

L'énergie insérée s'écrit comme le produit entre le volume de piézoélectrique et la densité moyenne :

$$W_{OC} = \overline{w_{OC}} \cdot V_p = \frac{1}{2} \bar{S} \cdot \bar{T} \cdot V_p \quad \text{Eq.(5.87)}$$

Il résulte que l'énergie communiquée au piézoélectrique suite à la déformation évolue avec la miniaturisation comme le volume, ce qui implique :

$$W_{OC} \sim \frac{1}{k^3} \quad \text{Eq.(5.88)}$$

L'énergie électrique récupérée par impact dépendra de plusieurs paramètres, dont le facteur de couplage et le facteur de qualité mécanique de la structure. Dans tous les cas elle constituera une partie de l'énergie totale transmise au piézoélectrique:

$$W_{el} \sim W_{OC} \sim \frac{1}{k^3} \quad \text{Eq.(5.89)}$$

La puissance électrique générée est égale au produit entre l'énergie électrique produite à chaque sollicitation par le bilame et sa fréquence d'oscillation (f_b) :

$$P_{el} = W_{el} f_b \quad \text{Eq.(5.90)}$$

La densité de puissance se déduit en divisant par l'aire du dispositif (A) :

$$p_{el} = \frac{W_{el} f_b}{A} \quad \text{Eq.(5.91)}$$

Son évolution avec l'échelle se déduit en utilisant Eq.(5.89) et Eq.(5.42). En supposant une réduction d'échelle d'un facteur k, la densité de puissance électrique pour un petit dispositif s'écrit :

$$p_{elp} = \frac{\left(\frac{W_{elg}}{k^3}\right) (f_{bg} k^2)}{\frac{A_g}{k^2}} = k \cdot \frac{W_{elg} f_{bg}}{A_g} = k \cdot p_{elg} \quad \text{Eq.(5.92)}$$

avec l'indice p correspondant à un dispositif de petite taille et l'indice g à un dispositif de grande taille. Par conséquence, la densité de puissance électrique pour un dispositif miniaturisé est plus grande. Plus précisément, elle est proportionnelle au facteur d'échelle:

$$p_{el} \sim k \quad \text{Eq.(5.93)}$$

On s'attend donc à un gain en performance des dispositifs avec la miniaturisation. C'est un résultat intéressant, qui mérite d'être exploité. Une manière de faire c'est de remplacer un grand dispositif par plusieurs petits de dimensions k fois inférieures et occupant la même surface (Figure 5.10). Le nombre

de dispositifs ainsi créés sera égal à k^2 . Comme la densité de puissance électrique produite augmente avec la miniaturisation, et que la surface est la même dans les deux cas, la puissance électrique totale générée sera k fois supérieure dans la seconde situation :

$$P_{eltot2} \sim k \cdot P_{el1} \quad \text{Eq.(5.94)}$$

Le volume total des dispositifs dans le second cas est k fois plus petit du fait d'une épaisseur inférieure. La puissance volumique sera donc k^2 fois supérieure :

$$\frac{P_{eltot2}}{V_{tot2}} \sim k^2 \cdot \frac{P_{el1}}{V_1} \quad \text{Eq.(5.95)}$$

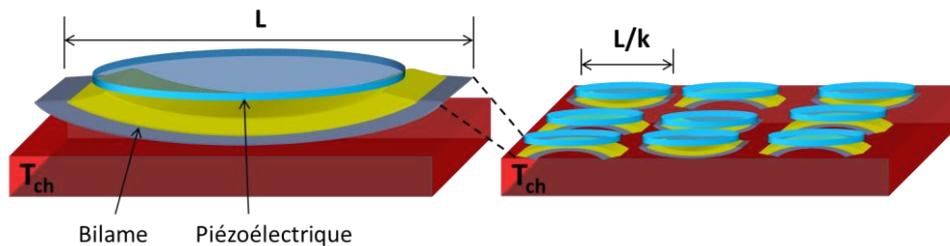


Figure 5.10: Remplacement d'un dispositif de grande taille par plusieurs dispositifs de dimensions k fois plus petites occupant la même surface.

5.2.4 Synthèse et discussion sur les lois d'échelle

Les lois d'échelle pour les dispositifs à base de bilames et piézoélectriques ont été déduites dans le présent chapitre. L'évolution de différents paramètres en fonction de la taille a été montrée. La synthèse de ces lois est donnée dans le Tableau 5.3.

Les évolutions établies montrent le gain attendu et pointent sur certains défis à relever. L'élément clef de ces évolutions est l'accélération en fréquence des bilames avec la miniaturisation. En effet, pour des petites dimensions les transferts thermiques se passent plus vite, le temps nécessaire étant inversement proportionnel au carré du facteur d'échelle dans le cas d'un bilame. Bien évidemment, cette tendance est conditionnée par la qualité des interfaces, qui a un impact direct sur le nombre de Biot. Il est souhaitable que ce dernier ait une valeur supérieure à 1, pour pouvoir considérer que les transferts thermiques sont limités par la propagation de chaleur en volume plutôt qu'à l'interface. La vérification expérimentale de l'accélération en fréquence a été faite pour des bilames centimétriques. Les courbes théorique et expérimentale manifestent la même tendance.

Il est attendu que l'accélération de la fréquence d'oscillation des bilames entraîne l'augmentation de la densité de puissance mécanique produite. En même temps, la densité de flux thermique traversant les bilames va aussi être augmentée. Il sera donc nécessaire de mieux évacuer la chaleur, surtout dans le cas où le flux passant par les bilames deviendrait comparable au flux passant par les parties solides du dispositif qui jouent le rôle de support mécanique. Une solution possible dans le cas où ceci arrive est de diminuer la surface active du dispositif (il s'agit bien de la surface occupée par les bilames et les piézoélectriques pour un dispositif placé entre une plaque chaude et une plaque froide). Ceci permettrait de garder stable le niveau de puissance générée, tout en libérant de la place pour mettre des dispositifs à alimenter, sans que la capacité d'évacuation de la chaleur soit impactée. Une autre loi d'échelle importante est la conservation des températures caractéristiques des bilames avec la miniaturisation. Ceci signifie qu'une géométrie peut être conçue à échelle centimétrique et

reproduite à petite échelle tout en gardant le même intervalle de fonctionnement. Par conséquence, la conception des bilames est facilitée.

Une autre tendance importante dont il faut tenir compte est la diminution des tensions générées avec l'échelle. En effet la tension produite par un piézoélectrique en circuit ouvert est proportionnelle à son épaisseur. Il est nécessaire qu'elle soit supérieure au seuil du circuit de rectification pour que le signal puisse être traité. Sachant que les diodes les plus adaptées qu'on peut trouver dans le commerce à l'heure actuelle ont un seuil de l'ordre du dixième de volt, il est préférable de garder les signaux en entrée au-dessus de 1 V afin de récupérer l'énergie avec un rendement acceptable.

<i>Grandeurs</i>	<i>Symbole</i>	<i>Loi</i>
Dimensions (longueur, largeur, épaisseur etc.)	L, l, p etc.	$\sim \frac{1}{k}$
Fréquence d'oscillation	f_{osc}	$\sim k^2$
Température de cloquage	T_u	const.
Température de décroquage	T_d	const.
Vitesse de basculement	v	const.
Densité de puissance mécanique	p_m	$\sim k$
Densité de flux thermique transporté	ϕ	$\sim k$
Rendement thermomécanique	η	const.
Raideur du bilame	χ_b	$\sim \frac{1}{k}$
Raideur du piézoélectrique	χ_p	$\sim \frac{1}{k}$
Force développée par le bilame	F_b	$\sim \frac{1}{k^2}$
Contrainte et déformation dans le piézoélectrique	T, S	const.
Tension en circuit ouvert	V_{OC}	$\sim \frac{1}{k}$
Densité de puissance électrique	p_{el}	$\sim k$

Tableau 5.3 : Evolutions des différentes grandeurs en fonction du facteur d'échelle.

Si ce défi est relevé il sera possible de profiter de l'augmentation de la densité de puissance électrique prévue. En effet cette dernière augmente comme le facteur d'échelle. Ceci encourage le développement de dispositifs miniaturisés, qui a été entamé par la mise en place d'un procédé de fabrication de bilames de dimensions microscopiques. Les étapes du procédé, aussi bien que les premiers échantillons obtenus sont présentées dans le chapitre suivant.

L'augmentation de la densité de puissance mécanique transportée par les bilames avec la miniaturisation restera valable pour toute méthode de transduction mécano-électrique, pourvu que l'évacuation de la chaleur soit faite de manière efficace. La densité de puissance mécanique va augmenter que la conversion soit faite par un piézoélectrique, un électret (voir paragraphe 3.1.2) ou un système électromagnétique. Il est attendu que la densité de puissance électrique générée augmente dans tous ces cas, avec conservation de toutes les lois d'échelle concernant les bilames.

Chapitre 6: Cas d'usage, comparaisons, futures évolutions.

Les chapitres précédents donnent les résultats les plus importants concernant les dispositifs à base de bilames et piézoélectriques. Les caractéristiques des éléments constitutants sont également discutées. Quelques questions ont néanmoins été laissées ouvertes. Il s'agit de certains cas d'usage prévus pour nos dispositifs, de la comparaison avec l'état de l'art et de la durée de vie. Ces aspects sont décrits dans le présent chapitre. Les futures évolutions possibles sont également présentées, avec notamment la miniaturisation des dispositifs et le dépôt de matériaux piézoélectriques sur les bilames.

6.1 Premiers cas d'usage investigués

Comme pour toute technologie de récupération de l'énergie, les cas d'usage jouent un rôle très important dans le développement des dispositifs à base de bilames et piézoélectriques. Ceci vient du fait qu'il faut connaître l'environnement où ils évoluent et tirer un maximum de l'énergie qu'il met à disposition. Le niveau de puissance électrique générée conditionne les fonctions que le dispositif peut assurer.

Une des fonctions visées pour les dispositifs élaborés dans le cadre de ce travail est l'alimentation de capteurs autonomes. Il est donc intéressant de les tester dans des cas concrets, où une source de chaleur est présente et où des mesures par capteur sont nécessaires pour des raisons de surveillance ou autres.

Plusieurs cas d'application ont été identifiés et une première série des tests a été faite dans chacun. Leur description est donnée dans la présente section.

6.1.1 Les environnements industriels et l'infrastructure

Les environnements industriels constituent une source riche de potentielles applications. Il est connu que des nombreux capteurs sont nécessaires au bon déroulement des processus industriels et à la surveillance des installations. Les besoins de monitoring sont également présents pour l'infrastructure, autant privée que publique.

Dans le cadre de ce travail nous avons visé des cas d'usage où un nombre important de capteurs et donc de dispositifs de récupération serait requis. Ainsi, des matrices sur substrat flexible ont pu être testées dans une installation électrique et sur un tuyau d'eau chaude. Ce sont des environnements proposés par des potentiels intégrateurs de nos dispositifs.

Afin d'adapter les prototypes aux environnements thermiques, des tests préliminaires ont été faits au laboratoire entre éléments métalliques chauffés (Figure 6.1). Ainsi, une cellule sur substrat en Téflon a été mise en marche en position verticale sur une barre, d'abord exposée à l'air ambiant, puis avec une autre barre chaude en face. La distance entre les deux a été réduite graduellement en partant d'un écart de 9 cm. Les deux éléments sont placés sur une plaque chaude et sont chauffés par le bas. La température à la hauteur où le prototype est placé est entre 90 et 100°C. Il se trouve donc entre deux sources de chaleur séparées par un gap d'air. Le prototype est resté fonctionnel jusqu'à une distance de 1.8 cm entre les barres. L'image pour une distance de 2.5 cm ainsi que le signal associé sont donnés dans la Figure 6.1. La valeur crête à crête de la tension obtenue est d'environ 4.5V. Le bilame utilisé mesure 35x20x0.22 mm³, pour une température de cloquage de 83°C et une hystérésis de 2°C.

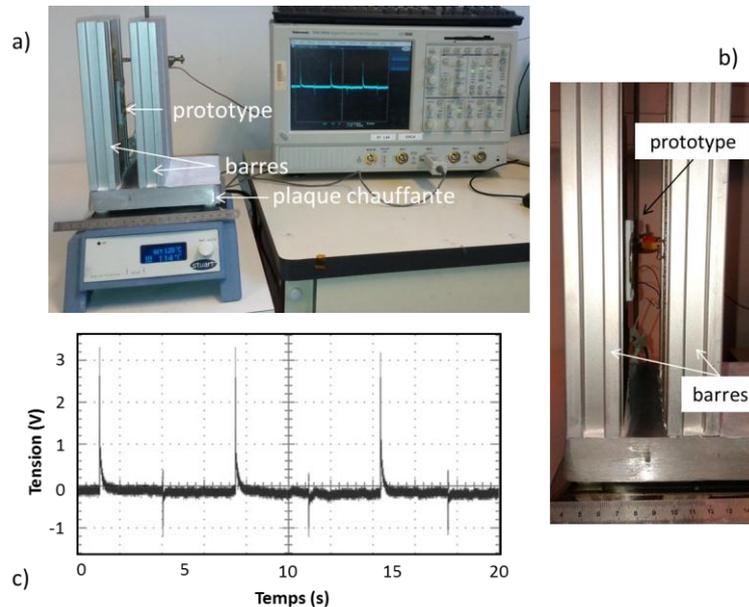


Figure 6.1: Expérience avec cellule sur substrat en Téflon placée entre deux barres verticales chaudes : a) vue d'ensemble de l'installation avec distance de 2.5 cm entre les barres ; b) agrandissement; c) signal obtenu.

Cette expérience montre la capacité des prototypes sur substrat flexible à fonctionner dans des endroits confinés. Pour comparaison, il serait peu pratique voire impossible de faire fonctionner certains dispositifs à effet Seebeck dans un espace de 2 cm au vu des épaisseurs du module thermoélectrique et du radiateur.

Une fois la preuve de fonctionnement dans un endroit confiné faite, la matrice 2x2 fonctionnant à plusieurs températures a été fabriquée (voir le paragraphe 4.2.3). Elle a été testée dans une installation électrique en imposant une rampe de température. Les cellules se sont mises en marche une après l'autre, en confirmant la possibilité d'utiliser nos dispositifs dans cet environnement.

Un autre environnement intéressant pour les tests de nos dispositifs est associé aux tuyaux d'eau chaude. En effet ces derniers sont souvent placés dans des endroits dépourvus de lumière. Plusieurs paramètres peuvent être surveillés dans un tuyau, notamment la température du fluide, aussi bien que son flux.

Comme mentionné avant, des matrices ont été mises en marche sur un tuyau de 8 cm de diamètre, ce qui correspond à un cas d'usage donné par un potentiel utilisateur de notre technologie. Une analyse détaillée des signaux obtenus est faite dans le paragraphe 4.2.3. La Figure 6.2 présente une matrice 2x2 montée et le signal obtenu en direct à l'oscilloscope. Pour rappel, la puissance électrique générée par la matrice est de $13 \mu\text{W}$ pour environ $900 \mu\text{W}$ de puissance mécanique. Les dispositifs bénéficient donc d'une marge importante d'optimisation.

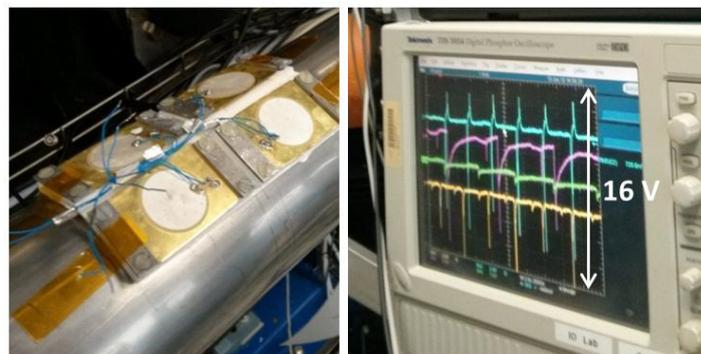


Figure 6.2: Matrice 2x2 flexible montée sur un tuyau d'eau chaude et signal obtenu en direct.

6.1.2 La domotique et les équipements électriques.

La domotique représente un autre champ large d'applications pour la récupération de l'énergie. Rendre la maison intelligente compte parmi les défis technologiques sur lesquels travaillent des nombreux acteurs du marché.

A l'intérieur du bâtiment il est possible de récupérer l'énergie provenant de plusieurs sources. On peut convertir en électricité la lumière, les vibrations, mais aussi la chaleur provenant de plusieurs sources. Dans ce dernier cas on peut citer les chaudières, les radiateurs, les outils dans la cuisine. En récupérant l'énergie thermique provenant de ces appareils il serait possible de réaliser plusieurs fonctions comme par exemple mesurer la température et transmettre sa valeur l'utilisateur, ou tout simplement le prévenir du fait que la température a dépassé un certain seuil. La dernière fonction est intrinsèque au bilame cloquant, souvent utilisé comme interrupteur thermique. Dans un cas typique le bilame ouvre ou ferme un circuit électrique comme partie de la boucle de contrôle de la température.

Afin d'informer l'utilisateur qu'une certaine température a été atteinte, ou dépassée, il est possible de coupler un module de récupération à bilame à une DEL clignotante. Une fois la température cible atteinte, le module se mettra en marche et alimentera la diode, qui donnera à l'utilisateur l'information sous forme visuelle.

Un circuit électrique a été conçu pour effectuer la collecte et le stockage de l'énergie provenant d'un module, pour la délivrer à une DEL. Le principe de fonctionnement est le même que lors des expériences présentées au paragraphe 4.1.3, sauf que l'interrupteur mécanique est remplacé par le circuit électrique.

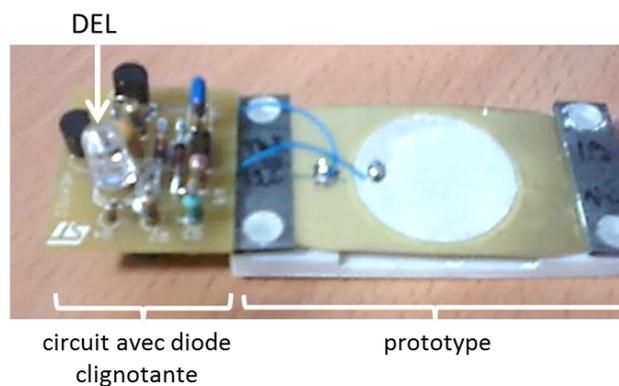


Figure 6.3: Prototype et circuit à DEL clignotante associé.

Le circuit transfère une partie de l'énergie électrique produite par le piézoélectrique à chaque impact sur un condensateur de stockage. Sa tension monte et quand une valeur de 2.3 V est atteinte le condensateur est vidé dans la DEL, produisant un pic de courant qui se traduit par l'apparition d'un pulse lumineux (Figure 6.4). Pendant cette étape la tension sur le condensateur de stockage tombe jusqu'à la tension de seuil de la diode, qui est de 1.6 V. Une nouvelle étape de chargement commence ensuite. La simulation du comportement du circuit est donnée dans la Figure 6.4 a et b. Les pulses de courant produits sont d'environ 12 mA.

La mise en marche avec branchement à une cellule de récupération a été faite sur plaque chaude autour de 130°C avec refroidissement à l'air ambiant. Des pulses de lumière réguliers distancés de quelques secondes ont été générés, comme dans la Figure 6.4 c. Cette expérience confirme la possibilité d'informer l'utilisateur du fait qu'une zone est chaude, tout en recyclant l'énergie qui y provient.

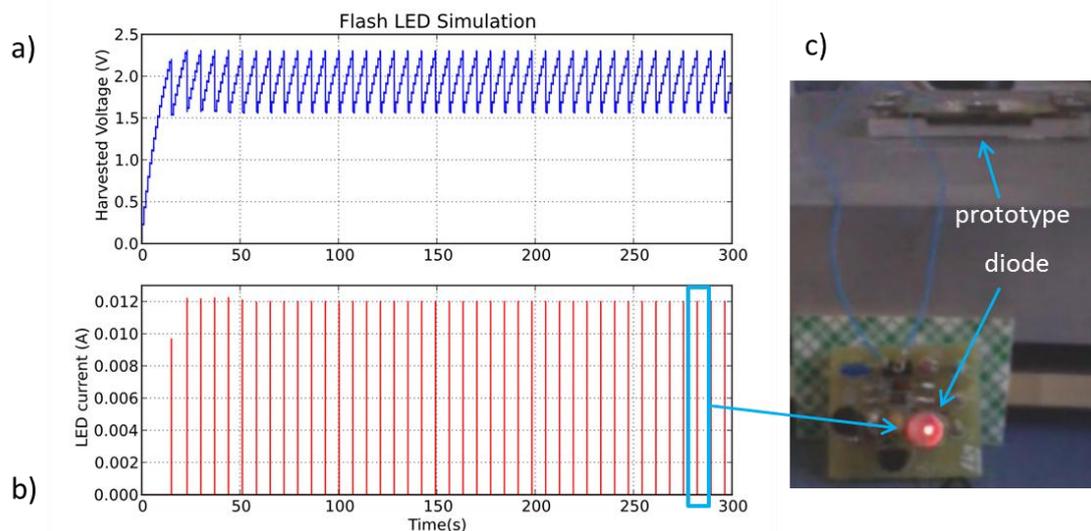


Figure 6.4: Allumage d'une DEL avec un dispositif à bilame et piézoélectrique et fonctionnement du circuit associé : a) simulation de l'évolution de la tension sur le condensateur de stockage ; b) simulation du courant dans la DEL ; c) pulse lumineux produit (conception du circuit et simulations faites par S. Trochut/ STMicroelectronics Crolles).

Une source d'énergie thermique inédite est constituée par les éléments d'éclairage qui chauffent. On peut penser aux lampes à incandescence, halogène et même aux DEL de puissance. L'énergie utile qu'ils produisent est sous forme lumineuse. Par contre, elle est accompagnée de dissipations sous forme de chaleur et d'une élévation non-négligeable de température. On peut donc envisager d'utiliser ces fuites pour alimenter des dispositifs de récupération. Afin de démontrer cette possibilité, des prototypes à base de bilames et piézoélectriques ont été testés sur des plaques à diodes destinées à l'éclairage.

Un exemple de test est montré dans la Figure 6.5. Ici un prototype sur substrat en Téflon a été placé sur une plaque en aluminium servant de support pour quelques diodes blanches. La mise en marche a été faite avec refroidissement à l'air ambiant. Le signal obtenu a une amplitude d'environ 8V crête à crête.

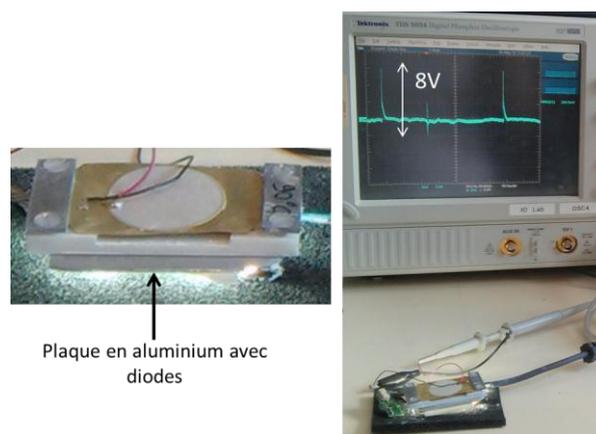


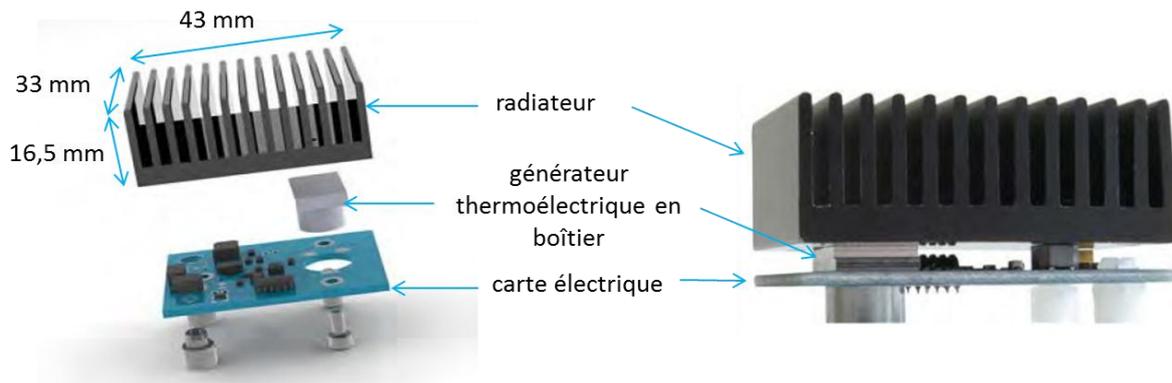
Figure 6.5: Prototype placé sur une plaque à diodes allumées et signal associé.

Les DEL de puissance peuvent chauffer à des températures supérieures à 70°C. On peut les retrouver dans les lampes de poche, les automobiles et de plus en plus dans l'éclairage public. Il est donc possible de récupérer la chaleur qu'elles dissipent avec des dispositifs à bilames et piézoélectriques afin de fournir l'énergie nécessaire pour des fonctions de détection qui apporteraient de la valeur ajoutée.

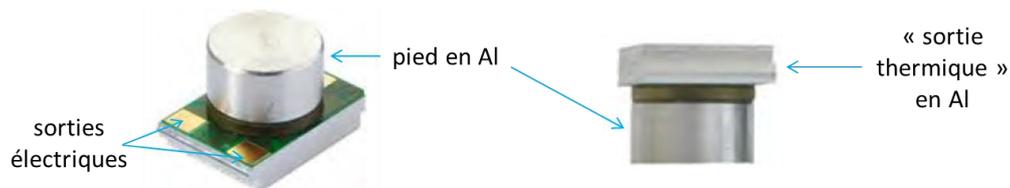
6.2 Comparaison à l'état de l'art, tests sur la durée de vie.

6.2.1 Comparaison aux dispositifs du marché pour un fonctionnement sans radiateur.

Des tests sur des dispositifs du marché ont été faits afin de connaître leur comportement. Ils se sont focalisés sur un récupérateur à effet Seebeck qui sert d'état de l'art. Le module caractérisé est développé par la société Micropelt. Il s'agit du TE-CORE7, qui utilise un générateur thermoélectrique de type MPG-D751 (Figure 6.6).



Le module comprend le générateur thermoélectrique mis en boîtier, une carte électrique, un radiateur et des vis de serrage qui servent à l'assemblage. Le boîtier du générateur comprend un pied en aluminium, qui entre en contact avec la source chaude et sert à la fois de chemin d'amenée de la chaleur et d'espaceur entre la source chaude et la carte. La partie haute du boîtier, appelée aussi sortie thermique, est également en aluminium, ce qui permet une bonne conduction de la chaleur vers le dissipateur (Figure 6.7).



Le boîtier testé dans le cadre de ce travail est le TGP-751[70], qui mesure $15 \times 10 \times 9.3 \text{ mm}^3$. Sa résistance thermique est de 18 K/W , pour une tension en sortie de 110 mV/K . Le générateur thermoélectrique est mis en boîtier pour des raisons de résistance mécanique et de gestion thermique. En effet, les matériaux utilisés pour la fabrication du générateur étant plutôt fragiles il est nécessaire d'assurer un assemblage adéquat, qui minimise les contraintes thermiques. Un autre rôle du boîtier est de séparer la partie froide de la partie chaude. Ceci revient à augmenter l'épaisseur de l'ensemble pour écarter les deux faces. Ce fait explique en partie l'épaisseur finale du boîtier de 9.3 mm .

Le module est fourni avec un dissipateur de type SK422 avec une longueur des ailettes de 33 mm . La résistance thermique correspondante est de 6.6 K/W . Des caractéristiques plus détaillées sont disponibles dans la fiche technique du démonstrateur, fournie par le fabricant [69].

Le boîtier testé contient donc un générateur de type MPG-751, placé entre le pied et la sortie thermique [71]. Il mesure $4.2 \times 3.4 \text{ mm}^2$ avec une épaisseur d'environ 1.1 mm (Figure 6.8). C'est un élément d'encombrement assez faible, grâce à la fabrication à petite échelle sur silicium.

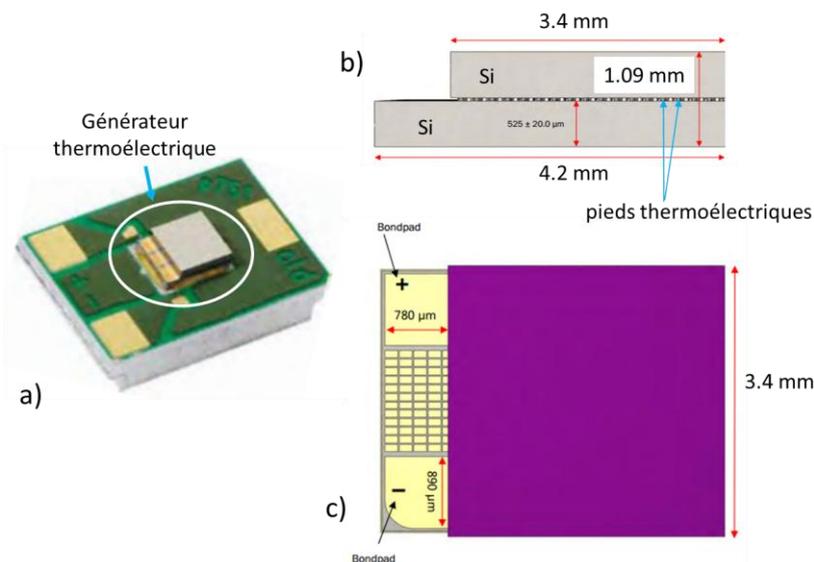


Figure 6.8: Le générateur MPG-751: a) placement du générateur sur la « sortie thermique » ; b) vue de côté montrant les substrats en silicium et les pieds thermoélectriques ; c) vue de dessus [71].

Le matériau thermoélectrique utilisé est à base de Tellure de Bismuth (Bi_2Te_3). Les pieds n et p sont fabriqués sur des wafers séparés qui sont ultérieurement assemblés. Les données fournies par le constructeur montrent que la partie active occupe un faible volume dans l'assemblage final. En effet, pour des matériaux thermoélectriques ayant des propriétés optimales à la température voulue, il n'est pas nécessaire de disposer d'un grand volume pour générer de la puissance électrique. Ce qui va compter c'est plutôt le flux thermique qui traverse la partie active. Plus celui-ci est grand, plus la puissance générée sera importante. Pour que cette condition soit assurée il faut être en mesure de garder une bonne différence de température entre la surface chaude et la surface froide du générateur.

La puissance électrique fournie en fonction de la température a été mesurée dans différentes conditions. La première série de mesures visait de vérifier si la puissance du module testé correspond aux données fournies par le fabricant avec utilisation du radiateur. Les mesures ont été faites sur une plaque chaude, pour des températures allant de 40 à 100°C, le maximum recommandé.

Dans un second temps le radiateur a été enlevé de l'ensemble en laissant le boîtier inséré dans la carte électrique. Ensuite, le boîtier a été testé séparément. Les résultats obtenus sont donnés dans la Figure 6.9. Les mesures ont été faites sur une résistance de 300 Ω, adaptée au générateur. Dans le cas où un radiateur est utilisé, une puissance électrique entre 0.25 et 11.4 mW est récoltée en sortie. Ce sont des valeurs légèrement en dessous des données fabricant, vu que le test est fait sur une surface horizontale, ce qui n'est pas une orientation optimale pour le module. Un placement à la verticale est recommandé pour améliorer la convection à l'interface du radiateur avec l'air et par conséquent la puissance électrique en sortie. Dans le cas où le radiateur est enlevé et le boîtier du générateur est laissé dans la carte thermique, la puissance en sortie varie entre 7.3 et 720 µW. Elle chute donc d'un facteur compris entre 16 et 34 si le radiateur est enlevé du module. Lors de ces derniers tests le boîtier est resté en contact avec la carte électrique, qui draine une partie de la chaleur et aide à son évacuation. La preuve est dans le fait que si le boîtier est testé seul, aucun signal n'est détecté, ceci pour toute la plage de températures d'essai.

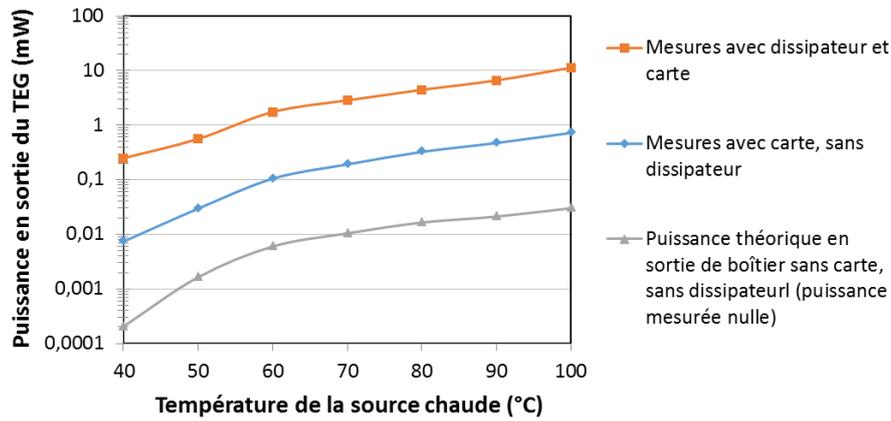


Figure 6.9: Puissance électrique en sortie (MicroPelt) avec convection naturelle à température ambiante. La puissance chute en absence de dissipateur.

Deux raisons peuvent être évoquées pour expliquer ce dernier résultat. La première est que la différence de température n'est pas suffisante pour avoir un signal. La seconde est que le signal existe, mais il est noyé dans le bruit. Pour mieux comprendre le résultat, des mesures de différence de température ont été faites aux bords du boîtier seul exposé à l'air ambiant statique. Entre 2 et 10 °C ont été mesurés sur une plaque chaude ayant une température entre 40 et 100°C. C'est une différence de température inférieure à celle mesurée avec le boîtier inséré dans la carte électrique et donc en théorie une puissance non nulle mais inférieure devrait être générée. Le calcul de cette puissance théorique a été fait en prenant en compte une évolution proportionnelle au carré de la différence de température disponible. Elle varie entre 0.2 et 30.2 μW . Sachant que l'aire de la partie supérieure est de 1.5 cm^2 , ceci correspond à une densité de puissance électrique entre 0.13 et 20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. A partir de ces valeurs, une comparaison peut être faite avec les dispositifs à base de bilames. Pour rappel, l'épaisseur du boîtier TGP-751 est de 9.3 mm, ce qui est environ deux fois supérieur aux dispositifs développés dans le cadre de ce travail.

Les bilames utilisés pour la construction des prototypes sur substrat flexible développent des énergies mécaniques de l'ordre de la centaine de micro joules. Il s'agit des bilames ayant une hystérésis de 3°C (voir le paragraphe 2.2.3). Sachant qu'une fois intégrés dans les prototypes ils oscillent à des fréquences moyennes de 0.3 Hz, et qu'ils mesurent 36x18 mm^2 , il est possible de déduire une densité de puissance mécanique associée selon la formule :

$$p_{meca} = \frac{E_{cycle}}{A_b} \cdot f_{osc} \quad \text{Eq.(6.1)}$$

avec E_{cycle} – l'énergie développée par un bilame sur un cycle d'oscillation, A_b et f_{osc} – aire et fréquence d'oscillation. Les densités d'énergie mécaniques correspondantes sont données dans la Figure 6.10a, tout comme les densités d'énergie électrique fournies par le générateur Seebeck.

La Figure 6.10b présente le rapport entre les deux densités de puissance. De manière générale, dans la plage de températures considérée on constate une meilleure densité de puissance pour les bilames. Le rapport entre les deux est plus grand pour les basses températures, dépassant la valeur de 50 pour 50°C. L'avantage diminue quand la température chaude augmente, pour se stabiliser autour d'un facteur 4.

La puissance volumique dans les différents cas est donnée dans la Figure 6.10 c. Les dimensions considérées pour les dispositifs à base de bilame sont celles d'une cellule sur substrat en Téflon. On remarque le fait que la densité de puissance volumique développée par les dispositifs à

effet Seebeck augmente avec la qualité de la gestion thermique. La densité volumique de puissance mécanique développée par les modules à bilame est du même ordre que la densité de puissance électrique développée par le module Micropelt avec dissipateur. L'avantage est du côté de la première dans le cas des basses températures.

Bien évidemment, il ne s'agit que de comparaisons portant sur la densité de puissance mécanique disponible. La densité de puissance électrique correspondante sera plus faible, compte tenu du rendement de conversion. Par contre, la densité de puissance considérée n'est qu'à l'état macroscopique. Si la taille des bilames était réduite d'un facteur 100, la densité surfacique de puissance électrique augmenterait du même facteur, selon les prévisions théoriques. Ceci peut amener un avantage significatif par rapport au dispositif à effet Seebeck.

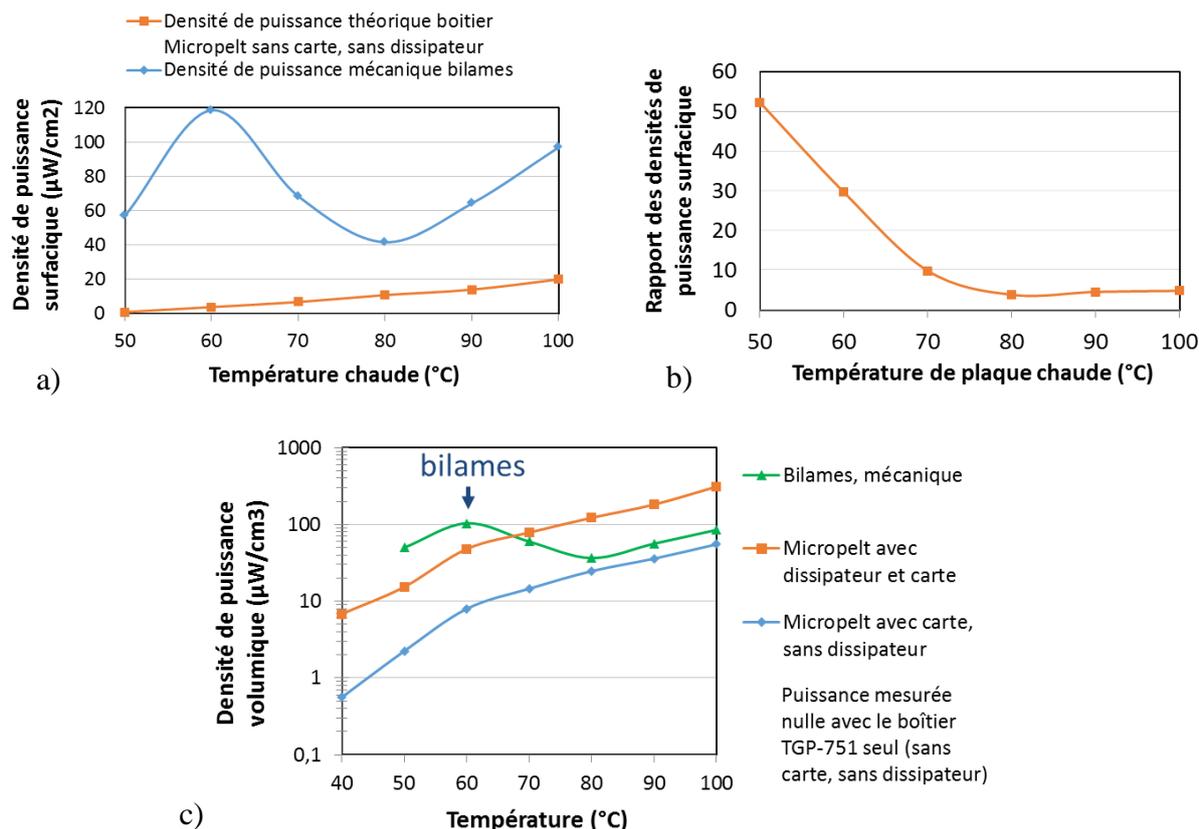


Figure 6.10: Comparaison des densités de puissance fournies par le générateur à effet Seebeck et les bilames thermiques : a) densités de puissance surfacique ; valeur théorique indiquée pour le boîtier TGP-751 seul, avec une surface de 15x10 mm²; b) rapport entre la densité de puissance mécanique des bilames et la densité de puissance électrique théorique fournie par le boîtier TGP-751 (densités surfaciques) ; c) comparaison des densités de puissance volumique mesurées.

Le gain serait réalisable avec des prototypes de quelques millimètres d'épaisseur au plus, en absence de radiateur. Ceci est dû en partie à la différence de température supérieure qu'un prototype développé sans le cadre de ce travail est capable de garder entre sa face chaude et sa face froide (Figure 6.11). Ainsi, sur une plaque chaude à 100°C, le TGP-751 garde une différence de température de 10°C, tandis qu'un prototype à base de Téflon de conception initiale garde 17.7 °C. Après optimisation thermique la différence de température est doublée et devient 3.6 fois supérieure à celle correspondant au dispositif à effet Seebeck.

Ces chiffres montrent le potentiel de la technologie développée dans le cadre de ce travail. Bien évidemment ils peuvent évoluer avec le temps et avec les améliorations qui vont suivre. Ce qui est à retenir est le fait que les dispositifs à bilame et piézoélectrique présentent une alternative

intéressante à l'existant pour une utilisation sans radiateur. En plus le coût des matériaux peut être plus bas, car aucun élément rare n'est utilisé.

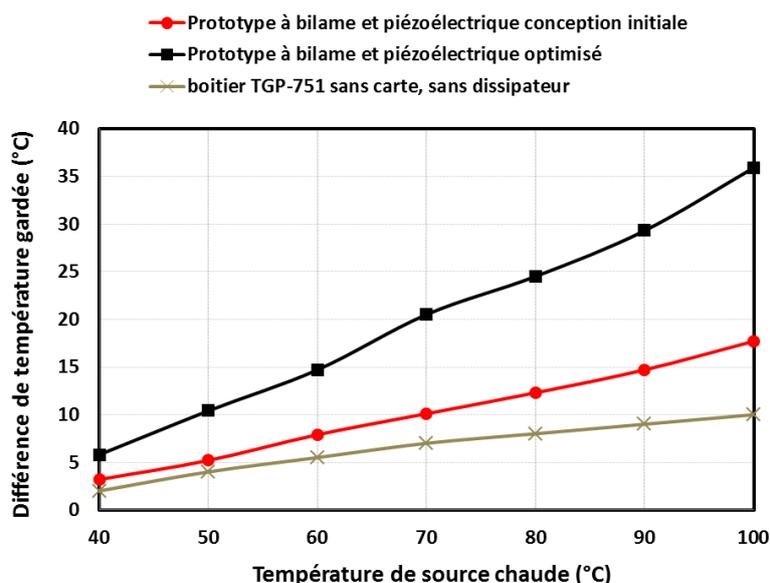


Figure 6.11: Différence de température gardée par les dispositifs en fonction de la température de plaque chaude (mesures).

6.2.2 Tests sur la durée de vie des dispositifs

6.2.2.1 Mécanismes de vieillissement. Tests sur la durée de vie des bilames.

Une des questions importantes à propos des dispositifs développés dans le cadre de ce travail porte sur leur durée de vie. Il est important qu'ils puissent assurer plusieurs années de fonctionnement. L'idéal est que la durée de vie dépasse celle des batteries à la température d'utilisation voulue pour que leur remplacement puisse être envisagé. Il est connu que ces dernières ne sont pas garanties pour plus de cinq ans.

Afin d'évaluer la durée de vie des dispositifs, il est nécessaire de connaître les mécanismes de vieillissement. On peut en citer plusieurs, dont notamment la fatigue mécanique du bilame et du piézoélectrique due au nombre de cycles de sollicitations à température plus grande que l'ambiante. On peut également penser à l'usure au choc entre les deux. Un autre mécanisme connu de vieillissement est la dépolarisation du piézoélectrique. En effet, celui-ci peut perdre sa polarisation avec le temps, ce qui peut engendrer la baisse du signal généré. Le fluage peut également jouer un rôle sur la performance des convertisseurs. En effet, la rigidité de l'assemblage pourrait baisser avec le temps suite à une action couplée des contraintes mécaniques et de la température.

Bien évidemment, le test de durée de vie le plus complet consiste dans le fonctionnement continu d'un dispositif jusqu'à son arrêt ou jusqu'à une dégradation conséquente de ses caractéristiques. Dans le cadre de ce travail le fonctionnement continu n'a pu être testé que pour des durées autour de 20 h. Ceci est dû à l'évolution continue des configurations dans le but de maximiser la puissance en sortie dans des conditions de plus en plus contraignantes. Sur les tests d'une durée autour de 20 h, le signal est resté constant, l'amplitude et la fréquence d'oscillation ne changeant pas. Ces essais ont été menés en parallèle avec le chargement de batteries pour une configuration avec bloc froid.

De manière générale, il est peu pratique de lancer des tests sur des longues durées, d'autant plus sur des durées d'environ 10 ans, ce qui correspond à la vie souhaitée pour les dispositifs. Il serait

plus pratique de faire des essais accélérés en reproduisant le nombre de cycles que le bilame ferait en quelques années sur des durées plus courtes. Sachant que la fréquence d'oscillation d'un bilame dans les prototypes est de l'ordre de 1 Hz, le nombre de cycles effectués en 10 ans sera d'environ 315 millions. A une fréquence de 0.3 Hz, il sera d'environ 95 millions. Des méthodes de test ont été conçues pour effectuer un nombre de cycle proche pour des durées d'essai raisonnables.

Certains bilames cloquants fabriqués par Delta Concept ont pu être validés pour 300000 cycles. La durée de vie donnée par le fournisseur de matériaux est estimée à un ordre de 10^7 cycles pour les disques cloquants [33]. Ce nombre est conditionné par le rapport entre le diamètre et l'épaisseur du disque. Plus le rapport est grand, plus la durée de vie est importante.

Afin de faire des tests sur un nombre de cycles approchant la centaine de millions, tout en mettant les bilames dans des conditions proches de celles rencontrées dans les prototypes, un banc dédié a été conçu par Delta Concept (Figure 6.12). L'idée est de faire osciller les bilames à des fréquences supérieures à 10 Hz. Afin de réussir ceci, ils seront placés entre un point chaud et un point froid forcés, avec un écart de température de 100°C .

Le banc de test comprend 6 emplacements pour les bilames dans un matériau isolant. Tout comme dans les prototypes sur substrat flexible, la chaleur est amenée par des cylindres métalliques à haute conductivité thermique en contact avec la plaque chaude. L'évacuation de la chaleur est faite par des blocs refroidisseurs à eau.

Le décompte du nombre de cycles effectués aussi bien que la mesure de la force développée par les bilames sera faite avec des éléments piézoélectriques placés en haut de la structure. Des aiguilles métalliques transmettront la force des bilames vers ces derniers. La vue en trois dimensions du plan du banc de test est donnée dans la Figure 6.13.

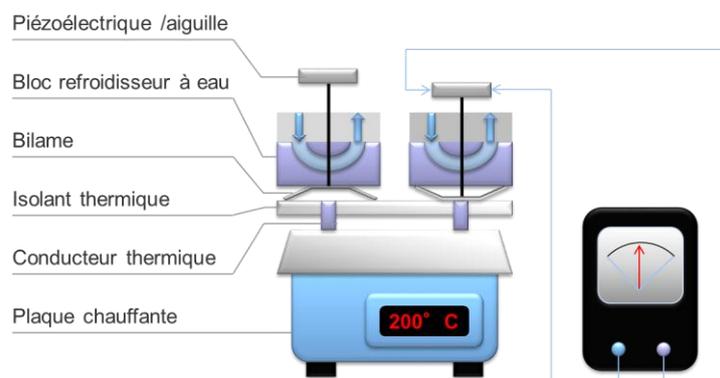


Figure 6.12: Schéma du banc de mesure de la durée de vie des bilames (fourni par Delta Concept).

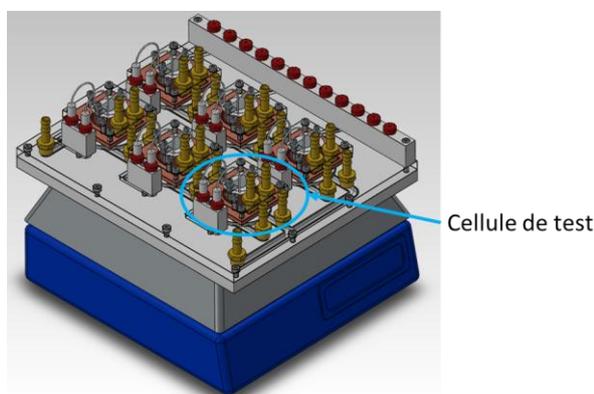


Figure 6.13: Vue 3D du banc de mesure de la durée de vie des bilames. On distingue les 6 cellules de test (plan fourni par Delta Concept).

Ce banc permettra de faire des mesures qui durent plusieurs mois au besoin, en fonction du nombre de cycles visé et de la fréquence d'oscillation des bilames.

6.2.2.2 Tests sur la durée de vie des piézoélectriques

Il est également intéressant de connaître la durée de vie des piézoélectriques. Plusieurs méthodes de mesure sont possibles pour la déterminer. La plus simple et rapide passe par l'utilisation de l'effet piézoélectrique inverse. L'application d'une tension alternative aux bords d'un piézoélectrique permet de le mettre en vibration. Des fréquences d'oscillation de l'ordre du kHz sont facilement imposables. Plus encore, les membranes utilisées dans le cadre de ce travail sont prévues à l'origine pour ce type de sollicitation.

Afin de faire les tests sous sollicitation électrique, une membrane de type Kingstate a été encastrée dans un cadre rond rigide (Figure 6.14). Le piézoélectrique a été sollicité à sa fréquence de résonance de 2000 Hz, avec un signal d'amplitude crête à crête de 60 V puis 600 V. Comme résultat, il subit 120000 cycles d'oscillation par minute, et les tests ne doivent durer que 28 h pour atteindre 200 millions de cycles.

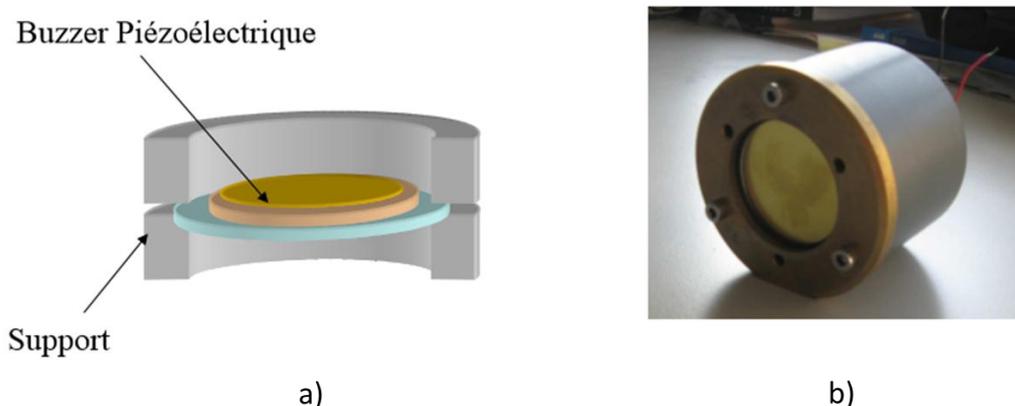


Figure 6.14: Support de test pour la durée de vie des membranes piézoélectriques : a) schéma de la membrane (« buzzer ») dans le support rigide ; b) photo de l'ensemble.

A 2000 Hz le coefficient de couplage du piézoélectrique est de 0.17. La tension de sollicitation a été choisie de manière à ce que les contraintes en flexion produites dans le piézoélectrique soient comparables à celles créées par contact avec un bilame. Il se trouve que pour que ça soit le cas la tension correspondant à l'effet inverse n'est pas égale à la tension générée par effet direct. Ce constat résulte des calculs sur l'énergie mécanique insérée. Les relations suivantes peuvent être écrites pour l'effet direct et l'effet inverse pour un coefficient de couplage modéré (ce qui est le cas pour ces tests) :

$$E_{mecad} \cdot K_e^2 = \frac{CV_{maxd}^2}{2} \quad \text{Eq.(6.2)} \quad E_{mecai} = K_e^2 \cdot \frac{CV_{maxi}^2}{2} \quad \text{Eq.(6.3)}$$

avec E_{meca} – énergie mécanique insérée, V_{max} – maximum de la tension aux bords du piézoélectrique, K_e – coefficient de couplage équivalent. L'indice d correspond à l'effet direct et l'indice i à l'effet inverse.

Pour avoir un rapport entre les énergies mécaniques créées de 1 et donc des contraintes mécaniques équivalentes, il faut que le rapport des tensions respecte la relation suivante :

$$\frac{E_{mecai}}{E_{mecad}} = 1 \Rightarrow \frac{V_{maxi}}{V_{maxd}} = \frac{1}{K_e^2} \quad \text{Eq.(6.4)}$$

La tension en sollicitation inverse doit donc être plus grande d'un facteur $1/K_e^2$. Ainsi des tensions appliquées 30 et 300 V (ou 60 et 600 V crête à crête) correspondent à des tensions générées d'environ 0.9 et 8.7 V. La première valeur est équivalente à la tension induite par un bilame de faible force et la seconde s'approche de des pics générés dans les prototypes habituels.

Les tests ont été conduits sur 200 millions de cycles, avec des mesures sur le facteur de couplage et le facteur de qualité mécanique. La première série de tests a été faite pour les deux tensions de sollicitation citées, les résultats étant donnés dans la Figure 6.15.

On remarque qu'aucun des deux facteurs mesurés ne change avec le nombre de cycles, ceci jusqu'à 200 millions. Le niveau de tension appliqué n'a pas d'influence notable sur les mesures. C'est un résultat significatif, qui montre la grande résilience des membranes utilisées pour des énergies mécaniques comparables à celles induites par les bilames.

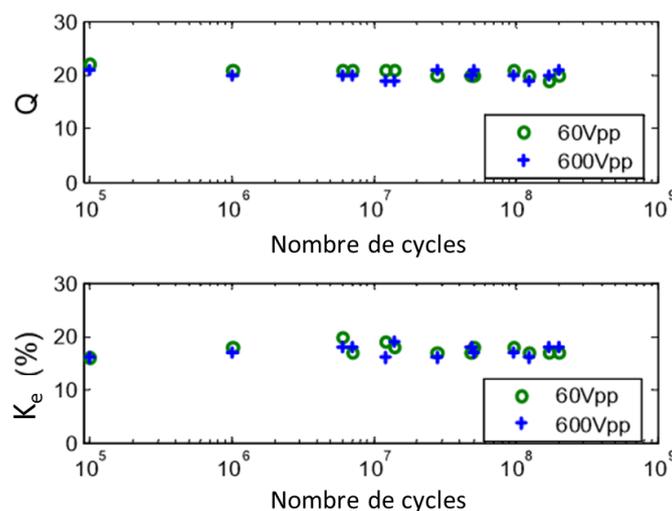


Figure 6.15: Evolution du facteur de qualité mécanique et du facteur de couplage en fonction du nombre de cycles de sollicitation à 60 V et 600 V crête à crête (test fait par P.J. Cottinet/ LGEF).

Des tests supplémentaires ont été faits à 110°C, afin de comprendre l'influence de la température sur l'évolution du facteur de couplage et le facteur de qualité mécanique. Les résultats sont donnés dans la Figure 6.16.

Tout comme pendant les tests précédents on observe que les facteurs significatifs ne changent pas avec le nombre de cycles malgré la haute température. Il faut donc s'attendre à un comportement similaire après intégration dans un prototype. Ce que l'on observe de plus est le fait que de manière générale le facteur de couplage et le facteur de qualité mécanique sont plus bas à 110°C. L'écart n'est pas grand par rapport à la température ambiante pour chacun des facteurs pris indépendamment. En revanche, le produit $K_e^2 Q$ diminue d'environ 30%, ce qui signifie que le rendement de conversion baisse quand la température augmente. Il est à savoir que les températures mesurées sur les piézoélectriques insérés dans les prototypes n'ont jamais dépassé 110°C dans le cadre de ce travail. Les pertes de performance associées au chauffage ne sont donc pas censées dépasser quelques dizaines de pourcent.

Ces tests sont très parlants sur la qualité des membranes utilisées, et sur la possibilité d'avoir une durée de vie confortable. Bien évidemment, ils pourraient être complétés, notamment pour prendre en compte le choc entre le bilame et le piézoélectrique et aussi l'évolution de la polarisation avec le

temps à haute température. Les tests sur la durée de vie des bilames permettront d'avoir un tableau plus complet. Il reste à dire que les estimations et les premiers résultats expérimentaux sont encourageants.

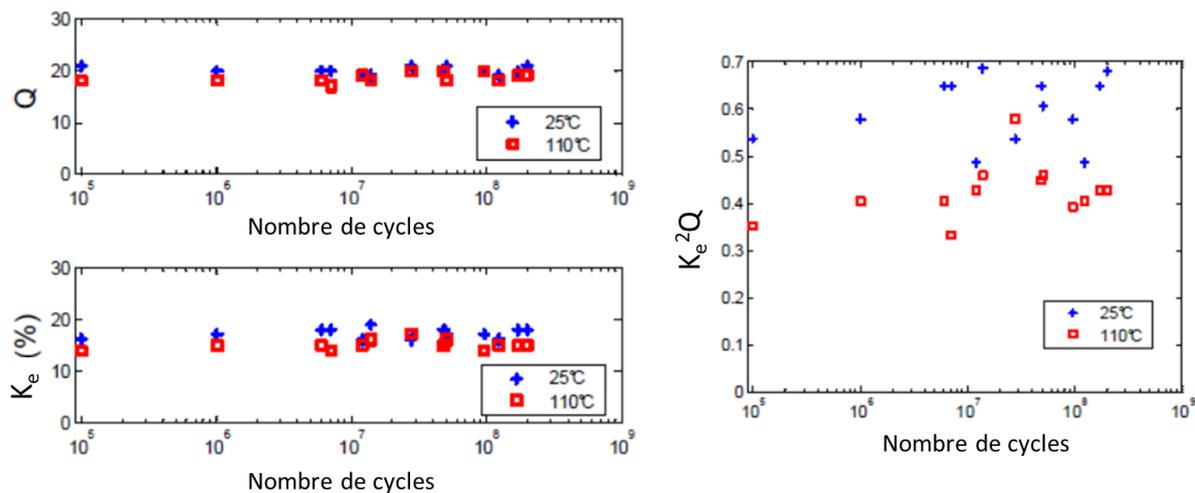


Figure 6.16: Evolution du facteur de qualité mécanique, du facteur de couplage et du produit $K_e^2 Q$ en fonction du nombre de cycles pour une sollicitation de 600 V crête à crête (test fait par P.J. Cottinet/ LGEF).

6.3 Futures évolutions

6.3.1 Dépôt de peinture piézoélectrique sur les bilames

Une solution originale pour la récupération de l'énergie thermique est le dépôt d'une couche piézoélectrique sur un bilame cloquant. C'est une solution qui offre un certain nombre d'avantages, en commençant par un meilleur couplage mécanique entre les éléments. En effet, le piézoélectrique sera directement activé à la déformation du bilame, sans passer par le choc et le rendement de transmission associé. Par contre, cette solution représente aussi un défi technologique. En effet, le dépôt est rendu difficile par la courbure du bilame. Bien que faible, la flèche associée étant autour de 1-2 mm, elle représente un empêchement assez fort. En plus la présence du poinçon complique encore plus la tâche. Les technologies de dépôt en salle blanche ne sont pas adaptées à un tel relief, tandis que le collage des céramiques de type PZT n'est pas possible à cause de la fragilité.

Le matériau piézoélectrique conformable le plus connu – le PVDF ne donne pas des résultats satisfaisant après dépôt sur les bilames. Il a donc fallu chercher une solution alternative, qui s'est présenté sous forme de peinture ferroélectrique.

La peinture testée a été développée au LGEF. La méthode de préparation consiste dans le mélange d'une poudre ferroélectrique avec une peinture polyuréthane. Le mélange obtenu est fluide et peut être étalé par pulvérisation sur un grand nombre de surfaces, grâce aux propriétés d'adhésion de la peinture. Le dépôt est suivi d'une étape de séchage autour de 60°C, afin d'évaporer le solvant. La couche obtenue ainsi a des propriétés piézoélectriques et pyroélectriques.

Des dépôts ont été réalisés sur deux types de bilames, à grande et à faible hystérésis. Les premiers sont des bilames 60-45 °C et le seconds des bilames 84-81°C. Les deux séries ont des dimensions de 36x18 cm². Les images des échantillons obtenus sont données dans Figure 6.17.

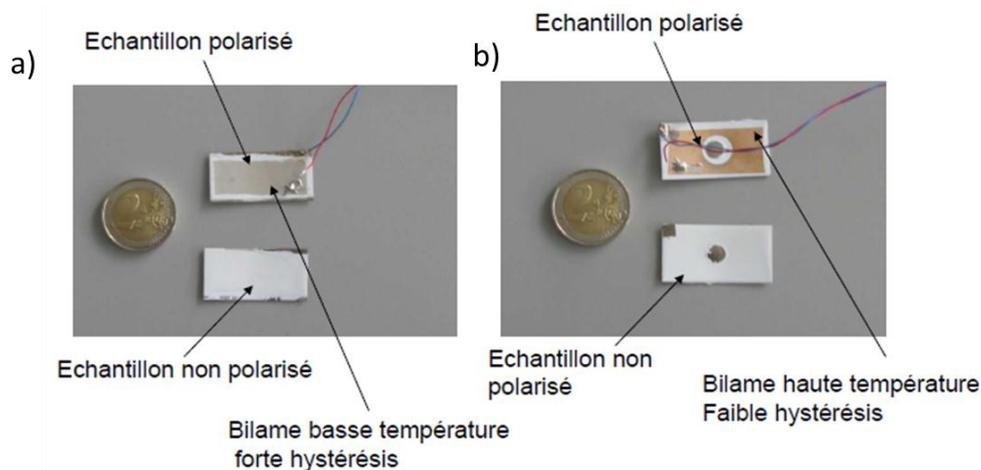


Figure 6.17: Bilames avec piézoélectrique déposé sur la couche active : a) bilame 60-45°C ; b) bilame 84-81 °C (dépôt fait par P.J. Cottinet/ LGEF).

On peut distinguer sur les images la peinture piézoélectrique de couleur blanche. Des électrodes sont déposées par-dessus avant de passer à l'étape de polarisation. Les électrodes testées sont la laque d'argent et le cuivre en feuille fine.

La mise en marche a été faite sur une cellule en Téflon, dans le deux cas, avec refroidissement à l'air ambiant, sans disposer de plaque froide par-dessus (Figure 6.18).

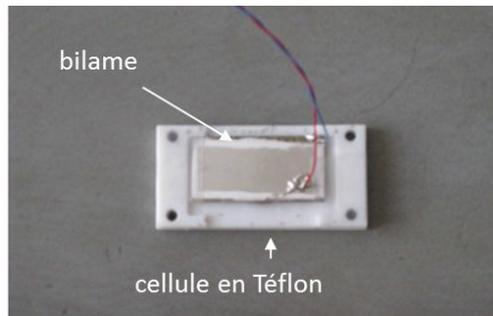


Figure 6.18: Test d'un bilame 60-45°C avec couche de peinture piézoélectrique.

Les pics générés par un bilame 60-45 °C sont présentés dans la Figure 6.19. L'amplitude crête à crête du signal est significative, approchant les 20V. Par contre, la fréquence d'oscillation est plutôt faible. Le temps de chauffage, aussi bien que le temps de refroidissement est rallongé. Ceci témoigne du fait que le refroidissement avec exposition directe à l'air ambiant n'est pas efficace. Ce fait a également été vérifié avec des bilames sans peinture. En plus le fait de poser simplement le bilame sur la surface chaude ne favorise pas le chauffage. Il est nécessaire de l'appuyer contre la surface pour que les transferts thermiques soient accélérés.

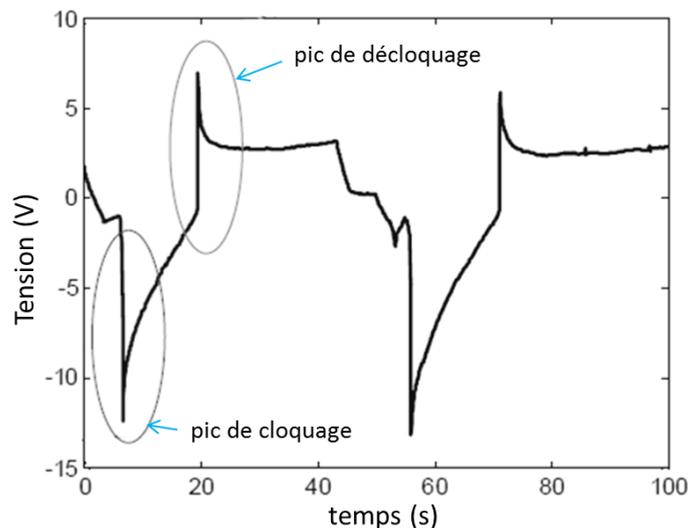


Figure 6.19: Signal généré par un bilame 60-45 °C avec peinture piézoélectrique.

Les conditions thermiques ne sont donc pas optimales dans le cadre de ce test, par contre l'amplitude du signal généré montre que le dépôt de peinture est une voie prometteuse pour le futur.

La mise en marche a également été faite avec le bilame 84-81 °C. Cette-fois ci le signal généré n'est pas aussi important. Pour cause on peut évoquer la force plus faible développée par le bilame, due à sa faible hystérésis. Aussi, la température de test est plus grande, et donc plus proche de la température de Curie du matériau ferroélectrique. Les pics générés ont une amplitude d'environ 2.5 V crête à crête (Figure 6.20). Ils se présentent sous forme de triangles à faible variation de pente, ce signifie qu'ils ne sont pas dus au cloquage lui-même et pourraient être d'origine pyroélectrique. Une mesure de température sans contact a été faite au niveau du poinçon pour confirmer cette hypothèse. Le relevé montre que la température évolue de même manière que la tension en sortie (Figure 6.20). Ceci démontre l'origine pyroélectrique du signal.

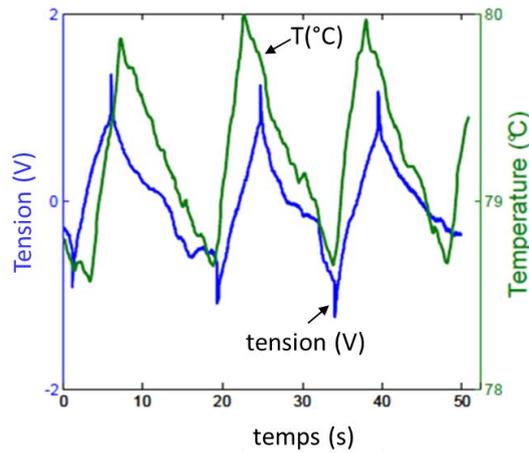


Figure 6.20: Signal généré par un bilame 84-81 °C avec couche de peinture piézoélectrique.

Ces résultats montrent une possible alternative – celle de la récupération d'énergie par effet pyroélectrique. Le signal obtenu est exploitable, sans pour autant qu'une optimisation ait été faite auparavant. Il est donc intéressant d'approfondir cette voie, surtout vu le potentiel annoncé (discuté dans le paragraphe 1.2.3). Egalement, il est possible d'élaborer une peinture avec une poudre ferroélectrique à température de Curie plus haute. Ceci permettra de garder des propriétés piézoélectriques convenables même après chauffage. Une nouvelle composition est en cours d'élaboration en vue de prochains tests.

6.3.2 Fabrication à micro échelle

Au vu des lois d'échelle développées dans le chapitre 5, il est intéressant de fabriquer des dispositifs à base de bilames et piézoélectriques de petites dimensions. Sachant que la largeur limite d'un bilame fabriqué avec l'approche actuelle, issue de la métallurgie, est de 5 mm, afin d'avoir des dimensions plus petites il est nécessaire de passer par une fabrication de type MEMS. L'avantage d'une telle approche est qu'elle fait partie du corps de métiers de STMicroelectronics, qui possède une bonne maîtrise des étapes technologiques.

Le but est donc de fabriquer des empilements de bilames et piézoélectriques à échelle microscopique. Dans le cas des piézoélectriques, la fabrication à échelle microscopique a connu un fort développement la dernière décennie. Plusieurs matériaux ont été investigués, dont le nitrure d'aluminium, le PZT et l'oxyde de zinc (voir le paragraphe 3.2.3). Les bilames thermiques à échelle microscopique sont moins connus, d'autant plus les bilames cloquants. En général, on cherche plutôt à diminuer l'effet bilame et les contraintes rémanentes associées pendant les étapes de fabrication des composants. Des travaux ont été menés aussi pour développer des actionneurs à bilame, pour des applications dans l'optique ou la micro-fluidique. Ainsi, des bilames thermiques à déformation continue ont été intégrés dans des valves de micro pompe [72] et dans des bras d'actionnement de micro-miroirs [73]. Dans les deux cas les bilames sont chauffés par effet Joule.

Notre tâche est la fabrication de micro bilames cloquants. Tout comme à l'échelle macroscopique, il serait pratique d'être en mesure de fabriquer des bilames courbés, avec une distorsion géométrique équivalente au poinçon. Ceci permettrait de jouer sur plusieurs paramètres afin d'atteindre les températures de cloquage souhaitées. Sachant que les procédés classiques ne permettent pas d'atteindre une forme aussi complexe pour un dépôt métallique, une méthode de fabrication innovante a été mise en place.

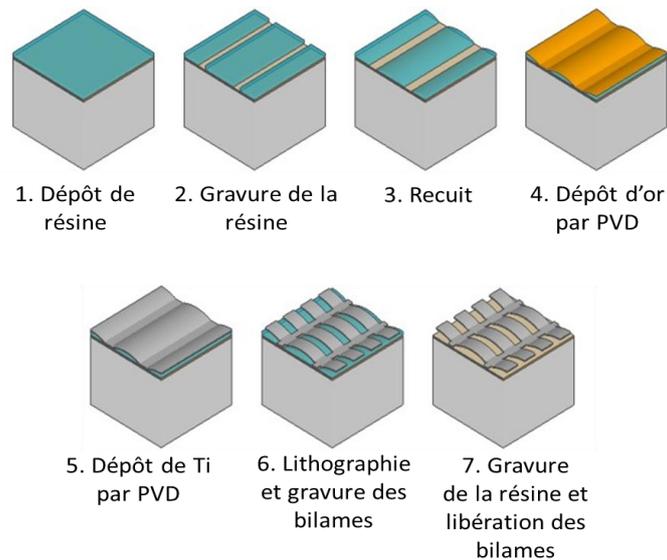


Figure 6.21: Procédé de fabrication de micro-bilames [74].

La clé du nouveau procédé de fabrication consiste dans le dépôt de métaux sur des microlentilles en résine. Ceci assure une forme incurvée avec la possibilité de créer une multitude de motifs. Le procédé consiste en 7 étapes. Les premières trois sont similaires à celles implémentées pour la fabrication de microlentilles pour des capteurs d'image. En premier temps, une résine est déposée sur un substrat en Si. Ensuite des motifs rectangulaires ou circulaires sont gravés dans la résine. Une étape de recuit à 140°C permet d'arrondir les bords. Après une couche d'or et une couche de titane sont déposées successivement par PVD à 210 °C. Les bilames et leurs attaches mécaniques sont ensuite gravés. Pour finir, la résine est enlevée par voie chimique afin de libérer les structures.

Un exemple de structure obtenue est donné dans la Figure 6.22. Ce sont des micro-bilames rectangulaires ayant des dimensions autour de 100 µm, avec des attaches solidaires au substrat en Si. Des motifs circulaires ont également été obtenus. Des « poinçons » peuvent être créés au centre des bilames en jouant sur la cinétique de recuit de la résine.



Figure 6.22: Micro-bilames en Ti-Au.

Les températures de cloquage et de décrochage des micro-bilames peuvent être contrôlées en jouant sur les dimensions, et notamment sur le rapport flèche sur épaisseur. Ce même ratio conditionne le caractère cloquant. Les conditions aux limites sont aussi un levier à utiliser.

Les premiers micro-bilames obtenus confirment la faisabilité du procédé de fabrication. A l'heure actuelle un travail supplémentaire est mené pour obtenir le caractère cloquant. Une fois ceci réussi, l'association des bilames pourra être faite avec des structures de récupération mécano-électrique.

Conclusion générale

Le présent travail est une contribution au domaine de la récupération de l'énergie. Le fait de rendre les objets autonomes du point de vue énergétique représente un des grands défis pour les acteurs de l'industrie et de la science. L'autonomie énergétique implique un moindre coût à l'utilisation et aussi une maintenance réduite pour les dispositifs électriques. Elle peut amener un confort d'utilisation accru et une empreinte écologique améliorée.

On parle de récupération quand l'énergie convertie est gratuite. Aussi la récupération de l'énergie implique une échelle réduite et des puissances générées suffisantes pour des objets à basse consommation. Comme ceci a été décrit dans le Chapitre 1, parmi les objets les plus prometteurs à l'heure actuelle on compte les capteurs sans fil, qui sont capables de transmettre l'information à distance par liaison radio. Leurs besoins en puissance électrique sont très faibles, $10 \mu\text{W}$ étant suffisants pour réaliser des fonctions utiles. Plusieurs sources d'énergie peuvent être utilisées pour les alimenter, dont notamment l'énergie solaire. Dans les endroits dépourvus de lumière la conversion de la chaleur est une solution intéressante pour produire l'énergie nécessaire.

La technologie classique pour convertir la chaleur en électricité repose sur l'effet Seebeck. Comme présenté dans le premier chapitre, il s'agit d'une conversion directe, par contre des nombreux défis sont à relever au niveau des matériaux utilisés. Ainsi, ils doivent être à la fois de bons conducteurs d'électricité et des mauvais conducteurs de chaleur, les deux propriétés s'excluant réciproquement. Les matériaux présentant les meilleures performances sont souvent chers, rares voire dangereux pour la santé. A l'heure actuelle les performances optimales de point de vue électrique sont atteintes avec l'utilisation d'un radiateur, souvent encombrant et en absence duquel la puissance générée peut chuter d'un ou plusieurs ordres de grandeur (comme montré au Chapitre 6).

Dans ce contexte une technologie innovante est proposée dans le cadre du présent travail. Elle repose sur une conversion de la chaleur en électricité en deux étapes, la première étant thermomécanique et la seconde mécano-électrique. Plusieurs voies de conversion ont été mises en œuvre à travers des partenariats et sont introduites dans le Chapitre 1. Ainsi, l'étape thermomécanique peut être réalisée par des bilames thermiques ou des gouttes de liquide qui explosent au contact avec une surface chaude. La conversion mécano-électrique peut être faite par des piézoélectriques ou des structures à électret.

Le présent travail est focalisé sur le développement de dispositifs à base de bilames et piézoélectriques. Comme présenté dans le Chapitre 2, les bilames utilisés présentent de l'instabilité mécanique et flambent lors des cycles de chauffage et de refroidissement alternés. Ceci leur permet d'osciller quand ils sont placés entre une surface chaude et une surface froide et de produire ainsi une puissance mécanique. La température de cloquage et de décroquage du bilame est réglée par le poinçon appliqué lors de la fabrication. Des images infrarouges acquises lors du chauffage montrent qu'il est suffisant de chauffer le poinçon pour qu'un bilame cloque. Des simulations sous COMSOL Multiphysics montrent qu'un poinçon de grande hauteur augmente la température de cloquage, ce qui est le cas en pratique. Il a été déduit à partir des expressions analytiques qu'un autre paramètre d'influence est le rapport entre la flèche du bilame et son épaisseur. Plus ce rapport est grand, plus la température de cloquage est haute. La vitesse au cloquage et au décroquage a été mesurée pour plusieurs séries de bilames. Ceci a permis de remonter à leur énergie cinétique, qui est autour de $420 \mu\text{J}$ par cycle pour une différence entre la température de cloquage et de décroquage de 3°C . Une puissance mécanique de $420 \mu\text{W}$ pourrait donc être obtenue en faisant osciller un tel bilame à une fréquence de 1 Hz.

Le chapitre 3 présente les différentes méthodes de conversion mécano-électrique, les circuits de récupération, aussi bien que les éléments de stockage. L'accent est mis sur la présentation des piézoélectriques, en passant par les matériaux, les lois physiques et les modèles associés. Un modèle à constantes localisées a été développé pour une sollicitation en mode choc. Les expressions de la tension et du déplacement ont été déduites en court-circuit et en circuit ouvert. La même analyse a été faite dans le cas d'une résistance optimale en sortie, l'expression de la tension étant donnée dans la littérature et l'expression du déplacement étant déduite dans le cadre de ce travail. L'évaluation numérique du rendement de conversion mécano-électrique a été faite en fonction de la résistance en sortie, du facteur de couplage généralisé et du facteur de qualité mécanique d'une structure. Plus les deux derniers sont hauts, plus le rendement est important, avec une limite théorique approchant les 100%.

Le chapitre 4 présente les prototypes élaborés. Le point de départ a été la preuve de concept sur plaque chaude, avec refroidissement par un bloc métallique avec circulation d'eau froide. Ensuite, la mise en prototype sur substrat dur a été effectuée, pour un fonctionnement avec refroidissement à l'air ambiant. L'étape suivante a été la fabrication sur substrat flexible, avec des structures matricielles de quelques millimètres d'épaisseur refroidies par convection naturelle. Les signaux générés en fonctionnement peuvent atteindre 15-16 V. La puissance électrique moyenne développée par une cellule de matrice fonctionnant à 75°C est d'environ 3.3 μ W. La puissance mécanique développée par le bilame dans ce cas est de l'ordre de 200 μ W. Les dispositifs bénéficient donc d'une marge confortable d'optimisation, un rendement mécano électrique bien plus haut pouvant être atteint si les pertes mécaniques dans la structure sont limitées.

Un modèle thermique analytique a été développé pour calculer la différence de température gardée par un prototype dans des conditions externes imposées. Le modèle a permis de proposer quelques voies d'optimisation thermique. La différence de température maintenue a été doublée par rapport aux prototypes d'origine en maximisant le volume occupé par l'air à l'intérieur et en peignant sa surface en noir. Elle atteint la moitié de la différence de température externe, avec refroidissement par convection naturelle.

Le chapitre 5 présente les lois d'échelle des dispositifs à base de bilames et piézoélectriques. L'évolution des différents paramètres avec la miniaturisation est étudiée. Ainsi, il a été démontré que si la taille des dispositifs est réduite d'un facteur k , la fréquence d'oscillation du bilame augmente d'un facteur k^2 . Cette tendance a été prouvée de manière expérimentale sur des bilames centimétriques. En même temps, les températures de cloquage et décroquage restent constantes. Ceci est convenable du point de vue de la conception, car la même forme peut être reproduite à toute échelle, sans variation des températures de fonctionnement. Suite à l'accélération conséquente des bilames, la densité de puissance mécanique transportée est censée augmenter du facteur d'échelle k , tout comme la densité de puissance électrique. Par contre, la diminution de l'amplitude du signal produit par les piézoélectriques est attendue, ce qui représentera un défi à relever. La miniaturisation peut donc amener une puissance supérieure, ce qui motive le développement de dispositifs sur substrat en silicium.

Le chapitre 6 présente les premiers cas d'usage identifiés. Les dispositifs développés ont été testés dans des conditions proposées par des potentiels utilisateurs, sur tuyau d'eau chaude et dans une installation électrique. L'utilisation des modules dans le domaine de la domotique est également à l'étude. La comparaison aux dispositifs représentant l'état de l'art a été faite. Les tests ont montré que la puissance électrique générée par un dispositif à effet Seebeck chute en absence de radiateur. Dans les mêmes conditions la densité surfacique de puissance mécanique développée par les dispositifs à bilames est supérieure. Le défi sera donc de la convertir en puissance électrique avec un bon rendement. La question de la durée de vie a été étudiée. Les mesures ont montré que les membranes

piézoélectriques utilisées pour la fabrication des prototypes sont capables de résister sans dégradation des propriétés à plusieurs centaines de millions de cycles de sollicitation.

Quelques pistes pour le futur sont également présentées, dont notamment le dépôt de peinture piézoélectrique sur les bilames et l'utilisation de l'effet pyroélectrique. Les premiers tests avec peinture sont encourageants, de signaux autour de 20 V crête à crête étant obtenus. Les premiers développements à micro-échelle ont également été effectués. Un procédé de fabrication de bilames a été mis en place et validé par la sortie des premières microstructures. Son optimisation est à l'étude pour rendre les micro-bilames cloquants.

Somme faite, ce travail a permis d'introduire une nouvelle technologie pour la récupération de l'énergie thermique. C'est une alternative pour les dispositifs classiques, à effet Seebeck. La conversion est faite en deux étapes : thermomécanique et mécano électrique. L'énergie mécanique disponible est confortable et le rendement de conversion mécano-électrique bénéficie d'une marge d'optimisation importante. Plusieurs prototypes ont été fabriqués, y compris des structures matricielles fines, flexibles et qui fonctionnent sans radiateur. Les lois d'échelle des dispositifs ont été établies. Elles prédisent l'augmentation de la densité de puissance électrique générée avec la miniaturisation. Les premiers cas d'usage ont été investigués avec mise en marche des dispositifs sur le terrain.

Les futures grandes directions de développement pour la technologie présentée sont l'amélioration du rendement mécano-électrique, la miniaturisation et le couplage aux capteurs sans fil.

Bibliographie

- [1] J. C. Muller, "Photovoltaïque," *Encyclopaedia Universalis*, 2013. [Online]. Available: <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/photovoltaique/>.
- [2] S. Boisseau, "Récupération d' énergie vibratoire à électrets," Thèse, Université de Grenoble, 2011.
- [3] T. Ueno, "Kanazawa magnetostrictive," in *Magnetostrictive energy harvesters and applications*, 2012.
- [4] T. Krupenkin and J. A. Taylor, "Reverse electrowetting as a new approach to high-power energy harvesting," *Nat. Commun.*, vol. 2, no. 8, 2012.
- [5] F. Cottone, "Introduction to Vibration Energy Harvesting," 2011. [Online]. Available: www.nipslab.org.
- [6] P. D. Mitcheson et al., "Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices," *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457–1486, 2008.
- [7] "Céramiques piézoélectriques." Saint Gobain Quartz S.A.S, p. 32.
- [8] Y. Manoli, "Energy harvesting - from devices to systems," in *ESSCIRC*, 2010, pp. 27–36.
- [9] S. Roundy, P. K. Wright, and J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes," *Comput. Commun.*, vol. 26, pp. 1131–1144, 2003.
- [10] S. Boisseau, G. Despesse, T. Ricart, E. Defay, and A. Sylvestre, "Cantilever-based electret energy harvesters," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, p. 15, 2011.
- [11] D. Pavone et al., "Design considerations for radio frequency energy harvesting devices," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 45, pp. 19–35, 2012.
- [12] H. Haocheng, "Demonstration of a highly efficient RF energy harvester for Wi-Fi signals," in *ICMMT*, 2012, pp. 1–4.
- [13] J. H. Goldsmid, *Introduction to thermoelectricity*. 2010, p. 242.
- [14] G. J. Snyder and E. S. Toberer, "Complex thermoelectric materials," vol. 7, no. February, pp. 105–114, 2008.
- [15] G. Savelli, "Étude et développement de composants thermoélectriques à base de couches minces," Thèse, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2007.
- [16] N. Mingo et al., "The nanoparticle in alloy approach to efficient thermoelectrics: silicides in SiGe," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 711, 2009.
- [17] S. B. Lang, "A 2400 history of pyroelectricity: from Ancient Grece to exploration of the solar system," *Br. Ceram. Trans.*, vol. 103, no. 2, pp. 65–70, 2004.
- [18] G. Sebald, E. Lefeuvre, and D. Guyomar, "Pyroelectric Energy Conversion : Optimization Principles," vol. 55, no. 3, pp. 538–551, 2008.

- [19] E. Lefeuvre et al., "Piezoelectric material-based energy harvesting devices : advances of SSH optimization techniques (1999-2009)," in *Piezoelectric Ceramics*, E. Suaste-Gomez, Ed. InTech, 2010, pp. 165–184.
- [20] G. Despesse, "Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des micro-systèmes communicants," Thèse, INPG, 2005.
- [21] L. Carliz, "Générateur piézoélectrique à déclenchement thermo-magnétique," INPG, 2009.
- [22] L. G. Fréchette et al., "Design of a microfabricated rankine cycle steam turbine for power generation," in *Proceedings of IMECE'03*, 2003, no. 212, pp. 1–10.
- [23] O. G. Symko, "Energy conversion using thermoacoustic devices," in *ICT*, 1999, pp. 645–648.
- [24] T. Skotnicki, "Générateur thermoelectrique," FR2951874A12009.
- [25] E. Lèveillé et al., "A microfluidic heat engine based on explosive evaporation," in *Power MEMS 2012*, 2012.
- [26] O. Namli, J. Lee, and M. Taya, "Modeling of piezo-SMA composites for thermal energy harvester," *Proc. SPIE*, vol. 6526, pp. 1–12, 2007.
- [27] T. Skotnicki, "Dispositif de conversion d'énergie thermique en électricité," FR2951873A12009.
- [28] G. Boistel, "De quelle précision a-t-on réellement besoin en mer," *Hist. Mes.*, vol. 21, no. 2, pp. 121–156, 2006.
- [29] S. Timoshenko, "ANALYSIS OF BI-METAL THERMOSTATS," *J.O.S.A.*, vol. 11, no. 3, pp. 233–255, 1925.
- [30] *Kanthal Thermostatic Bimetal Handbook*. Kanthal AB, 2008, p. 134.
- [31] W. H. Wittrick, "Stability of a bimetal disk," *Quart. Journ. Mech. Appl. Math.*, vol. 6, no. 1, pp. 15–31, 1953.
- [32] M. Batista and F. Kosel, "Thermoelastic stability of bimetallic shallow shells of revolution," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 44, pp. 447–464, 2007.
- [33] *Thermostatic bimetals*. Imphy S. A., p. 69.
- [34] T. Skotnicki, O. Puscasu, and S. Monfray, "Dispositif de conversion d'énergie thermique en énergie électrique en présence d'une source chaude," 12/54054 brevet en cours.
- [35] T. Vu-Cong, "Electrets substituting external bias voltage in dielectric elastomer generators : application to human motion," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 13, 2013.
- [36] S. Boisseau, G. Despesse, S. Monfray, O. Puscasu, and T. Skotnicki, "Semi-flexible bimetal-based thermal energy harvesters," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 8, 2013.
- [37] S. Boisseau et al., "Bimetal-and-electret-based thermal energy harvesters – Application to a battery-free Wireless Sensor Node," *soumis à Smart Mater. Struct.*, p. 12, 2013.

- [38] B. Nogarede, "Moteurs piézoélectriques," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. 33, no. 0, p. 21, 1996.
- [39] *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications*. APC International, Ltd., 2011, p. 114.
- [40] M. Brissaud, *Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration*. Presses Polytechniques Romandes, 2007, p. 448.
- [41] C. Millon, "Contribution à l'étude de procédés de réalisation de structures métal/PZT/métal sur silicium pour microsystèmes piézoélectriques," Thèse, INSA de Lyon, 2003.
- [42] "IEEE Standard on Piezoelectricity." ANSI/IEEE, p. 66, 1987.
- [43] A. Benayad, "Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique : élaboration , caractérisation et application.," Thèse, INSA de Lyon, 2005.
- [44] T. Ricart et al., "Macro energy harvester based on Aluminium Nitride thin films," in *Ultrasonics Symposium (IUS)*, 2011, pp. 1928–1931.
- [45] M. Dubois and P. Muralt et al., "Stress and piezoelectric properties of aluminium nitride thin films deposited onto metal electrodes by pulsed direct current reactive sputtering," *J. Appl. Phys.*, vol. 89, no. 11, pp. 6389–6395, 2001.
- [46] Z. Lin Wang, "Nanogenerators for self-powering nanosystems and piezotronics for smart MEMS/NEMS," in *International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, 2011, pp. 115–120.
- [47] R. Hinchet, "Scaling rules of piezoelectric nanowires in view of sensor and energy harvester integration," in *IEDM*, 2012, pp. 6.2.1–6.2.4.
- [48] M. Marzencki, "Conception de microgénérateurs intégrés pour systèmes sur puce autonomes," Thèse, Université Joseph Fourier Grenoble I, 2007.
- [49] C. Jean-Mistral, "Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystèmes autonomes communicants," Thèse, Université Joseph Fourier, 2008.
- [50] M. Defosseux, "Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes," Thèse, Université de Grenoble, 2011.
- [51] P.-J. Cottinet, "Actionnement et récupération d'énergie à l'aide de polymères électro-actifs," Thèse, INSA de Lyon, 2010.
- [52] C. B. Williams and R. B. Yates, "Analysis of a micro-electric generator for microsystems," in *Solid State Sensors and Actuators and Eurosensors IX*, 1995, pp. 369–372.
- [53] S. J. Roundy, "Energy Scavenging for Wireless Sensor Nodes with a Focus on Vibration to Electricity Conversion," University of California, Berkeley, 2003.
- [54] H. A. C. Tilmans, "Equivalent circuit representation of electromechanical transducers : I . Lumped-parameter systems," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 6, pp. 157–176, 1996.
- [55] M. Renaud, P. Fiorini, and C. Van Hoof, "Optimization of a piezoelectric unimorph for shock and impact energy harvesting," *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, pp. 1125–1135, 2007.

- [56] H. A. C. Tilmans, "Equivalent circuit representation of electromechanical transducers : II . Distributed-parameter systems," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 7, pp. 285–309, 1997.
- [57] A. Badel, "Récupération d' énergie et contrôle vibratoire par éléments piézoélectriques suivant une approche non linéaire," Thèse, INSA de Lyon/ Université de Savoie, 2005.
- [58] E. Dallago et al., "Electronic interface for piezoelectric energy scavenging system," in *Solid-State Circuits Conference*, 2008, pp. 402–405.
- [59] A. Beauger et al., "Condensateurs," *Téchniques de l'ingénieur*, vol. 33, no. 0. p. 24, 2007.
- [60] "Thinergy MEC101." Infinite Power Solutions, p. 7.
- [61] "Supercapacitor." [Online]. Available: [www. batteryuniversity.com](http://www.batteryuniversity.com). [Accessed: 01-Jun-2013].
- [62] "EFL700A39." STMicroelectronics, p. 10, 2012.
- [63] "EnerChip CBC050." Cymbet Corporation, p. 4, 2010.
- [64] "CAP-XX Supercapacitors Product Guide 2013." CAP-XX, p. 30, 2013.
- [65] "PowerStream Li-ion Coin Cell Lir2032 Data Sheet." p. 3.
- [66] F. P. et al. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 1996.
- [67] R. Matthews, "Beam formulas," 2013. [Online]. Available: www.structsource.com/analysis/types/beam.html.
- [68] "Beam design formulas with shear and moment diagrams," *American Wood Council*, 2007. [Online]. Available: www.awc.org.
- [69] "TE-CORE 6/ TE-CORE7 ThermoHarvesting Power Module." Micropelt GmbH, p. 19.
- [70] "TGP-751, TGP-651 ThermoGenerator-Package (TGP)." Micropelt GmbH, p. 15.
- [71] "MPG-D751 Thin Film Thermogenerator and Sensing Device." Micropelt GmbH, p. 6.
- [72] H. Jerman, "Electrically-activated, normally-closed diaphragm valves," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 4, pp. 210–216, 1994.
- [73] A. Jain, H. Qu, S. Todd, and H. Xie, "A thermal bimorph micromirror with large bi-directional and vertical actuation," *Sensors Actuators A*, vol. 122, pp. 9–15, 2005.
- [74] A. Arnaud, S. Boisseau, S. Monfray, O. Puscasu, G. Despesse, J. Boughaleb, Y. Sanchez, F. Battegay, M. Fourel, S. Audran, F. Boeuf, J. Delamare, G. Delepierre, G. Pitone, and T. Skotnicki, "Piezoelectric and electrostatic bimetal-based thermal energy harvesters," in *Power MEMS*, 2013.

Communications de l'auteur

Congrès:

- **O. Puscasu**, S. Monfray, G. Savelli, C. Maître, J.-P. Péméant, P. Coronel, K. Domański, P. Grabiec, P. Ancey, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, V. Bottarel, G. Ricotti, I. Bimbaud, F. Boeuf, F. Gaillard, and T. Skotnicki, “An innovative heat harvesting technology (HEATec) for above-Seebeck performance,” in *Electron Devices Meeting (IEDM), IEEE International*, 2012, pp. 12.5.1–12.5.4.
- **O. Puscasu**, S. Monfray, C. Maître, P. Ancey, P. Urard, V. Bottarel, G. Ricotti, and T. Skotnicki, “Innovative Thermal Energy harvesting: HEATec,” in *Energy Harvesting and Storage Conference*, Berlin 2012.
- **O. Puscasu**, S. Monfray, S. Boisseau, C. Maître, P. Ancey, G. Ricotti, F. Boeuf, F. Gaillard, D. Guyomar, and T. Skotnicki, “HEATec - an innovative technology for thermal energy harvesting,” in *Energy Harvesting and Storage Conference*, Washington 2012.
- **O. Puscasu**, S. Monfray, C. Maître, J.-P. Péméant, F. Boeuf, G. Savelli, F. Gaillard, D. Guyomar, and T. Skotnicki, “A disruptive technology for thermal to electrical energy conversion,” in *Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 18th International Workshop on*, 2012, pp. 1–3.
- **O. Puscasu**, S. Monfray, F. Boeuf, G. Savelli, F. Gaillard, D. Guyomar, and T. Skotnicki, “Scale laws for enhanced power for MEMS based heat energy harvesting,” in *Silicon Nanoelectronics Workshop, IEEE*, 2012, pp. 1–2.
- S. Monfray, **O. Puscasu**, G. Savelli, U. Soupremanien, E. Ollier, C. Guerin, L. Fréchette, E. Léveillé, G. Mirshekari, C. Maître, P. Coronel, K. Domanski, P. Grabiec, P. Ancey, D. Guyomar, V. Bottarel, G. Ricotti, F. Boeuf, F. Gaillard, and T. Skotnicki, “Innovative thermal energy harvesting for zero power electronics,” in *Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW)*, 2012, pp. 1–4.
- Arnaud, S. Boisseau, S. Monfray, **O. Puscasu**, G. Despesse, J. Boughaleb, Y. Sanchez, F. Battegay, M. Fourel, S. Audran, F. Boeuf, J. Delamare, G. Delepierre, G. Pitone, and T. Skotnicki, “Piezoelectric and electrostatic bimetal-based thermal energy harvesters,” in *Power MEMS*, 2013.

Articles de journaux:

- **O. Puscasu**, S. Monfray, C. Maître, 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,” *soumis à Microelectron. J.*, 2012.

- **O. Puscasu**, S. Monfray, J. Boughaleb, P.-J. Cottinet, D. Rapisarda, E. Rouvière, G. Delepierre, G. Pitone, C. Maître, F. Boeuf, D. Guyomar, and T. Skotnicki, “A flexible bimetal and piezoelectric based thermal to electrical energy converter,” *soumis à Sensors Actuators A Phys.*, 2013.
- S. Boisseau, G. Despesse, S. Monfray, **O. Puscasu**, and T. Skotnicki, “Semi-flexible bimetal-based thermal energy harvesters,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, p. 8, 2013.

Brevets:

- **O. Puscasu**, S. Monfray, T. Skotnicki, and C. Maître, “Générateur thermoelectrique presentant une lame deformable presentant une aimantation,” Ref. ST : 13-GR3-0290 .
- **O. Puscasu**, S. Monfray, and T. Skotnicki, “Contrôle de la plage thermique de fonctionnement d’un générateur thermoélectrique,” Ref. ST : 13-GR3-0312 .
- T. Skotnicki, **O. Puscasu**, and S. Monfray, “Dispositif de conversion d’énergie thermique en énergie électrique en présence d’une source chaude,” FR 29903012012.
- S. Monfray, T. Skotnicki, **O. Puscasu**, and C. Maître, “Plaque incurvée et son procédé de fabrication,” FR29889112012.
- S. Monfray, T. Skotnicki, C. Maître, and **O. Puscasu**, “Dispositif de récupération d’énergie,” FR29889122012.

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : PUSCASU

DATE de SOUTENANCE : 22 Janvier 2014

Prénoms : **Onoriu**

TITRE: **Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique**

NATURE : **Doctorat**

Numéro d'ordre : 2014-ISAL-0012

Ecole doctorale : **EEA**

Spécialité : **Energie**

RESUME :

Le présent travail est une contribution au domaine de la récupération de l'énergie. Le fait de rendre les objets autonomes du point de vue énergétique est un des grands défis pour les acteurs de l'industrie et de la science. L'autonomie énergétique implique un moindre coût à l'utilisation et aussi une maintenance réduite pour les dispositifs à alimenter. Elle peut amener un confort d'utilisation accru et une empreinte écologique réduite.

L'énergie récupérée est gratuite et peut être convertie en électricité ou autre forme utile. C'est une conversion à petite échelle, les puissances produites étant suffisantes pour alimenter des dispositifs à basse consommation. Parmi ces derniers, on compte les capteurs sans fil, qui peuvent être alimentés avec des puissances aussi faibles que 10 μ W.

Le présent travail est focalisé sur la récupération de l'énergie thermique. La technologie classique de conversion repose sur les dispositifs à effet Seebeck. Les matériaux employés sont souvent chers, rares voire dangereux pour la santé. Aussi, les dispositifs ont besoin d'un radiateur pour des performances optimales.

Dans ce contexte une technologie innovante est proposée dans le cadre du présent travail. L'objectif est de fabriquer des dispositifs fins, flexibles et bas coût pour un fonctionnement sans radiateur. Le fonctionnement repose sur une conversion de la chaleur en électricité en deux étapes : thermomécanique et mécano-électrique. La première étape est réalisée avec des bilames thermiques qui oscillent en présence d'un gradient de température et la seconde avec des éléments piézoélectriques.

Plusieurs prototypes ont été élaborés, le point de départ étant la preuve de concept sur plaque chaude, avec refroidissement par un bloc métallique avec circulation d'eau froide. Ensuite, la mise en prototype sur substrat dur a été effectuée, pour un fonctionnement avec refroidissement à l'air ambiant. L'étape suivante a été la fabrication sur substrat flexible, avec des structures matricielles de quelques millimètres d'épaisseur refroidies par convection naturelle. Le signal généré par les dispositifs est composé de pics de tension périodiques pouvant atteindre 16 V d'amplitude. La puissance électrique moyenne développée par une cellule de matrice fonctionnant à 75°C est d'environ 3.3 μ W. La puissance mécanique développée par le bilame dans ce cas est de l'ordre de 200 μ W. Les dispositifs bénéficient donc d'une marge confortable d'optimisation. Un modèle a été mis en place pour l'étape de conversion mécano-électrique et montre que le rendement théorique limite est de 100%. Un modèle thermique analytique a été développé pour calculer la différence de température gardée par un prototype dans des conditions externes imposées. Des étapes d'optimisation ont été suggérées, avec comme résultat le doublement du gradient de température conservé par rapport au concept d'origine. Ainsi un prototype amélioré est capable de prendre la moitié de la différence de température externe imposée, pour un refroidissement à l'air.

Les lois d'échelle des dispositifs ont été établies. Il a été démontré que si la taille des dispositifs est réduite d'un facteur k, la fréquence d'oscillation du bilame augmente d'un facteur k carré. En même temps, les températures de fonctionnement restent constantes. Suite à l'accélération conséquente en fréquence, la densité de puissance mécanique transportée augmente du facteur d'échelle k, tout comme la densité de puissance électrique. La miniaturisation peut donc amener des performances supérieures, ce qui a justifié le début de la fabrication sur silicium.

Les premiers cas d'usage ont été investigués, avec des tests effectués dans des conditions proposées par des potentiels intégrateurs : sur tuyau d'eau chaude et dans une installation électrique. L'utilisation des dispositifs développés pour des applications de la domotique est également à l'étude.

MOTS-CLES : récupération de l'énergie, bilame, piézoélectrique, lois d'échelle

Laboratoire (s) de recherche : **LGEF**

Directeur de thèse: **Pr. Daniel GUYOMAR**

Composition du jury:

Elie LEFEUVRE	Rapporteur
Skandar BASROUR	Rapporteur
Paul MURALT	Président
Philippe CORONEL	Examineur
Daniel GUYOMAR	Directeur de thèse
Thomas SKOTNICKI	Co-directeur
Stéphane MONFRAY	Invité
Jean-Louis COMPEAU	Invité

