



**HAL**  
open science

# Récupération d'énergie issue des variations temporelles de la température par effet pyroélectrique

Fatima Zahra El Fatnani

► **To cite this version:**

Fatima Zahra El Fatnani. Récupération d'énergie issue des variations temporelles de la température par effet pyroélectrique. Electronique. Université de Lyon; Université Hassan II (Casablanca, Maroc), 2017. Français. NNT : 2017LYSEI088 . tel-02061314

**HAL Id: tel-02061314**

**<https://theses.hal.science/tel-02061314v1>**

Submitted on 8 Mar 2019

**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.



N°d'ordre NNT : 2017LYSEI088

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON**  
opérée au sein de  
**Institut National des Sciences Appliquées de Lyon**

et délivré en partenariat international avec  
**Université Hassan II de Casablanca**

**Ecole Doctorale N° 160**  
**Électronique, Électrotechnique, Automatique**  
**Spécialité / discipline de doctorat : Génie Electrique**

Soutenue publiquement le 14/10/2017, par :

**Fatima Zahra EL FATNANI**

---

**Récupération d'énergie issue des  
variations temporelles de la  
température par effet pyroélectrique**

---

Devant le jury composé de :

---

M. BOUGHALEB Yahia	PES, Univ-Chouaib Doukkali, Maroc	Examineur
Mme. SASSI Zina	Maître de conférence /HDR, INSA-Lyon, France	Examinatrice
M. LARAQI Najib	Professeur des universités, Univ-Paris 10-LTIE, France	Examineur
Mme. DEZAIRI Aouatif	PES, Univ Hassan II de Casablanca, Maroc	Rapporteur
M. MOUHIB Taoufiq	Professeur HDR, EST, Univ Hassan I <sup>er</sup> , Maroc	Rapporteur
M. COURTOIS Christian	Professeur des universités, Univ-Valenciennes, France	Rapporteur
M. GUYOMAR Daniel	Professeur des universités, INSA-Lyon, France	Directeur de thèse
M. MAZROUI M'hammed	PES, Univ Hassan II de Casablanca, Maroc	Co Directeur de thèse

---

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

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
<b>CHIMIE</b>	<b>CHIMIE DE LYON</b> <a href="http://www.edchimie-lyon.fr">http://www.edchimie-lyon.fr</a>  Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal 3 <sup>e</sup> etage <a href="mailto:secretariat@edchimie-lyon.fr">secretariat@edchimie-lyon.fr</a> Insa : R. GOURDON	<b>M. Stéphane DANIELE</b> Institut de Recherches sur la Catalyse et l'Environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Equipe CDFA 2 avenue Albert Einstein 69626 Villeurbanne cedex <a href="mailto:directeur@edchimie-lyon.fr">directeur@edchimie-lyon.fr</a>
<b>E.E.A.</b>	<b>ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</b> <a href="http://edeea.ec-lyon.fr">http://edeea.ec-lyon.fr</a>  Sec : M.C. HAVGOUDOUKIAN <a href="mailto:Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr">Ecole-Doctorale.eea@ec-lyon.fr</a>	<b>M. Gérard SCORLETTI</b> Ecole Centrale de Lyon 36 avenue Guy de Collongue 69134 ECULLY Tél : 04.72.18 60.97 Fax : 04 78 43 37 17 <a href="mailto:Gerard.scorletti@ec-lyon.fr">Gerard.scorletti@ec-lyon.fr</a>
<b>E2M2</b>	<b>EVOLUTION, ECOSYSTEME, MICROBIOLOGIE, MODELISATION</b> <a href="http://e2m2.universite-lyon.fr">http://e2m2.universite-lyon.fr</a>  Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : H. CHARLES <a href="mailto:secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr">secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Fabrice CORDEY</b> CNRS UMR 5276 Lab. de géologie de Lyon Université Claude Bernard Lyon 1 Bât Géode 2 rue Raphaël Dubois 69622 VILLEURBANNE Cédex Tél : 06.07.53.89.13 <a href="mailto:cordey@univ-lyon1.fr">cordey@univ-lyon1.fr</a>
<b>EDISS</b>	<b>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTE</b> <a href="http://www.ediss-lyon.fr">http://www.ediss-lyon.fr</a>  Sec : Sylvie ROBERJOT Bât Atrium - UCB Lyon 1 04.72.44.83.62 Insa : M. LAGARDE <a href="mailto:secretariat.ediss@univ-lyon1.fr">secretariat.ediss@univ-lyon1.fr</a>	<b>Mme Emmanuelle CANET-SOULAS</b> 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 <a href="mailto:Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr">Emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr</a>
<b>INFOMATHS</b>	<b>INFORMATIQUE ET MATHEMATIQUES</b> <a href="http://infomaths.univ-lyon1.fr">http://infomaths.univ-lyon1.fr</a>  Sec : Renée EL MELHEM Bat Blaise Pascal, 3 <sup>e</sup> étage Tél : 04.72. 43. 80. 46 Fax : 04.72.43.16.87 <a href="mailto:infomaths@univ-lyon1.fr">infomaths@univ-lyon1.fr</a>	<b>M. Luca ZAMBONI</b>  Bâtiment Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 VILLEURBANNE Cedex Tél :04 26 23 45 52 <a href="mailto:zamboni@maths.univ-lyon1.fr">zamboni@maths.univ-lyon1.fr</a>
<b>Matériaux</b>	<b>MATERIAUX DE LYON</b> <a href="http://ed34.universite-lyon.fr">http://ed34.universite-lyon.fr</a>  Sec : Marion COMBE Tél:04-72-43-71-70 –Fax : 87.12 Bat. Direction <a href="mailto:ed.materiaux@insa-lyon.fr">ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Jean-Yves BUFFIERE</b> INSA de Lyon MATEIS Bâtiment Saint Exupéry 7 avenue Jean Capelle 69621 VILLEURBANNE Cedex Tél : 04.72.43 71.70 Fax 04 72 43 85 28 <a href="mailto:Ed.materiaux@insa-lyon.fr">Ed.materiaux@insa-lyon.fr</a>
<b>MEGA</b>	<b>MECANIQUE,ENERGETIQUE,GENIE CIVIL,ACOUSTIQUE</b> <a href="http://mega.universite-lyon.fr">http://mega.universite-lyon.fr</a>  Sec : Marion COMBE Tél:04-72-43-71-70 –Fax : 87.12 Bat. Direction <a href="mailto:mega@insa-lyon.fr">mega@insa-lyon.fr</a>	<b>M. Philippe BOISSE</b> 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 <a href="mailto:Philippe.boisse@insa-lyon.fr">Philippe.boisse@insa-lyon.fr</a>
<b>ScSo</b>	<b>ScSo*</b> <a href="http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/">http://recherche.univ-lyon2.fr/scso/</a> Sec : Viviane POLSINELLI Brigitte DUBOIS Insa : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04 78 69 72 76 <a href="mailto:viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr">viviane.polsinelli@univ-lyon2.fr</a>	<b>M. Christian MONTES</b> Université Lyon 2 86 rue Pasteur 69365 LYON Cedex 07 <a href="mailto:Christian.montes@univ-lyon2.fr">Christian.montes@univ-lyon2.fr</a>

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

# REMERCIEMENTS

**F**AIRE une thèse de doctorat, signifie être prêt de vivre une expérience professionnelle et personnelle uniques dans la vie, le doctorant subit alors tout un mélange de sentiments : fierté, stress, autonomie, fatigue... Durant la thèse, le doctorant réussi aussi de développer ses connaissances et ses compétences, d'ancrer son travail de recherche dans celui de la recherche scientifique internationale et d'enrichir sa démarche par une ouverture à l'interdisciplinarité.

Les travaux de recherche présentés dans ce manuscrit de thèse ont été effectués au Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité (LGEF) de l'institut National des Sciences Appliquée de Lyon, France, dont le Directeur est **Mr Laurent LEBRUN** et Laboratoire Physique de la Matière Condensée (LPMC) de l'Université Hassan II de Casablanca, Maroc, dont la directrice est **Mme Aouatif DEZAIRI**. Je leur présente mes premiers et sincères remerciements de m'avoir accueilli dans leurs laboratoires respectifs. Je leur saurais gré de la confiance qu'ils m'ont témoignée et de l'opportunité qu'ils m'ont donnée pour développer ces travaux de recherche en mettant à ma disposition tous les équipements et outils nécessaires dans le but de mener à bien ce projet de thèse.

Mes encadrants **Mr Daniel GUYOMAR** et **Mr M'hammed MAZROUI**, constituent vraiment une équipe de recherche de haute qualité non seulement sur le plan scientifique mais surtout sur le plan humain Il s'agissait donc d'une équipe qui réunit des différentes disciplines permettant d'élargir le champ des idées. J'avais l'honneur d'être sous leurs encadrements, je cède alors un grand et profond remerciement à ces deux personnes qui m'ont fait confiance et qu'ils étaient sûr que je suis apte de bien développer ce sujet de thèse. Ils m'ont accordé tous le temps nécessaire pour des échanges, des discussions, des explications et aussi des propositions dans le sens de pousser vers l'avant ce sujet de thèse. J'espère de tout mon cœur que j'ai pu être à la hauteur de leurs attentes. Je remercie chaleureusement **Mr Fouad BELHORA**, une personne exceptionnelle tant sur le plan humain que scientifique qui a initié avec moi les travaux de recherche de cette thèse. Je suis extrêmement reconnaissante du temps sans limite consacré à échanger.

Ces travaux de recherches ont connu des précieuses aides de la part des membres de laboratoire LGEF, je dirai que ce n'était pas possible d'avancer dans quelques manipulations sans leur colla-

laboration. En particulier je parle sur **Mesdames Laurence SEVEYRAT** et **Véronique PERRIN** dont je présente tous mes remerciements pour leur gentillesse tout d'abord, leur disponibilité, leur aide pour la réalisation des mesures et pour l'élaboration des nanofluides. Je n'oublierai pas de remercier **Mr Frédéric DEFROMERIE** pour son amitié, son humour permanent ainsi que son aide pour la réalisation des bancs de test. **Mr Amine BOUSSADI** mérite un remerciement spécial pour son aide précieuse, son amitié, sa disponibilité en cas de besoin et sa contribution dans les manipulations de la caméra thermique.

Un remerciement est tenu à **Mme Evelyne DORIEUX**, la gestionnaire du laboratoire LGEF pour sa gentillesse, sa disponibilité, ses propositions, et aussi son efficacité dans la gestion des tâches administratives.

Je voudrais exprimer ma plus profonde gratitude et mon plus grand amour à mes parents, sans leur compréhension considérable, leur immense soutien et sacrifice, je ne pourrais jamais achever mes études et atteindre des moments de joie. Cette thèse leur est dédiée.

Merci aux financeurs de ces travaux de recherche : Programme Avenir Saint-Étienne (PALSE) 2015 et Ministère Marocain de l'Education et l'Enseignement Supérieur.

Une pensée émue pour les collègues, doctorants et étudiants des deux laboratoires LGEF et LPMC avec qui j'ai vécu une ambiance assez exceptionnelle et j'ai partagé des instants conviviaux qui ont permis la réalisation de mes travaux de recherche dans des meilleures conditions.

# RÉSUMÉ

*Titre.* Récupération de l'énergie issue des variations temporelles de la température par effet pyroélectrique

*Résumé.* Cette thèse, de nature expérimentale, rentre dans le cadre de la récupération d'énergie pour les micro-générateurs et l'autonomie des dispositifs électroniques à faible consommation. Ce travail propose les possibilités de récupérer de l'énergie thermique par effet pyroélectrique. L'énergie thermique à convertir est une variation temporelle de température. Nous avons proposé deux principales techniques pour produire de l'énergie électrique via une céramique pyroélectrique de type PZT. La première est centrée sur la récupération des radiations infrarouges associé à la technique SSHI. Originellement, la technique SSHI a été développée dans le cas de la récupération d'énergie piézoélectrique, mais nous l'avons appliqué dans le cas de la pyroélectricité et qui nous a permis de maximiser la puissance récupérée d'un facteur de 2. La seconde technique proposée concerne la récupération des fluctuations thermiques provenant des mouvements convectifs naissant à l'intérieur d'un fluide dans la configuration de Rayleigh-Bénard. Nous avons mené plusieurs études pour augmenter le transfert convectif dans le but d'améliorer la réponse pyroélectrique et donc maximiser la puissance récupérée. Dans le cas des convections naturelles, le choix de fluide adéquat et l'optimisation des paramètres de contrôle de la configuration Rayleigh-Bénard constituent des étapes primordiales pour aboutir à un meilleur transfert thermique par convection. Dans le cas des convections forcée, il a été étudié l'intérêt de disperser des particules de Cuivre de taille nanométrique dans un fluide porteur pour augmenter plus davantage le transfert convectif. Avec ce nanofluide, la réponse pyroélectrique a été maximisée d'un facteur de 10.

*Mots-clés.* Récupération d'énergie, énergie thermique, effet pyroélectrique, radiation infrarouge, technique SSHI, convections, nanofluide.

# ABSTRACT

*Title.* Harvesting energy from temporal variations of temperature by pyroelectric effect

*Abstract.* This experimental thesis focuses on the energy harvesting for micro-generators and autonomy of electronic devices with low consumption. This work proposes the possibilities of harvesting thermal energy by pyroelectric effect. The thermal energy to be converted is thermal fluctuations. We proposed two main techniques to generate electricity by pyroelectric ceramic. The first one focuses on the harvesting of infrared radiation associated with the SSHI technique. Originally, the SSHI technique was developed in the case of the piezoelectric energy harvesting, but we applied it in the case of pyroelectricity and which allowed us to maximize the harvested power by a factor of 2. The second proposed technique concerns the harvesting of thermal fluctuations resulting from convective movements originating inside a fluid in the Rayleigh-Bernard configuration. We have carried out several studies to increase the convective transfer in order to improve the pyroelectric response and maximize the harvested power. In the case of natural convection, the choice of a suitable fluid and the optimization of the control parameters of the Rayleigh-Bernard configuration are essential steps in order to achieve better heat transfer by convection. In the case of forced convection, it has been studied the advantage of dispersing copper nanoparticles in a pure fluid to increase the convective transfer. With this nanofluid, the pyroelectric response was maximized by a factor of 10.

*Keywords.* Energy harvesting, thermal energy, pyroelectric effect, infrared radiation, SSHI technique, convections, nanofluid.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vi
<b>TABLE DES MATIÈRES</b>	vii
<b>LISTE DES FIGURES</b>	x
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	1
<b>I GENERALITES SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE, SOURCES, CAS D'USAGE ET METHODES</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	7
<b>1.1 CONCEPT DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE</b> . . . . .	7
<b>1.2 LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES AMBIANTES</b> . . . . .	9
<b>1.2.1 Energie mécanique</b> . . . . .	9
<b>1.2.1.1 Vibration mécanique</b> . . . . .	9
<b>1.2.1.2 Mouvement du corps humain</b> . . . . .	10
<b>1.2.2 Energie électromagnétique</b> . . . . .	10
<b>1.2.2.1 Rayonnements lumineux (solaires)</b> . . . . .	11
<b>1.2.2.2 Rayonnements hyperfréquences</b> . . . . .	12
<b>1.2.3 Energie thermique</b> . . . . .	12
<b>1.3 TECHNIQUES DE CONVERSION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES AMBIANTES EN ÉLECTRICITÉ ET LEURS APPLICATIONS</b> . . . . .	13
<b>1.3.1 Systèmes de conversion électromécanique</b> . . . . .	13
<b>1.3.1.1 Conversion piézoélectrique</b> . . . . .	13
<b>1.3.1.2 Conversion électrostrictive</b> . . . . .	17
<b>1.3.1.3 Conversion électrostatique</b> . . . . .	21

1.3.2	Systèmes de conversion photovoltaïque	22
1.3.3	Système de conversion thermique-électrique	24
1.3.3.1	Conversion thermoélectrique	24
1.3.3.2	Conversion pyroélectrique	27
CONCLUSION		28
<b>2</b>	<b>PRINCIPE DE LA RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE, ET CARACTERISATION DES</b>	
	<b>PHÉNOMÈNES PYROELECTRIQUE ET TRANSFERT THERMIQUE</b>	<b>30</b>
INTRODUCTION		32
2.1	EFFET PYROÉLECTRIQUE	33
2.1.1	Historique	34
2.1.2	Principe	35
2.1.3	Modélisation de l'effet pyroélectrique	36
2.1.4	Récupération de l'énergie par effet pyroélectrique	38
2.1.4.1	Concept globale de la récupération de l'énergie par effet pyro- électrique	38
2.1.4.2	Evolution de la récupération de l'énergie par effet pyroélectrique	39
2.2	GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES	42
2.2.1	Notion élémentaires	42
2.2.1.1	Champs de température	42
2.2.1.2	Surface isothermes	43
2.2.1.3	Flux thermique et densité de flux thermique	43
2.2.2	Les différents types de transfert thermique	43
2.2.2.1	Transfert conductif	43
2.2.2.2	Transfert radiatif	44
2.2.2.3	Transfert convectif	46
CONCLUSION		50
<b>3</b>	<b>RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES RADIATIONS INFRAROUGES</b>	<b>51</b>
INTRODUCTION		52
3.1	RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES RAYONNEMENTS INFRAROUGES	53
3.1.1	Choix du matériau pyroélectrique : Céramique PZT	53
3.1.2	Structure Cristalline de Céramique PZT	55
3.1.3	Caractéristiques de céramique PZT utilisée.	55

TABLE DES MATIÈRES	7
3.1.4 Mesure du coefficient pyroélectrique	57
3.1.5 Modélisation de l'effet pyroélectrique par schéma équivalent	59
3.1.6 Etude expérimentale	61
3.1.6.1 Dispositif expérimentale et techniques de mesures	61
3.1.6.2 Validation de la méthode utilisée	63
3.1.6.3 Résultats & discussions	65
3.2 OPTIMISATION ET AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR RAYON- NEMENT INFRAROUGE	70
3.2.1 Effet de la surface de matériau pyroélectrique sur la puissance récupérée	71
3.2.2 Résultats & discussion	72
CONCLUSION	75
<b>4 RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR UN ÉLÉMENT PYROÉLECTRIQUE EXCITÉ PAR CONVECTION</b>	<b>77</b>
INTRODUCTION	79
4.1 RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE ISSUE DES CONVECTIONS RAYLEIGH-BÉNARD	80
4.1.1 Principe de l'étude	80
4.1.2 Dispositif expérimental et technique de mesure	82
4.1.3 Résultats et discussion	83
4.2 OPTIMISATION ET AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE	87
4.2.1 Influence de la nature du fluide en convection sur la réponse pyroélectrique	87
4.2.1.1 Nature des fluides utilisés	87
4.2.1.2 Résultats et discussions	89
4.2.2 Effet de géométrie de système de convection sur la réponse pyroélectrique	95
4.2.2.1 Effet du volume en variant la hauteur du système convectif	96
4.2.2.2 Effet de la distance entre la surface libre d'huile et la céramique pyroélectrique (niveau d'huile)	99
4.2.3 Application visée : capteur de niveau d'huile autonome en termes d'énergie	104
4.2.3.1 Concept général du capteur proposé	106
4.2.3.2 Principe de fonctionnement du capteur proposé	107
CONCLUSION	108
<b>5 AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR NANOFLUIDE EN CONVECTION</b>	<b>110</b>

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	111
<b>5.1 LES NANOFUIDES ET LEUR RAPPORT AVEC L'AUGMENTATION DU TRANSFERT CONVECTIF</b> . . . . .	111
<b>5.2 CHOIX DES NANOPARTICULES/FLUIDE DE BASE ET MÉTHODE DE PRÉPARATION</b> . . . . .	113
<b>5.3 PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES NANOFUIDES</b> . . . . .	114
<b>5.3.1 Conductivité thermique</b> . . . . .	114
<b>5.3.2 Viscosité dynamique</b> . . . . .	115
<b>5.3.3 Capacité calorifique</b> . . . . .	116
<b>5.3.4 Masse volumique</b> . . . . .	116
<b>5.4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE</b> . . . . .	117
<b>5.4.1 Préparation d'un nanofluide à base de nanoparticules de cuivre et l'huile de colza</b> . . . . .	117
<b>5.4.2 Propriétés thermophysiques du nanofluide préparé</b> . . . . .	118
<b>5.4.3 Résultats et discussions</b> . . . . .	119
<b>CONCLUSION</b> . . . . .	123
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</b>	<b>124</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>126</b>
<b>PRODUCTION SCIENTIFIQUE</b>	<b>133</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>1.1 Comparaison de la puissance des vibrations, du solaire et des diverses batteries chimiques [2].</b> . . . . .	8
<b>1.2 Étendue du spectre électromagnétique [3].</b> . . . . .	11
<b>1.3 Évolution du champ électrique généré par une antenne WiFi en fonction de la distance [4].</b> . . . . .	12
<b>1.4 Principe de fonctionnement d'un cristal piézoélectrique .</b> . . . .	14
<b>1.5 Chaussures piézoélectriques utilisant soit du PVDF stratifiés placés sous la plante du pied ou un bimorphe de céramique piézoélectrique PZT placé sous le talon [5].</b>	16
<b>1.6 Genouillère récupérant l'énergie de la marche [6].</b> . . . . .	16

1.7 (a) un modèle de structure vibrante comprenant un élément piézoélectrique (b) un dispositif de récupération d'énergie SSHI en fonctionnement permanent. . . . .	17
1.8 Cycle à réaliser avec un matériau électrostrictif pour la récupération d'énergie [7].	18
1.9 Dispositif expérimentale de conversion électrostrictif [8] . . . . .	19
1.10 Le courant induit par les polymères pur et les polymères composites en fonction de la fréquence pour un champ électrique $E = 30 kV$ et une contrainte $S = 2,5 \%$ . [8]. . . . .	20
1.11 Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge à $4 Hz$ avec $S = 0,5 \%$ . [8]. . . . .	20
1.12 Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique [9]. . . . .	21
1.13 Chaussures avec générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur [10]. . . . .	22
1.14 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. . . . .	23
1.15 Système Everlast [11] : (a) Photo du système Everlast (b) Structure du système Everlast. . . . .	24
1.16 Illustration de l'effet Seebeck. . . . .	25
1.17 Illustration de l'effet Peltier. . . . .	25
1.18 Facteur de mérite de quelques matériaux thermoélectriques [49]. . . . .	26
1.19 Prototype d'un générateur thermoélectrique [12]. . . . .	27
1.20 Le principe de fonctionnement d'un matériau pyroélectrique. . . . .	28
1.21 Schéma du circuit d'essai de conversion d'énergie pyroélectrique (SSHI) utilisé par Guyomar et al. [13]. . . . .	28
2.1 Couplage liant les propriétés thermique, électrique et mécaniques [14]. . . . .	32
2.2 Hiérarchisation des classes cristallines. . . . .	33
2.3 Expériences menées en 1762, Fig. 3 : pierre de tourmaline chauffés sur un métal, Fig. 4 : poussières repoussées par la pierre, Fig.6 : Poussières attirées par la pierre [14]. . . . .	34
2.4 cristal élémentaire de $BaTiO_3$ . (a) température constante et (b)variations de température. . . . .	35
2.5 Principe de l'effet pyroélectrique [15]. . . . .	36
2.6 Effet pyroélectrique primaire et secondaire [15]. . . . .	37
2.7 Densité d'énergie produite par différents films copolymères [67]. . . . .	40
2.8 Puissance récupérée en fonction de la résistance optimale [68]. . . . .	40

2.9 Puissance de sortie par effet pyroélectrique et thermoélectrique, $T = 20^{\circ}\text{C}$ [69].	41
2.10 Ondes électromagnétiques [16].	45
2.11 Convection thermohaline dans les océans [17].	47
2.12 Schéma d'une cellule de convection de Rayleigh-Bénard.	48
3.1 Maille pérovskite cubique du céramique <i>PZT</i> .	55
3.2 Présentation de la céramique pyroélectrique.	56
3.3 Courant généré par notre échantillon pour différentes températures : (a) $40^{\circ}\text{C}$ , (b) $60^{\circ}\text{C}$ et (c) $80^{\circ}\text{C}$	58
3.4 Schémas équivalent d'un matériau pyroélectrique.	59
3.5 Illustration schématique du banc expérimental pour la récupération d'énergie thermique via une céramique pyroélectrique.	63
3.6 Evolution de la tension électrique en fonction de temps, dans deux cas : présence et d'absence de switch.	64
3.7 Évolution temporelle de la tension pyroélectrique aux bornes de la céramique pyroélectrique <i>PZT</i> pour différents distances : (a) $d = 15\text{cm}$ , $20\text{cm}$ , (b) $d = 10\text{cm}$ , $5\text{cm}$ et (c) $d = 2\text{cm}$ , $1\text{cm}$	67
3.8 Puissance récupérée en fonction de la résistance optimale pour trois distances choisies.	69
3.9 Evolution de la puissance récupérée en fonction de la distance.	70
3.10 Montage en parallèle des céramique <i>PZT</i> de même type.	72
3.11 Evolution temporelle du courant pyroélectrique en fonction de la surface $A$ de la céramique <i>PZT</i> .	73
3.12 Courant induit en fonction de la surface de l'élément pyroélectrique.	74
3.13 Puissance récupérée en fonction de la charge électrique pour différentes valeurs de surface : $A$ , $2A$ et $4A$ .	75
4.1 Configuration Rayleigh-Bénard : Un fluide chauffé par le bas et refroidi par le haut. L'élément pyroélectrique est placé sur le fluide en convection.	80
4.2 Images thermiques : champ de température au sein de fluide et en surface de la céramique pyroélectrique. La température aux centre des croix vaut : (a) $129^{\circ}\text{C}$ (b) $137^{\circ}\text{C}$ (c) $140^{\circ}\text{C}$ (d) $136^{\circ}\text{C}$ (e) $57^{\circ}\text{C}$ (f) $61^{\circ}\text{C}$ .	81
4.3 Schéma général simplifié du dispositif expérimental pour la conversion pyroélectrique de l'énergie basée sur les convections Rayleigh-Bénard dans un bain d'huile.	82

4.4 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique soumis à une fluctuation thermique provenant d'huile de colza en convection chauffée à 250° . . . . .	84
4.5 Evolution temporelle du courant induit par la céramique pyroélectrique dans la configuration de Rayleigh-Bénard . . . . .	85
4.6 Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge . . . . .	86
4.7 Viscosimètre <i>Brookfield</i> conçu pour la mesure des viscosités des fluides utilisés . . . . .	89
4.8 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'huile de silicone chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C. . . . .	91
4.9 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain de glycérol chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C. . . . .	92
4.10 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'eau chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C. . . . .	93
4.11 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'huile de colza chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C. . . . .	94
4.12 Tension pyroélectrique obtenue pour chaque fluide utilisé en fonction de la température de chauffage. . . . .	95
4.13 Illustration schématique simplifié du dispositif expérimental pour étudier l'influence de $h_1$ et $h_2$ . . . . .	96
4.14 Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique PZT en tenant compte de trois valeur de " $h_1$ " : (a) $h_1 = 3\text{ cm}$ , (b) $h_1 = 2\text{ cm}$ , (c) $h_1 = 1\text{ cm}$ . . . . .	98
4.15 Puissance récupérée pour différent valeur de " $h_1$ " en fonction de la résistance de charge $R$ . . . . .	99
4.16 Tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en fonction de temps pour différent valeur de $h_2$ : (a) $h_2 = 2\text{ cm}$ , (b) $h_2 = 1\text{ cm}$ , (c) $h_2 = 0.5\text{ cm}$ , (d) $h_2 = 0\text{ cm}$ . . . . .	101
4.17 Tension électrique en sortie de la céramique en fonction de " $h_2$ " . . . . .	102
4.18 Evolution du courant induit par la céramique pyroélectrique en fonction de temps pour différentes valeurs de " $h_2$ " : (a) $h_2 = 1\text{ cm}$ , (b) $h_2 = 0.5\text{ cm}$ , (c) $h_2 = 0\text{ cm}$ . . . . .	103

4.19 Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge $R$ pour quatre niveau d'huile	104
4.20 Principe d'un capteur intelligent	105
4.21 Application visée : (a) Concept général du capteur, (b) Position du capteur	107
4.22 Circuit électrique du capteur proposé	108
5.1 Procédure de préparation du nanofluide : (a) fluide de base : huile de colza, (b) Nanoparticule de cuivre, (c) hotte à flux laminaire, (d) bain ultrason (e) Aspect du nanofluide Cu/huile colza	118
5.2 Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza sans ajout de nanoparticule de cuivre	120
5.3 Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 0,5%vol de Cu	120
5.4 Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 1%vol de Cu	121
5.5 Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 1,5%vol de Cu	121
5.6 Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 2%vol de Cu	122

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

**G**RÂCE au développement dans le domaine de l'électronique, certains dispositifs électroniques tels que les capteurs portables, les dispositifs de surveillance dans les bâtiments, les GPS (global positioning system) ... ont connu une forte demande. En raison que ces dispositifs sont portables, ils nécessitaient la transportation de leurs propres systèmes d'alimentation. Dans la plupart des applications précitées, le système d'alimentation est toujours encombrant à cause des câbles de connexions électriques qui occupent également de l'espace. Afin de surmonter ce problème, la solution classique était l'usage des batteries électrochimiques, cette solution apparaissait meilleure et elle a connu des progrès notables au cours de ces dernières années mais, elle reste très limitée et présente plusieurs inconvénients, à titre d'exemple la durée de vie de telles batteries est vraiment limitée. Un remplacement ou un rechargement régulier de ces dernières est nécessaire, ce qui peut se révéler à la fois coûteux et contraignant. En plus, certains systèmes ne tolèrent pas les produits chimiques présentant dans les batteries, même normalement elles sont encapsulées, il y a toujours un risque potentiel de causer des problèmes graves lorsque les piles usées ne sont pas remplacées ou rechargées au bon moment.

Des progrès dans le but de développer des systèmes perpétuellement alimentés, ont conduit à une solution optimale pour limiter l'usage des batteries et assurer l'autonomie énergétique de ces systèmes. C'est à ce niveau qu'intervient la récupération d'énergie, c'est une technique qui consiste à convertir l'énergie ambiante disponible dans l'environnement en une énergie électrique qui sera fourni aux systèmes électroniques.

Il existe diverses sources d'énergie disponibles pour être récupérées et converties en électricité et, en effet, beaucoup travaux ont été présentés sur les générateurs capables de générer de l'énergie électrique à partir des vibrations mécaniques, de la lumière, des gradients thermiques, de l'énergie solaire, de la RF ambiante ... etc. L'existence de ces sources pourrait permettre aux dispositifs électroniques de fonctionner indéfiniment.

Une source d'énergie - l'énergie thermique - est rarement récupérée bien qu'elle est disponible partout. Dans la vie quotidienne, de grandes quantités de chaleur perdue sont libérées des cycles de pompe à chaleur, de réfrigération. . . Au lieu qu'elles soient perdues, vaut mieux les récupérer dans

le but de produire gratuitement l'énergie électrique. Les déperditions en énergie thermique étant très importantes de façon générale, la récupération sur ce type d'énergie est donc relativement facile et permet d'obtenir des niveaux de puissance récupérée de l'ordre de la dizaine de mW, ce qui place cette technique parmi les meilleures pour convertir efficacement l'énergie thermique en énergie électrique avec un niveau supérieur à celui obtenu traditionnellement à partir de l'énergie d'une source vibratoire.

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous travaillons sur une approche prometteuse : la récupération d'énergie thermique à partir de la variation de température créée par des convections en utilisant l'effet pyroélectrique, c'est-à-dire que nos travaux de recherches visent à se servir des sources d'énergies thermiques pour produire de l'énergie électrique en utilisant des matériaux pyroélectriques. Nous pouvons définir la pyroélectricité comme la propriété de voir, sous l'action d'une variation de température, se modifier la polarisation électrique. L'originalité de cette proposition de recherche réside dans le fait que nous utilisons les convections dans un fluide pour augmenter de façon sensible l'énergie récupérée. Nous avons réussi de créer des fluctuations de température tout en gardant une température fixe, l'idée est très innovante, originale et se réalise à faible coût, ainsi que les variations de température existent dans les environnements industriels ce qui justifie l'importance de ce travail.

L'objectif et la motivation de ces travaux est de développer une nouvelle technique de récupération d'énergie qui peut être particulièrement adaptée à satisfaire les demandes énergétiques des applications à faible consommation. Nous espérons que les résultats obtenus dans ce travail pourraient favoriser le développement de la récupération d'énergie thermique.

Ce manuscrit comporte cinq chapitres qui permettent de : présenter les éléments bibliographiques sur les différentes sources d'énergie ambiantes possibles à récupérer et disponibles dans l'environnement, montrer l'importance de l'énergie thermique comme étant la source la plus prometteuse permettant un niveau d'énergie récupéré assez élevé, et décrire les différentes techniques de récupération d'énergie thermique que nous avons développées dans ce travail ainsi que les résultats obtenus. Ces chapitres sont organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique est menée pour définir le concept et l'intérêt de la récupération d'énergie pour l'alimentation des dispositifs électroniques ainsi de présenter les différentes sources d'énergies ambiantes disponibles dans l'environnement également les techniques de conversion d'énergie développées et leurs applications. Nous allons montrer à travers ce chapitre que les sources d'énergies ambiantes telle que les vibrations, la lumière ont été largement et suffisamment développée alors que l'énergie thermique a été peu exploitée sachant que cette source est disponible partout et elle permet un niveau d'énergie comparable ou même supérieur

à celui qui est obtenu par les autres sources ambiantes. Cela prouve en quelque sorte notre choix pour ce type d'énergie.

Nous consacrons le second chapitre pour une étude approfondie sur les matériaux pyroélectriques qui font notre choix dans ces travaux de recherche, pour la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique. Nous présentons également les différents types de transfert thermique et leurs disponibilités dans l'environnement afin d'introduire nos techniques développées au cours de cette thèse. Deux techniques de récupération d'énergie ont été développées : en utilisant le transfert thermique par radiation infrarouge en suite par convection Rayleigh-Bénard. Le principe de ces deux techniques et les résultats obtenus là-dessus seront présentés dans les chapitres qui suivent.

Le troisième chapitre propose une première étude expérimentale qui traite la récupération des rayonnements infrarouges via une céramique de type PZT, dans le but de les convertir en électricité. Pour une plus grande puissance des radiations infrarouges absorbée, la réponse pyroélectrique sera plus importante, c'est dans ce contexte que, nous allons étudier l'influence de la distance séparant l'échantillon pyroélectrique de la source des rayonnements sur la tension électrique et sur la puissance récupérée. Ce chapitre sera divisé en deux parties, la première présente une description du matériau choisi qui est une céramique commercialisée de type PZT ainsi que le banc expérimental dédié à la récupération d'énergie à partir des radiations infrarouges. La seconde partie sera consacrée à la présentation de deux propositions pour améliorer la puissance récupérée : l'une consiste à connecter le matériau pyroélectrique à un dispositif de commutation autoalimenté pour mettre en oeuvre la technique SSHI et l'autre consiste à augmenter la surface du matériau pyroélectrique pour augmenter de façon significative la puissance récupérée.

Nous présentons dans le quatrième chapitre, une étude expérimentale originale qui consiste à récupérer, par une céramique pyroélectrique, des fluctuations thermiques créées naturellement dans un bain de fluide. Nous allons décrire à travers ce chapitre le principe de notre étude basée sur des convections Rayleigh-Bénard au sein d'un fluide tout en exposant des résultats expérimentaux validant la technique proposée. Ce chapitre présente également des différentes études dans le but de savoir comment évolue l'efficacité du transfert convectif en fonction des paramètres de contrôle : facteur d'aspect (géométrie du système), nombre de Prandtl (nature du fluide), nombre de Rayleigh (variation de la température), pour pouvoir améliorer la réponse pyroélectrique et donc maximiser la puissance récupérée.

Nous allons étudier dans le dernier chapitre de ce manuscrit, l'intérêt de disperser des nanoparticules dans un fluide pur pour intensifier le transfert de chaleur par convection dans la configuration Rayleigh-Bénard et par conséquent, améliorer la réponse pyroélectrique et donc la conversion

de l'énergie. Nous allons présenter une brève description sur des compositions de nanofluides couramment utilisés et leurs méthodes de préparation. Ensuite, nous décrirons la méthode de préparation d'un nanofluide à base des nanoparticules de cuivre et huile de colza. Une discussion concernant les propriétés thermophysiques du nanofluide utilisé sera menée et finalement, nous conclurons le chapitre par une discussion sur les résultats expérimentaux liés à la conversion pyroélectrique des variations thermiques créées par convection dans le nanofluide proposé.

# GENERALITES SUR LA RECUPERATION D'ENERGIE, SOURCES, CAS D'USAGE ET METHODES

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	7
<b>1.1 CONCEPT DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE</b> . . . . .	7
<b>1.2 LES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES AMBIANTES</b> . . . . .	9
<b>1.2.1 Energie mécanique</b> . . . . .	9
<b>1.2.1.1 Vibration mécanique</b> . . . . .	9
<b>1.2.1.2 Mouvement du corps humain</b> . . . . .	10
<b>1.2.2 Energie électromagnétique</b> . . . . .	10
<b>1.2.2.1 Rayonnements lumineux (solaires)</b> . . . . .	11
<b>1.2.2.2 Rayonnements hyperfréquences</b> . . . . .	12
<b>1.2.3 Energie thermique</b> . . . . .	12
<b>1.3 TECHNIQUES DE CONVERSION DES RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES AMBIANTES EN ÉLECTRICITÉ ET LEURS APPLICATIONS</b> . . . . .	13
<b>1.3.1 Systèmes de conversion électromécanique</b> . . . . .	13
<b>1.3.1.1 Conversion piézoélectrique</b> . . . . .	13
<b>1.3.1.2 Conversion électrostrictive</b> . . . . .	17
<b>1.3.1.3 Conversion électrostatique</b> . . . . .	21

---

1.3.2	Systèmes de conversion photovoltaïque	22
1.3.3	Système de conversion thermique-électrique	24
1.3.3.1	Conversion thermoélectrique	24
1.3.3.2	Conversion pyroélectrique	27
CONCLUSION		28

## Introduction

**A**u cours des années, de nombreux domaines d'application ont été intéressés par les systèmes autonomes en termes d'énergie. L'autonomie des dispositifs électronique correspond bien à la tendance actuelle en termes de développement durable ainsi qu'en termes de technologie nomade. Le problème posé par ces systèmes est de savoir comment fournir la puissance requise pour leur alimentation. Les progrès de l'électronique ont conduit à l'usage des batteries qui ont permis d'avoir des systèmes autonomes et portables en même temps. La recherche n'a pas cessé de développer des piles à haute densité d'énergie rien que pour augmenter la durée de vie des systèmes qui présente un facteur primordial. De plus, les batteries qui meurent sans avertissement posent de sérieux problèmes dans les applications de surveillance de la sécurité à titre d'exemple. Sans oublier l'impact du rejet des piles usagées. Pour résoudre tous ces problèmes, la production d'énergie durable peut être obtenue en convertissant l'énergie ambiante en énergie électrique.

La récupération d'énergie vise à se servir de l'énergie ambiante pour alimenter les systèmes électriques et stocker éventuellement l'énergie quand elle n'est pas nécessaire. Plusieurs sources d'énergie ambiante sont en profit afin d'être récupérées et converties en électricité citant l'énergie thermique [18, 19, 20], l'énergie lumineuse [21, 22], l'énergie mécanique [23, 24] et l'énergie magnétique [25, 26].

Ce chapitre présente donc une vaste enquête sur les sources d'énergie ambiante qu'on peut profiter afin de rendre un système autonome en termes d'énergie. En outre, il fournit une étude bibliographique et une comparaison des différentes technologies de récupération d'énergie qui existent.

### 1.1. Concept de la récupération d'énergie

La récupération d'énergie, peut être définie comme la conversion des énergies ambiantes telles que les vibrations mécaniques, l'énergie thermique, les rayonnements solaires, l'énergie ... etc. en énergie électrique utilisable en se servant des matériaux appelés intelligents ou des structures de conversion d'énergie. En d'autres termes, le concept général de la récupération d'énergie est de convertir l'énergie de l'environnement qui est sous une forme inutilisable ou gaspillée en une forme plus utile. Souvent, la forme d'énergie la plus utile dans les applications modernes est l'énergie électrique, qui après conversion, elle peut être stockée ou utilisée pour alimenter des dispositifs électriques.

Les sources d'énergie gaspillées ou inutilisables existent sous différentes formes telles que l'activité humaine, dans les véhicules, dans les machines industrielles et d'autres sources d'énergie

environnantes peuvent être divisées en vibrations, en énergie solaire, en radiofréquence, en sources d'air, en variations de pression, en particules radioactives, en gradient de température ... Plusieurs approches ont été explorées au cours des dernières décennies pour récupérer l'énergie de l'environnement afin d'alimenter des réseaux de capteurs sans fil. Ces réseaux de capteurs sont utilisés pour améliorer le confort et la santé des bâtiments intelligents. L'énergie requise par un capteur sans fil est de l'ordre de centaines de micro watts.

Corps Humain	Structures	Industrie	Environnement	Véhicules
Respiration, tension artérielle, chaleur corporelle, natation, mouvement des doigts, mouvement du bras, marche.	Tunnels, Nettoyeurs, système HVAC, canalisation	Moteurs, compresseurs, pompes, Convoyeurs	Soleil, gradient de température, température quotidienne, courant océanique, signal RF,	Hélicoptères, voitures, trains, avions, turbines, freins

Tableau 1.1: Sources d'énergie disponibles dans l'environnement [27].

Les sources d'énergies ambiantes les plus étudiées, développées et utilisées pour produire de l'énergie électrique sont l'énergie solaire et les vibrations mécaniques. L'importance de ces deux énergies réside sur le fait qu'elles sont inépuisables et renouvelables. Nous présentons dans la figure. 1.1 une comparaison entre les puissances fournies par différentes batteries chimiques et celles obtenues en convertissant les énergies mécanique et solaire. Ces dernières ne dépendent en un aucun cas à la durée de vie.

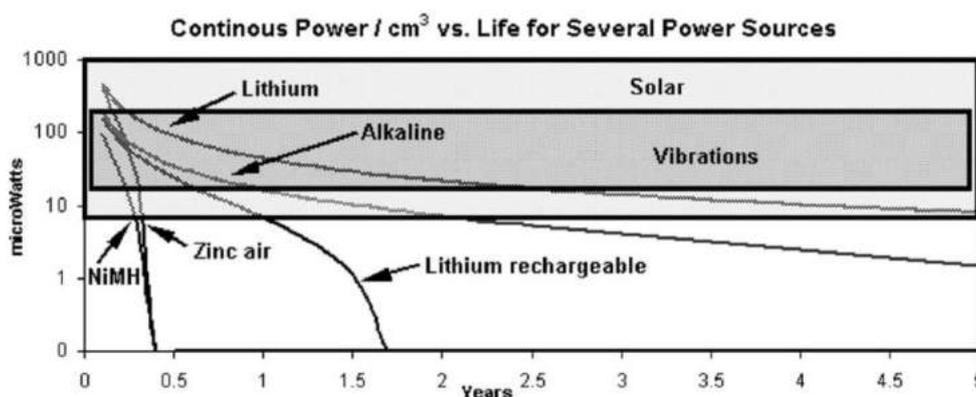


FIGURE 1.1: Comparaison de la puissance des vibrations, du solaire et des diverses batteries chimiques [2].

## 1.2. Les ressources énergétiques ambiantes

Les énergies ambiantes disponibles dans l'environnement sont diverses. L'énergie mécanique et thermique ont connu une certaine particularité due au fait qu'elles sont non seulement produites par différents phénomènes de l'environnement mais également liées au corps humain. Il existe évidemment d'autres sources d'énergie présente dans l'environnement qui pourraient constituer une ressource exploitable telles que les rayonnements électromagnétiques y compris lumineux et hyperfréquences. Dans la suite de cette section, nous proposons donc de quantifier ces différentes sources d'énergie ainsi de présenter leurs techniques de conversion.

### 1.2.1. Energie mécanique

L'énergie mécanique peut être produite à partir des vibrations ambiantes à proximité des machines tournantes environnantes à titre exemple ou encore aux bruits acoustiques. Mais également peut provenir des mouvements humains que ce soit volontaires ou naturels. La différenciation de ces deux types de sources sera faite dans la suite de cette section.

#### 1.2.1.1. Vibration mécanique

La récupération d'énergie vibratoire est une approche dans laquelle des vibrations parasites peuvent être converties en énergie électrique tout en utilisant des transducteurs piézoélectriques ou électromagnétiques. Les vibrations parasites proviennent d'une gamme de sources autour du dispositif de récupération d'énergie, telles que le vent, les forces sismiques [28] ou encore les vibrations induites dans le sol et les murs par les véhicules, vent ou pluie. Il existe trois grandes catégories de sources de vibrations, comme le montre le tableau. [1.2] industrielle, structurelle et véhiculaire [29]. Les approches existantes pour la récupération d'énergie par vibration utilisent typiquement un circuit redresseur qui est accordé à la fréquence de résonance de la structure de récupération et à la fréquence dominante des vibrations.

Vibrations structurales	Vibrations Industrielles	Vibrations véhiculaires
Routes, système HVAC, ponts	Machines industrielles, moteurs, transformateur, ventilateur, refroidisseurs, grilles intelligentes	Automobiles, Trains, avion, Camions

Tableau 1.2: Catégories de vibration.

Les techniques de récupération d'énergie par vibration peuvent s'appuyer sur des approches piézoélectriques, électrostatiques, et électrostrictives. Trois techniques communes seront discutées individuellement, ainsi qu'une comparaison sera établie pour comparer les caractéristiques des différentes techniques.

### 1.2.1.2. Mouvement du corps humain

L'énergie humaine est définie comme l'utilisation du mouvement humain ou de la chaleur corporelle pour la production d'énergie dans le but d'alimenter un dispositif électronique. Cela dit, la puissance pourrait être récupérée indirectement à partir des actions quotidiennes ou actions intentionnellement générées par l'être humain. L'énergie peut être récupérée à partir de la chaleur corporelle, de la respiration, de la tension artérielle, de la frappe, du mouvement du bras, du pédalage et de la marche. Le tableau 1.3 donne une vue d'ensemble de la puissance utilisée par le corps humain pendant diverses activités [30].

Activités	Kilocal/heure	Watts
Dormir	70	81
S'asseoir	100	116
Manger un repas	110	128
Se promener	140	163
Conduire une voiture	140	163
Jouer le piano	140	163
Faire le ménage	150	175
Menuiserie	230	168
Natation	500	582
Escalade	600	698
Course longue distance	900	1048

Tableau 1.3: Dépenses d'énergie humaine pour certaines activités [30].

### 1.2.2. Energie électromagnétique

Nous pouvons classer les sources électromagnétiques en deux parties : les sources qui sont liées aux dispositifs de communication sans fil tels que les téléphones, radar, WiFi... et celles qui correspondent à la lumière visible comme le montre l'étendue du spectre électromagnétique (fréquences et longueurs d'onde) représentée dans la figure 1.2.

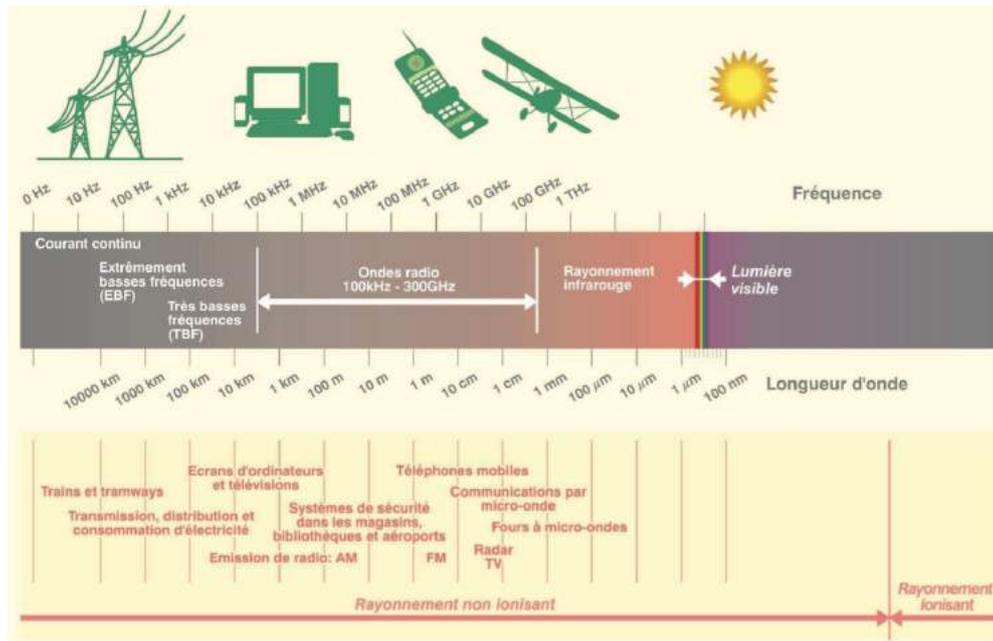


FIGURE 1.2: Étendue du spectre électromagnétique [3].

### 1.2.2.1. Rayonnements lumineux (solaires)

Les éclairages solaires ou artificiels peuvent être transformés en énergie électrique à l'aide des cellules solaires, qui sont commercialisées et bien caractérisées. En moyenne, l'énergie solaire reçue par la surface terrestre est d'environ  $1,2 \times 10^{17} W$ . Cela signifie qu'en moins d'une heure, une quantité suffisante d'énergie est fournie pour satisfaire toute la demande énergétique de la population humaine [31]. La conversion de l'énergie par effet photovoltaïque est une méthode de génération d'énergie électrique qui consiste à convertir le rayonnement solaire en courant électrique direct en utilisant des semi-conducteurs qui présentent l'effet photovoltaïque que nous allons expliquer son principe de fonctionnement dans les sections qui suivent.

Malgré que l'énergie solaire a un grand potentiel pour la production d'énergie de nombreux défis limitent son utilisation. D'une part, L'énergie de sortie dépend du matériau qui doit avoir des caractéristiques adaptées au spectre de lumière disponible, par exemple, des matériaux cristallins tels que le silicium et l'arséniure de gallium ont montré une efficacité d'absorption et un rendement de conversion élevé d'environ 15 % à 30 %. Tandis que les matériaux à film mince tels que le tellure de cadmium qui a une capacité d'absorption élevée mais son efficacité de conversion est faible ( $\leq 10\%$ ). D'une autre part, selon les conditions météorologiques, quand le soleil est voilé, le ciel est nuageux ..., la puissance devient plus faible, ce qui limite bien évidemment l'utilisation de cette source aux zones où la lumière du soleil est insuffisante. Par conséquent, utiliser d'autres

techniques de récupération d'énergie telles que la piézoélectricité et la thermoélectricité semble intéressant.

### 1.2.2.2. Rayonnements hyperfréquences

Les dispositifs de communication sans fil émettent des champs électromagnétiques hautes fréquences, ces derniers peuvent être considérés comme source d'énergie ambiante possible pour être récupéré. L'inconvénient pour la récupération de ce type d'énergie c'est qu'il faut se placer proche de la source des champs électromagnétiques ce qui limite vraiment l'usage de cette source pour alimenter les dispositifs électroniques placés loin de la source.

Comme le montre la figure. [1.3](#), le champ électrique diminue en fonction de la distance, il s'agit d'un champ électrique de  $2.45\text{ GHz}$  à la source, généré par une antenne WiFi. D'après la figure on observe clairement qu'en s'éloignant de l'antenne d'une distance de deux mètres, le champ électrique diminue et ne vaut que  $1\text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ .

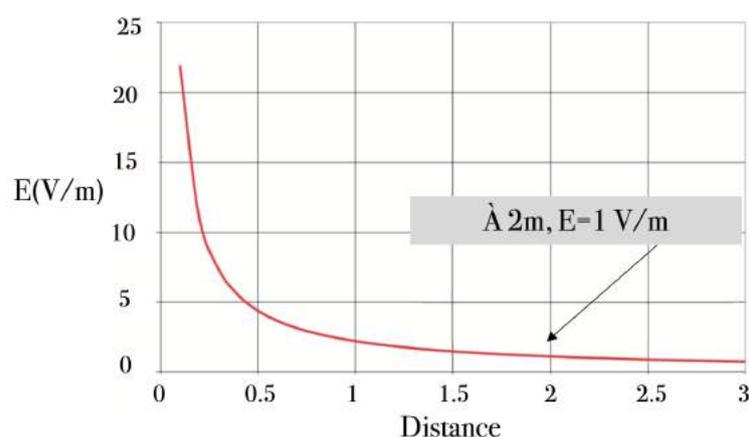


FIGURE 1.3: Évolution du champ électrique généré par une antenne WiFi en fonction de la distance [\[4\]](#).

### 1.2.3. Énergie thermique

L'énergie thermique est aussi une forme d'énergie qui se présente facilement dans l'environnement. Les dispositifs de récupération d'énergie thermique pourraient utiliser l'énergie thermique de différentes sources : être humain et animaux, machines ou autres sources naturelles. Les déperditions en énergie thermique étant très importantes de façon générale, la récupération sur ce type d'énergie est donc relativement facile et permet d'obtenir des niveaux de puissance récupérée de l'ordre de la dizaine de mW. Plusieurs systèmes sont sources de pertes thermiques qui se traduisent par émission de chaleur présentant des sources potentielles d'énergie. Citons à titre d'exemple, les sous-sol qui renferme l'énergie thermique utilisée soit pour assurer le chauffage, soit pour générer

de l'électricité, les centrales thermiques, les machines à vapeur, les machines thermodynamiques, comme les réfrigérateurs qui, pendant leur cycle de fonctionnement, ils dégagent de la chaleur ou encore le pot d'échappement des voitures qui évacuent des gaz dont leur température peut atteindre 700 °C.

### **1.3. Techniques de conversion des ressources énergétiques ambiantes en électricité et leurs applications**

Cette section aura pour but présenter les différents principes de conversion des énergies mécanique, électromagnétique et thermique en énergie électrique utile, en associant chaque principe de conversion d'énergie à plusieurs applications développées par des chercheurs scientifiques.

#### *1.3.1. Systèmes de conversion électromécanique*

L'énergie mécanique est considérée la source d'énergie la plus importante puisqu'elle est fréquemment utilisée dans les applications de la récupération d'énergie ambiante. Plusieurs dispositifs, qui convertissent l'énergie mécanique (vibration et mouvement) en énergie électrique exploitable, ont déjà été étudiés et développés [32, 33, 34, 5].

##### *1.3.1.1. Conversion piézoélectrique*

L'effet piézoélectrique se traduit par le fait qu'une déformation d'un matériau produit une charge électrique dans sa surface (effet direct) et, inversement, un champ électrique appliqué produit une déformation mécanique (effet inverse) [35] comme représenté sur la Figure. 1.4) Cet effet a été découvert par Jacques et Pierre Curie en 1880. Les frères de Curie ont constaté que certains matériaux, soumis à une contrainte mécanique, subissaient une polarisation électrique proportionnelle à la contrainte appliquée. Grâce à l'effet piézoélectrique, il est possible donc de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique.

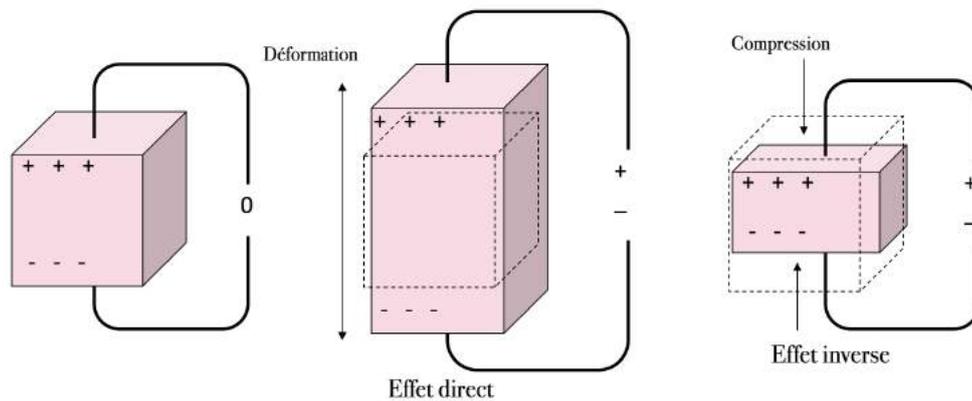


FIGURE 1.4: Principe de fonctionnement d'un cristal piézoélectrique .

L'énergie piézoélectrique est la plus répandue parmi toutes les méthodes basées sur la vibration en raison de plusieurs facteurs :

- Coefficient de couplage électromécanique raisonnable.
- Absence de matériaux volumineux comme l'aimant permanent ou la bobine.
- Faisabilité d'être déposé sur des substrats pour des applications MEMS (Micro ElectroMechanical Systems).

Le coefficient de couplage du matériau constitue un outil souvent utilisé pour tester l'efficacité des générateurs piézoélectrique [36]. Pour l'effet piézoélectrique direct, le carré du coefficient de couplage électromécanique est égal au rapport entre l'énergie électrique stockée dans le matériau piézoélectrique et l'énergie mécanique appliquée (Eq.1.1).

$$k^2 = \frac{E_s}{E_{meca}} \quad (1.1)$$

avec  $E_s$  est l'énergie électrique stockée et  $E_{meca}$  c'est l'énergie mécanique appliquée.

Pour l'effet piézoélectrique inverse, le carré du coefficient de couplage électromécanique est exprimé comme rapport entre l'énergie mécanique stockée dans le matériau piézoélectrique et l'énergie électrique appliquée (Eq.1.2).

$$k^2 = \frac{E_s}{E_{ele}} \quad (1.2)$$

où  $E_s$  et  $E_{ele}$  représentent respectivement l'énergie électrique stockée et l'énergie électrique appliquée.

Les coefficients de couplage pour différents axes longitudinal (Eq.1.1) et transversal (Eq.1.4) peuvent être exprimés en fonction des constantes propres du matériau piézoélectrique.

$$\begin{cases} k_{33}^2 &= \frac{d_{33}^2}{\varepsilon_{33}^T s_{33}^E} \\ k_{31}^2 &= \frac{d_{31}^2}{\varepsilon_{31}^T s_{31}^E} \end{cases} \quad (1.3)$$

Les indices 1, 2 et 3 présentent les axes principaux avec l'axe 3 correspond par convention à l'axe de polarisation.

La densité d'énergie électrique récupérable peut être calculée à partir des équations 1.1 et 1.2 qui définissent le coefficient de couplage.

$$E_{ele} = k^2 E_{meca} = \frac{1}{2} k^2 Y S^2 \quad (1.4)$$

où  $Y$  et  $S$  sont respectivement le module de Young et la déformation maximale.

La conversion électromécanique par effet piézoélectrique est un outil direct pour produire de l'énergie électrique et qui ne nécessite en aucun cas la transformation ou le stockage d'énergie. Néanmoins, la puissance récupérée reste faible, cela est dû principalement aux pertes mécaniques. En regard de tout cela, de nombreux chercheurs ont étudié, développé et appliqué le concept d'utilisation de matériaux piézoélectriques pour la récupération d'énergie. Un exemple d'applications c'est des chaussures à base d'un générateur piézoélectrique [37] récupérant l'énergie issue de la marche humaine [5]. Comme le montre la figure. 1.5, la semelle des chaussures a été réalisée en deux configurations. La première est une semelle à base des films polymère de type PVDF en couche de  $28\mu m$ , cette structure est capable de générer une puissance maximale vaut  $1.1mW$ . La deuxième semelle est un bimorphe piézoélectrique à base de céramique de type  $PZT$  qui génère une puissance maximale de  $8.4mW$ .

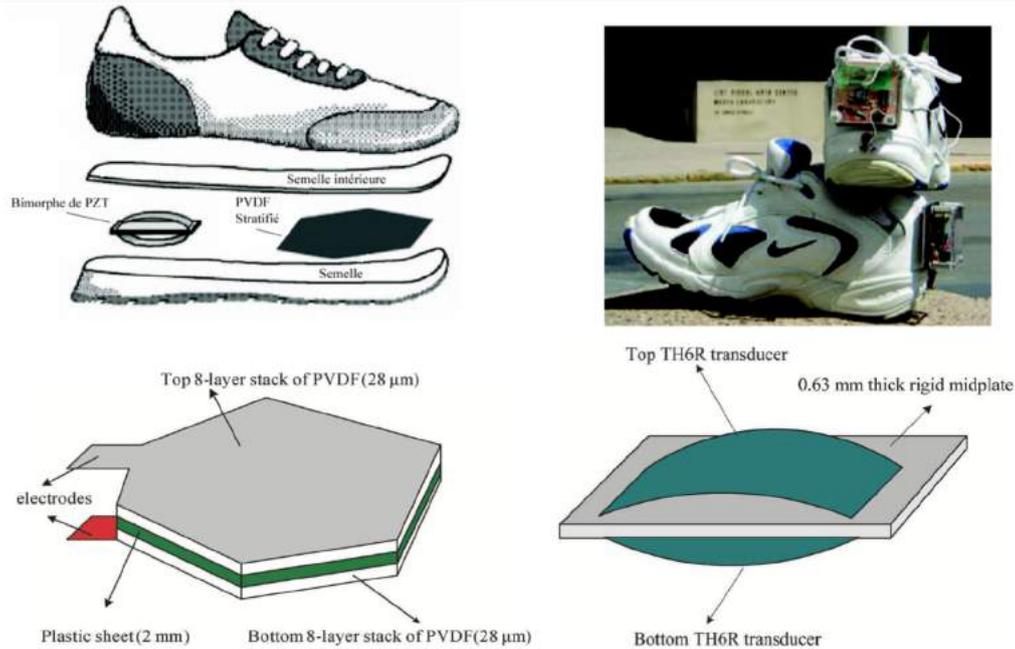


FIGURE 1.5: Chaussures piézoélectriques utilisant soit du PVDF stratifiés placés sous la plante du pied ou un bimorphe de céramique piézoélectrique PZT placé sous le talon [5].

Une autre application de conversion électromécanique de l'énergie parmi d'autre a été développée [6]. Il s'agit d'un dispositif portable et miniaturisé qui se place au niveau de genou du corps humain afin de récupérer l'énergie provenant de la marche (Figure. 1.6).

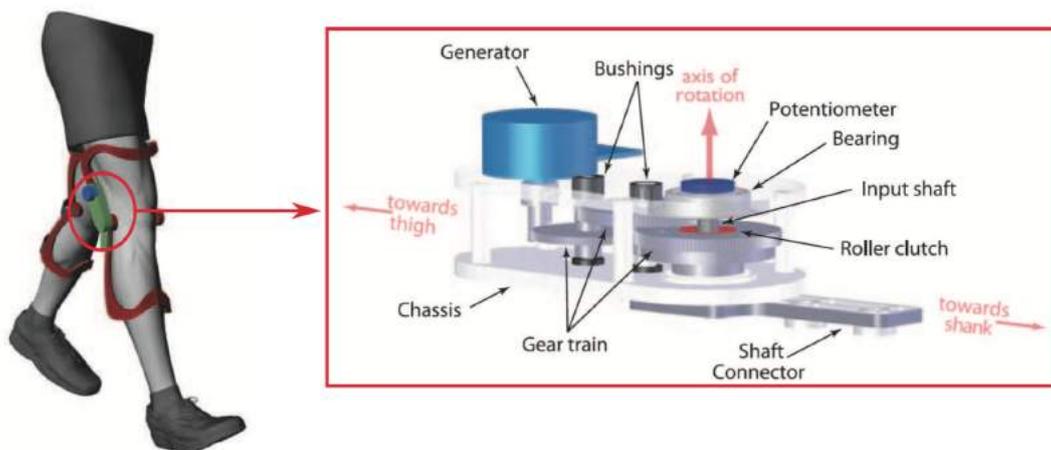


FIGURE 1.6: Genouillère récupérant l'énergie de la marche [6].

Si cette genouillère est portée sur chacune des jambes, elle permettra de générer une puissance allant jusqu'à  $5W$  lorsque l'être humain marche avec une vitesse de  $1.5m.s^{-1}$ .

Une approche très innovante pour la récupération de l'énergie piézoélectrique à partir des vibrations mécaniques a été proposée par Guyomar et al. [38, 39], il s'agit de la technique SSHI pour Synchronized Switch Harvesting on Inductor, un circuit auto-adaptatif de la récupération d'énergie. La figure. 1.7 montre un modèle de structure vibrante comprenant un élément piézoélectrique et un dispositif de récupération d'énergie SSHI en fonctionnement permanent.

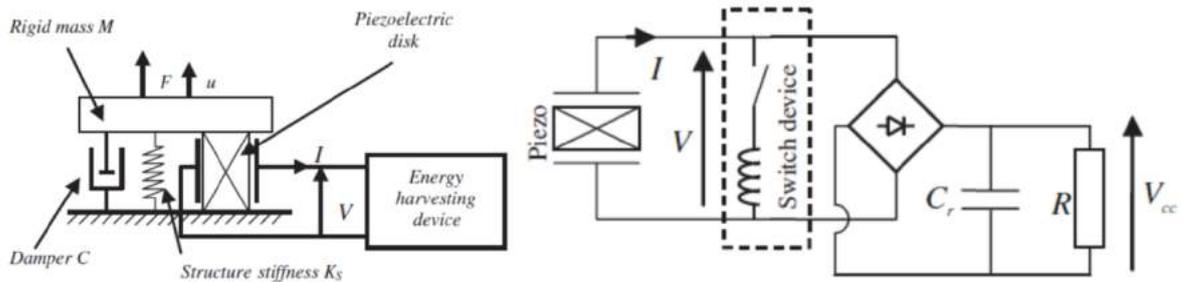


FIGURE 1.7: (a) un modèle de structure vibrante comprenant un élément piézoélectrique (b) un dispositif de récupération d'énergie SSHI en fonctionnement permanent.

Cette approche est dérivée d'une méthode très connue appelée SSDI pour Synchronized Switching Damping on Inductor [40], une technique semi-passive qui a été développée pour résoudre le problème de l'amortissement des vibrations dans les structures mécaniques. Il a été montré que la technique SSHI, augmente la puissance récupérée d'un facteur 8 par rapport à la technique standard [38].

### 1.3.1.2. Conversion électrostrictive

Contrairement à la piézoélectricité, un matériau électrostrictif ne peut pas générer une tension électrique lorsqu'il est soumis à une contrainte mécanique c'est à dire que le matériau subit un seul effet, il se déforme lorsqu'un champ électrique est appliqué [7, 41]. Cependant l'électrostriction est utilisée pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. La figure. 1.8 montre le cycle énergétique qu'un matériau électrostrictif doit subir pour pouvoir assurer la conversion électromécanique de l'énergie.

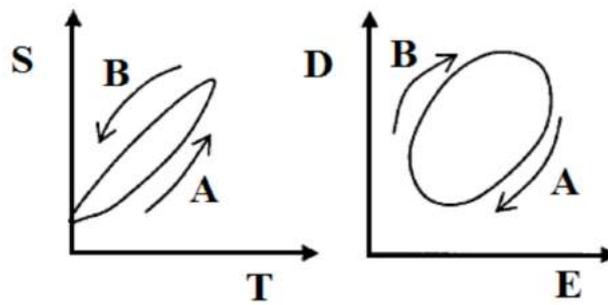


FIGURE 1.8: Cycle à réaliser avec un matériau électrostrictif pour la récupération d'énergie [7].

Le matériau ne doit pas suivre le même chemin lors de son étirement (chemin A) et lors de sa contraction (chemin B). L'énergie électrique récupérée est maximale pour une combinaison particulière de conditions aux limites lors de la réalisation de ce cycle. Ainsi, à partir des équations intrinsèques de l'électrostriction, le calcul des variations mécaniques et électriques sur les chemins A et B est possible, ce qui permet pour des conditions aux limites adéquates de calculer l'énergie électrique récupérée.

L'électrostriction est une propriété de matériaux non conducteurs, qui traduit une dépendance quadratique entre la déformation  $S$  et la polarisation électrique  $P$  sous une contrainte constante  $T$ .

$$S_{ij} = Q_{ijkl} P_k P_l \quad (1.5)$$

où  $Q$  est la charge électrique sur les électrodes.

L'électrostriction est décrite par des équations intrinsèques (Eq. 1.6) basées sur un potentiel thermodynamique préalablement choisi.

$$\begin{cases} S_{ij} = M_{ijkl} E_k E_l + S_{ijkl}^E T_{kl} \\ D_i = \varepsilon_{ik}^T E_k + 2M_{ijkl} E_l T_{ld} \end{cases} \quad (1.6)$$

où  $M_{ijkl}$  est le coefficient d'électrostriction, et  $\varepsilon_{ik}^T$  est la permittivité diélectrique linéaire.

Le courant induit par la vibration du matériau électrostrictif peut être calculé par :

$$I = A \frac{\partial D_i}{\partial t} \quad (1.7)$$

où  $A$  est la surface du matériau électrostrictif.

Pour le cas de l'effet électrostrictif, le coefficient de couplage est exprimé par :

$$k^2 = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \quad (1.8)$$

où  $E_1 + E_2$  est la densité d'énergie d'entrée mécanique, et  $E_1$  représente la densité d'énergie électrique de sortie. Plus le coefficient de couplage est élevé, plus on récupère de l'énergie électrique.

L'effet électrostrictif a été utilisé par belhora et al. [8] pour récupérer des vibrations mécaniques en utilisant une hybridation entre un polymère électrostrictif et des électrets. Comme nous l'avons expliqué, il n'y a pas de polarisation permanente dans un matériau électrostrictif par rapport au matériau piézoélectrique, donc pour assurer sa polarisation, le matériau électrostrictif a nécessairement besoin d'une application d'un champ statique. Pour éviter ce problème, belhora et al. [8] utilisaient l'hybridation du polymère électrostrictif avec des électrets. Ces derniers assurent la polarisation du polymère électrostrictif pour qu'il fonctionne en mode pseudo-piézoélectrique et convertit les vibrations mécaniques en énergie électrique. La structure d'hybridation et le dispositif de récupération d'énergie sont présentés dans la figure. 1.9.

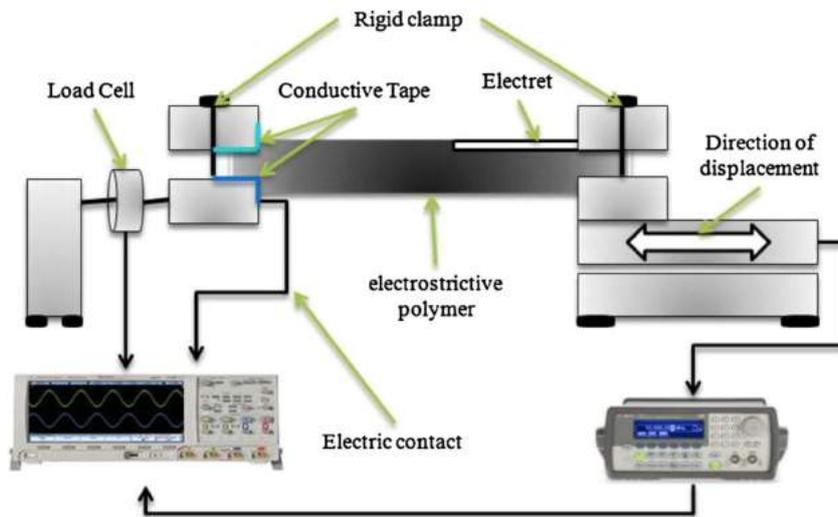


FIGURE 1.9: Dispositif expérimentale de conversion électrostrictif [8]

Cette structure est autonome en terme d'énergie, et elle peut être placées sur n'importe quel système vibrant pour la conversion électromécanique d'énergie. Belhora et al. [8] ont testé cette structure en utilisant des polymères de PU et P(VDF-TrFE-CFE) purs et chargés avec des nanoparticules de carbone. La figure. 1.10 présente le courant induit par les deux types de polymères en fonction de la fréquence. Il faut noter que ces polymères ont été polarisés par l'application d'un champ électrique externe assuré par les électrets. la performance des films polymères a été améliorée par l'ajout des nanoparticules de carbone comme le montre la figure. 1.10, le courant induit par les polymères composites était plus élevé par rapport aux valeurs obtenues par les PU et P (VDF-TrFE-CFE) purs.

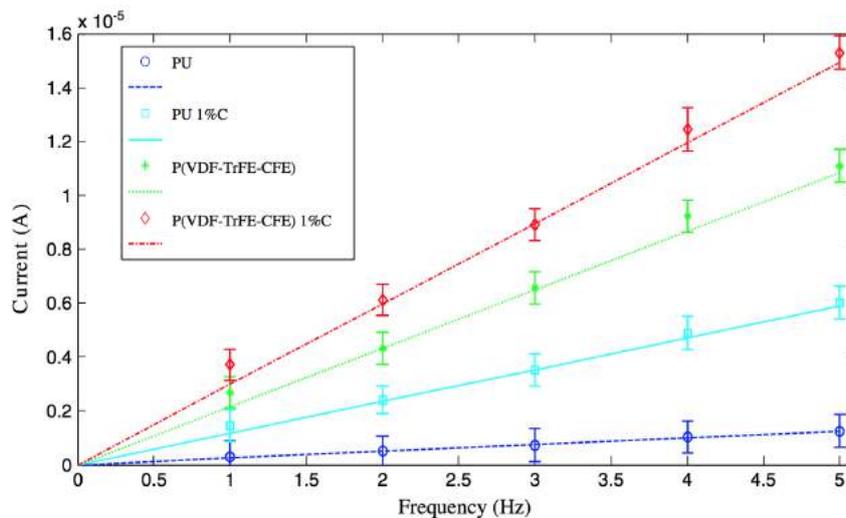


FIGURE 1.10: Le courant induit par les polymères pur et les polymères composites en fonction de la fréquence pour un champ électrique  $E = 30 \text{ kV}$  et une contrainte  $S = 2,5 \%$ . [8].

La densité de puissance récupérée en fonction de la résistance optimale est présentée dans la figure. 1.11 Les polymères composites semblent plus performants en terme de puissance récupérée par rapport aux polymères purs. La densité de puissance augmente donc de manière significative avec l'incorporation de nanoparticule de carbone dans les films de polymères purs. La structure d'hybridation entre les polymères et les électrets permet de récupérer une densité de puissance maximale qui vaut  $1,76 \mu\text{W}$ . Cette méthode d'utilisation de l'hybridation des nano-composites diélectriques et des électrets est très intéressante car elle permet la réalisation des systèmes autonomes fonctionnant sans batterie.

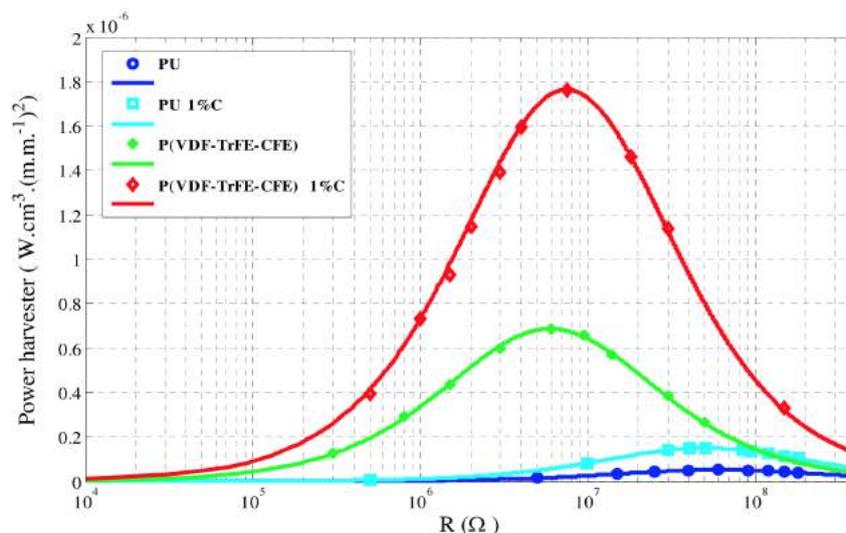


FIGURE 1.11: Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge à  $4 \text{ Hz}$  avec  $S = 0,5 \%$ . [8].

### 1.3.1.3. Conversion électrostatique

La conversion électrostatique est classée parmi les techniques de la conversion électromécanique. Contrairement aux générateurs piézoélectriques, et similaire aux générateur électrostrictifs, les générateurs électrostatiques nécessitent un préchargement pour pouvoir générer une puissance électrique. Un générateur électrostatique est donc un condensateur préalablement chargé avec des électrodes qui meuvent. Ce mouvement peut être assuré par des vibrations ambiantes à titre d'exemple. Un générateur électrostatique a été déjà développé [42], il s'agit d'un condensateur micro-usiné qui exploite les vibrations ambiantes pour les convertir en énergie électrique. La récupération d'énergie électrostatique ne nécessite pas de matériaux intelligents et pourrait être intéressé par le domaine de MEMS. Les récupérateurs électrostatiques génèrent une tension relative élevée de 2 à 10 V [43]. Ces systèmes ont été optimisés pour améliorer la densité de puissance de sortie jusqu'à atteindre  $110 \text{ w/cm}^3$  à 120 Hz vibration [43].

Le principe de fonctionnement de ces systèmes électrostatiques a été rappelé par Meninger et al. [42]. L'idée de base est fournir une quantité d'énergie au condensateur du micro-générateur et profiter de l'énergie vibratoire ambiante pour diminuer sa capacité tout en augmentant la distance entre les électrodes (qui nécessite bien évidemment un travail mécanique). Le principe de fonctionnement de ce type de générateur est illustré dans la figure. 1.12.

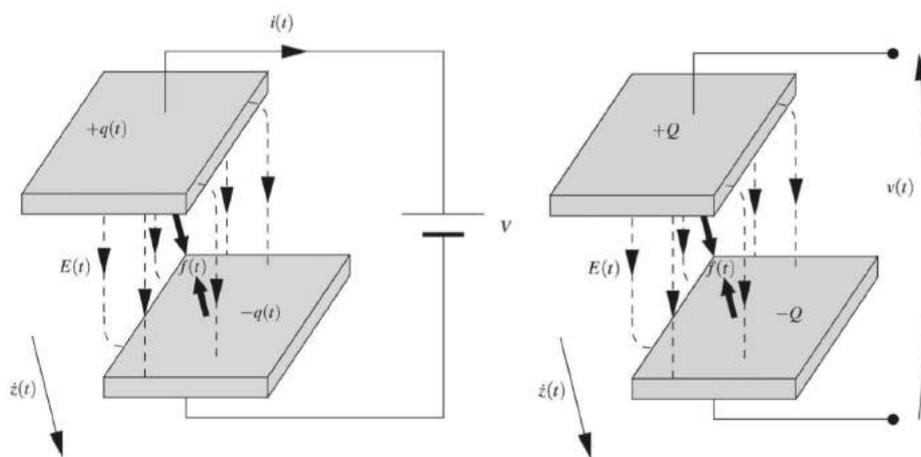


FIGURE 1.12: Principe de fonctionnement d'un générateur électrostatique [9].

Les électrodes qui sont en mouvement, entraînent à deux cas :

- À tension constante, diminution de la capacité, dans ce cas des charges électriques sont générées

- À charge constante, augmentation de la tension aux bornes de la capacité et donc l'augmentation de l'énergie électrostatique.

Dans les deux cas, le travail mécanique fournie à l'écartement des électrodes est converti en énergie électrique.

Quelques applications ont été comme même développées malgré que la plupart des micro-générateurs électrostatiques génèrent une puissance assez faible. Parmi les applications développées, nous présentons la chaussure électrostatique [10] (Figure. 1.13), dont la capacité du générateur est à base d'un élastomère compressible. Quand l'utilisateur marche avec un rythme de deux pas par seconde, la chaussure fourni une puissance de 800 mW.

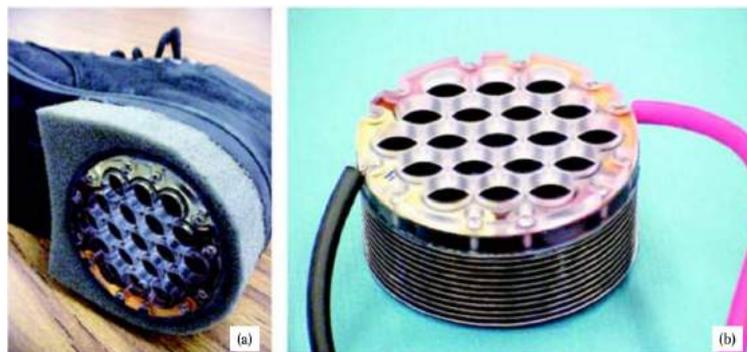


FIGURE 1.13: Chaussures avec générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur [10].

Le générateur est composé d'une capacité à base d'un élastomère diélectrique compressible. Quand l'utilisateur effectue des pas en marchant, il actionne un soufflet (dessus du générateur figure. 1.13. a) appliquant une pression sur l'élastomère (dessous du générateur figure. 1.13. b) qui se comprime et entraînant par la suite une variation de capacité du générateur nécessaire pour la conversion électromécanique.

### 1.3.2. Systèmes de conversion photovoltaïque

La conversion photovoltaïque est une technique de récupération d'énergie lumineuse qui consiste à convertir l'énergie solaire en énergie électrique en utilisant ce qu'on appelle cellules photovoltaïques. Ces cellules sont des jonctions  $PN$  dissymétriques, les deux cotés  $P$  et  $N$  sont appelés base et émetteur respectivement et ils sont de différentes épaisseurs et différent dopage : la couche  $P$  peu dopée de Bore et elle est généralement épaisse par rapport à la couche  $N$  qui est très dopée en phosphore. Le schéma d'une cellule photovoltaïque est représenté dans la figure. 1.14.

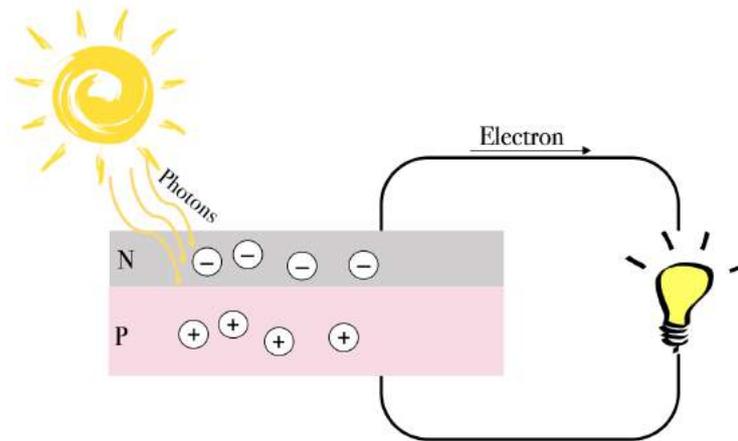


FIGURE 1.14: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

L'énergie solaire reçue par la couche *N*, excite les électrons qui par conséquent sautent de la bande de valence vers la bande de conduction à condition que cette énergie soit supérieure à l'énergie de gap du système. A circuit ouvert, une différence de potentiel est créée aux bornes de la cellule, à circuit fermé, une circulation d'un courant proportionnel à l'éclairement est observé. En fait, le rendement de la conversion de l'énergie solaire par les cellules photovoltaïques, dépend de l'ensoleillement c'est à dire l'intensité de la lumière et de son allure spectrale. Les premières et fameuses applications dans le domaine de la récupération d'énergie solaire qui ont été développées et même commercialisées sont des calculatrices, des montres ou encore des réveils, se sont des appareils à faible consommation (de l'ordre de  $\mu W$ ). Il a été déjà étudié l'alimentation d'une souris d'ordinateur sans fil par un générateur photovoltaïque de  $28 \text{ cm}^2$  [44]. Le système d'alimentation est composé d'une cellule photovoltaïque pour la conversion de l'énergie, de deux batteries pour le stockage, d'un convertisseur DC-DC pour charger les batteries, d'un contrôle MPPT qui est un microprocesseur qui fait fonctionner la cellule PV en mode puissance maximale. Avec les avancés technologiques, plusieurs récupérateurs d'énergie solaire ont été réalisés. Les applications les plus répandues sont celles qui alimentent des capteurs sans fils comme les systèmes Everlast [11], Prometheus [45], Héliomote [46] et AmbiMax [47]. Tous ces récupérateurs sont conçus pour alimenter des capteurs sans fils par des cellules photovoltaïques avec une supercapacité pour le stockage de l'énergie et proposés pour un fonctionnement à l'extérieur. Nous présentons dans la figure. 1.15 un parmi les récupérateurs cités, il s'agit du système Everlast qui est un système autonome avec d'une durée de vie de 20 ans avec un régulateur MPPT qui permet en principe de faire fonctionner le générateur photovoltaïque dans des conditions optimales afin d'atteindre un niveau maximal de puissance.

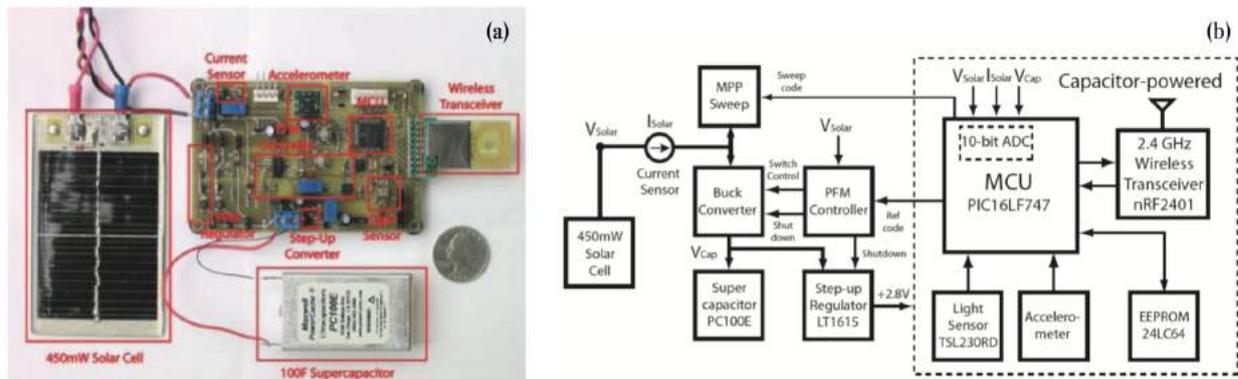


FIGURE 1.15: Système Everlast [11] : (a) Photo du système Everlast (b) Structure du système Everlast.

### 1.3.3. Système de conversion thermique-électrique

Contrairement aux autres types d'énergies ambiantes, la conversion d'énergie à partir de l'énergie thermique a reçu de plus en plus d'attention récemment. L'énergie thermique est une autre forme d'énergie qui est disponible presque partout, thermoélectricité et pyroélectricité sont les techniques les plus universelles pour la récupération d'énergie thermique. Le gradient de température ou la variation de température dans le convertisseur d'énergie est la condition préalable nécessaire à la récupération de l'énergie thermique. La température varie plus lentement en raison de la grande capacité calorifique des matériaux. Cela provoque une diminution de la fréquence de travail et, par conséquent, un maximum d'énergie disponible doit être récupéré en une seule tentative.

#### 1.3.3.1. Conversion thermoélectrique

Les générateurs thermoélectriques qui convertissent l'énergie thermique en énergie électrique, ont connu un grand intérêt ces dernières années. En raison de leurs avantages, tels que la haute fiabilité, absence de bruit, ainsi que leur capacité d'utiliser la chaleur perdue comme une source d'énergie en faire un moyen attractif pour la récupération d'énergie à partir de gradients de température. L'effet thermoélectrique est la capacité de convertir le flux de chaleur thermique en un courant électrique. La récupération d'énergie avec cet effet est donc possible. Les phénomènes thermoélectriques englobent deux effets identifiés séparément : l'effet Seebeck et l'effet Peltier, [48] ces deux effets sont thermodynamiquement réversibles.

—L'effet Seebeck illustré dans la figure 1.16 montre qu'il y a l'apparition d'une différence de potentiel entre deux métaux dissemblables noté a et b en présence d'un gradient de température. Cela était dû au fait que les métaux réagissaient différemment à la différence de température, créant une boucle de courant et un champ magnétique.

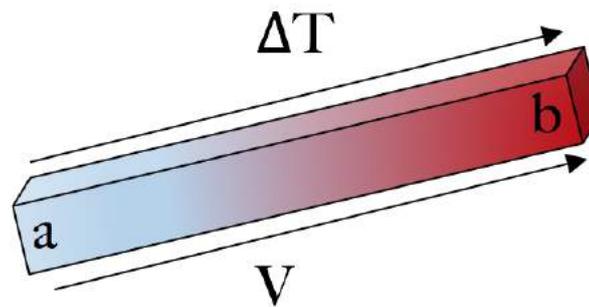


FIGURE 1.16: Illustration de l'effet Seebeck.

L'effet Seebeck se traduit par l'équation [1.9](#) avec  $V$  le champ électrique généré, le  $S_{ab}$  coefficient Seebeck des matériaux  $a$  et  $b$ , et  $\Delta T$  le gradient de température.

$$V = S_{ab}\Delta T \quad (1.9)$$

Pour obtenir une tension électrique importante, il faut avoir un coefficient Seebeck important qui est une caractéristique intrinsèque du matériau thermoélectrique et un gradient thermique important.

— **L'effet Peltier** représenté dans la figure [1.17](#) est l'inverse de l'effet Seebeck, c'est à dire qu'il y'a l'apparition d'une différence de température entre les deux extrémités des métaux en présence d'un courant qui circule. Peltier a constaté que les jonctions de métaux dissemblables noté  $a$  et  $b$  ont été chauffées ou refroidies, selon la direction dans laquelle un courant électrique passait à travers eux.

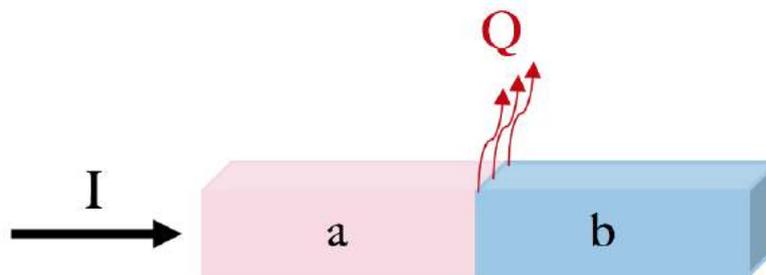


FIGURE 1.17: Illustration de l'effet Peltier.

L'effet Peltier est exprimé par l'équation [1.10](#), avec  $Q$  le flux de chaleur,  $I$  le courant électrique,  $P_a$  et  $P_b$  respectivement les coefficients Peltier des matériaux  $a$  et  $b$  représentés dans la figure [1.17](#).

$$Q = (P_a - P_b)I \quad (1.10)$$

La conversion thermoélectrique permet d'obtenir une quantité d'énergie électrique qui dépend du gradient de température, donc pour avoir une quantité d'énergie utile en sortie du générateur, il est nécessaire d'assurer un gradient thermique important.

Pour une différence de température donnée, l'efficacité de conversion thermoélectrique, qui est limitée par les propriétés des matériaux, peut être obtenue en utilisant l'équation suivante [49].

$$\eta = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_2} \frac{\sqrt{ZT + 1} - 1}{\sqrt{ZT + 1} + \frac{\theta_2}{\theta_1}} \quad (1.11)$$

Où  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont les températures chaudes et froides aux extrémités du convertisseur thermoélectrique, et  $ZT$  est un facteur de mérite lié aux matériaux thermoélectriques. La figure 1.18 représente le facteur de mérite d'un certain nombre de matériaux thermoélectriques [50].

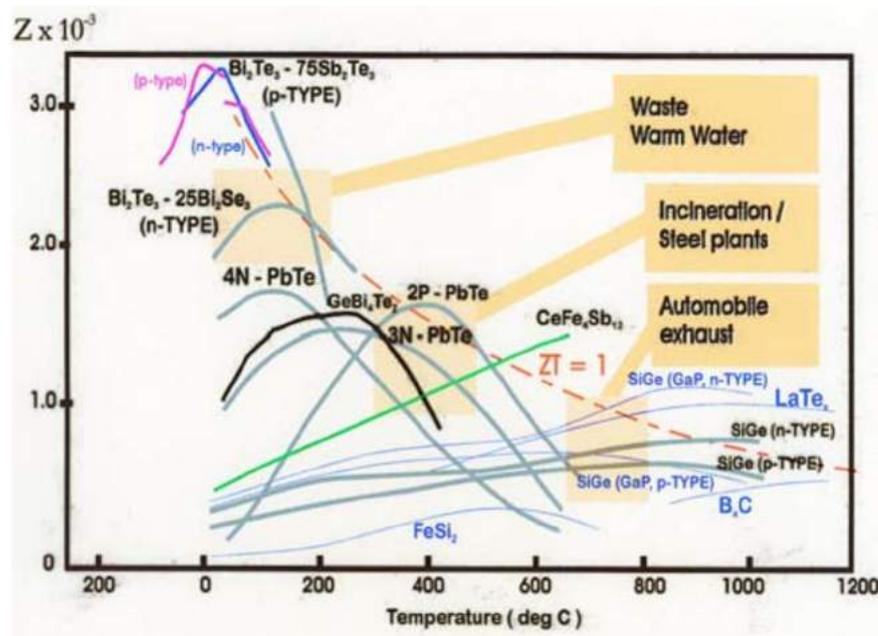


FIGURE 1.18: Facteur de mérite de quelques matériaux thermoélectriques [49].

Le premier domaine qui a connu des applications de conversion d'énergie par effet thermoélectrique, c'est l'industrie horlogère. Une montre alimentée par un générateur thermoélectrique a été proposée par Bulova en 1978 [51]. La montre génère une tension qui vaut 300 mV. Cette tension est élevée à 1,5 V en vue d'alimenter les circuits de la montre. Une application de la conversion

thermoélectrique a été développée par Stark et al. [12]. Il s'agit d'une thermopile sur film souple présenté dans la figure. 1.19).



FIGURE 1.19: Prototype d'un générateur thermoélectrique [12].

Ce type de générateur thermoélectrique qui est sous forme de bouton, d'une surface de  $3 \text{ cm}^2$  et une épaisseur de  $3 \text{ mm}$ , génère une puissance de  $120 \mu\text{W}$  lorsqu'il est soumis à un gradient de température de  $5 \text{ K}$ .

#### 1.3.3.2. Conversion pyroélectrique

La conversion d'énergie pyroélectrique offre une solution nouvelle et directe pour convertir la chaleur résiduelle en électricité en chauffant et en refroidissant alternativement un matériau pyroélectrique qui, par effet pyroélectrique, produit de l'électricité. Contrairement au générateur thermoélectrique, les générateurs pyroélectriques n'ont pas besoin d'un gradient de température, mais ils nécessitent des fluctuations temporelles de température, donc les champs d'application sont tout à fait différents.

L'effet pyroélectrique se traduit donc par une variation de polarisation spontanée que possède certains cristaux lorsque ces derniers subissent une variation de température. La variation de polarisation entraîne une différence de potentiel temporaire, qu'après le temps de relaxation diélectrique, elle disparaîtra. Ce changement de polarisation se traduit en courant électrique appelé courant pyroélectrique et également sous forme d'une tension appelée tension pyroélectrique. La figure. 1.20 montre le principe de fonctionnement d'un matériau pyroélectrique. A une température ambiante (constante), la polarisation électrique interne d'un matériau pyroélectrique ne se manifeste donc pas, car celle-ci est compensée par des charges libres qui sont présentes à la surface du cristal.

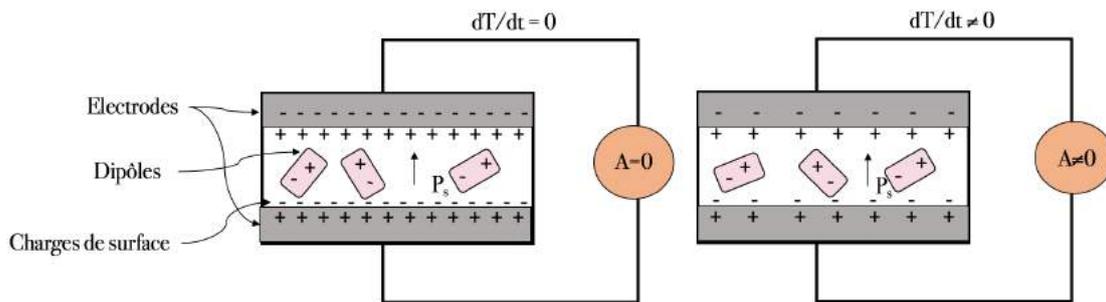


FIGURE 1.20: Le principe de fonctionnement d'un matériau pyroélectrique.

Les matériaux pyroélectriques sont principalement la base des capteurs dans les détecteurs infrarouges, comme ils sont appliqués dans divers domaines allant de la thermographie IR aux éthylotests sans oublier de passer par les détecteurs de réactions chimiques, les détecteurs de gaz, les alarmes incendies ou encore les détecteurs de présence. Les cristaux pyroélectriques ont été utilisée non seulement dans les systèmes de détection mais également pour le développement d'accélérateur de particules assez compact [52].

Les matériaux pyroélectriques ont connu des applications dans le domaine de la récupération d'énergie. Guyomar et al. [13] ont développé un dispositif expérimental pour la récupération pyroélectrique d'énergie par cycle SSHI. Le dispositif est présenté dans la figure. 1.21. Le matériau pyroélectrique utilisé est un film polymère de type PVDF, la technique a permet d'obtenir une énergie récupérée maximal de  $175 \mu J/cycle$  pour des variations de température de  $1.27^\circ K$  à  $500 mHz$ .

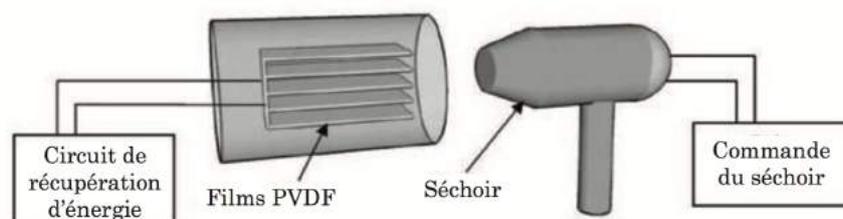


FIGURE 1.21: Schéma du circuit d'essai de conversion d'énergie pyroélectrique (SSHI) utilisé par Guyomar et al. [13].

## Conclusion

**A**u cours de cette étude bibliographique, nous avons présenté les différentes sources d'énergie ambiante possible à récupérer pour alimenter les dispositifs électroniques et assurer leur autonomie en termes d'énergie. Nous avons également examiné à travers ce chapitre introductif,

un certain nombre de techniques de récupération d'énergie de différent type : mécanique, thermique, lumineuse . . . et leur application pour la production de l'énergie électrique gratuite. Nous avons constaté que les sources d'énergie présentées au cours de ce chapitre, ont été largement développées comme le cas de l'énergie mécanique et l'énergie solaire. L'énergie thermique présente comme même deux solutions pour son exploitation : par thermoélectricité ou pyroélectricité, cependant ce type d'énergie n'a été pas suffisamment étudié, développé et appliqué dans le domaine de la récupération d'énergie comme l'énergie mécanique à titre d'exemple. Nous étions convaincus donc que l'exploitation de l'énergie thermique est un bon choix pour développer des récupérateurs d'énergie thermique. Nous nous sommes intéressés par l'effet pyroélectrique pour produire de l'énergie électrique à partir des variations temporelles de la température dont il permet de produire une puissance de quelques  $mW$  pour un système de taille centimétrique. A la suite de ce chapitre, une étude approfondie sur la conversion pyroélectrique sera menée.

# PRINCIPE DE LA RECUPERATION D'ENERGIE THERMIQUE, ET CARACTERISATION DES PHÉNOMÈNES PYROELECTRIQUE ET TRANSFERT THERMIQUE

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	32
<b>2.1 EFFET PYROÉLECTRIQUE</b> . . . . .	33
<b>2.1.1 Historique</b> . . . . .	34
<b>2.1.2 Principe</b> . . . . .	35
<b>2.1.3 Modélisation de l'effet pyroélectrique</b> . . . . .	36
<b>2.1.4 Récupération de l'énergie par effet pyroélectrique</b> . . . . .	38
<b>2.1.4.1 Concept globale de la récupération de l'énergie par effet pyroélectrique</b> . . . . .	38
<b>2.1.4.2 Evolution de la récupération de l'énergie par effet pyroélectrique</b> . . . . .	39
<b>2.2 GÉNÉRALITÉS SUR LES TRANSFERTS THERMIQUES</b> . . . . .	42
<b>2.2.1 Notion élémentaires</b> . . . . .	42
<b>2.2.1.1 Champs de température</b> . . . . .	42
<b>2.2.1.2 Surface isothermes</b> . . . . .	43
<b>2.2.1.3 Flux thermique et densité de flux thermique</b> . . . . .	43
<b>2.2.2 Les différents types de transfert thermique</b> . . . . .	43

---

2.2.2.1 Transfert conductif . . . . .	43
2.2.2.2 Transfert radiatif . . . . .	44
2.2.2.3 Transfert convectif . . . . .	46
CONCLUSION . . . . .	50

## Introduction

COMME nous avons vu en premier chapitre, les procédés de conversion thermo-mécano-électrique ont un potentiel intrinsèque. Ces procédés consistent à utiliser des matériaux généralement appelés intelligents ou encore électroactifs [53] en raison de leurs réponses et réactions en présence d'une contrainte extérieure (contrainte mécanique, variation de température, champ électrique ...). Pour mieux comprendre les couplages liant les matériaux entre eux, nous présentons dans la figure. 2.1 les interactions thermodynamiques réversibles possibles qui peuvent avoir lieu. Pour traduire phénoménologiquement ces couplages, trois paires de variables intensives et extensive associées à chaque forme d'énergie doivent être présentées, il s'agit de champs électrique et déplacement de charge pour la forme électrique de l'énergie, contrainte élastique et allongement pour le cas de l'énergie mécanique et en ce qui concerne l'énergie thermique la paire de variables est la température et l'entropie.

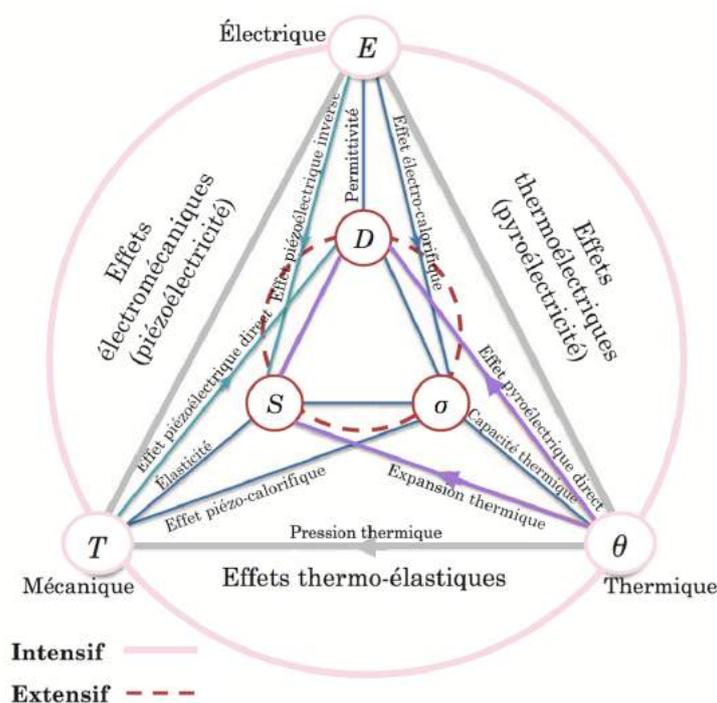


FIGURE 2.1: Couplage liant les propriétés thermique, électrique et mécaniques [14].

En effet, Les variables extensives sont additives à condition que la valeur totale de la variable pour le cristal est égale à la somme des variables pour ses éléments. Tandis que les variables intensives ne sont pas additives et elles sont indépendantes des caractéristiques quantitatives du cristal.

En effet, Le couplage dont nous nous sommes intéressé dans cette thèse est le couplage entre l'électricité et la chaleur. Ce deuxième chapitre propose donc une tour d'horizon de l'effet pyroélectrique pour la conversion thermo-électrique de l'énergie. Dans un premier temps, l'effet pyroélectrique sera présenté, accompagné d'un rappel historique sur leur découverte et leur exploitation ainsi que leur évolution dans le domaine de la récupération d'énergie. Dans un deuxième temps, nous décrivant les différents transferts thermiques qui permettent de mettre en profite l'effet pyroélectrique pour la conversion de l'énergie incluant leur disponibilité dans l'environnement.

## 2.1. Effet pyroélectrique

Avant de parler de l'effet pyroélectrique, il faut tout d'abord distinguer trois effets de base : piézoélectrique, pyroélectrique et ferroélectrique. La plupart des matériaux qui se caractérisent par ces effets sont des matériaux polaires (cristal ou cristallite), c'est à dire que leur réseau cristallin se compose d'ions positifs et d'ions négatifs. La symétrie de la maille élémentaire ou primitive de ce réseau cristallin est le facteur déterminant de la nature du cristal et des effets qui peuvent se manifester. La figure. 2.2 montre une classification des cristaux en fonction de leurs propriétés piézoélectriques, pyroélectriques ou ferroélectriques.

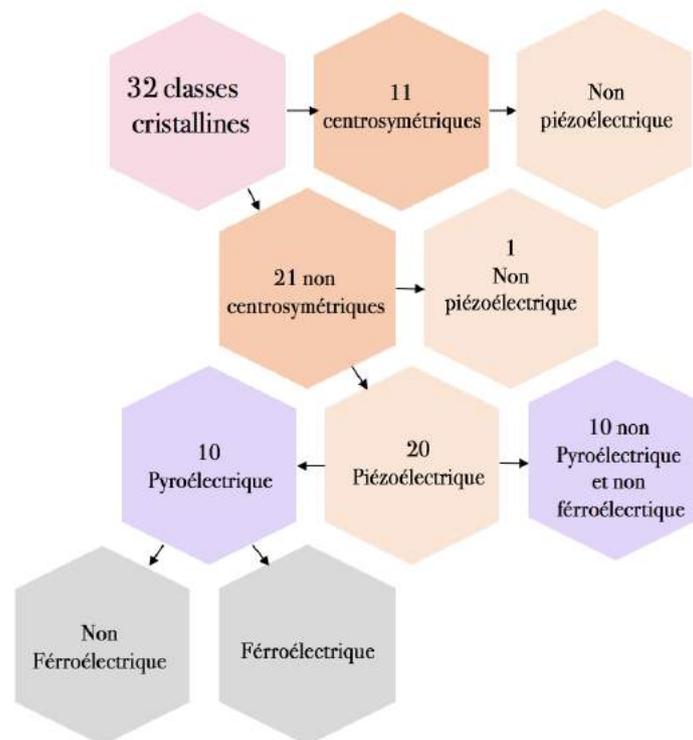


FIGURE 2.2: Hiérarchisation des classes cristallines.

### 2.1.1. Historique

Le philosophe grec Théophraste était le premier à produire des écrits mentionnant l'effet pyroélectrique. Lyngourion est une pierre décrite par ce philosophe et qui a la propriété d'attirer la paille et les copeaux de bois. A cette époque, des pouvoirs magiques et des vertus médicinales ont été attribués à la pierre à cause des croyances limitées.

Des savants en 18<sup>ème</sup> siècle ont menés des expériences sur la tourmaline [14] pour comprendre quelques phénomènes dans le domaine des champs électrostatiques. L'expérience présentée dans la figure. 2.3 a été réalisée par Aepinus pour démontrer que dans la surface de tourmaline existe des charges électrostatiques dont le sens dépend de la température.

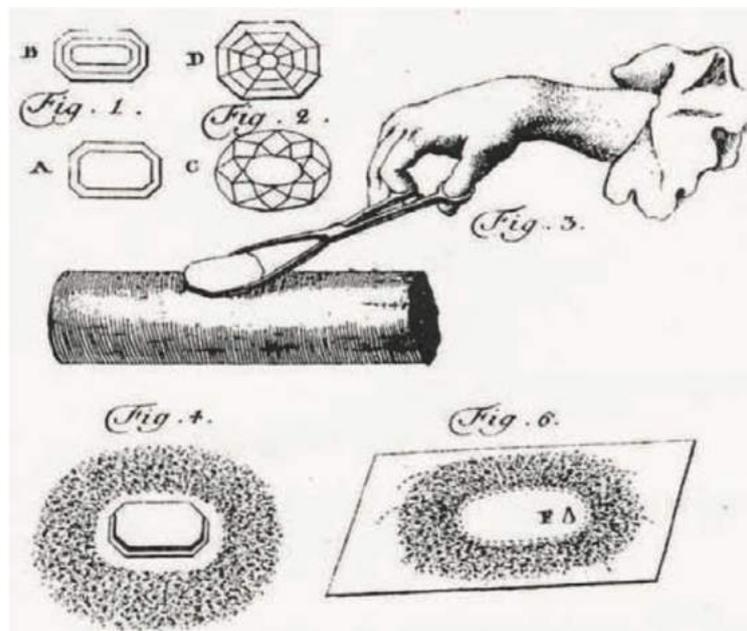


FIGURE 2.3: Expériences menées en 1762, Fig. 3 : pierre de tourmaline chauffée sur un métal, Fig. 4 : poussières repoussées par la pierre, Fig. 6 : Poussières attirées par la pierre [14].

Grâce au développement des appareils de mesure tel que l'électromètre de A. Becquerel et l'appareil de mesure de charge pyroélectrique de J.M. Gaugain, l'effet pyroélectrique eut été décrit. Les travaux qui ont donné naissance au nom « pyroélectricité » étaient ceux menés sur le sel de rochelle par D. Brewster. Lord Kelvin énonça en 1878 les principales théories sur l'effet pyroélectrique. Les travaux menés sur le cristal de quartz par Jacques et Pierre Curie, leur conduisent à supposer que l'apparition des charges électriques était liée à un chauffage non uniforme du matériau. Cette supposition leur poussait également à découvrir l'effet piézoélectrique en 1880. Ces deux frères physiciens ont été les premiers à avoir fait le rapprochement entre la polarisation électrique et l'arrangement atomique du matériau [14, 15]. L'effet pyroélectrique a été donc découvert

avant l'effet piézoélectrique et il est principalement utilisée dans les détecteurs infrarouges ou dans les capteurs de température. Récemment, on constate qu'il pourrait également être utilisé pour la conversion directe de la chaleur en énergie électrique.

### 2.1.2. Principe

L'effet pyroélectrique est défini comme la dépendance de la polarisation spontanée à la température dans certains solides anisotropes. Les matériaux pyroélectriques possèdent donc une polarisation dite spontanée  $P_s$  qui présente une forte dépendance à la température due à la structure cristallographique du matériau [15]. La structure cristalline d'un matériau pyroélectrique doit avoir un moment dipolaire différent de zéro. Dans la plupart des monocristaux et des céramiques, une augmentation de la température fait diminuer le moment dipolaire, par conséquent, diminution de la polarisation spontanée. La quantité de charge liée diminue alors, et la redistribution des charges libres pour compenser la variation de la charge liée. Ce déplacement de charge génère un courant : courant pyroélectrique [14, 54]. Au moment où la température devient homogène au sein du matériau, le courant pyroélectrique tend à s'annuler. En refroidissant le matériau pyroélectrique, le sens du courant s'inverse et la polarisation augmente.

Pour expliquer la pyroélectricité du point de vue microscopique, le déplacement des atomes de leurs positions d'équilibre lors du chauffage et du refroidissement entraîne l'effet pyroélectrique. La figure. 2.4 illustre un élément unitaire d'un cristal  $BaTiO_3$ . La polarisation spontanée aura lieu quand les atomes se déplacent de leurs position d'équilibre [15].

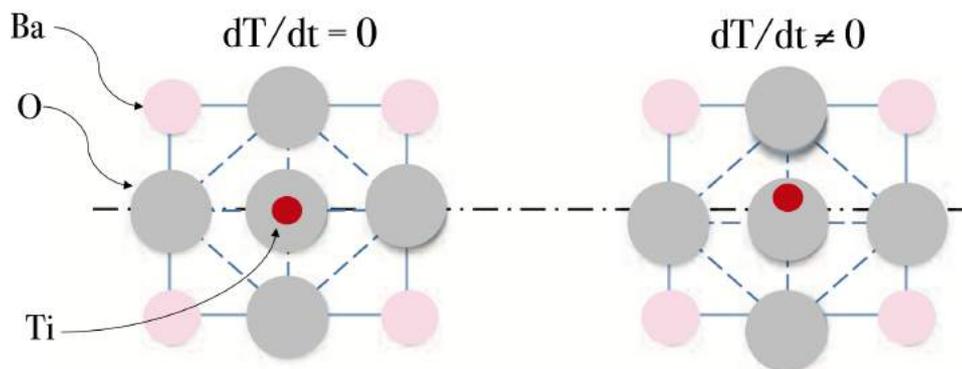


FIGURE 2.4: cristal élémentaire de  $BaTiO_3$ . (a) température constante et (b) variations de température.

D'une manière simple, pour observer l'effet pyroélectrique, un matériau pyroélectrique doit être soumis à une variation de température et mis entre deux électrodes conducteurs en connectant l'ensemble à un ampèremètre comme le montre la figure. 2.5 qui illustre le processus d'apparition du courant pyroélectrique.

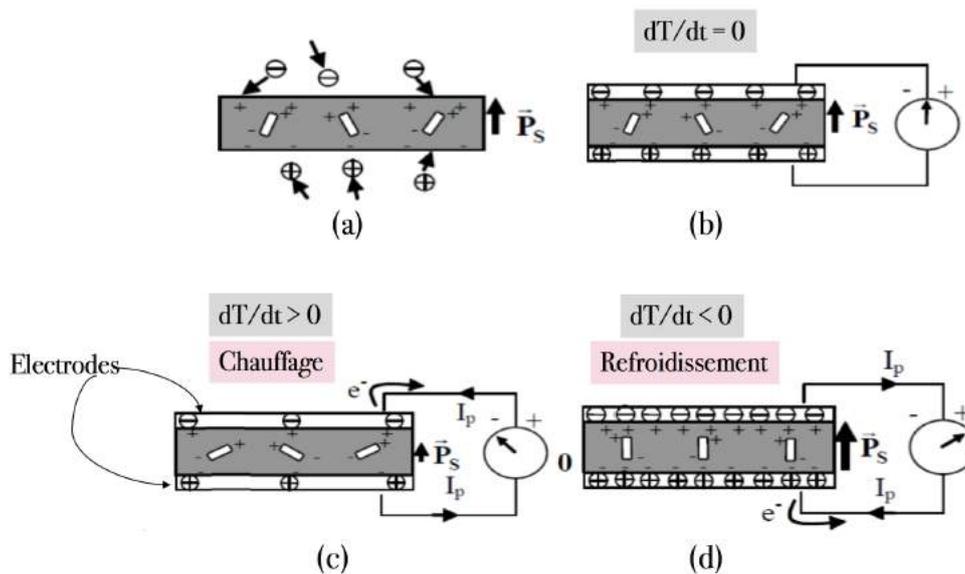


FIGURE 2.5: Principe de l'effet pyroélectrique [15].

En raison de la polarisation spontanée du matériau, des charges libres s'accumulent à la surface du matériel (Fig. 2.5(a)). A température constante, la polarisation spontanée est constante et aucun courant ne circule comme illustré sur la figure. 2.5(b). Une élévation de la température réduit la polarisation spontanée, Il en résulte une diminution de la quantité de charges liées aux électrodes, et la redistribution des charges conduit à la circulation d'un courant à travers le circuit externe (Figure. 2.5(c)). Si le matériau est refroidi, la polarisation spontanée augmente, et le signe de courant s'inverse comme illustré à la figure. 2.5(d).

### 2.1.3. Modélisation de l'effet pyroélectrique

Un certain nombre d'effets électrique se produit lorsque le cristal subit un changement de température, ces effets qui dépendent des contraintes thermiques, mécaniques et électriques sur le cristal sont tous regroupés sous l'effet pyroélectrique. Le changement de la polarisation spontanée  $P_s$  induite dans le cristal à contraintes  $s$  et champ électrique  $E$  constants est défini par [55] :

$$\left(\frac{\partial P_s}{\partial T}\right)_{E,s} = \left(\frac{\partial P_s}{\partial T}\right)_{E,e} + \left(\frac{\partial P_s}{\partial e}\right)_{E,s} \left(\frac{\partial e}{\partial T}\right)_{E,s} \quad (2.1)$$

avec "e" désigne la déformation mécanique.

L'équation.2.1 est composée de deux termes. La première composante est liée au changement de la polarisation en fonction de la température lorsque les dimensions du cristal sont fixes. La deuxième composante est liée à la déformation du cristal. Le premier et le second terme sont

appelés respectivement coefficient pyroélectrique primaire  $p_1$  ou réel et coefficient pyroélectrique secondaire  $p_2$ . On peut écrire donc les deux coefficients pyroélectriques comme [14, 56] :

$$p_1 = \frac{\partial P_s}{\partial T} \quad (2.2)$$

$$p_2 = \left( \frac{\partial P_s}{\partial e} \right)_{E,s} \left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_{E,s} = \left( \frac{\partial P_s}{\partial s} \right)_{E,s} \left( \frac{\partial s}{\partial e} \right)_{E,s} \left( \frac{\partial e}{\partial T} \right)_{E,s} = dc\alpha \quad (2.3)$$

où  $d$ ,  $c$  et  $\alpha$  sont respectivement les coefficients de piézoélectricité, d'élasticité et d'expansion thermique qui caractérisent les cristaux. Cette composante s'annule lorsque le cristal est incapable de se déformer en présence d'une variation de la température.

La figure. 2.6 illustre graphiquement la différence entre l'effet pyroélectriques primaire et secondaire. L'effet primaire est en trait rouge plein et l'effet secondaire est en trait rouge discontinu.

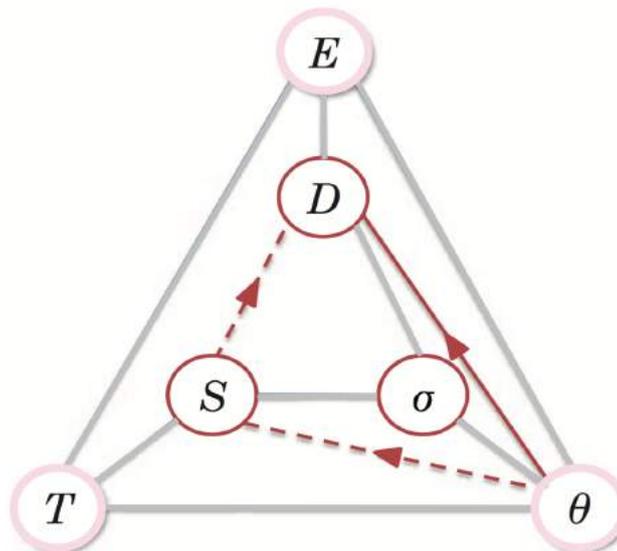


FIGURE 2.6: Effet pyroélectrique primaire et secondaire [15].

Lorsqu'on parle de la récupération d'énergie à partir de la chaleur, il faut d'abord établir les équations des matériaux pyroélectriques [57]. En supposant que les matériaux pyroélectriques ne présentent aucune perte et ils ont des propriétés purement linéaires, les équations constitutives s'écrivent donc comme :

$$dD = \epsilon_{33}^T dE + pdT \quad (2.4)$$

$$d\sigma = pdE + c_E \frac{dT}{T} \quad (2.5)$$

Où  $D$ ,  $E$ ,  $T$  et  $\sigma$  sont le déplacement électrique, le champ électrique, la température et l'entropie, respectivement. Les coefficients sont définis comme suit :

$$\varepsilon_{33}^T = \left( \frac{\partial D}{\partial E} \right)_T \quad (2.6)$$

$$p = \frac{\partial D}{\partial T} = \frac{\partial \sigma}{\partial E} \quad (2.7)$$

$$c_E = \frac{\partial U}{\partial T} \quad (2.8)$$

où  $U$ ,  $\varepsilon_{33}^T$ ,  $p$ ,  $c_E$ , représentent respectivement l'énergie interne, la permittivité diélectrique, le coefficient pyroélectrique et la capacité calorifique.

Par Analogie avec le travail de Lefevre et al. [12], la puissance récupérée [58] dans le cas de pyroélectricité peut être définie comme :

$$P_{max} = \frac{p^2 T^2}{2\pi \varepsilon_{33}^T} f \quad (2.9)$$

où  $f$  est la fréquence. En conséquence, l'énergie récupérée pour un cycle par unité de volume est donnée par :

$$W_{max} = \frac{p^2 T^2}{2\pi \varepsilon_{33}^T} \quad (2.10)$$

Un facteur de mérite pour la récupération d'énergie peut être définie par :

$$F = \frac{p^2}{\varepsilon_{33}^T} \quad (2.11)$$

A partir de l'équation [2.11], les propriétés pyroélectriques des matériaux sont les facteurs les plus importants pour la récupération d'énergie.

#### 2.1.4. Récupération de l'énergie par effet pyroélectrique

##### 2.1.4.1. Concept globale de la récupération de l'énergie par effet pyroélectrique

L'effet pyroélectrique peut être mis en profit dans les systèmes de production d'énergie électrique à partir de la chaleur pour satisfaire les demandes de puissance des dispositifs électroniques. Les matériaux à forte activité pyroélectrique correspondent toujours à des variations de polarisation plus importantes, ce qui permet d'augmenter considérablement l'énergie récupérée.

Les avantages de la conversion d'énergie pyroélectrique sont doubles. D'une part, elle ne nécessite pas des températures élevées, pas de gradient spatial de température comme le cas des

générateurs thermoélectriques mais uniquement des variations temporelles de température. D'une autre part, des températures faibles peut faire fonctionner un matériau pyroélectrique et qu'aucune pièce en mouvement n'est nécessaire (comme le cas des matériaux piézoélectriques), ainsi que les systèmes de génération de puissance pyroélectrique présente une excellente fiabilité et une longue durée de vie

#### 2.1.4.2. Evolution de la récupération de l'énergie par effet pyroélectrique

Depuis la fin des années 50, l'étude de l'effet pyroélectrique pour la production de l'énergie n'a été faite que par un petit nombre de chercheurs. Les principes de la conversion directe de l'énergie thermique directement en énergie électrique ont été étudié initialement par différents chercheurs [59, 60, 61]. Les recherches menées concernent l'étude de la performance théorique des matériaux, ainsi la détermination des propriétés du matériau diélectrique de base, tels qu'un très grand déplacement électrique, une très grande tension de claquage et une forte dépendance à la température du déplacement électrique, nécessaires pour une production d'énergie significative. En effet, Une forte dépendance du déplacement électrique à la température est nécessaire pour maximiser la puissance électrique qui peut être générée du matériau pyroélectrique lorsqu'il est chauffé et refroidi. Fatuzzo et al [62] ont mené une étude qui traite l'utilisation de différents types de cycles de production d'énergie pour étudier l'efficacité d'un convertisseur d'énergie thermique. Un calcul et une comparaison de l'énergie thermique stockée par leurs matériaux pyroélectriques ont été établis. Une autre étude dans le domaine de la production d'énergie pyroélectrique a été effectué [63] en proposant un convertisseur pyroélectrique à plusieurs étages qui fonctionne entre 300 et 1500 K avec un rendement maximal prévu de 14 %.

Olsen et al. [64, 65, 66] ont proposé le premier cycle de conversion pyroélectrique nommé « cycle Olsen » ou « cycle Ericsson ». Ils ont mesuré ce cycle thermodynamique en termes de comportement charge-tension c'est à dire la polarisation en fonction de champ électrique appliqué. La gamme de température était entre 23 et 67 °C, chaque cycle de conversion a été capable de générer 30 mJ/cm<sup>3</sup> de densité d'énergie électrique de sortie en appliquant un champ électrique maximal de 55 kV/mm [65]. En se basant sur les travaux précédents, Navid et al. [67] ont testé le cycle Ericsson sur des film copolymères. En plongeant successivement les films dans des bains d'huile de silicone froids et chauds à 25 et 110 °C, les films produisaient une densité d'énergie maximale de 521 J/L comme le montre la figure suivante :

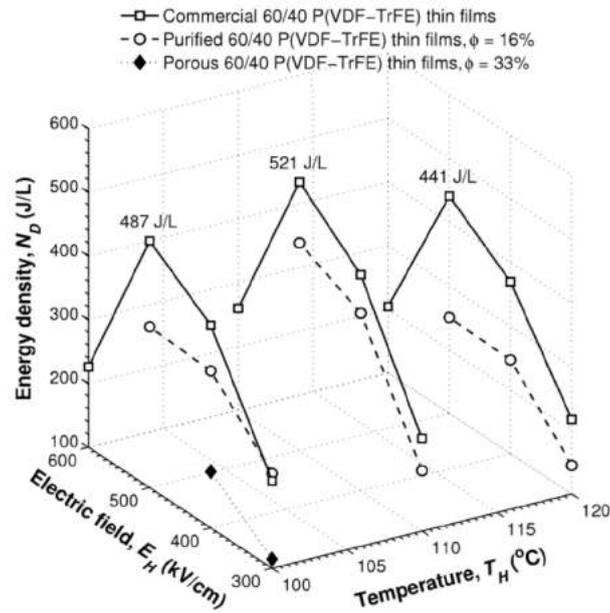


FIGURE 2.7: Densité d'énergie produite par différents films copolymères [67].

Le domaine de la conversion pyroélectrique ne cessait pas d'évoluer et a connu un grand avancement et des progrès significatives. Guyomar et al. [68] ont étudié la faisabilité de la récupération de l'énergie thermique sur film PVDF combinée à la technique de la récupération synchronisée par interrupteur (SSHI). Pour des variations de température de 0, 5 à 8 K, le rendement de conversion était d'environ 0,02 % du cycle thermodynamique de Carnot, et la technique SSHI augmente l'énergie convertie par un facteur de 2,5 (Voir figure 2.8).

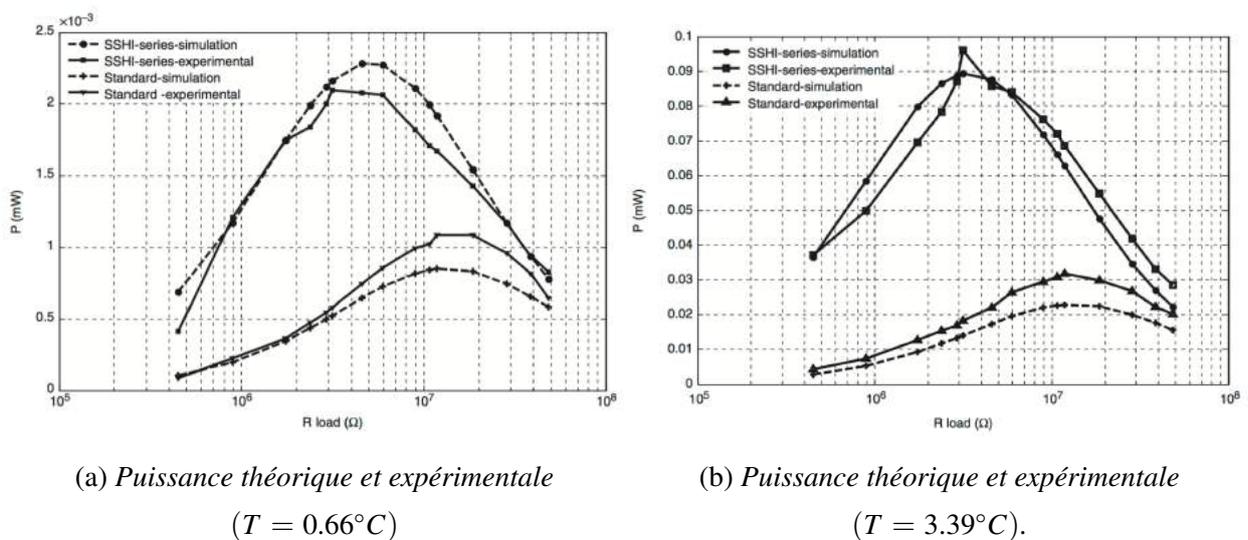


FIGURE 2.8: Puissance récupérée en fonction de la résistance optimale [68].

En ce qui concerne les études de simulation, Sebald et al. [69] ont simulé la récupération d'énergie pyroélectrique en utilisant des propriétés pyroélectriques d'un matériau de type céramique. Ils ont étudié la puissance de sortie en fonction du coefficient d'échange de chaleur pour une variation de température de  $20^\circ\text{C}$  en prenant en considération le problème de l'échange thermique sur la surface de l'élément pyroélectrique.

$$Q = -\frac{h}{e} (\theta - \theta_{ext}) \quad (2.12)$$

où  $h$ ,  $e$  et  $\theta$  sont respectivement le coefficient d'échange thermique, l'épaisseur de l'échantillon et la température.

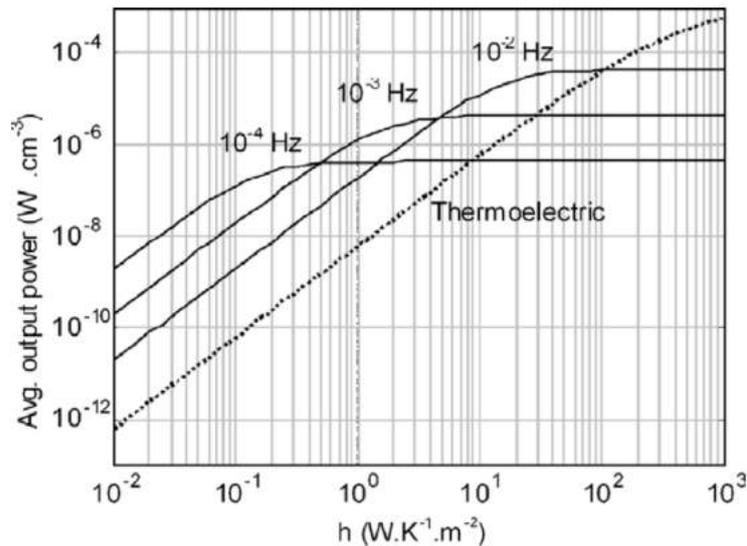


FIGURE 2.9: Puissance de sortie par effet pyroélectrique et thermoélectrique,  $T = 20^\circ\text{C}$  [69].

En négligeant les pertes diélectriques, l'augmentation de l'échange de chaleur ou la fréquence de variation de la température entraîne une augmentation de la puissance récupérée. Sebald et al. [69] ont également étudié la récupération d'énergie pyroélectrique en utilisant la transition de phase ferroélectrique-paraélectrique dans une céramique ferroélectrique. Sur la base des cycles d'Ericsson, l'énergie récupérée atteignait  $186 \text{ mJ}/\text{cm}^3$  avec une variation de température de  $50^\circ\text{C}$  et un cycle de champ électrique de  $3,5 \text{ kV}/\text{mm}$ .

Les travaux de cette thèse, seront donc la suite de cette évolution dans le domaine de la récupération thermique par effet pyroélectrique en proposant une nouvelle approche qui ne nécessite aucune excitation extérieure (champs électrique par exemple) autre que les fluctuations de température. Nous aborderons dans les sections qui suivent les différentes sources de variation de

température en étudiant les trois modes de transfert de chaleur afin d'introduire les techniques de chauffage utilisées dans nos travaux de recherche sachant que nous avons utilisé expérimentalement le transfert thermique par radiation infrarouge et par convection (naturelle et forcée) pour la production d'énergie électrique via un matériau présentant la propriété de pyroélectricité.

## 2.2. Généralités sur les transferts thermiques

Le transfert thermique est un transfert énergétique entre deux corps ayant des températures différentes [70]. L'échange naturel de chaleur se fait principalement du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Au niveau microscopique, l'énergie thermique est associée aux vibrations des atomes et des molécules. Par conséquent, il peut être vu comme une forme d'énergie cinétique. La température est en effet une mesure de ces vibrations. Le transfert de chaleur entre deux corps à différentes températures est un échange d'énergie cinétique au niveau microscopique. Le corps à haute température transmet l'énergie à la basse température, atteignant finalement l'équilibre thermique. La tendance à l'équilibre thermique, voire à la distribution de l'énergie cinétique, est une expression de la seconde loi de la thermodynamique.

Le transfert de chaleur est considéré comme le processus de base de toutes les industries. Pendant le processus de transfert de chaleur, un milieu à une température plus élevée transfère son énergie sous forme de chaleur à un autre milieu à une température plus basse. Le milieu peut transférer sa chaleur à travers différents mécanismes. Ces mécanismes de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement. Le rayonnement n'est pas un mode de transfert de chaleur très commun dans les industries, mais dans certains procédés, il joue un rôle essentiel dans le transfert de chaleur, par exemple dans un four de combustion. La conduction et la convection, sont les modes de transfert de chaleur les plus rencontrés dans les industries.

### 2.2.1. Notion élémentaires

#### 2.2.1.1. Champs de température

Les transferts thermiques sont principalement liés à l'évolution de la température dans le temps et dans l'espace. À un temps donné et en tout point de l'espace, la valeur de température est un champ scalaire nommé champ de température est défini mathématiquement par l'équation suivante :

$$T = f(x, y, z, t) \quad (2.13)$$

Le champ de température peut être sous deux formes :

- Stationnaire ou Permanent. Il est indépendant du temps, on parle alors de champ de température en régime permanent
- Instationnaire ou Transitoire. Il évolue avec le temps, on parle alors de champ de température en régime transitoire.

### 2.2.1.2. Surface isothermes

Une surface isotherme est caractérisée par une température identique à chaque point et à chaque instant. En régime stationnaire les surfaces isothermes sont invariantes. En régime instationnaire elles sont essentiellement mobiles et déformables [70].

À l'instant  $t_1$ , un point dans une surface isotherme ne pouvant avoir qu'une seule température. La surface satisfait donc l'équation suivante :

$$f(x, y, z, t) = T_1 \quad (2.14)$$

avec  $T_1$  la température commune à tous les points de la surface isotherme.

### 2.2.1.3. Flux thermique et densité de flux thermique

La quantité de chaleur qui traverse une surface  $S$  par unité de temps, est appelé flux thermique exprimé par :

$$\phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} dS \quad (2.15)$$

où  $\phi$ ,  $t$ ,  $\lambda$  sont respectivement le flux de chaleur ( $W$ ) et la quantité de chaleur ( $J$ ), le temps ( $s$ ), la conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ ).

La densité de flux de chaleur est la quantité de chaleur transmise par unité de temps et de surface, elle est définie par :

$$\varphi = \frac{d\phi}{dS} \quad (2.16)$$

où  $\varphi$  la densité de flux de chaleur ( $W.m^{-2}$ ),  $d\phi$  le flux de chaleur ( $W$ ) et  $dS$  La surface ( $m^2$ ).

## 2.2.2. Les différents types de transfert thermique

### 2.2.2.1. Transfert conductif

La conduction est une transmission de chaleur entre deux corps en contact physique. Le transfert conductif existe seulement lorsqu'un écart de température existe, c'est à dire un gradient de température non nul. Dans le cas où le gradient de température est nul, le milieu est en équilibre

thermique et aucun transfert de chaleur ne peut se produire. La transmission de la chaleur par conduction est décrite par l'équation de Fourier [71].

$$\vec{\varphi}(x, y, z, t) = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}(x, y, z, t) \quad (2.17)$$

Notons que le signe négatif signifie que l'énergie thermique se propage du chaud vers le froid, c'est à dire dans le sens des températures décroissantes.  $\vec{\varphi}$  et  $\overrightarrow{\text{grad}T}$  sont de signe opposé.

En régime transitoire, le champ de température constitue la solution d'une équation aux dérivées partielles nommée équation de la chaleur et définit par :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.18)$$

avec  $\frac{\partial T}{\partial t}$  présente le gradient de température,  $\rho$  et  $C_p$  sont respectivement la masse volumique exprimée en  $Kg.m^{-3}$  la chaleur massique exprimée en  $Jkg^{-1}K^{-1}$ .  $\lambda$  est un terme se ramène à une caractéristique intrinsèque et uniforme de chaque matériau solide appelée conductivité thermique qui constitue un paramètre de référence dans les études de transferts de chaleur en régime permanent. En régime transitoire, un terme doit être introduit, appelé diffusivité thermique « a » et qui traduit la capacité du matériau à diffuser la chaleur. La diffusivité thermique caractérise la vitesse de propagation d'une sollicitation thermique [72]. La conductivité et la diffusivité sont reliées par la relation suivante :

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (2.19)$$

### 2.2.2.2. Transfert radiatif

Le transfert thermique par radiation est un mode de transmission de chaleur qui ne nécessite aucun support physique. Il présente un échange thermique entre des corps sans contact physique, donc il est considéré comme le mode de transfert thermique privilégié des corps séparés par le vide ou tout autre milieu interstitiel permettant le passage des radiations : air, gaz transparents, milieux semi-transparentes. En générale, tout corps dont la température est différente de zéro absolue peut émettre une énergie sous forme de rayonnement. Ce rayonnement fait partie des radiations électromagnétique classées par les physiciens en fonction de longueur d'onde [3] comme le montre la figure.2.3.

A température supérieure au zéro absolu, le rayonnement émis spontanément et en continue par la matière est régi par la loi de Stefan-Boltzmann

$$q_r = \varepsilon \kappa T^4 \quad (2.20)$$

où  $q_r$  est la densité de flux de chaleur radiante ( $W.m^{-2}$ ),  $\varepsilon$  est l'émissivité du matériau,  $\kappa$  est la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67.10^{-8} Wm^{-2}k^{-4}$ ) et  $T$  représente la température du matériau ( $K^\circ$ )

Autour de nous, de nombreux exemples concrets d'échange radiatif existe. Citons l'exemple du rayonnement solaire. Les rayonnements qui nous parviennent sont visibles (lumière) et invisibles (infrarouge et ultra-violet). Quand la température de la source radiative est faible, les rayonnements mis en jeu ne sont que des rayonnements invisibles comme le cas des fours de cuisson ou encore les plaques de cuisson électriques. Le corps humain, un bâtiment, un arbre ... sont des corps dont la température est proche de celle de l'environnement. L'émission radiative est beaucoup plus faible et donc moins sensible dans le cadre d'une approche quantitative. Ce rayonnement est composé de longueurs d'ondes différentes dont l'intensité dépend de la température du corps. Il se propage en ligne droite dans le vide, à la vitesse de la lumière.

Un parmi les rayonnements électromagnétiques, on fait appel au rayonnement infrarouge qui se caractérise par une émission d'ondes depuis un corps chauffant provoquant une élévation de température du récepteur. Il s'agit donc d'une technique de chauffage qui ne nécessite pas un milieu intermédiaire pour transférer l'énergie thermique car les infrarouges ne sont pas absorbés par l'air. Le rayonnement infrarouge a été nommé chaleur radiative et découvert par William Herschel en étudiant le spectre solaire. Le spectre infrarouge se divise en trois parties comme le montre la figure 2.10.

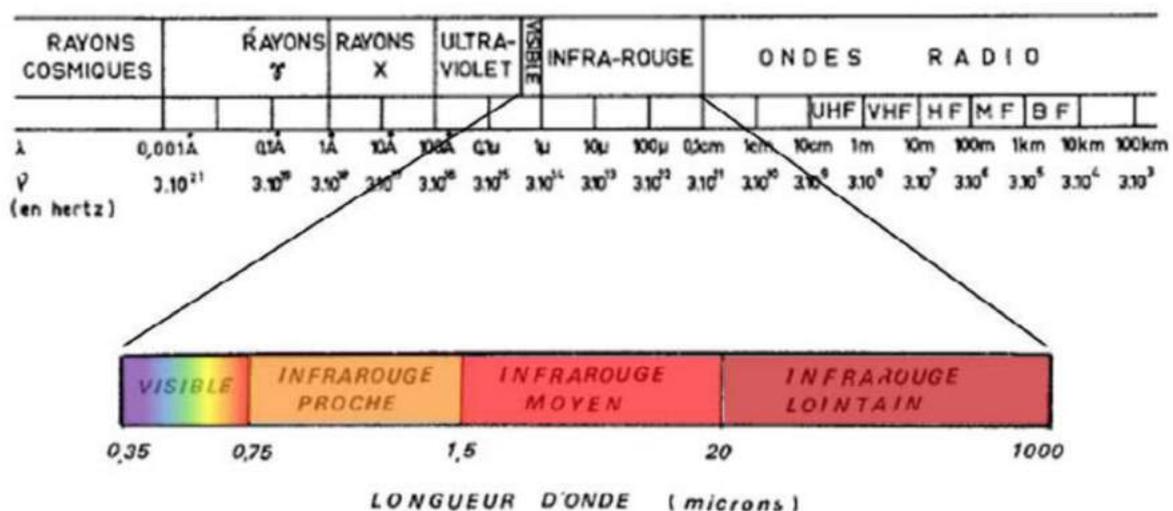


FIGURE 2.10: Ondes électromagnétiques [16].

L'infrarouge proche correspond à la bande de longueur d'onde allant de de 0,75 à 1,5 m et il est détecté par les cellules photoémissives, les émulsions photographiques, les détecteurs pho-

toconducteurs et photovoltaïques. L'intervalle de longueur d'onde de 1,5 à 20  $\mu\text{m}$  correspond à l'infrarouge moyen qui peut être détecté par les détecteurs thermiques, photoconducteurs et photovoltaïques. L'infrarouge lointain correspond aux longueurs d'onde de 20 à 1000  $\mu\text{m}$  et ce type de rayonnement est détecté par les détecteurs thermiques.

Nous avons abordé le rayonnement infrarouge car nous l'avons utilisé dans nos travaux de recherche pour chauffer un échantillon pyroélectrique afin de produire l'énergie électrique. L'intérêt du chauffage choisi est que l'inertie thermique est faible donc le temps de chauffage est assez court. La technique utilisée, les résultats obtenus et le domaine d'application sont exposés dans le troisième chapitre de ce manuscrit.

### 2.2.2.3. *Transfert convectif*

La convection est un phénomène très vaste qui fait partie de la mécanique des fluides que nous ne pourrions pas présenter et aborder tous ces aspects. Nous nous sommes intéressés à la convection thermique découverte par le physicien Bénard au 18<sup>ème</sup> siècle. C'est un phénomène qui se produit lorsqu'un fluide meurt sous l'action d'une force créée par un gradient de température. Dans cette thèse nous nous sommes intéressés plus précisément à la convection Rayleigh-Bénard qui traduit la soumission d'un fluide à un gradient de température c'est à dire chauffé par le dessous et refroidi par le dessus. Cette configuration fait apparaître une instabilité à cause de la variation de la masse volumique du fluide chaud (léger), et fluide froid (lourd). Le fluide chaud qui est moins dense aura tendance à s'élever tandis que le fluide froid qui est normalement plus dense aura tendance à s'enfoncer.

En effet, la convection thermique est un phénomène que l'on peut rencontrer dans la vie quotidienne, citons le cas le plus fameux lorsqu'on bout de l'eau ou encore lorsqu'on souffle sur les aliments chauds pour les refroidir. Nous pouvons rencontrer la convection thermique dans de nombreux systèmes naturels : astrophysique, géographique . . . comme le cas de la convection thermique dans l'atmosphère [73], ou la circulation thermohaline des océans [17] comme le montre la figure 2.11.

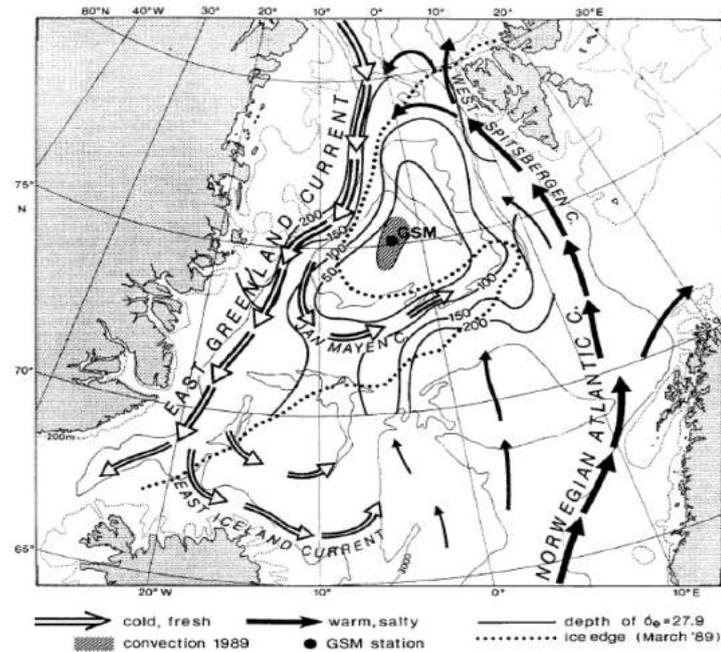


FIGURE 2.11: Convection thermohaline dans les océans [17].

La convection thermique est présente aussi dans le noyau externe [74] ou dans le manteau terrestre [75], elle est ainsi présente dans d'autres systèmes naturels tel que le soleil [76]. En effet. Elle est mise en jeu non seulement dans des systèmes naturels mais aussi dans l'industrie [77] et dans des systèmes artificiels comme les systèmes de ventilation [78].

La convection Rayleigh-Bénard est le cas le plus simple que l'on puisse imaginer. C'est le cas où un fluide est soumis à un gradient de température : source chaude de température  $T_{ch}$  et source froide de température  $T_{fr}$ . Les deux sources seront évidemment séparées par une distance noté  $H$ . comme le montre la figure 2.12.

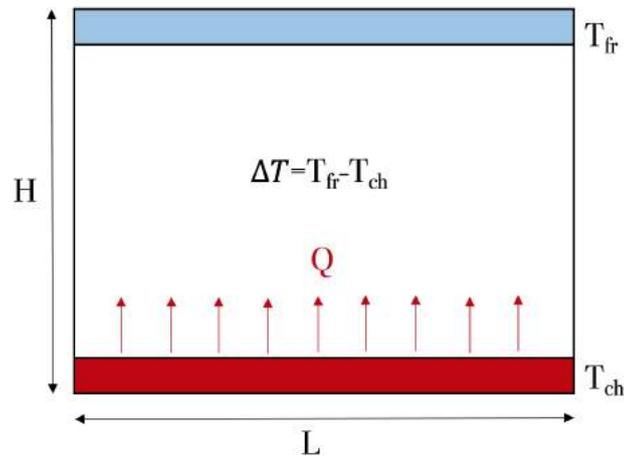


FIGURE 2.12: Schéma d'une cellule de convection de Rayleigh-Bénard.

La différence de température  $\Delta T = T_{ch} - T_{fr}$  imposé au fluide crée une instabilité dans le système. Le fluide chaud se met en mouvement et assure le transfert de chaleur vers le milieu le plus froid. Dans ce système, trois paramètres de contrôle sont mis en jeu :

- Rapport d'aspect lié à la géométrie du système.
- Nombres de Prandtl qui ne dépend que des propriétés du fluide.
- Nombre de Rayleigh lié à la différence de température  $\Delta T$  imposée au système.

### ***Rapport d'aspect A***

Le premier paramètre de contrôle du système convectif est un paramètre géométrique lié à la distance  $H$  qui sépare les sources chaude et froide, et à la largeur du système  $L$ . Le rapport d'aspect  $A$  est défini comme suit :

$$A = \frac{L}{H} \quad (2.21)$$

Ce paramètre a une influence sur le mouvement du fluide [79, 80, 81] donc le transfert thermique dépend de la géométrie du système convectif comme nous allons le prouver expérimentalement dans le quatrième chapitre de ce manuscrit.

### ***Nombre de Prandtl Pr :***

Ce paramètre caractérise les propriétés thermiques du fluide, il traduit la rapidité des phénomènes thermique et hydrodynamique dans un fluide. En effet, chaque fluide possède de nombreuses grandeurs caractéristiques qui ne dépendent essentiellement que de la température. Citons la masse volumique  $\rho$ , la capacité calorifique  $C_p$ , la conductivité thermique  $\lambda$ , la viscosité dynamique  $\eta$ , et

le coefficient de dilatation  $\beta$ . La viscosité cinématique  $\nu$  et la diffusivité thermique  $a$  peuvent être définies à partir de ces grandeurs caractéristiques du fluide. La diffusivité thermique est définie par l'équation (Fig. 2.11) et la viscosité cinématique est donnée par :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.22)$$

Le nombre de Prandtl  $Pr$  est défini comme le rapport entre la viscosité cinématique  $\nu$  et la diffusivité thermique  $a$ , soit :

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (2.23)$$

Ce nombre sans dimension permet d'évaluer l'efficacité du transport diffusif de chaleur par rapport au transport de quantité de mouvement. C'est une grandeur intrinsèque au fluide utilisé. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que le transfert thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. Dans la littérature, plusieurs fluides ont été utilisés afin d'étudier la convection thermique. L'eau [82], glycérol [83], mercure [84, 85] et l'air [86]. Dans nos travaux de recherche, nous avons testé quatre fluides différents pour optimiser notre système de récupération d'énergie par convection Rayleigh-Bénard dont le principe de cette étude sera présenté dans le quatrième chapitre de ce manuscrit.

#### ***Nombre de Rayleigh $Ra$ :***

Le nombre de Rayleigh  $Ra$  est un paramètre de contrôle caractérisant le transfert de chaleur au sein d'un fluide. Plus le nombre de Rayleigh est grand, plus le transfert convectif est intense. Il s'écrit sous la forme :

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu a} \quad (2.24)$$

où  $\beta$  le coefficient de dilatabilité du fluide,  $H$  la dimension caractéristique,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide et  $a$  la diffusivité thermique du fluide.

Le nombre de Rayleigh peut s'écrire en fonction de nombre de Prandtl et de nombre de Grashof :

$$Ra = Gr \times Pr \quad (2.25)$$

Le nombre de Rayleigh constitue un paramètre suffisant pour identifier la présence de convection au sein du fluide. Au delà d'une valeur critique noté  $Ra_c$  la convection libre ou naturelle est

mise en jeu. Tandis qu'à une valeur inférieure à  $Ra_c$  le transfert s'opère uniquement par conduction et il n'y a aucun mouvement de fluide.

Pour conclure nous allons étudier expérimentalement l'influence des paramètres sans dimensions abordés dans cette section, sur le transfert thermique par convection dans le but d'optimiser le système de récupération d'énergie thermique par convection via des matériaux pyroélectriques.

## Conclusion

L'UN des avantages de l'effet pyroélectrique est que l'on converti directement l'énergie thermique en énergie électrique même en présence d'une faible variation de température. Au cours de ce deuxième chapitre, nous avons mené une étude approfondie sur l'effet pyroélectrique et les transferts thermiques dans le but d'introduire nos travaux de recherche qui portent essentiellement sur la récupération d'énergie thermique via l'effet pyroélectrique. Comme nous l'avons déjà évoqué, les déperditions en énergie thermique étant très importantes qui rendent, la récupération sur ce type d'énergie, relativement facile. Dans les travaux de cette thèse, nous nous sommes intéressés par les transferts radiatif et convectif comme deux techniques de création des variations de température dans le but de faire fonctionner l'échantillon pyroélectrique et produire gratuitement l'énergie électrique. Le chauffage par radiation infrarouge est rapide et présente des applications prometteuses dans le domaine de la récupération d'énergie. Le chauffage par convection est une méthode pertinente qui assure des fluctuations de température à partir d'une source de température fixe. L'importance des convections réside sur le fait qu'elle est présente dans de nombreux procédés industriels : refroidissement d'appareils électriques, collecteurs solaires, chauffage des locaux ou encore les centrales nucléaires. Nous proposons dans le chapitre suivant une étude expérimentale de la récupération d'énergie thermique par rayonnement infrarouge via une céramique pyroélectrique tout en optimisant et améliorant le banc expérimental dans le but de maximiser la puissance récupérée.

# RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES RADIATIONS INFRAROUGES

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	52
<b>3.1 RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE DES RAYONNEMENTS INFRAROUGES</b> . . . . .	53
<b>3.1.1 Choix du matériau pyroélectrique : Céramique PZT</b> . . . . .	53
<b>3.1.2 Structure Cristalline de Céramique PZT</b> . . . . .	55
<b>3.1.3 Caractéristiques de céramique PZT utilisée.</b> . . . . .	55
<b>3.1.4 Mesure du coefficient pyroélectrique</b> . . . . .	57
<b>3.1.5 Modélisation de l'effet pyroélectrique par schéma équivalent</b> . . . . .	59
<b>3.1.6 Etude expérimentale</b> . . . . .	61
<b>3.1.6.1 Dispositif expérimentale et techniques de mesures</b> . . . . .	61
<b>3.1.6.2 Validation de la méthode utilisée</b> . . . . .	63
<b>3.1.6.3 Résultats &amp; discussions</b> . . . . .	65
<b>3.2 OPTIMISATION ET AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR RAYON-</b> <b>NEMENT INFRAROUGE</b> . . . . .	70
<b>3.2.1 Effet de la surface de matériau pyroélectrique sur la puissance récupérée</b> . . . . .	71
<b>3.2.2 Résultats &amp; discussion</b> . . . . .	72
<b>CONCLUSION</b> . . . . .	75

## Introduction

LE rayonnement infrarouge est un rayonnement spontané émis par les objets en fonction de leur température. En raison de l'invisibilité de ce type de rayonnement à l'oeil nu, un système de détection est nécessaire. La détection du rayonnement infrarouge présente un grand intérêt pour une large gamme d'applications [87, 88, 89]. Les détecteurs infrarouges à haute sensibilité peuvent facilement détecter tout objet ou corps en mouvement et leur progrès n'a cessé d'augmenter pour développer des systèmes de détection plus légers, moins coûteux et plus efficaces. Cette révolution technologique a conduit au développement des détecteurs pyroélectriques qui ont permis de passer des systèmes très lourds et très coûteux à des systèmes compacts et portables, ainsi qu'ils fonctionnent avec un temps de réponse beaucoup plus court car les matériaux pyroélectriques sont très sensibles à la variation de température, justifiant ainsi leur choix, considéré idéal, dans des applications où une réponse rapide est essentielle. Les détecteurs thermiques pyroélectriques présentent quatre principaux avantages :

- Sensibilité sur une très large bande spectrale sur l'ensemble du spectre électromagnétique, en fonction des caractéristiques d'absorption du matériau pyroélectrique.
- Sensibilité sur une très large gamme de température de quelques degrés à des centaines de degrés, selon les matériaux pyroélectriques.
- Réponse rapide, sur des périodes aussi courtes que les picosecondes.
- Fabrication à faible coût à partir de matériaux peu coûteux.

En outre, les dispositifs pyroélectriques convertissent facilement l'énergie thermique en énergie électrique qui peut ensuite être stockée ou utilisée directement pour alimenter un dispositif électronique particulier. La géométrie relativement petite de ces dispositifs, les rendent utiles et bien adaptés pour être combinés à des appareils portables et miniatures où le câblage est non souhaité, comme le cas des capteurs à distance.

Nous proposons dans ce chapitre une étude expérimentale qui traite la réponse pyroélectrique d'une céramique de type *PZT* en présence des rayonnements infrarouges dans le but de les convertir en électricité. Ce travail sera bien adapté au développement des détecteurs de rayonnement infrarouge autonomes en termes d'énergie, afin de leur donner deux fonctions : la détection de rayonnement infrarouge et la récupération d'énergie pour leur alimentation électrique.

La performance d'un matériau pyroélectrique pour la détection des radiations infrarouges est directement liée à son coefficient pyroélectrique. En effet, pour une plus grande puissance absorbée, le courant pyroélectrique sera plus grand, dans ce contexte, nous avons étudié l'influence

de la distance séparant l'échantillon pyroélectrique de la source de rayonnement sur la tension électrique et sur la puissance récupérée. Nos résultats expérimentaux montrent que la tension électrique et la puissance récupérée ont augmenté de manière significative en diminuant la distance entre la source infrarouge et l'élément pyroélectrique, ce qui indique une amélioration de taux de récupération d'énergie lorsque de courtes distances ont été envisagées.

La première partie de ce présent chapitre présente une description du matériau choisi qui est une céramique commercialisée de type *PZT* justifiant ainsi notre choix pour ce type de matériau en se basant sur des propriétés tel que le coefficient pyroélectrique, la température maximale de fonctionnement et le temps de relaxation, qui jouent un rôle primordial dans la conversion pyroélectrique. Ensuite nous décrivons le banc expérimental dédié à la récupération d'énergie à partir des radiations infrarouges ainsi que les résultats obtenus. La seconde partie est consacrée à la présentation de deux propositions pour améliorer la puissance récupérée : la première consiste à connecter le matériau pyroélectrique à un dispositif de commutation autoalimenté pour mettre en oeuvre la technique *SSH1* dont le principe est expliqué préalablement, et la deuxième consiste à augmenter la surface de matériau pyroélectrique pour augmenter de façon significative la puissance récupérée.

### 3.1. Récupération d'énergie thermique des rayonnements infrarouges

Nous proposons dans cette partie, la conversion d'énergie thermique via un matériau pyroélectrique que nous chauffons par des radiations infrarouges. Dans cette partie de l'étude expérimentale, nous décrivons tout d'abord le matériau pyroélectrique utilisé dans cette étude, ensuite nous présentons une modélisation de la réponse pyroélectrique qui nous permettra de lier le comportement thermique au comportement électrique afin de déterminer les différentes grandeurs de la réponse pyroélectrique telles que la tension électrique en sortie de l'élément pyroélectrique, le courant induit par l'élément pyroélectrique et la puissance récupérée. Finalement nous validons notre technique proposée en exposant nos résultats expérimentaux. Cette étude constitue une première expérimentation pour tester notre céramique *PZT* en terme d'efficacité, de sensibilité en présence d'une variation de température, et en terme de réponse pyroélectrique.

#### 3.1.1. Choix du matériau pyroélectrique : Céramique *PZT*

Certaines propriétés telles que la température maximale de fonctionnement, le temps de relaxation diélectrique et surtout le coefficient pyroélectrique doivent être prises en considération pour effectuer un excellent choix de matériau car elles jouent un rôle très important dans l'estimation de la réponse pyroélectrique ainsi de la plage de température où l'effet pyroélectrique est

exploitable. Les matériaux qui possèdent de forts coefficients pyroélectriques et de faibles temps de relaxation diélectrique, les rendent potentiellement intéressants pour une meilleure conversion pyroélectrique [14, 56, 87].

Plusieurs matériaux présentent la propriété de pyroélectricité que se soit des céramiques, des polymères ou encore des matériaux composites. De nombreux matériaux ont été caractérisés en extrayant leurs propriétés pyroélectriques que nous présentons dans le tableau suivant :

Coefficient Unité	$P$ $\mu C.m^{-2}.K^{-1}$	$\varepsilon_{33}^T$ $\varepsilon_0$	$c_E$ $J.m^{-3}.K^{-1}$	Référence
<i>PLZT 0.5/53/47</i>	360	854	2.5	[90]
<i>PLZT 8/53/47</i>	97	238	2.5	[90]
<i>PLZT 14/53/47</i>	19	296	2.5	[90]
<i>PZT</i>	533	1116	2.5	[91]
<i>PZT / PZT composite</i>	180	1200	2.5	[92]
<i>PZT 700nm</i>	211	372	2.5	[93]
<i>PMZT 700nm</i>	152	255	2.5	[93]
<i>PVDF</i>	33	9	1.8	[94]
<i>PZT / P(VDF - TrFE) 50%</i>	33.1	69.2	2	[91]
<i>PZT / PVCD - HFP50/50 vol%</i>	450	85	2	[95]
<i>PZT0.3/PU 0.7%</i>	90	23	2	[96]

Tableau 3.1: Propriétés pyroélectriques pour différentes catégories de matériaux.

Notre choix de matériau s'est basé principalement sur un coefficient pyroélectrique important, un coût faible et une grande durée de vie. La céramique de type *PZT* (Titano-Zirconate de Plomb) fait notre choix de matériau pyroélectrique pour effectuer nos études expérimentales vu son coefficient pyroélectrique qui vaut  $533 \mu C.m^{-2}.K^{-1}$  [91]. C'est un fort coefficient pyroélectrique, par rapport à ceux des autres matériaux présentés dans le tableau 3.1, qui justifie et explique la raison pour laquelle nous l'avons choisi comme matériau pyroélectrique pour convertir l'énergie thermique en électricité.

Le terme céramique signifie plus précisément un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. D'une façon générale, les céramiques *PZT* sont très rigides et durs, elles résistent à la chaleur, à la corrosion, aux agents chimiques et à l'usure. Leurs liaisons chimiques, leur état cristallin et leur microstructure sont à l'origine de ces excellentes propriétés. Les céramiques *PZT* entrent

actuellement dans la fabrication de nombreux dispositifs électroniques ainsi que leurs propriétés ont été mises en profit par plusieurs chercheurs [97, 98]. Une céramique de type *PZT* avec ses diverses caractéristiques se présente donc comme le meilleur candidat pour répondre aux besoins actuels et futurs dans le domaine de la récupération d'énergie thermique

### 3.1.2. Structure Cristalline de Céramique *PZT*

Les céramiques *PZT* ont une formule générale  $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$  avec  $0 \leq x \leq 1$  et leur structure cristalline est de type pérovskite  $ABO_3$  [99]. La représentation de la maille pérovskite est montrée dans la figure 3.1.

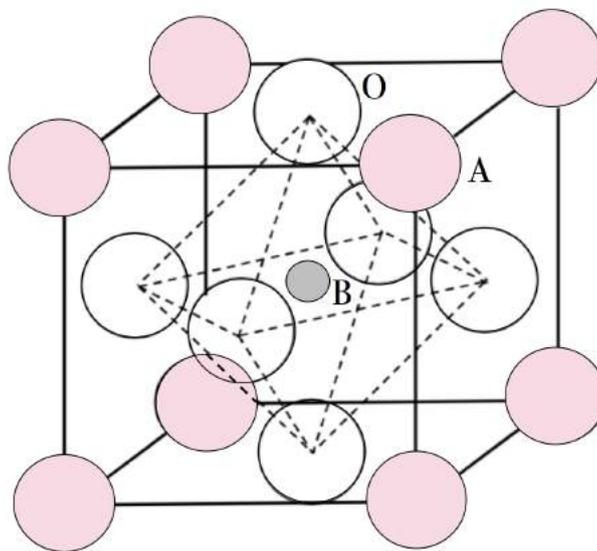


FIGURE 3.1: Maille pérovskite cubique du céramique *PZT*.

L'arrangement atomique se représente par maille cubique. Le cation *A* occupe donc les sommets avec un indice de coordination de 12 atomes proches voisins, les oxygènes se situent au centres des faces et le cation *B* occupe le centre de la maille avec une coordinance de 6 atomes proches voisins. Dans cette structure, le cation *B* se trouve au centre d'un octaèdre d'oxygène, les  $BO_6$  sont reliés par le sommet en formant un réseau tridimensionnel d'octaèdre. Dans le cas du *PZT*, le cation *A* est  $Pb^{2+}$  et le cation *B* est soit un ion  $Zr^{4+}$ , soit un ion  $Ti^{4+}$ .

### 3.1.3. Caractéristiques de céramique *PZT* utilisée.

Le type d'échantillon utilisé dans notre étude expérimentale est un diaphragme piézoélectrique commercialisé par *RadioSpear Components*. Ce diaphragme est connu sous le nom « buzzer ». Il est souvent utilisé dans les microphones car il génère un son lorsqu'une tension lui est appliquée.

Le matériau de base de ce diaphragme est une céramique de type *PZT* qui présente une propriété de piézoélectricité, ce qui prouve son usage pour la conversion électromécanique d'énergie [100]. Dans ce travail, nous avons montré que le diaphragme piézoélectrique peut être un convertisseur thermoélectrique d'énergie car la céramique, outre la piézoélectricité, elle présente la propriété de pyroélectricité [97, 98], c'est-à-dire que le buzzer est capable de générer une tension électrique lorsqu'il est soumis à une variation de température. Il est composé principalement d'une lamelle céramique collée à un substrat en laiton comme le montre la figure 3.2.

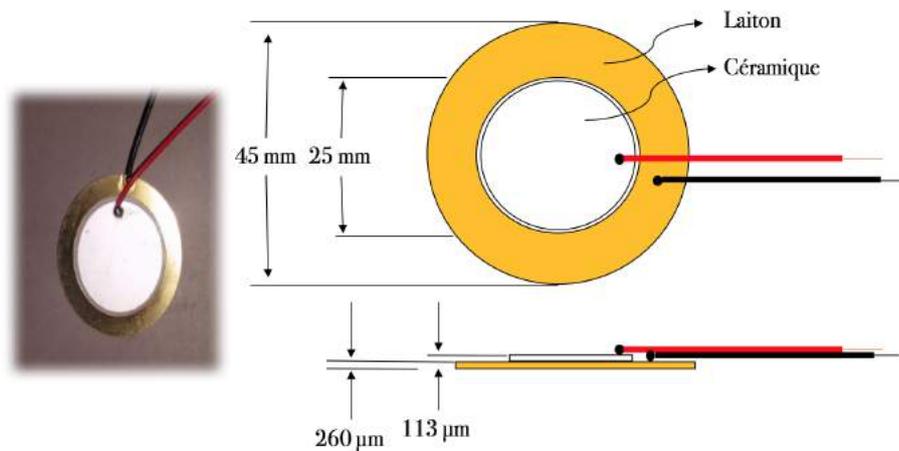


FIGURE 3.2: Présentation de la céramique pyroélectrique.

Les caractéristiques de notre échantillon sont regroupées dans le tableau 3.2. Notons que la valeur du coefficient pyroélectrique présentée dans le tableau est une valeur expérimentale que nous avons mesurée nous même et dont la technique de mesure sera détaillée dans la prochaine section.

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Coefficient Pyroélectrique	$p$	570	$\mu C.m^{-2}.K^{-1}$
Capacité électrique	$C$	90	$nF$
Résistance	$R_p$	30	$K\Omega$
Température maximal de fonctionnement	$T$	450	$C^\circ$
Diamètre	$\phi$	2,5	$cm$
Epaisseur	$e$	113	$\mu m$
Capacité calorifique	$c_E$	2,5	$J.m^{-3}.K^{-1}$

Tableau 3.2: Caractéristiques du céramique *PZT*.

#### 3.1.4. Mesure du coefficient pyroélectrique

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer le coefficient pyroélectrique. Nous nous sommes limités à décrire deux méthodes de mesure : méthode statique, et méthode dynamique.

La méthode statique [101] consiste à mesurer la variation de charge induite en présence de la température. Lorsque le matériau pyroélectrique subit une variation de température, cela crée un déséquilibre des charges à l'interface entre l'échantillon et l'électrode. Pour rétablir la stabilité, les charges sont libérées et apparaîtront aux bornes d'une capacité mis en parallèle avec l'élément pyroélectrique. Ces charges sont ensuite mesurées par un électromètre. Le coefficient pyroélectrique peut être calculé par la relation 3.1 qui le lie avec la variation des charges.

$$P_{moyen} = \frac{\Delta Q}{A(T_2 - T_1)} \quad (3.1)$$

Où  $A$  la surface de l'élément pyroélectrique,  $T_1$  et  $T_2$  sont les températures avec  $T_2 > T_1$ .

La méthode dynamique [101] consiste à mesurer le courant traversant l'électromètre lorsque l'élément pyroélectrique est subit à une rampe de température. Cette technique a été largement utilisée [56, 100] car le temps de mesure est relativement court vu que cette méthode consiste simplement à enregistrer le courant électrique en présence de la variation de température. La relation qui lie le courant et la variation des charges est exprimée par l'équation 3.2 et le coefficient pyroélectrique est ensuite calculé par l'équation 3.1.

$$\Delta Q = \int_0^{\infty} I(t) dt \quad (3.2)$$

Nous avons utilisé la méthode dynamique pour mesurer le coefficient pyroélectrique de notre échantillon. La mesure consiste à plonger l'échantillon dans un bain d'huile thermostaté chaud puis dans un bain d'huile thermostaté à l'ambiante. On mesure continument le courant généré par notre matériau pyroélectrique en fonction du temps. L'intégration de ce dernier nous donne ensuite la variation de charge électrique. Finalement on déduit la valeur du coefficient pyroélectrique en utilisant l'équation 3.1. La température de chaque bain ( $T_2$  et  $T_1$ ) est mesurée par un thermocouple. Le courant  $I(t)$  est mesuré avec un amplificateur de courant *SR570 Stanford RS*. L'acquisition est assurée par un oscilloscope *Agilent Megazoom DSO7034A* et l'intégration est faite numériquement sous *Matlab®*.

Les courbes qui donnent le courant pyroélectrique généré par notre échantillon pour différentes températures  $40^\circ\text{C}$ ,  $60^\circ\text{C}$  et  $80^\circ\text{C}$  sont présentées dans la figure 3.3).

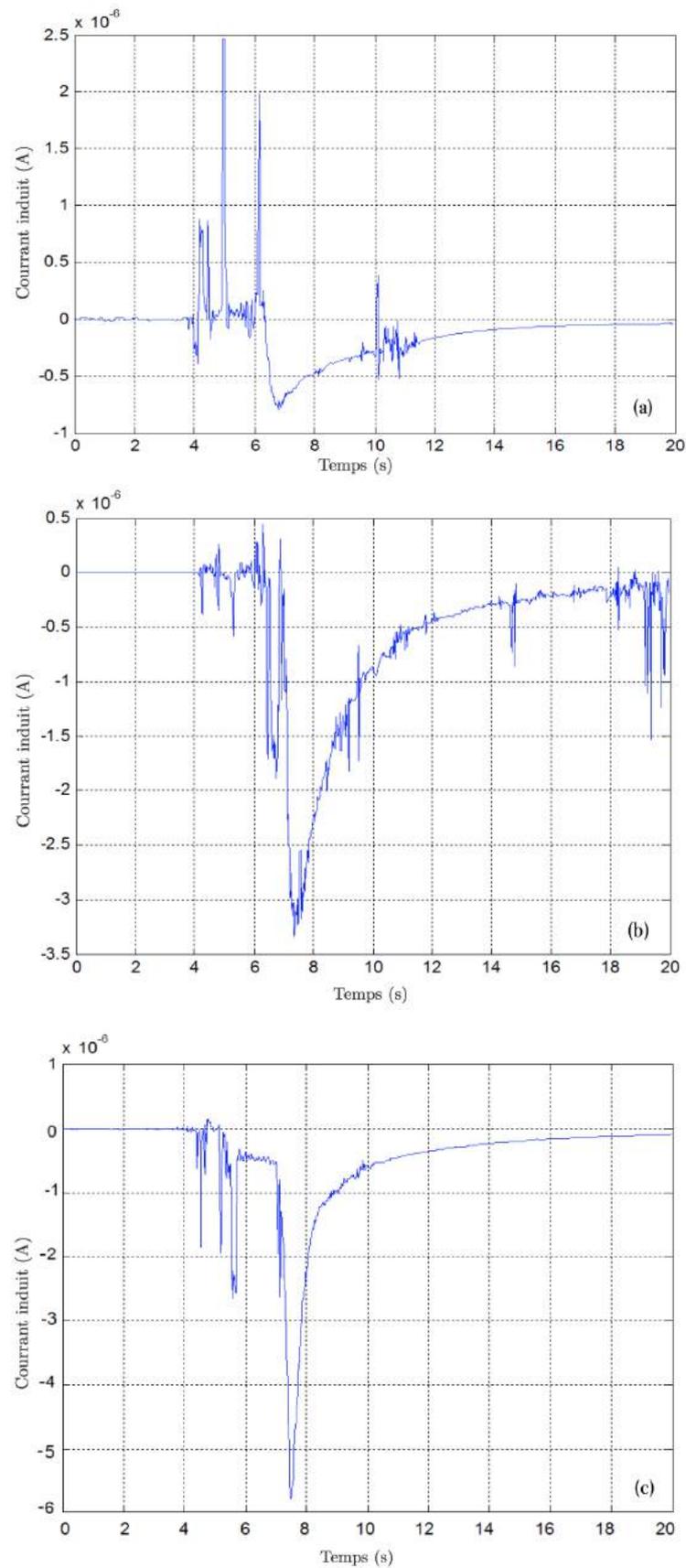


FIGURE 3.3: Courant généré par notre échantillon pour différentes températures : (a)  $40^{\circ}\text{C}$ , (b)  $60^{\circ}\text{C}$  et (c)  $80^{\circ}\text{C}$

Après avoir mesuré le courant généré par notre matériau pyroélectrique pour différentes températures allant de  $40^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $80^{\circ}\text{C}$ , on calcule à partir de l'équation 3.2 la variation de la charge électrique pour déduire par la suite les valeurs de coefficient pyroélectrique en utilisant l'équation 3.1 et qui valent  $542\ \mu\text{C}/\text{m}^2/\text{K}$ ,  $595\ \mu\text{C}/\text{m}^2/\text{K}$  et  $569\ \mu\text{C}/\text{m}^2/\text{K}$  respectivement pour des températures  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  et  $80^{\circ}\text{C}$ . Nous pouvons considérer donc que le coefficient pyroélectrique de notre échantillon est  $570\ \mu\text{C}/\text{m}^2/\text{K}$  en tenant compte bien sûr d'une incertitude égale à  $30\ \mu\text{C}/\text{m}^2/\text{K}$ . Cette valeur du coefficient pyroélectriques est en accord avec les valeurs trouvées dans la littérature [91].

### 3.1.5. Modélisation de l'effet pyroélectrique par schéma équivalent

Plusieurs travaux de recherche ont étudié et traité la modélisation de l'effet pyroélectrique par schéma électrique équivalent [14, 102, 103]. Cette modélisation estime les performances de l'élément pyroélectrique en présence de la variation de température. Le schéma équivalent d'un matériau pyroélectrique connecté à une résistance de charge est illustré dans la figure 3.4.

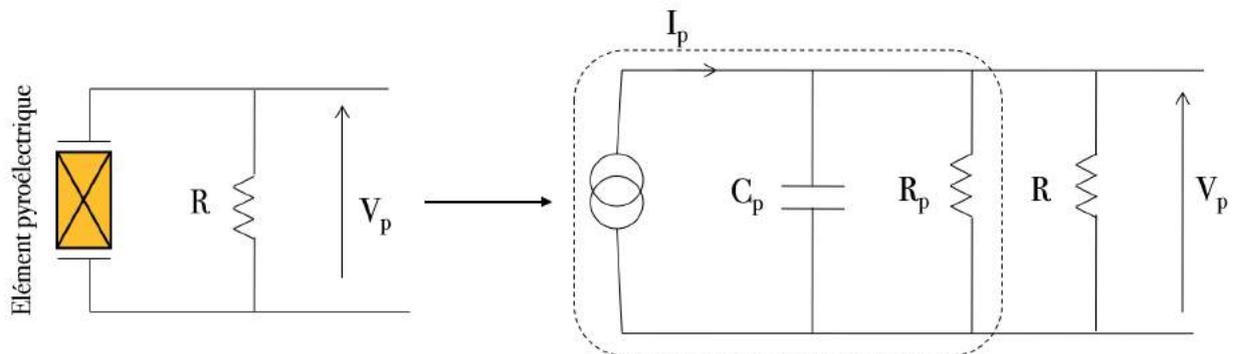


FIGURE 3.4: Schémas équivalent d'un matériau pyroélectrique.

L'élément pyroélectrique est modélisé comme un générateur de courant placé en parallèle avec une résistance et une capacité. Les différents paramètres présentés dans les schémas de la figure 3.4 sont définis comme suit :

Paramètre	Symbole	Unité
Courant généré par l'élément pyroélectrique	$I_p$	A
Tension à la sortie de l'élément pyroélectrique	$V_p$	V
Capacité électrique	$C_p$	F
Résistance électrique	$R_p$	$\Omega$
Résistance de charge	$R$	$\Omega$

Tableau 3.3: Différent paramètres présents dans la figure 3.4.

Le déplacement électrique est défini par l'équation 3.3 Sa dérivée par rapport à la température donne ensuite l'équation 3.4 :

$$dD = \varepsilon dE + P \quad (3.3)$$

$$dD = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial T} + \frac{\partial P}{\partial T} \quad (3.4)$$

Où  $\varepsilon$  la permittivité,  $E$  le champ électrique et  $P$  la polarisation électrique. Le courant pyroélectrique peut être exprimé en dérivant par rapport au temps l'équation 3.4. Notons que la polarisation  $P$  est le seul paramètre dépendant de la température, ainsi que nous n'appliquons aucun champ électrique  $E$  à l'élément pyroélectrique, par conséquent la variation du déplacement électrique en fonction des variations de température peut s'écrire sous cette forme [14] :

$$I_p = A \frac{dD}{dt} = pA \frac{dT}{dt} \quad (3.5)$$

avec  $p$  le coefficient pyroélectrique défini par :

$$p = \frac{\partial P}{\partial T} \quad (3.6)$$

Le courant pyroélectrique s'exprime donc en fonction de la surface  $A$  de matériau pyroélectrique, du coefficient pyroélectrique et de la variation temporelle de la température [14, 104].

Le courant  $I_p$  peut être établie à partir de circuit équivalent du matériau pyroélectrique présenté dans la figure 3.4 en utilisant la loi des nœuds L'expression du courant est donnée par :

$$I_p = C_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} + \frac{V}{R} \quad (3.7)$$

où  $V$  est la tension aux bornes de la résistance de charge  $R$  qui est normalement égale à  $V_p$ . L'équation 3.7 est une équation différentielle dont sa résolution donne la tension  $V_p$  aux bornes

de l'élément pyroélectrique. Il est possible d'exprimer la tension pyroélectrique en fonction de la variation temporelle de la température en introduisant l'expression du courant pyroélectrique (Eq.3.5) dans l'équation 3.7. L'équation résultante est donnée par :

$$pA \frac{dT}{dt} = C_p \frac{dV_p}{dt} + \frac{V_p}{R_p} + \frac{V}{R} \quad (3.8)$$

Pour déterminer la puissance générée par l'élément pyroélectrique, nous connectons en parallèle l'élément pyroélectrique à une résistance de charge  $R$ . La puissance instantanée dissipée par la résistance peut être déterminée en mesurant la tension de sortie et en utilisant la relation suivante :

$$P(t) = \frac{V_p^2(t)}{R} \quad (3.9)$$

Pour parler en terme d'efficacité de conversion pyroélectrique, nous pouvons exprimer le rendement énergétique de matériau pyroélectrique par le calcul de ce rapport :

$$r = \frac{W}{Q} \quad (3.10)$$

avec  $W$  l'énergie sur la charge et  $Q$  l'énergie thermique fournie à l'élément pyroélectrique qui peut être exprimée par l'expression suivante [57] :

$$Q = C_v(T_h - T_b) \quad (3.11)$$

Où  $T_h$  et  $T_b$  sont respectivement, les valeurs haute et basse de la température.

### 3.1.6. Etude expérimentale

#### 3.1.6.1. Dispositif expérimentale et techniques de mesures

Après avoir caractérisé la céramique  $PZT$  utilisée dans notre étude, et modélisé par schéma équivalent sa réponse pyroélectrique, nous proposons une étude expérimentale dédiée à la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique. Notre étude consiste à soumettre la céramique pyroélectrique à une variation de température provoquée par une lampe infrarouge qui émit des radiations infrarouges. Les variations temporelles de la température vont évidemment exciter la céramique, et par effet pyroélectrique, elle génère une réponse pyroélectrique qui se traduit par une tension électrique, un courant pyroélectrique et une puissance récupérée. L'étude expérimentale ne s'arrête pas à ce niveau, car nous voulons améliorer la réponse pyroélectrique pour un maximum de puissance récupérée. Tout d'abord, nous allons tester la technique  $SSHI$  (Synchronized

Switch Harvesting on Inductor) pour augmenter d'une manière significative la puissance récupérée. Ensuite, nous allons étudier l'effet de la surface de la céramique sur la puissance récupérée, qui normalement doit augmenter en augmentant la surface selon la prédiction du modèle théorique. Cette section fera donc l'objet d'une présentation détaillée de l'expérimentation, l'exposition et la discussion des résultats obtenus.

La technique expérimentale proposée dans cette étude est considérée comme la plus simple pour récupérer l'énergie thermique via une céramique pyroélectrique et qui constitue une technique particulièrement adaptée pour satisfaire les besoins énergétiques des applications à petite échelle. Nous rappelons que l'effet pyroélectrique présente deux effets : effet primaire et effet secondaire (cités précédemment au chapitre 2), donc nous précisons que nous n'avons considéré que l'effet primaire par conséquent, aucune excitation électrique ou mécanique n'a été appliquée à l'élément pyroélectrique.

Pour faire fonctionner la céramique *PZT* en mode pyroélectrique, des variations temporelles de température doivent être présentes. L'élévation de la température est obtenue à l'aide d'une lampe infrarouge *HP3631/01 InfraCare* qui émet un rayonnement infrarouge d'une puissance de 300 W et le refroidissement se fait par air ambiant. La température de la céramique est mesurée par un pyromètre *CA871 Chauvin Arnoux*. La céramique est connectée en parallèle avec un interrupteur autoalimenté et une résistance de charge  $R$ . En ce qui concerne la mesure et l'acquisition des grandeurs électriques de sortie de la céramique, elles sont assurées par un amplificateur de courant *SR570 Stanford RS* et un oscilloscope *Agilent Megazoom DSO7034A*. Une représentation schématique du banc expérimental de la conversion pyroélectrique mis en œuvre est représentée dans la figure 3.5. Tout les résultats sont enregistrés et traités sous *Matlab*®. L'efficacité de cette technique et les résultats des expériences seront discutés dans ce qui suit.

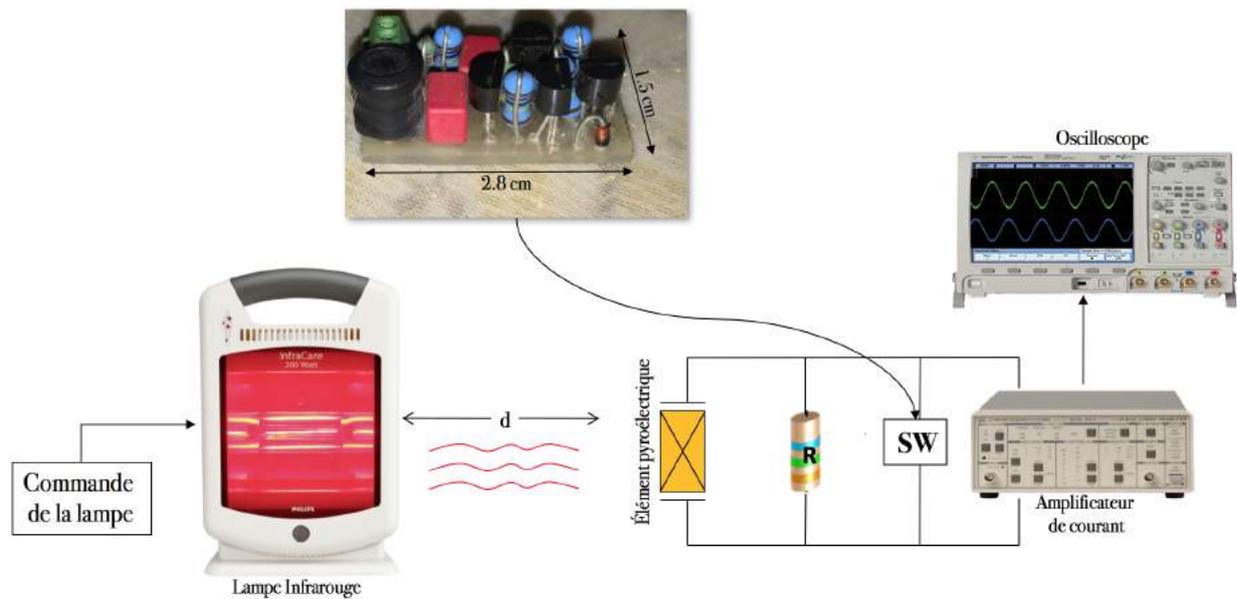


FIGURE 3.5: Illustration schématique du banc expérimental pour la récupération d'énergie thermique via une céramique pyroélectrique.

Le dispositif  $SW$  connecté en parallèle avec la céramique désigne un commutateur (switch) utilisé dans le cadre de la technique  $SSH I$ . Cette technique a été inventé par Guyomar et al. [105] et qui consiste à ajouter un commutateur en parallèle avec l'élément actif provoquant une augmentation et une inversion de la tension dans chaque maximum. Le dispositif de commutation, incluant une inductance, reste toujours ouvert excepté au voisinage des extremum de la tension afin de l'inverser à travers l'inductance. Le dispositif est maintenu fermé jusqu'à ce que la tension soit complètement inversée. Donc le processus de commutation se produit uniquement sur les extremum du signal considéré. Cette procédure entraîne une augmentation de l'amplitude de la tension. Le courant traversant la résistance  $R$  est proportionnel à la tension pyroélectrique et le courant parcouru l'interrupteur électronique est toujours nul sauf en phase d'inversion. La technique proposée est entièrement compatible avec des structures de récupération d'énergie par piézoélectricité [106] mais également par pyroélectricité [107] dans le but d'agrandir artificiellement les cycles de conversion énergétique. L'utilisation de la technique  $SSH I$  constitue donc un moyen de gain énergétique à coût réduit.

### 3.1.6.2. Validation de la méthode utilisée

Pour tester l'efficacité de la céramique  $PZT$  utilisée en terme de conversion pyroélectrique. Nous présentons dans la figure 3.6 la tension électrique générée par la céramique  $PZT$  dans les deux cas : présence et absence de switch.

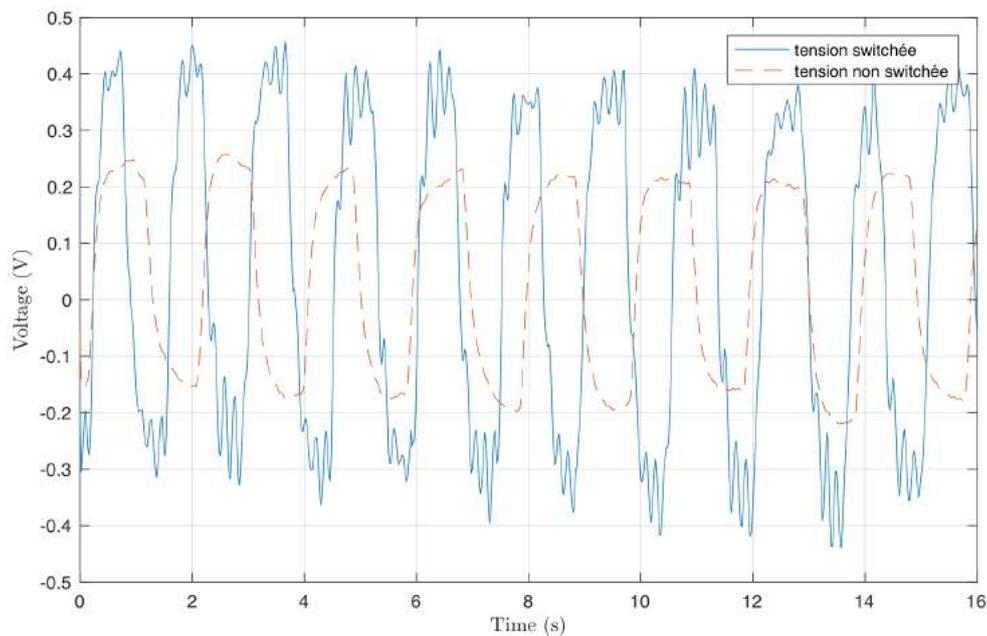


FIGURE 3.6: Evolution de la tension électrique en fonction de temps, dans deux cas : présence et d'absence de switch.

La figure 3.6 illustre deux allures de variation de tension en fonction de temps obtenues avec le dispositif expérimental décrit et présenté dans la figure 3.5. En présence d'une variation de température, la céramique *PZT* génère une tension électrique due à son activité pyroélectrique. Pour une distance entre la source thermique et la céramique *PZT* égale à 2 cm, et dans le cas de non usage de switch, la céramique génère une tension qui vaut 200 mV. En cas d'usage de switch cette valeur a été augmentée pour atteindre 400 mV. Les amplitudes maximales obtenues avec switch sont donc supérieures à celle obtenues sans switch.

Le cycle de la conversion pyroélectrique combiné avec la technique *SSHI* est expliqué comme suit : quand la température augmente et en raison de l'activité pyroélectrique, une tension électrique positive apparaît aux bornes de la céramique pour atteindre un maximum. La tension sera par la suite inversée de  $V_1$  à  $-V_2$  pour deux raisons : la diminution de la température et l'activité de switch. Avant inversion, le switch augmente plus davantage l'amplitude de la tension comme le montre la figure 3.6. Après inversion, en augmentant la température encore une fois, la tension électrique augmente et le processus d'inversion est répété. La tension électrique est donc maximisée pour chaque cycle.

En comparant les résultats obtenus en termes de tension pyroélectrique, il apparaît que la tension switchée est maximisée d'un facteur de 2 par rapport à la tension non switchée, ce qui valide la technique utilisée dans cette étude. Nous pouvons tenir compte d'une inversion à rapport sans

unité défini par l'équation suivante [108, 109] :

$$\frac{V_1}{V_2} = \beta \quad (3.12)$$

$\beta$  est appelé coefficient d'inversion dont sa valeur varie entre 0 et 1. Quand  $\beta$  égale à 1, cela correspond à une inversion parfaite.

### 3.1.6.3. Résultats & discussions

Après validation de la technique *SSHI* utilisée pour notre système de conversion pyroélectrique, cette section présente donc la suite des résultats expérimentaux obtenus. La céramique *PZT* pyroélectrique est fixée à une distance "d" de la source infrarouge, tel que représenté sur la figure 3.5. L'objectif est d'étudier la sensibilité et l'efficacité de la céramique *PZT* en fonction de la distance "d".

La figure 3.7 montre l'évolution temporelle de la tension générée par la céramique pyroélectrique *PZT* en fonction de différentes distances allant de 20 cm à 1 cm. L'observation de l'évolution temporelle de la tension montre qu'elle dépend de la température. La céramique *PZT* subit le même cycle de conversion pyroélectrique préalablement décrit, le maximum et le minimum de la tension pyroélectrique correspondent donc respectivement au chauffage (par radiations infrarouges émis par la lampe infrarouge) et au refroidissement (par air ambiant). La première observation que nous pouvons faire d'après les allures obtenues (Fig. 3.7) est que notre échantillon était très sensible au rayonnement infrarouge et a généré une tension électrique sans aucune excitation électrique supplémentaire à l'excitation thermique. Afin de mieux comprendre le comportement de notre échantillon pyroélectrique, nous avons essayé de réduire autant que possible la distance qui le sépare de la lampe infrarouge. La deuxième observation tirée est qu'une augmentation de la valeur de tension de sortie de la céramique *PZT* est relevée quand la distance est diminuée.

La tension pyroélectrique obtenue en diminuant la distance de 20 cm à 15 cm passe de 200 mV à 300 mV. Lorsque nous diminuons la distance de 10 cm à 5 cm puis de 2 cm à 1 cm, la tension pyroélectrique ne cesse d'augmenter et passe respectivement de 350 mV à 400 mV et de 450 mV à 570 mV. Remarquons que la tension évolue de 200 mV à 570 mV, l'augmentation observée est donc significative.

Nous notons que la tension pyroélectrique est un signal alternatif presque symétrique, et l'alternance positive et négative présentent pratiquement la même allure. Les niveaux de tension obtenus via la céramique *PZT* en utilisant la technique proposée ne sont pas trop faibles et peuvent donc alimenter un dispositif électronique à faible consommation. Les valeurs obtenues durant

cette étude expérimentale sont comparables à celles obtenues dans certains travaux de recherche et dédiées à l'alimentation des dispositifs à faible dimension [110, 111, 112].

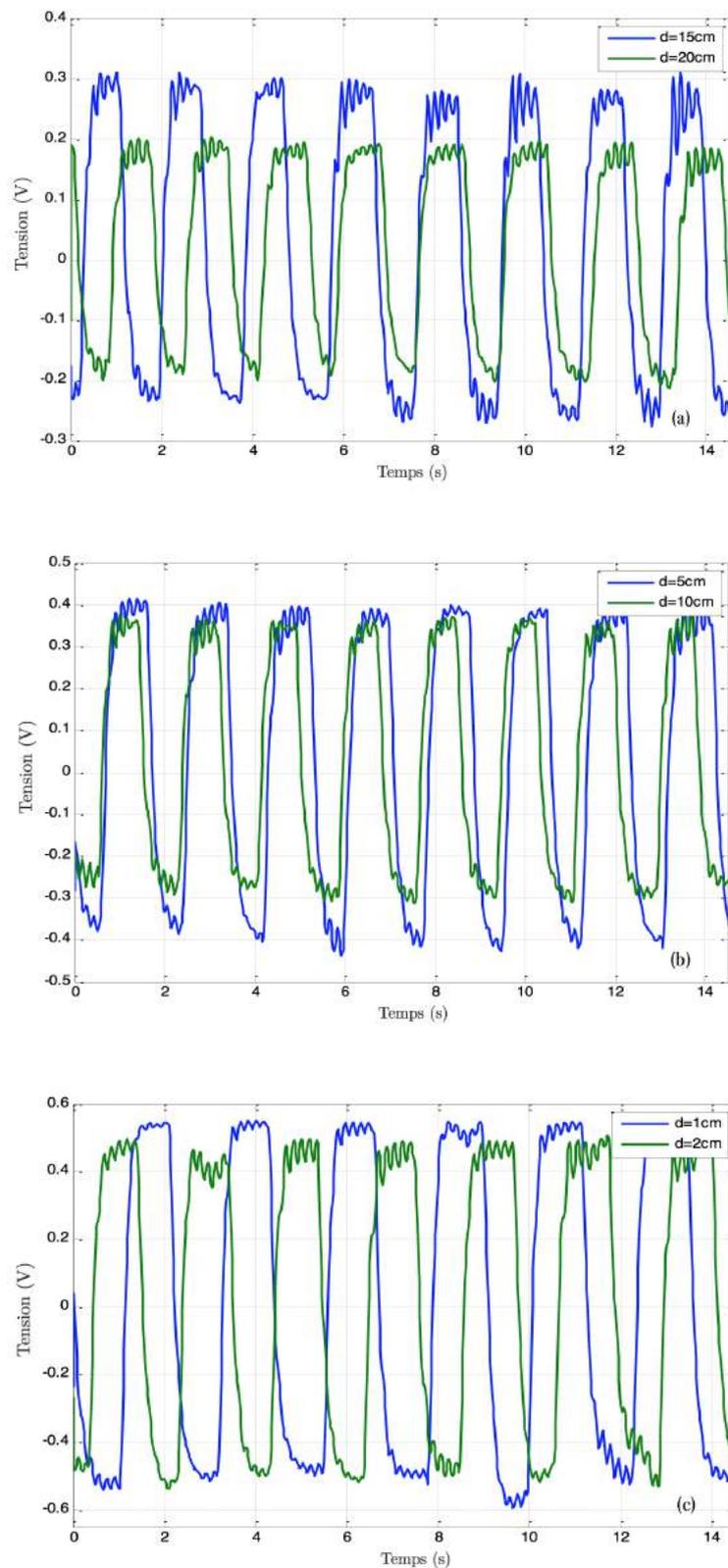


FIGURE 3.7: Évolution temporelle de la tension pyroélectrique aux bornes de la céramique pyroélectrique *PZT* pour différentes distances : (a)  $d = 15\text{cm}$ ,  $20\text{cm}$ , (b)  $d = 10\text{cm}$ ,  $5\text{cm}$  et (c)  $d = 2\text{cm}$ ,  $1\text{cm}$

A partir de la figure 3.7, nous constatons que la tension électrique augmente lorsque la distance entre la source infrarouge et notre échantillon pyroélectrique est minimale et vice versa. Ce comportement était tout à fait évident, parce que, plus que la céramique *PZT* est proche de la source infrarouge, plus l'intensité du rayonnement infrarouge qui lui atteint est grande donc elle est chauffée plus davantage par rapport au cas de grande distance.

Après avoir exposé et discuté les résultats obtenus en termes de tension générée par la céramique *PZT*, nous proposons de présenter dans la partie qui suit la puissance récupérée par la céramique *PZT* en fonction de la charge électrique. Les allures de puissance pour trois valeurs de distance choisies sont illustrées dans la figure 3.8.

La puissance récupérée a été calculée à partir de la tension pyroélectrique dont les courbes ont été présentées ci dessus. Pour cela, nous utilisons un code de calcul sous *Matlab*® traitant les résultats expérimentaux et traçant la courbe présentée dans la figure (Fig 3.8) et qui montre le comportement de la puissance récupérée par la céramique pyroélectrique en fonction de la résistance de charge pour trois valeurs de distances : 5 cm, 2 cm et 1 cm. Nous observons d'après la figure (Fig 3.8) l'existence d'une résistance de charge optimale à laquelle la puissance récupérée est maximale vérifiant les travaux de recherche menés par Cottinet et al. [113]. Selon ce résultat expérimental, et comme prévu, la puissance récupérée augmente d'une façon significative avec la diminution de distance séparant la céramique *PZT* de la source infrarouge. En ce qui concerne les valeurs maximales, la puissance pourrait atteindre 1,4 mW, 0,9 mW et 0,7 mW pour des distances de 1 cm, 2 cm et 5 cm respectivement.

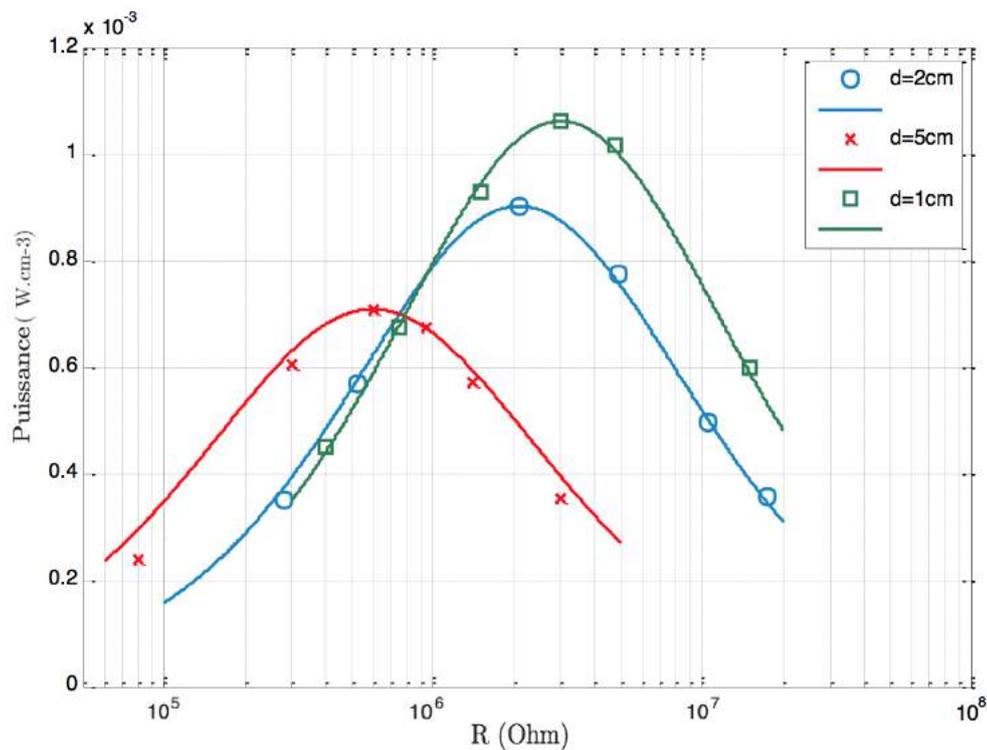


FIGURE 3.8: Puissance récupérée en fonction de la résistance optimale pour trois distances choisies.

Pour une meilleure compréhension et visualisation de l'effet de la distance sur la puissance récupérée, nous avons tracé cette grandeur physique dans la figure 3.8 pour une large gamme de distance allant de 1 cm à 40 cm.

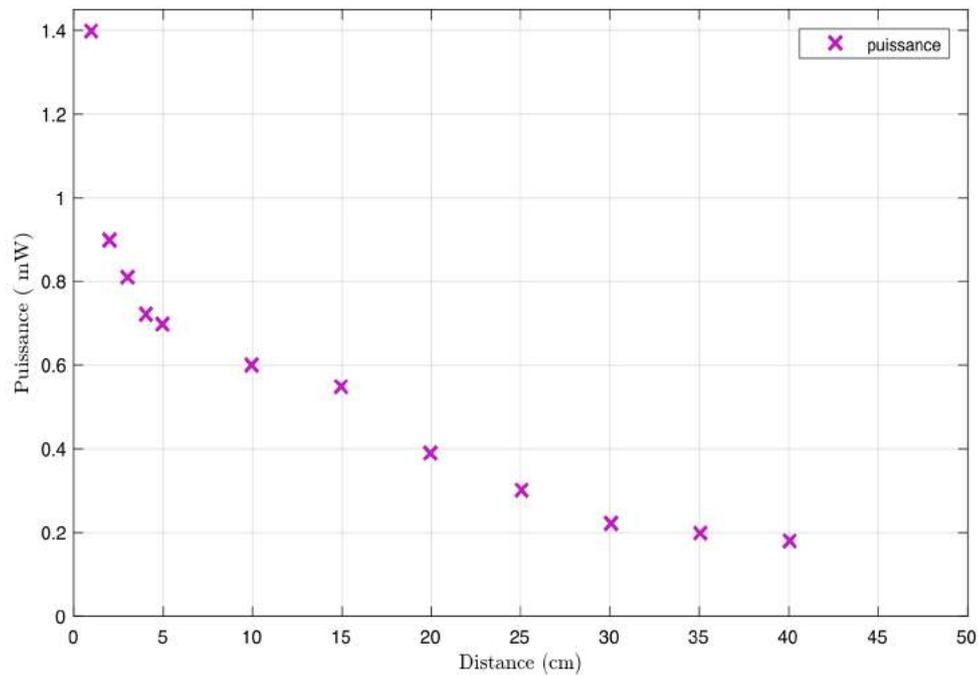


FIGURE 3.9: Evolution de la puissance récupérée en fonction de la distance.

Les valeurs de puissance récupérée obtenues en utilisant les radiations infrarouges et l'effet pyroélectrique sont suffisantes pour alimenter des dispositifs électroniques de faible puissance. Plusieurs chercheurs scientifiques ont développé différentes techniques pour la récupération d'énergie comme nous avons introduit dans le chapitre 1. La majorité de ces travaux sont basés sur la conversion électromécanique, pour la raison que l'énergie mécanique est la source d'énergie la plus importante pourtant, la quantité d'énergie récupérée est souvent de l'ordre de  $nW$  ou  $\mu W$  [114, 115]. Les systèmes développés ne présentent pas une autonomie complète et parfois les matériaux intelligents utilisés nécessitent une excitation extérieure [116, 117]. La comparaison de nos résultats avec d'autres dans le même domaine, nous permet d'être convaincu de l'efficacité de la technique proposée sachant que nous pourrions atteindre des valeurs de puissance en milliwatts.

### 3.2. Optimisation et amélioration de la récupération d'énergie thermique par rayonnement infrarouge

En se basant sur la première étude expérimentale et sur les mesures effectuées pour la conversion d'énergie thermique via une céramique *PZT*, nous proposons une deuxième étude expérimentale qui vise à optimiser et améliorer la quantité d'énergie récupérée en augmentant la surface de notre échantillon pyroélectrique. Le banc expérimental dédié à cette étude est identique à celui

présenté dans la figure (Fig.3.5) sauf que nous n'utilisons pas le switch. La fluctuation de température est toujours produite par la lampe infrarouge (chauffage) et par air ambiant (refroidissement) donc l'élément pyroélectrique subit les mêmes conditions de variation de température et conduit au même cycle de conversion présenté dans la première partie de ce chapitre.

Les résultats expérimentaux de cette deuxième étude ont montré également qu'avec le simple concept que nous proposons, nous avons acquis une grande quantité de puissance récupérée qui sera certainement utile dans une vaste gamme d'applications, y compris les capteurs et la détection infrarouge.

### 3.2.1. Effet de la surface de matériau pyroélectrique sur la puissance récupérée

L'idée d'étudier l'effet de surface de notre échantillon pyroélectrique sur la conversion pyroélectrique est basée essentiellement sur la prédiction théorique tirée de la modélisation de l'effet pyroélectrique décrite préalablement. Rappelons l'équation définissant le courant pyroélectrique qui est exprimé en fonction de la surface, du coefficient pyroélectrique et de la variation de température :

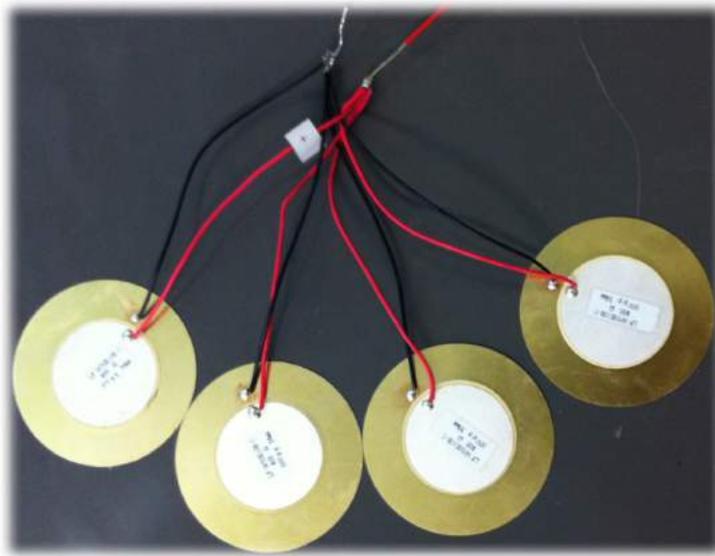
$$I_p = A \frac{dD}{dt} = pA \frac{dT}{dt} \quad (3.13)$$

Cette équation permet de prévoir une augmentation de courant électrique en fonction de la surface  $A$ . Plus précisément, si la surface passe de  $A$  à  $\alpha A$ , le courant sera donc augmenté d'un facteur de  $\alpha$ . Pour parler en terme de puissance récupérée, nous avons exprimé, dans la section qui traite la modélisation de l'effet pyroélectrique, la puissance récupérée en fonction de la tension générée par la céramique  $PZT$ , mais elle peut être également calculer en fonction du courant induit par effet pyroélectrique en utilisant l'équation suivante :

$$P = RI^2 \quad (3.14)$$

L'équation 3.14 nous permet de lier donc la puissance récupérée au courant pyroélectrique pour pouvoir justifier théoriquement l'augmentation de la puissance en fonction du courant et donc en fonction de la surface de l'élément pyroélectrique.

En effet, pour augmenter la surface de notre céramique  $PZT$  commercialisée d'une surface normalement non modifiable, nous avons effectué un montage en parallèle de plusieurs céramiques  $PZT$  (Fig.3.10) identiques et de même propriétés présentées dans le tableau (Tab.3.2) de telle sorte qu'elles vont induire la même valeur de courant pyroélectrique  $I_1$ . On obtiendra en sortie un courant totale  $I_T$  qui sera la somme des courants induits par chaque céramique. Si nous utilisons deux ou quatre céramiques en parallèle le courant totale sera égale respectivement à  $2 I_1$  et  $4 I_1$ . Cette prédiction sera vérifiée expérimentalement ci dessous.

FIGURE 3.10: Montage en parallèle des céramique *PZT* de même type.

### 3.2.2. Résultats & discussion

Après avoir expliqué l'idée de base de cette étude expérimentale, nous exposons dans ce qui suit, nos résultats expérimentaux qui seront confrontés au modèle présenté ci dessus.

L'évolution temporelle du courant pyroélectrique en fonction de la surface de la céramique est illustrée dans la figure [3.11](#)). Cette évolution est semblable à celle observée pour la tension électrique présentée précédemment et qui montre la dépendance du courant pyroélectrique à la fluctuation thermique. Les valeurs maximales du courant ont été obtenues quand la lampe infrarouge est allumée, cela correspond au chauffage dû à la présence des radiations infrarouges. Lorsque la lampe est éteinte, l'élément pyroélectrique se trouve en contact direct avec l'air ambiant qui lui refroidit, cela explique les valeurs minimales du courant pyroélectrique. Notons que les courants minimaux sont pratiquement égaux en valeur absolue aux maximums de courant obtenus.

A partir de la Figure [3.11](#) qui illustre l'influence de la surface de céramique sur le courant induit, nous observons que le courant induit par l'élément pyroélectrique augmente proportionnellement avec la surface. Les amplitudes maximales obtenues pour une surface initiale ( $A = 5 \text{ cm}^2$ ) sont donc inférieures à celle obtenues pour des surfaces doublé ( $2A = 10 \text{ cm}^2$ ) et quadruplée ( $4A = 20 \text{ cm}^2$ ).

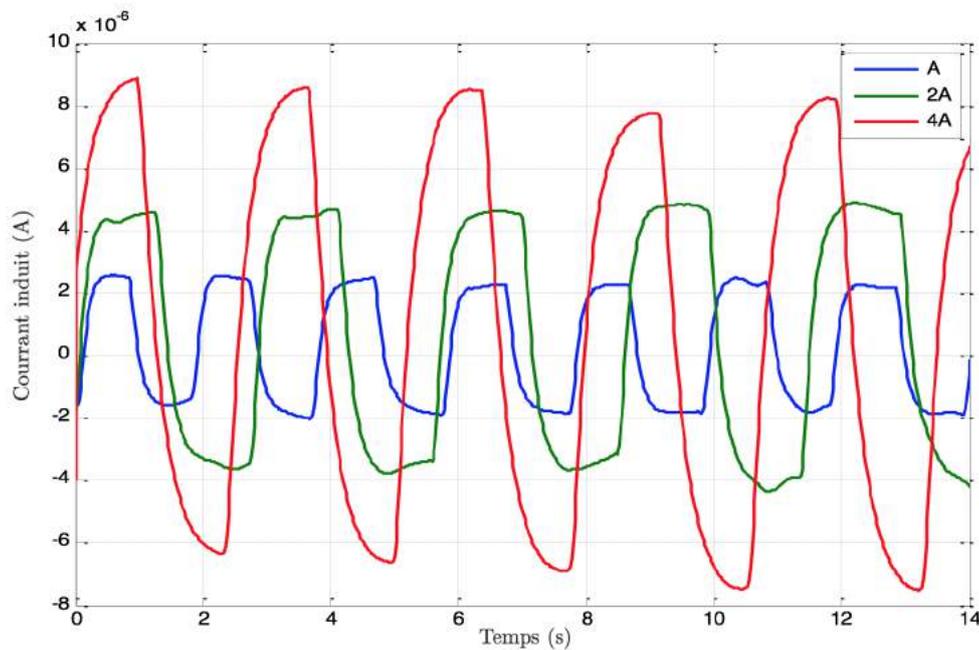


FIGURE 3.11: Evolution temporelle du courant pyroélectrique en fonction de la surface A de la céramique PZT.

Il en ressort que les valeurs maximales du courant pyroélectrique atteintes sont de  $2 \mu A$ ,  $4 \mu A$  et  $8 \mu A$ . Cela signifie que si nous augmentons la surface de l'élément pyroélectrique passant de A à 2A puis à 4A, le courant augmente d'un facteur de 2 et 4 respectivement. Nous constatons donc que ces valeurs expérimentales mesurées sont en accord avec la prédiction théorique.

Pour optimiser la réponse pyroélectrique en terme du courant induit, nous présentons dans la figure 3.12 le courant pyroélectrique en fonction de différentes surfaces allant de 5 à  $50 \text{ cm}^2$ . Le comportement du courant est linéaire et proportionnel à la surface de l'élément pyroélectrique. Le courant augmente du même facteur auquel la surface est augmenté. Nous pouvons estimer donc qu'une céramique pyroélectrique d'une surface de  $100 \text{ cm}^2$  induit un courant de l'ordre de  $40 \mu A$ .

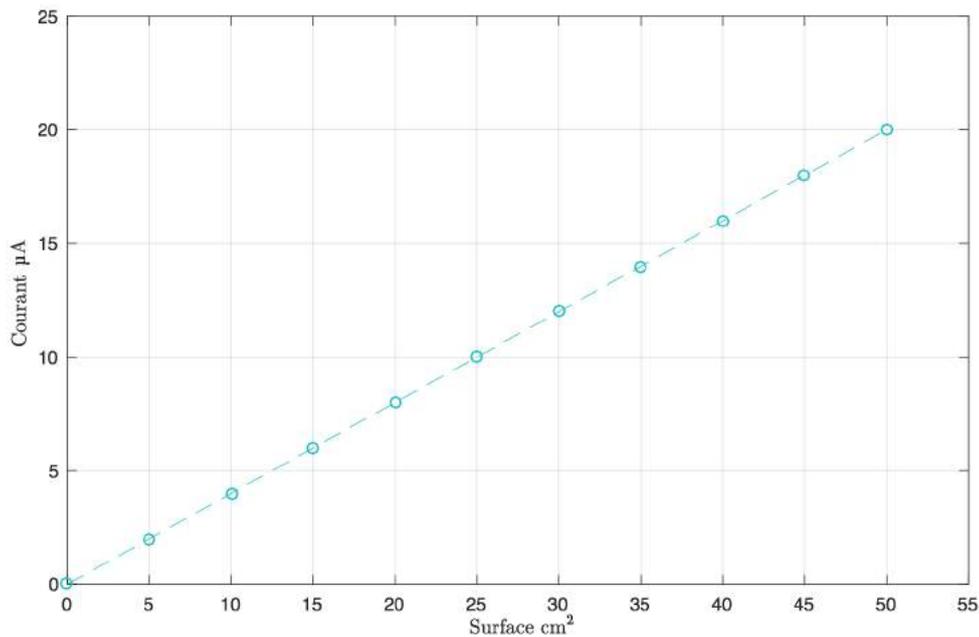


FIGURE 3.12: Courant induit en fonction de la surface de l'élément pyroélectrique.

Dans l'idée d'améliorer la puissance récupérée, nous avons calculé ses valeurs en se servant de l'équation 3.14 qui exprime la puissance en fonction de courant induit par l'élément pyroélectrique. Nous traçons également cette grandeur physique en fonction de la charge électrique pour les mêmes surfaces considérées précédemment ( $A = 5 \text{ cm}^2$ ,  $2A = 10 \text{ cm}^2$ ,  $4A = 20 \text{ cm}^2$ ). Nous illustrons dans la figure 3.13 la puissance récupérée en fonction de la résistance de charge pour les trois valeurs de surface. Comme la première étude expérimentale que nous avons effectuée, nous observons la présence d'une charge optimale pour la puissance récupérée à la quelle des valeurs maximales sont obtenues. La figure 3.13, montre clairement que la puissance augmente considérablement en augmentant la surface de la céramique pyroélectrique en atteignant les valeurs maximales de  $0.80 \text{ mW}$ , de  $1.75 \text{ mW}$  et de  $2.40 \text{ mW}$  respectivement pour des surfaces  $A$ ,  $2A$ ,  $4A$ . l'augmentation n'était pas au même facteur que l'augmentation de courant électrique, pour la simple raison que la puissance récupérée n'est pas exprimée uniquement en fonction de courant induit par la céramique pyroélectrique mais elle tient compte de la charge électrique qui change également (augmente évidemment) en fonction de nombre de céramique mises en parallèle.

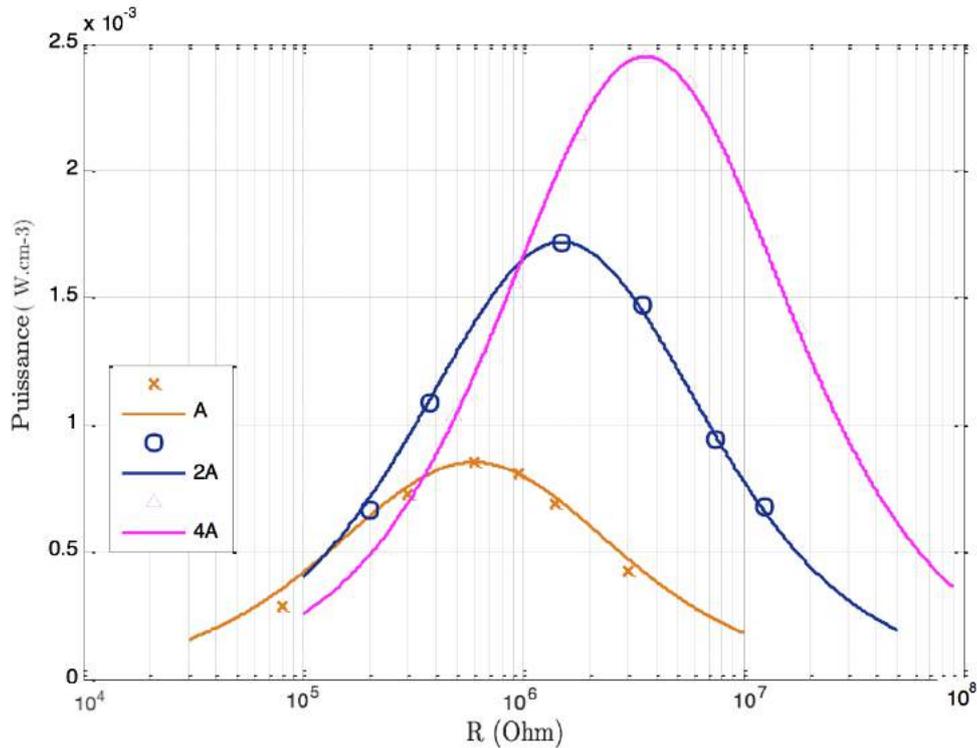


FIGURE 3.13: Puissance récupérée en fonction de la charge électrique pour différentes valeurs de surface : A, 2A et 4A.

En effet, une étude similaire a été réalisée par belhora et al. [8], qui traite l'influence de surface d'un polymère électroactif pour la récupération d'énergie mécanique. Ils ont prouvé par un modèle théorique et par des résultats expérimentaux que le courant induit par le polymère augmente proportionnellement avec l'augmentation de film polymère. Ces travaux de recherche réalisés sur un polymère vérifient ainsi l'importance de notre étude expérimentale.

Lors de la comparaison de la performance de notre technique de récupération d'énergie avec d'autres techniques développées, nous constatons que la quantité d'énergie que nous récupérons et que nous exprimons en  $mW$  est comparable ou même largement supérieure à des quantités d'énergie obtenues par certains travaux de recherche dans différents domaines [107, 118].

## Conclusion

DANS ce troisième chapitre, nous avons décrit notre technique expérimentale pour la récupération d'énergie thermique via des radiations infrarouges et une céramique pyroélectrique de type *PZT*. Nous avons également exposé et discuté les résultats obtenus là-dessus et qui ont prouvé l'efficacité et la faisabilité de la technique proposée. En effet, un comportement périodique a été observé lors du tracé de la tension et du courant pyroélectrique en fonction de temps, ce qui

signifie leur dépendance à la variation de température appliquée (chauffage/refroidissement) à la céramique pyroélectrique.

En ce qui concerne la conversion pyroélectrique de l'énergie thermique, les résultats expérimentaux ont permis de valider la technique *SSH* utilisée pour augmenter significativement la réponse pyroélectrique.

Les résultats expérimentaux qui rentrent dans le cadre de l'amélioration de réponse pyroélectrique en fonction de la surface de la céramique *PZT* confirment globalement le comportement de courant et de la puissance prévus par le modèle théorique. C'est dire que pour avoir un maximum d'énergie récupérée, il suffit tout simplement d'augmenter la surface du matériau pyroélectrique. Notons qu'une céramique pyroélectrique de type *PZT*, d'une surface de  $5 \text{ cm}^2$  peut fournir une puissance qui vaut  $0.8 \text{ mW}$ , cette valeur a été augmentée d'un facteur de 3 pour atteindre  $2,4 \text{ mW}$  quand la surface de l'élément pyroélectrique est de l'ordre de  $20 \text{ cm}^2$ .

Dans ce qui suit, nous proposons une deuxième technique de récupération d'énergie thermique via la même céramique pyroélectrique que nous avons utilisée dans l'étude expérimentale présentée dans ce chapitre et qui sera soumise cette fois ci à des fluctuations de température créés par des convections Rayleigh-bénard.

# RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR UN ÉLÉMENT PYROÉLECTRIQUE EXCITÉ PAR CONVECTION

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	79
<b>4.1 RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE ISSUE DES CONVECTIONS RAYLEIGH-BÉNARD</b> . . . . .	80
<b>4.1.1 Principe de l'étude</b> . . . . .	80
<b>4.1.2 Dispositif expérimental et technique de mesure</b> . . . . .	82
<b>4.1.3 Résultats et discussion</b> . . . . .	83
<b>4.2 OPTIMISATION ET AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE</b> . . . . .	87
<b>4.2.1 Influence de la nature du fluide en convection sur la réponse pyroélectrique</b> . . . . .	87
<b>4.2.1.1 Nature des fluides utilisés</b> . . . . .	87
<b>4.2.1.2 Résultats et discussions</b> . . . . .	89
<b>4.2.2 Effet de géométrie de système de convection sur la réponse pyroélectrique</b> . . . . .	95
<b>4.2.2.1 Effet du volume en variant la hauteur du système convectif</b> . . . . .	96
<b>4.2.2.2 Effet de la distance entre la surface libre d'huile et la céramique pyro-</b> <b>électrique (niveau d'huile)</b> . . . . .	99
<b>4.2.3 Application visée : capteur de niveau d'huile autonome en termes d'énergie</b> . . . . .	104
<b>4.2.3.1 Concept général du capteur proposé</b> . . . . .	106
<b>4.2.3.2 Principe de fonctionnement du capteur proposé</b> . . . . .	107

---

<b>CONCLUSION</b> . . . . .	108
-----------------------------	-----

## Introduction

LE transfert de la chaleur est un phénomène complexe et sa présence dans la vie quotidienne reste remarquable car il intervient d'une manière inévitable (déperdition thermique, radiation ...). Particulièrement, le transfert convectif dans un fluide attire toujours l'attention des scientifiques. Un cas simple de convection thermique est la convection de Rayleigh-Bénard qui a fait l'objet de nombreux travaux en point de vue expérimental et théorique vu son faible nombre de paramètres de contrôle. Plusieurs travaux de recherche ont été menés sur ce phénomène dans le but de le comprendre et de l'exploiter. La convection thermique est présente d'une façon remarquable dans l'industrie où les fluides occupent une place primordiale dans plusieurs procédés tels que l'industrie agroalimentaire (fabrication du chocolat, sucre), l'industrie pétrolières ou encore le traitement des polymères ...

Un grand nombre de chercheurs ont menée plusieurs études numériques et expérimentales dans le but d'améliorer le transfert de chaleur par convection en étudiant les phénomènes gérant la convection, les propriétés des fluides utilisés, ainsi que l'effet de la géométrie des systèmes dans lesquels la convection a lieu. La convection thermique est traduit par une circulation naturelle d'un fluide dans un cas d'instabilité due à la présence d'un gradient de température, on parle alors d'une convection naturelle. Si la circulation de fluide devient artificielle (pompe, agitation, ...) il s'agit donc d'une convection forcée.

Nous présentons dans ce chapitre, une étude expérimentale sur la récupération d'énergie thermique et sa conversion en énergie électrique via une céramique pyroélectrique. L'originalité de cette étude réside dans le fait que nous utilisons la convection Rayleigh-Bénard pour assurer des fluctuations thermiques dans le but de faire fonctionner la céramique en mode pyroélectrique et donc générer une réponse électrique. Aucun travail scientifique n'a été fait jusqu'à présent avec cette technique spécifique pour la récupération d'énergie. Nous croyons en outre que les caractéristiques générales de nos résultats expérimentaux devraient être d'une importance universelle pour la récupération d'énergie thermique par pyroélectricité.

Dans ce présent chapitre, on se propose de décrire le principe de notre étude basée sur des convections naturelles au sein d'un fluide tout en exposant des résultats expérimentaux validant la technique proposée. Cette partie aura pour but également de savoir comment évolue l'efficacité du transfert thermique par convection en fonction des paramètres de contrôle : facteur d'aspect (géométrie du système), nombre de Prandtl (nature de fluide), nombre de Rayleigh (variation de température), pour pouvoir améliorer la réponse pyroélectrique et donc maximiser la puissance récupérée.

## 4.1. Récupération d'énergie thermique issue des convections Rayleigh-Bénard

### 4.1.1. Principe de l'étude

Le but principal de l'étude expérimentale que nous présentons dans ce chapitre est d'étudier la conversion de l'énergie thermique par un élément pyroélectrique, à partir d'une source de chaleur constante. Notons que pour mettre en œuvre l'effet pyroélectrique, la présence des fluctuations thermiques constitue une condition primordiale. En effet, dans la configuration de Rayleigh-Bénard, les fluctuations de température (chauffage et refroidissement) ont été essentiellement garanties par le fluide en convection. La figure (Fig. 4.1) montre le principe de notre système basé sur un élément pyroélectrique placé au dessus d'un fluide en convection. Nous mentionnons que nous utilisons la même céramique pyroélectrique utilisée dans les travaux présentés en chapitre 3.

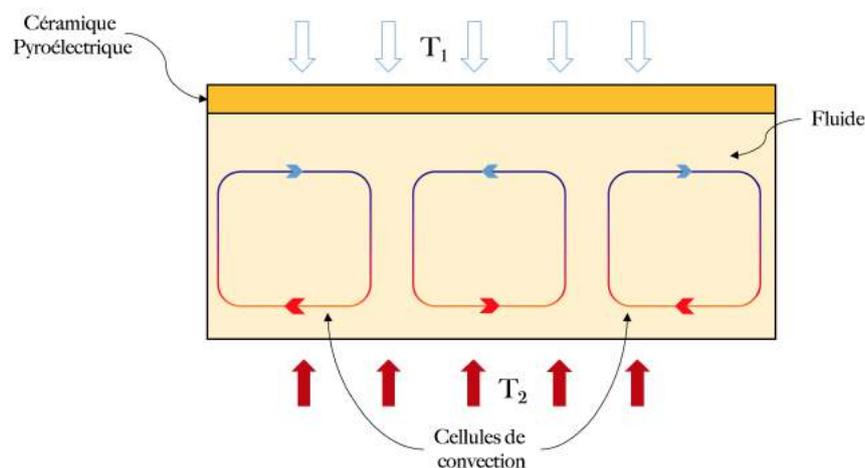


FIGURE 4.1: Configuration Rayleigh-Bénard : Un fluide chauffé par le bas et refroidi par le haut. L'élément pyroélectrique est placé sur le fluide en convection.

En absence de chauffage, le fluide est en état de stabilité et ne meurt pas. Quand le fluide est chauffé simultanément par le bas et refroidi par le haut (cette configuration est instable) c'est à dire : un gradient thermique qui engendre un gradient de densité au sein du fluide. Ce dernier aura tendance à bouger et perdra son état de stabilité. Sous l'effet de la poussée d'Archimède, les molécules chaudes tendent à s'élever car elles se dilatent et deviennent plus légères que les molécules froides qui sont plus denses et tendent à descendre. Cette circulation en alternance des molécules chaudes et froides conduit à des fluctuations thermiques qui seront ensuite captées par l'élément pyroélectrique qui est en contact direct avec l'air ambiant. En effet, pour pouvoir justifier la présence d'une variation de température et que l'élément pyroélectrique subit une variation de température, nous avons utilisé une caméra thermique *Infrec thermo GEAR* dans le but d'observer

le champ de température au sein du fluide et en surface de la céramique pyroélectrique. Les images ont été obtenues en utilisant la configuration présentée dans la figure (Fig.4.1) : le fluide utilisé est l'huile de colza avec  $T_1 = 25^\circ\text{C}$  et  $T_2 = 150^\circ\text{C}$ .

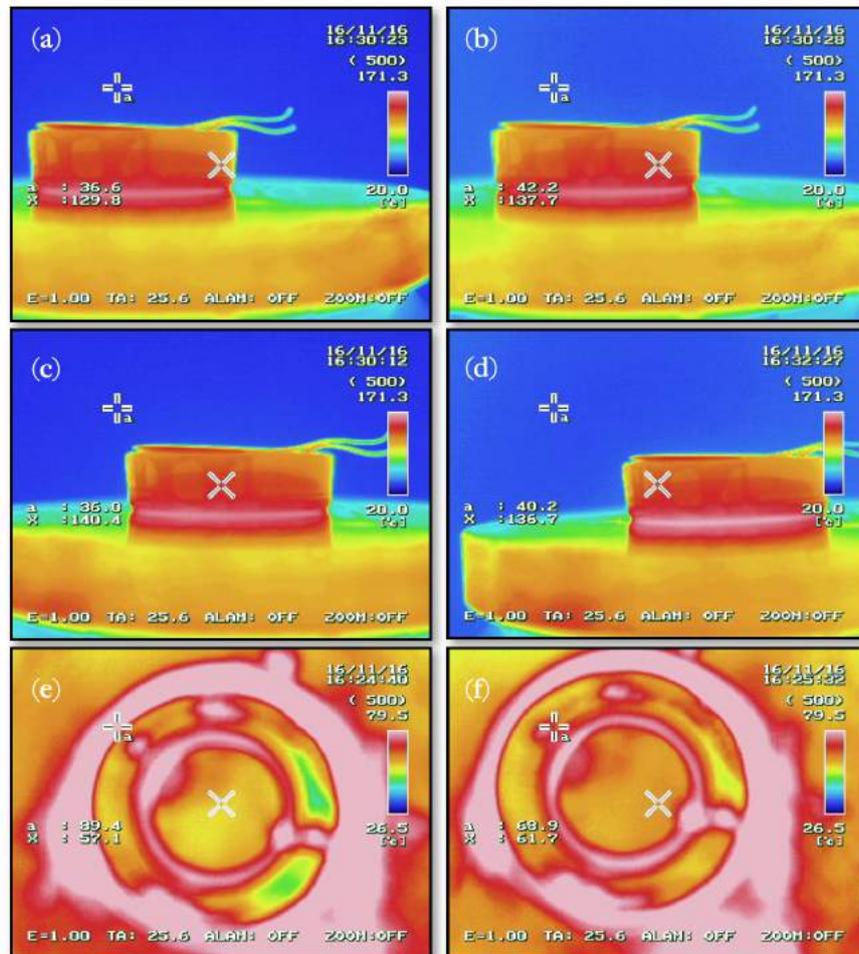


FIGURE 4.2: Images thermiques : champ de température au sein de fluide et en surface de la céramique pyroélectrique. La température aux centre des croix vaut : (a)  $129^\circ\text{C}$  (b)  $137^\circ\text{C}$  (c)  $140^\circ\text{C}$  (d)  $136^\circ\text{C}$  (e)  $57^\circ\text{C}$  (f)  $61^\circ\text{C}$ .

La figure (Fig.4.2) illustre la distribution de température sur le plan xy au sein du fluide chauffé, la température aux points (centre des croix) est de  $129^\circ\text{C}$ ,  $137^\circ\text{C}$ ,  $140^\circ\text{C}$  et  $136^\circ\text{C}$ , cela montre que la température au sein du fluide n'est pas la même à chaque point c'est à dire que la température varie en fonction du temps. La figure 4.2 : (e) et (f) montre la distribution de température en surface de la céramique pyroélectrique. La température aux points (centre des croix) vaut  $57^\circ\text{C}$  et  $61^\circ\text{C}$ . La température qui arrive à la céramique pyroélectrique n'est pas la même et varie en fonction du temps. À travers ces images thermiques nous prouvons l'existence d'une variation temporelle de

température qui sera captée par la céramique pyroélectrique et convertie par effet pyroélectrique en énergie électrique.

#### 4.1.2. Dispositif expérimental et technique de mesure

Nous avons expliqué précédemment le concept général de notre étude expérimentale qui consiste à récupérer l'énergie thermique à partir du transfert thermique provenant du fluide en convection dans la configuration de Rayleigh-Bénard, et la convertir en une énergie électrique à travers une céramique pyroélectrique. Le dispositif expérimental et la cellule de convection seront présentés ici afin d'obtenir de plus amples informations sur notre étude expérimentale. Le banc d'expérience dédié à cette étude est illustré dans la figure (Fig.4.3). Notre étude prendra deux volets : valider la technique proposée et améliorer la réponse pyroélectrique en utilisant la technique SSHI expliquée préalablement.

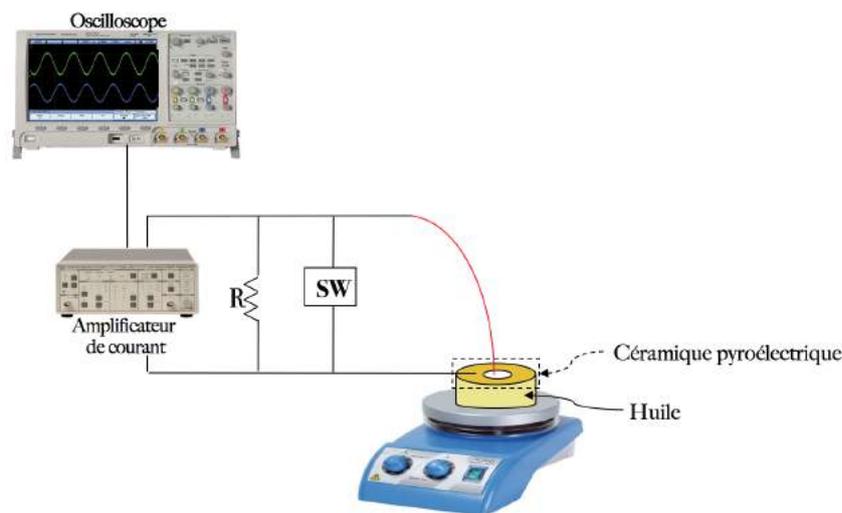


FIGURE 4.3: Schéma général simplifié du dispositif expérimental pour la conversion pyroélectrique de l'énergie basée sur les convections Rayleigh-Bénard dans un bain d'huile.

Le banc expérimental illustré dans la figure (Fig.4.3) est constitué de deux parties, la première assure l'excitation thermique de la céramique, et la seconde concerne la conversion de cette excitation en électricité. La céramique pyroélectrique de type PZT est placée en dessus d'une coupelle remplie d'huile chauffée à une température fixée à  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . l'énergie thermique à récupérer provient donc de la variation de température transférée par le mouvement d'huile chaude. Nous mentionnons que l'huile utilisée dans cette étude est huile de colza, qui est une huile végétale.

La céramique pyroélectrique soumise à des fluctuations thermiques à travers l'huile en convection, est connectée en parallèle à une résistance de charge  $R$  et au même switch autoalimenté utilisé

dans la première étude présentée dans le chapitre 3. En ce qui concerne la mesure et l'acquisition de la réponse pyroélectrique (tension de sortie, courant et puissance récupérée), elles sont assurées par un amplificateur de courant *SR570 Stanford RS* et un oscilloscope *Agilent Megazoom DSO7034A*. Les mesures sont ensuite enregistrées et traitées sous *Matlab®*. La validation et la faisabilité et l'efficacité de cette technique expérimentale feront l'objet des paragraphes qui suivent, en exposant les résultats expérimentaux obtenus.

#### 4.1.3. Résultats et discussion

L'efficacité et la faisabilité de la technique proposée basée sur les cellules de convection Rayleigh-Bénard ont été validées par des expériences en utilisant huile de colza comme fluide de référence afin de s'assurer que le transfert convectif permet à la céramique PZT de générer une réponse électrique par effet pyroélectrique. Nous présentons dans cette partie les premiers résultats expérimentaux obtenus avec le dispositif expérimental décrit et présenté dans la figure (Fig 4.3). Nous avons constaté dans le chapitre qui précède que la technique SSHI a eu un effet important dans l'amélioration de la réponse pyroélectrique. L'amélioration était environ d'un facteur de 2 donc nous nous sommes toujours intéressés par cette technique qui constitue une piste de solution exploitable dans le but d'améliorer davantage la réponse pyroélectrique.

Les résultats qui seront présentés ici vont inclure la tension en sortie de la céramique pyroélectrique, le courant induit et la puissance récupérée dans le cas simple où la céramique est connectée uniquement avec une résistance de charge et également dans le cas où la technique SSHI est mise en œuvre.

Nous illustrons dans la figure (Fig 4.4) l'évolution temporelle de la tension électrique générée par la céramique pyroélectrique placée en dessus du bain d'huile chauffée à  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nous avons prévu que l'excitation thermique (variation de température) sera assurée par le gradient thermique que nous appliquons sur l'huile ( $T_1 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $T_2 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) qui sera dans un état d'instabilité par conséquent, elle sera en convection Rayleigh-Bénard générant ainsi un transfert convectif.

Comme nous avons mentionné auparavant, la céramique pyroélectrique est connectée à un commutateur autoalimenté dans le cadre de la technique SSHI, donc nous traçons dans la figure (Fig 4.4) deux allures de tension en sortie de la céramique pyroélectrique dans le but d'observer l'amélioration de la réponse pyroélectrique par la technique SSHI.

Il ressort de la figure (Fig 4.4) que la présence d'une tension électrique montre que la céramique pyroélectrique a réellement subi des fluctuations de température car elle ne peut générer une tension électrique qu'à la présence d'une variation de température. Ce résultat montre clairement que les convections de Rayleigh-Bénard produites à travers le mouvement d'huile chaude,

sont capables de produire des fluctuations de température nécessaires pour exciter la céramique pyroélectrique. Cela valide en quelque sorte la technique proposée. Quand les molécules d'huile chaudes s'élèvent à cause de leur faible densité, elles chauffent ensuite la céramique. En raison de l'activité pyroélectrique, une tension électrique positive apparaît à ses bornes pour atteindre un maximum. Ensuite les molécules descendent car elles se sont refroidies, et devenues plus dense, à ce moment là, la céramique se retrouve en contact avec l'air ambiant qui contribue à son refroidissement. Par conséquent, la tension s'inverse pour atteindre un minimum. Le maximum et le minimum de la tension pyroélectrique correspondent donc respectivement au chauffage et au refroidissement.

La tension pyroélectrique est un signal alternatif non symétrique, et l'alternance positive et négative ne sont pas identiques et ne présentent pas la même allure. Cela est expliqué par le fait que les fluctuations thermiques sont aléatoires de telle sorte que la céramique pyroélectrique ne reçoit pas la même température au cours du temps. Notons qu'avant inversion de la tension le switch utilisé augmente plus davantage l'amplitude de la tension comme le montre la figure (Fig 4.4).

Sans le switch, la céramique pyroélectrique génère une tension qui ne dépasse pas  $150mV$ , tandis que dans le cas où le switch est utilisé, cette valeur est augmentée pour atteindre  $300mV$ . Si nous comparons donc la tension switchée et non switchée, nous observons clairement que la tension générée par l'élément pyroélectrique est maximisée d'un facteur de 3 grâce à la technique SSHI. Ces résultats prouvent que l'utilisation de cette technique a eu un effet majeur sur l'augmentation de la tension électrique.

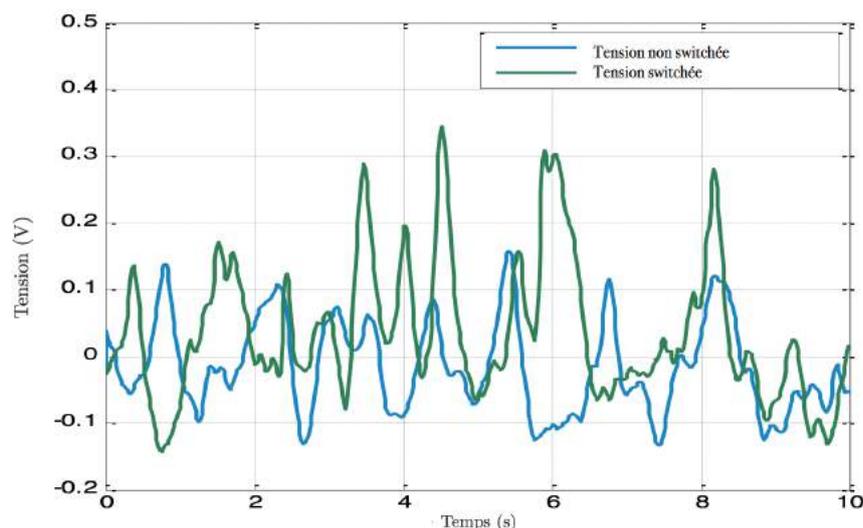


FIGURE 4.4: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique soumise à une fluctuation thermique provenant d'huile de colza en convection chauffée à  $250^{\circ}$ .

Après avoir présenté les résultats en point de vue de l'évolution temporelle de la tension, nous présentons ici le courant induit par l'élément pyroélectrique pour les mêmes conditions prises en considération précédemment. Pour mesurer ce courant, un amplificateur de courant a été utilisé comme le montre la Figure (Fig.4.3). Nous illustrons dans la figure (Fig.4.5) deux allures qui concernent l'évolution du courant induit par la céramique pyroélectrique en fonction du temps pour le cas simple (sans switch) et pour le cas d'usage de switch. L'aspect générale de l'allure du courant induit ne se diffère pas à ce que nous avons observé pour la tension en sortie de la céramique. Nous avons constaté donc la même observation discutée dans le paragraphe précédent.

En effet, le processus chauffage/refroidissement est tellement rapide que la réponse pyroélectrique en terme de courant induit est rapide aussi. Donc le maximum et le minimum des amplitudes correspondent respectivement aux chauffage et refroidissement de la céramique pyroélectrique. Les valeurs maximales positives obtenues lorsque nous utilisons le commutateur automatique valent  $1,55 \mu A$ . Sans utiliser la technique SSHI ces valeurs sont minimales et ne dépasse pas  $0.5 \mu A$ . Une augmentation d'un facteur de 3 est donc constatée.

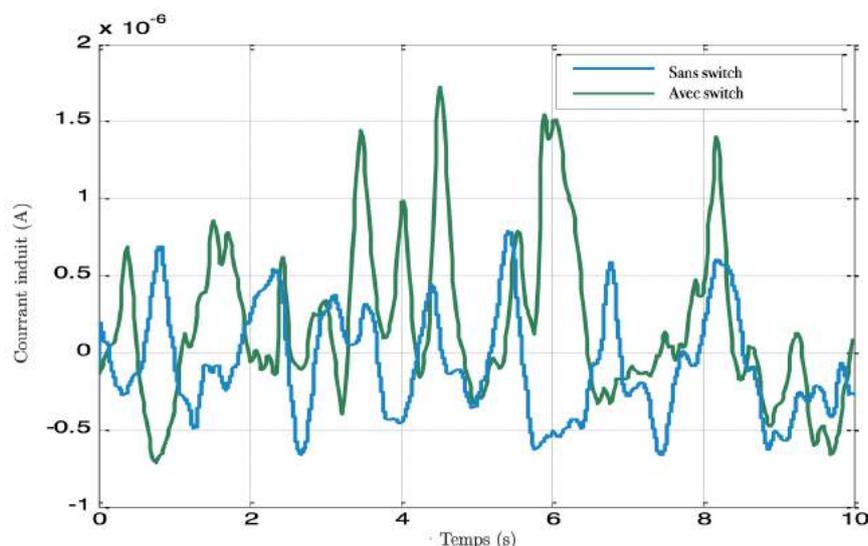


FIGURE 4.5: Evolution temporelle du courant induit par la céramique pyroélectrique dans la configuration de Rayleigh-Bénard

Pour parler en terme de puissance récupérée, nous suivons la même procédure de calcul expliquée et décrite dans le chapitre précédent afin d'obtenir la puissance en fonction de la résistance de charge que nous avons connectée en parallèle avec la céramique pyroélectrique comme le montre la figure (Fig.4.3). Nous illustrons dans la figure (Fig.4.6) la puissance récupérée par la céramique pyroélectrique en fonction de la résistance de charge. Pour les mêmes conditions de différence de

température et de tension de sortie, la puissance mesurée sur la charge atteint une valeur maximale de  $0.28 \text{ mW}$ . La puissance a été maximisée par la technique SSHI pour atteindre une valeur qui vaut  $0.55 \text{ mW}$ . Cette valeur a démontré l'excellent potentiel de cette technique pour la récupération d'énergie thermique.

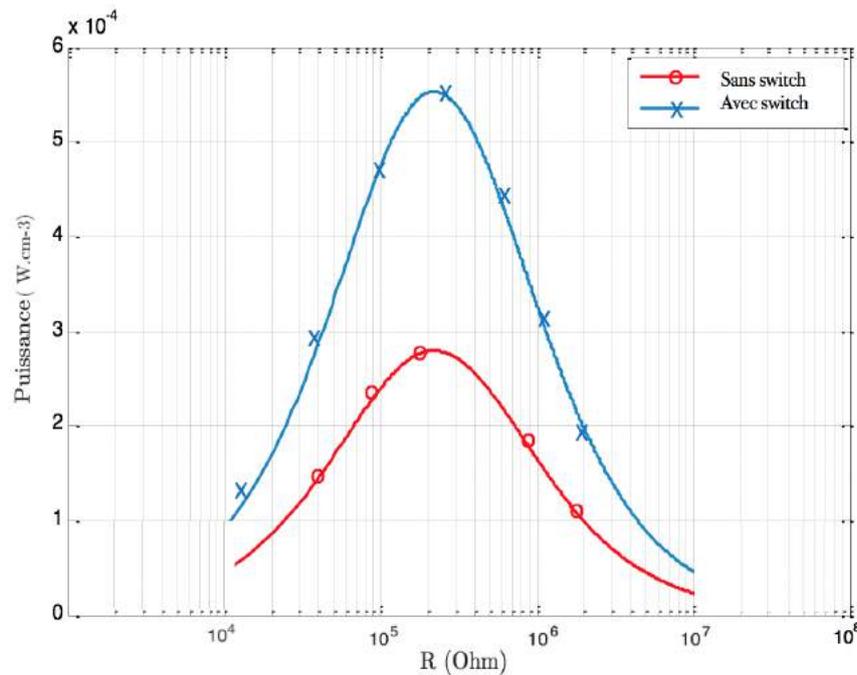


FIGURE 4.6: Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge

Il est clair que nous avons pu atteindre des valeurs de puissance en milliwatts en utilisant une technique très simple basée sur les convections de Rayleigh-Bénard et l'effet pyroélectrique. Par conséquent, le travail proposé dans ce chapitre présente une technique convaincante pour produire de l'énergie électrique à partir d'une source thermique. Le fait de créer des fluctuations de température tout en maintenant la température de fluide fixe constitue une idée novatrice, originale et principalement réalisable à faible coût. En outre, les variations de température existent dans de nombreux environnements industriels qui témoignent l'importance de ce travail. Nous nous sommes intéressés à améliorer le niveau de puissance récupérée, pour ce fait, nous étudions dans ce qui suit, l'influence de certains paramètres pour pouvoir augmenter le transfert convectif, car qui dit convection importante, dit aussi excitation importante qui traduit une meilleure réponse pyroélectrique. Les travaux dans ce sens seront présentés au cours de ce chapitre.

## 4.2. Optimisation et amélioration de la récupération d'énergie thermique

xzzz

### 4.2.1. Influence de la nature du fluide en convection sur la réponse pyroélectrique

#### 4.2.1.1. Nature des fluides utilisés

Le transfert de chaleur peut jouer un rôle important dans divers processus industriels. Notre but principal est d'augmenter le transfert thermique afin d'améliorer la réponse pyroélectrique de notre échantillon. La voie que nous avons choisie pour pouvoir augmenter est d'utiliser des fluides efficaces pour le transfert convectif car l'efficacité de tels processus est souvent limitée par les propriétés thermophysiques des fluides utilisés. Les techniques d'intensification du transfert de chaleur convectif en jouant sur la nature du fluide caloporteur ne sont pas très connues. Nous avons essayé à travers cette étude d'optimiser les propriétés du fluide destiné au transfert convectif. Nous évoquerons dans ce qui suit les propriétés de chaque fluide choisi ainsi les essais expérimentaux que nous avons effectué dans le cadre de cette étude.

Nous avons décidé d'étudier la réponse pyroélectrique en utilisant quatre types de fluide différents. Notre choix s'est porté sur l'eau, l'huile de colza, le glycérol et l'huile de silicone. Ce choix des fluides a été guidé par le fait que :

- Ils répondent tous aux critères généraux demandés par le transfert thermique par convection.
- Ils ont des propriétés différentes, ce qui facilite notre étude comparative.
- Ils sont présents d'une manière remarquable dans plusieurs applications.
- Leurs coûts sont relativement corrects
- La manipulation de ces fluides ne présente aucune toxicité ou danger pour l'homme et l'environnement

Chaque fluide a des propriétés physiques qui lui sont spécifiques. Les propriétés des fluides utilisés sont répertoriées dans le Tableau (Tab.4.1) *Huile de colza* est une huile végétale que l'on obtient par trituration de graines de colza, elle est utilisée dans des secteurs variés. Après transformation, l'huile de colza rentre dans la production de biocarburants [119]. En tant qu'une huile végétale, son utilisation comme un fluide de transfert thermique constitue une voie très prometteuse. Cette huile est disponible en grande quantité avec un coût relativement faible, ainsi qu'elle possède des propriétés thermique et thermo-physique intéressantes telle que l'absence de la pression de vapeur dans sa gamme de fonctionnement. *Les huiles de silicone* ont une très bonne stabilité chimique, ce qui veut dire une bonne résistance au vieillissement. Le *glycérol* est un fluide

visqueux, transparent, inodore et ne présente aucune toxicité. Ainsi qu'il est biocompatible et très utilisé dans divers domaines d'application. *L'Eau* est présente dans de nombreux domaines et secteurs d'activités allant du refroidissement au transport thermique. Elle possède un ensemble de propriétés physiques et chimiques, elle peut devenir solvant, fluide thermique ou simplement liquide facile à manipuler ce qui explique son implémentation dans la plupart des activités industrielles. Pour réaliser notre étude expérimentale, nous avons utilisé l'Huile de colza commercialisée par la société *Henry Frank S.A.S*, huile de silicone *Rhodorsil huile 604 V 50*, glycérol *Aldrich : Glycérol pour biologie moléculaire, 99 %* et de l'eau potable. ]

Fluide	Huile de colza	Eau	Huile de silicone	Glycérol
Viscosité dynamique à 25°C (Pa.s)	$0,86.10^{-2}$	$1,005.10^{-3}$	1,14	1,51
Viscosité dynamique à 100°C (Pa.s)	$0,454.10^{-3}$	$0,282.10^{-3}$	0,014	$0,368.10^{-3}$
Masse volumique ( $g.cm^{-3}$ )	0,916	0,998	0,96	1,261
Conductivité thermique ( $W/m.°C$ )	0,1698	0,598	0,15	0,286
Coefficient de dilatation ( $°C^{-1}$ )	$6,7.10^{-4}$	$0,18.10^{-3}$	$10,4.10^{-4}$	$0,5.10^{-3}$
Chaleur massique ( $J.g^{-1}.°C^{-1}$ )	3,744	4,178	1,525	2,41

Tableau 4.1: Propriétés des fluides utilisés.

Les valeurs de la viscosité sont des valeurs mesurées par un viscosimètre *Brookfield* (Fig. 4.7) et comparées avec les valeurs trouvées dans les fiches techniques de chaque fluide. Le principe de mesure de la viscosité est d'appliquer une force de mouvement à l'aide d'une sonde qui tourne en mettant le fluide en rotation à vitesse fixe. La résistance du fluide au mouvement de rotation appliqué est enregistrée à l'aide d'un ressort spiralé interne, puis convertie en unité viscosimétrique, cette résistance traduit la viscosité.



FIGURE 4.7: Viscosimètre *Brookfield* conçu pour la mesure des viscosités des fluides utilisés

#### 4.2.1.2. Résultats et discussions

Nous voulons à travers cette étude, déterminer les caractéristiques les plus influentes sur l'aptitude d'un fluide à évacuer la chaleur. Pour cela nous avons essayé de contrôler le nombre de Prandtl (grandeur intrinsèque au fluide utilisé) et le nombre de Rayleigh (lié à la variation thermique). Nous avons combiné le contrôle de nombre de Prandtl  $Pr$  et nombre de Rayleigh  $Ra$  car les caractéristiques des fluides changent toujours avec la température. Comme nous avons expliqué préalablement dans le chapitre 2, le nombre de Prandtl permet d'évaluer l'efficacité du transfert thermique de chaleur par rapport au transport de quantité de mouvement. Un nombre de Prandtl élevé indique que le profil de température dans le fluide sera fortement influencé par le profil de vitesse. Un nombre de Prandtl faible indique que le transfert thermique est tellement rapide que le profil de vitesse a peu d'effet sur le profil de température. En ce qui concerne le nombre de Rayleigh, Il peut être vu comme la différence de température sans dimension, c'est à dire que plus il est élevé, plus l'échange de chaleur est important. A partir de là, pour avoir un système convectif efficace en terme de transfert thermique, il faut utiliser un fluide ayant un faible nombre de Prandtl tandis que le nombre de Rayleigh doit être élevé (Eqs. 2.24 et 2.25). Les valeurs de  $Pr$  et  $Ra$  qui correspondents aux fluides proposés sont présentées dans le tableau (Tab. 4.2).

Fluide	Huile de colza	Eau	Huile de silicone	Glycérol
Nombre de Prandtl	1,001	7	12,72	10,59
Nombre de Rayleigh	$\approx 15.10^4$	$\approx 12.10^4$	$\approx 8.10^4$	$\approx 10^4$

Tableau 4.2: Valeurs de nombre de Prandtl et nombre de Rayleigh.

Il en ressort de ces valeurs que l'huile de colza possède le plus faible nombre de Prandtl et le plus grand nombre de Rayleigh. Donc nous estimons que le transfert thermique utilisant l'huile de colza sera important par conséquent la réponse pyroélectrique sera plus importante.

Nous présentons dans ce qui suit les résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de cette étude. En raison que les propriétés changent avec la température, chaque fluide subit différents gradients thermiques ( $T_{fr} = 25^\circ C$ ,  $T_{ch} = 100^\circ C$ ,  $150^\circ C$ ,  $200^\circ C$ ,  $250^\circ C$ ). Le dispositif expérimental dédié à cette étude est identique à celui de l'étude précédente. La céramique pyroélectrique est donc placée en dessus de chaque bain de fluide chaud. La réponse pyroélectrique est ensuite enregistrée et tracé via *Matlab*®.

Nous illustrons pour chaque fluide utilisé, l'évolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique. Nous remarquons tout d'abord que la tension pyroélectrique augmente avec l'augmentation de la température de chauffage des fluides. Nous avons estimé que la réponse pyroélectrique sera plus importante si nous utilisons l'huile de colza possédant un faible nombre de Prandtl et un nombre de Rayleigh élevé. Cela a été prouvé expérimentalement en se basant sur les figures (Figs 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11) qui montrent que la tension obtenue en utilisant l'huile de colza est supérieure aux tensions obtenues par les autres fluides utilisés. La tension vaut 170 mV, 185 mV, 250 mV et 350 mV respectivement pour des températures de chauffage de  $100^\circ C$ ,  $150^\circ C$ ,  $200^\circ C$  et  $250^\circ C$  (Fig 4.11). L'eau vient en deuxième ordre avec des amplitudes maximales de tension qui atteignent 50 mV, 90 mV, 110 mV et 175 mV respectivement pour des températures de chauffage de  $100^\circ C$ ,  $150^\circ C$ ,  $200^\circ C$  et  $250^\circ C$  (Fig 4.10). En utilisant le glycérol, la tension ne dépasse pas 25 mV, 60 mV, 80 mV et 140 mV respectivement pour des températures de chauffage de  $100^\circ C$ ,  $150^\circ C$ ,  $200^\circ C$  et  $250^\circ C$  (Fig 4.9). Les faibles valeurs de tension pyroélectrique ont été obtenues en utilisant l'huile de silicone (Fig 4.8) et qui valent 70 mV, 40 mV, 10 mV, 0,5 mV.

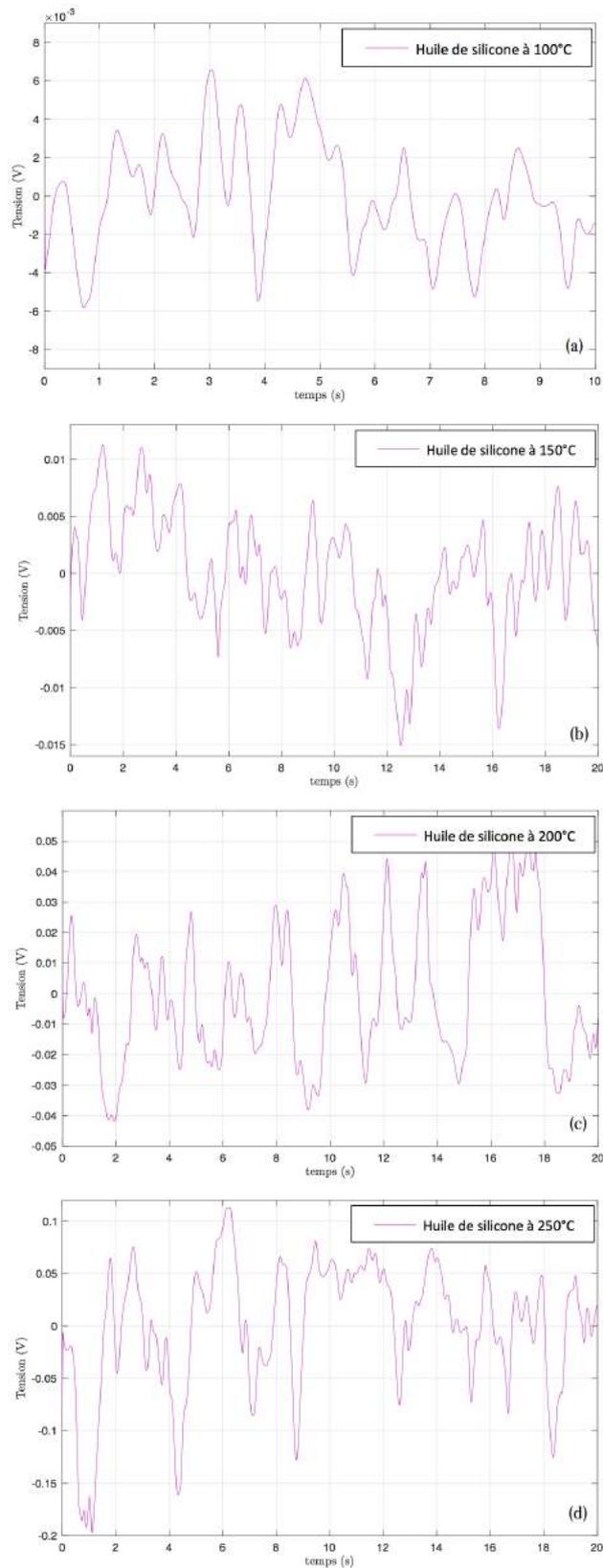


FIGURE 4.8: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'huile de silicone chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C.

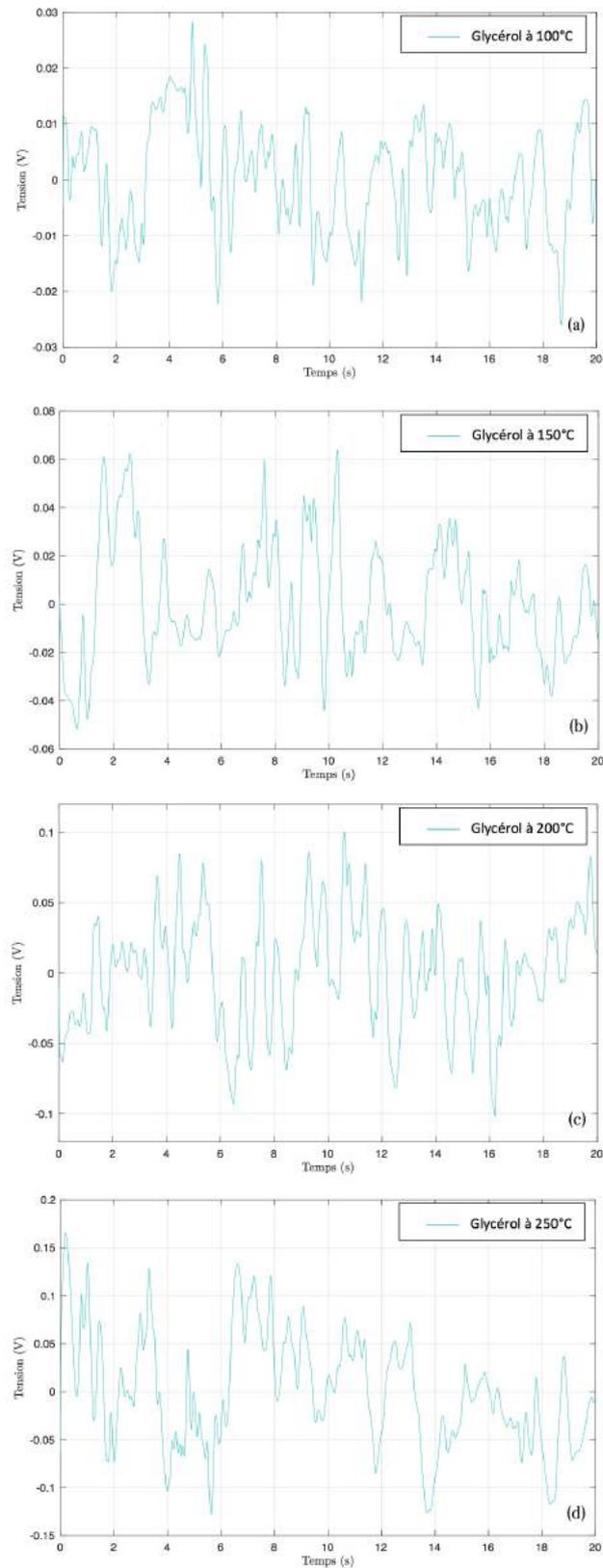


FIGURE 4.9: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain de glycérol chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C.

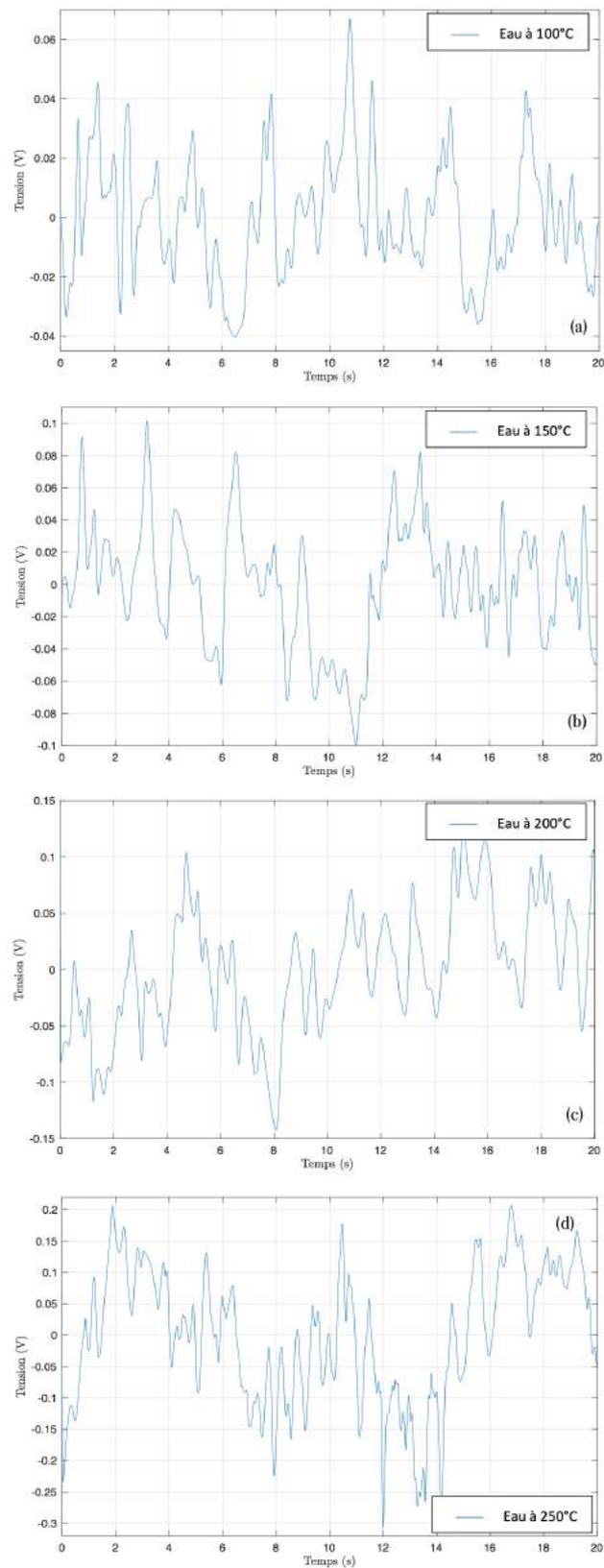


FIGURE 4.10: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'eau chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C.

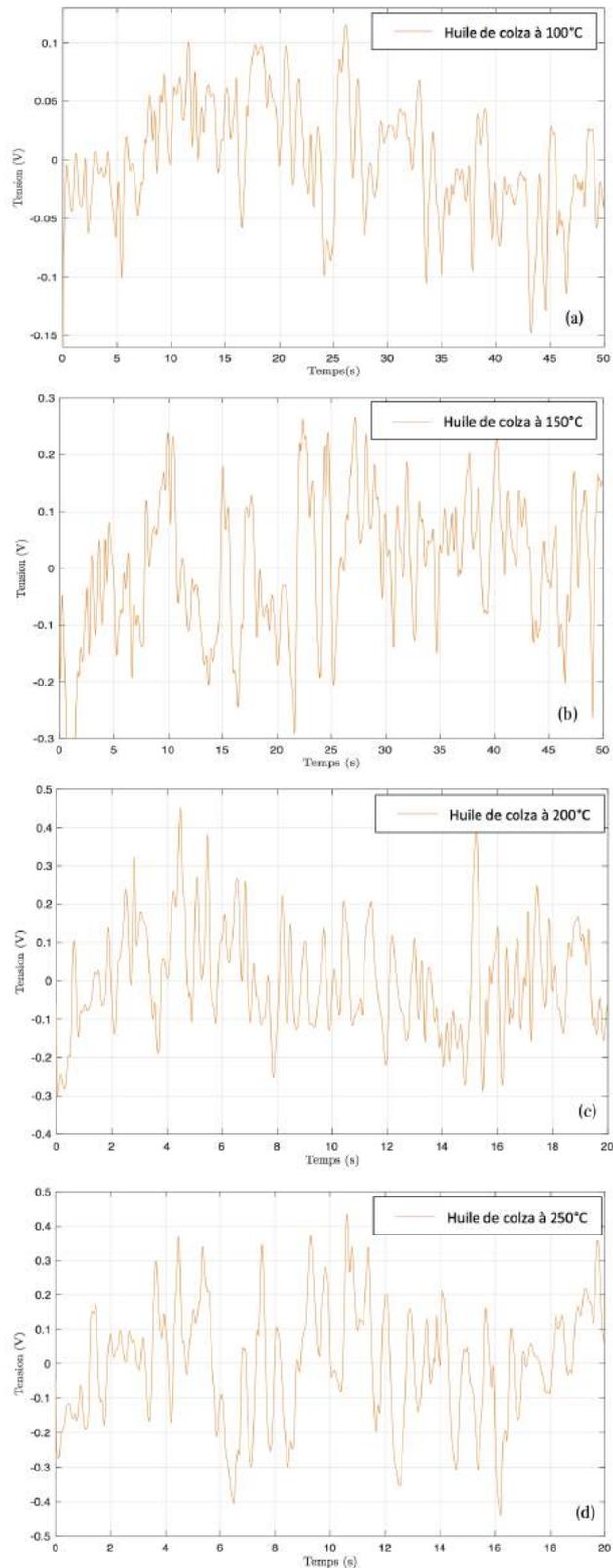


FIGURE 4.11: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en utilisant un bain d'huile de colza chauffé à différentes températures : (a) 100 °C, (b) 150 °C, (c) 200 °C, (d) 250 °C.

Lors de l'étude expérimentale, nous avons constaté que le glycérol devient moins visqueux au point qu'il s'approche à la consistance de l'eau, donc le glycérol et l'eau ont tendance à trop bouger qu'à transférer de la chaleur. L'huile de silicone ne change pas trop sa viscosité avec la température. Malgré qu'il est chauffé à 250 °C, il reste très visqueux. L'huile de colza a changé sa viscosité mais pas au point qu'il devient trop léger comme l'eau et le glycérol, ni très visqueux comme le cas d'huile de silicone. Il apparaît donc que la viscosité a l'influence la plus importante sur le transfert convectif. En effet, on peut voir que l'augmentation du transfert thermique est directement liée à la diminution de la viscosité mais à une certaine limite, sinon le profil de vitesse au sein de fluide devient dominant.

Pour une meilleure observation de l'évolution de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique chauffée par chacun des quatre fluides utilisés, nous proposons la figure (Fig.4.12) qui récapitule les résultats obtenus de cette étude expérimentale et qui illustre la tension électrique en fonction de la température de chauffage des fluides.

A partir de cette étude menée sur l'efficacité du transfert convectif en fonction de la nature des fluides liée directement à l'efficacité de la réponse pyroélectrique, nous concluons que l'huile de colza constitue le choix le plus favorable pour effectuer la suite de nos expériences basées sur les convections thermiques et l'effet pyroélectrique.

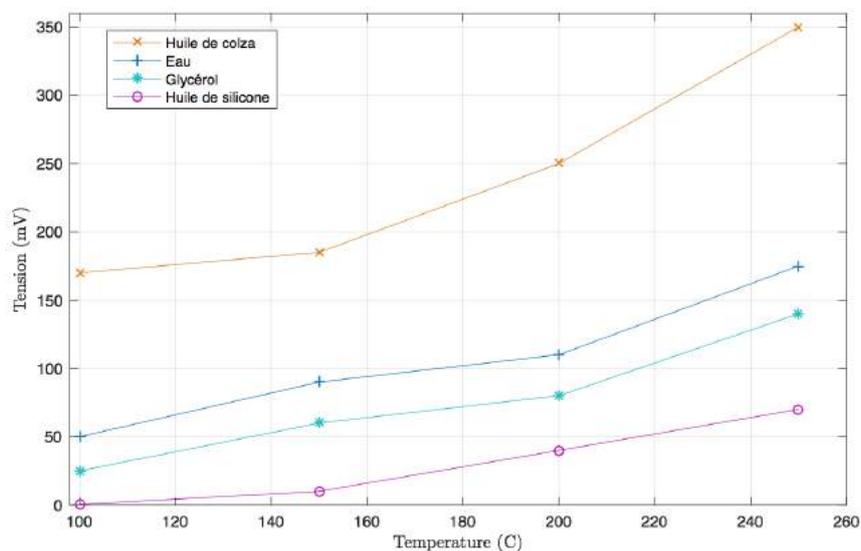


FIGURE 4.12: Tension pyroélectrique obtenue pour chaque fluide utilisé en fonction de la température de chauffage.

#### 4.2.2. Effet de géométrie de système de convection sur la réponse pyroélectrique

Le deuxième acteur qui peut agir sur le transfert thermique par convection est la géométrie du système où la convection a lieu. Dans le but d'optimiser notre système de récupération d'énergie,

nous proposons dans cette partie, d'étudier l'effet de la géométrie de système de convection sur la réponse pyroélectrique. Dans un premier temps, nous étudions l'effet de volume sur la réponse pyroélectrique noté " $h_1$ ". Le volume est donc changer qu'à travers la hauteur de la coupelle tout en gardant son diamètre fixe. Cette étude nous permettra de déterminer le choix (entre un petit ou un grand volume) le plus favorable pour une meilleure excitation de la céramique est donc une meilleure réponse pyroélectrique. Dans un second temps, nous essayons d'étudier l'influence du niveau d'huile sur la réponse pyroélectrique, c'est à dire la distance qui sépare la surface libre d'huile et la céramique pyroélectrique noté " $h_2$ ". Cette étude vise non seulement à optimiser notre système de récupération d'énergie mais aussi à développer un capteur de niveau d'huile autonome en terme d'énergie. Le dispositif expérimental dédié à cette étude est présenté dans la figure (Fig 4.13).

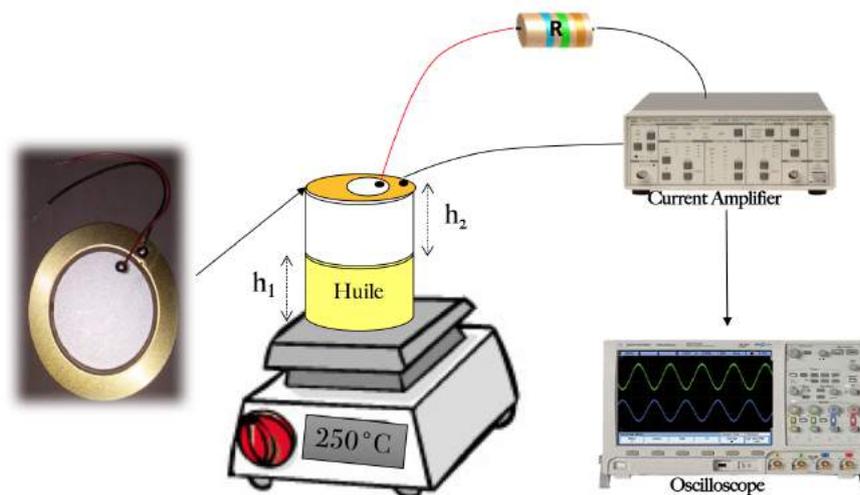


FIGURE 4.13: Illustration schématique simplifié du dispositif expérimental pour étudier l'influence de  $h_1$  et  $h_2$

#### 4.2.2.1. Effet du volume en variant la hauteur du système convectif

Nous discutons dans ce paragraphe l'effet du volume " $h_1$ " sur la réponse pyroélectrique. Pour ce fait, nous avons utilisé trois coupelles ayant le même diamètre mais des hauteurs différentes. Nous mentionnons que " $h_2$ " est maintenu fixe ( $h_2 = 0 \text{ cm}$ ), c'est-à-dire que la céramique pyroélectrique est en contact direct avec l'huile chauffée à  $250^\circ\text{C}$ . Nous illustrons dans la figure (Fig 4.14) l'évolution de la tension en sortie de la céramique pyroélectrique en fonction de temps et pour différent valeurs de " $h_1$ " :  $1 \text{ cm}$ ,  $2 \text{ cm}$  et  $3 \text{ cm}$ .

A partir de la figure (Fig 4.13) nous constatons que la tension en sortie de la céramique pyroélectrique augmente faiblement avec la diminution de " $h_1$ ". Si nous observons l'évolution tempo-

relle de la tension dans l'intervalle de temps  $[0s, 4s]$  pour les trois cas de " $h_1$ ", nous remarquons un changement au niveau de la fréquence. Cette observation est expliquée par le fait que quand " $h_1$ " est petite c'est à dire un petit volume, l'huile est chauffée et refroidie très rapidement, cela entraîne donc à des fluctuations thermiques assez rapides que la réponse pyroélectrique est rapide aussi. En revanche, quand " $h_1$ " est grande c'est à dire un volume important, l'huile subit un cycle de chauffage / refroidissement très lent vu qu'il y a plus d'espace et donc plus de temps pour que le fluide tourne et crée des cellules de convection.

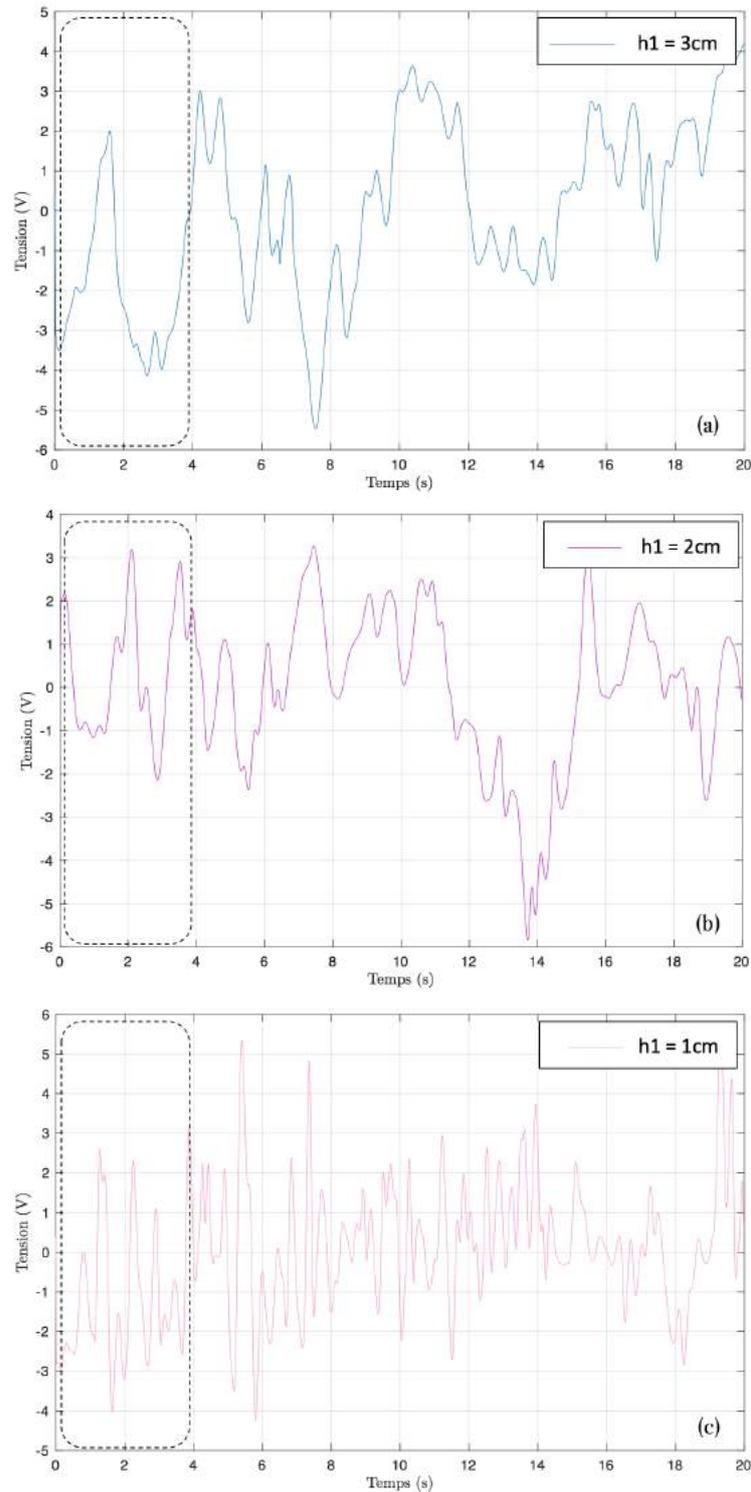


FIGURE 4.14: Evolution temporelle de la tension électrique en sortie de la céramique PZT en tenant compte de trois valeurs de " $h_1$ " : (a)  $h_1 = 3\text{ cm}$ , (b)  $h_1 = 2\text{ cm}$ , (c)  $h_1 = 1\text{ cm}$ .

En ce qui concerne l'effet du volume d'huile sur la puissance récupérée, nous prévoyons que l'augmentation de la puissance avec la diminution de " $h_1$ " sera faible tant que la tension en sortie de

la céramique change faiblement en fonction du volume. Nous présentons dans la figure (Fig.4.14) la puissance récupérée pour différentes valeurs de " $h_1$ ".

Nous avons remarqué que nous récupérons des niveaux très proches de puissance de puissance. C'est évident puisque la puissance est liée à la tension qui augmente faiblement tels que présenté préalablement. Ainsi, la quantité de fluide a peu effet sur l'efficacité énergétique du système, mais elle a un effet direct sur la vitesse de réponse de la céramique pyroélectrique.

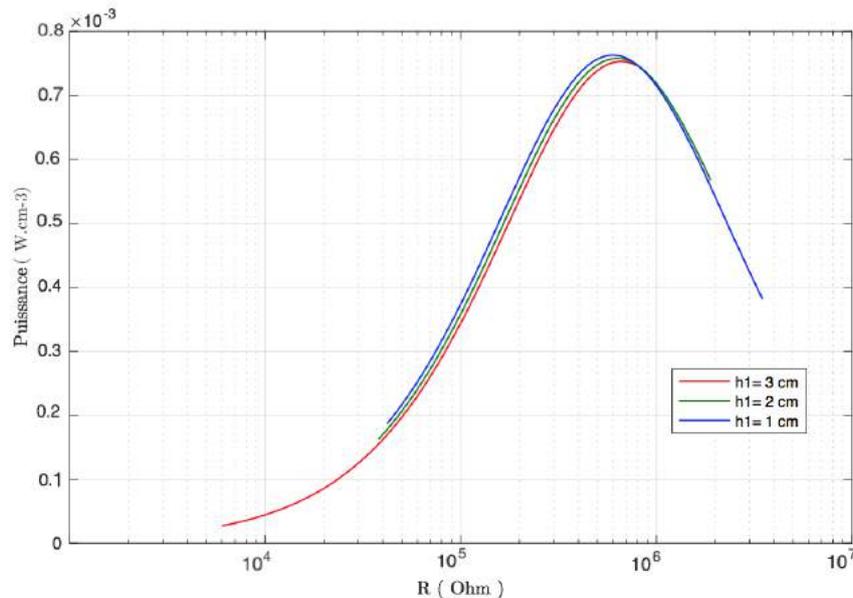


FIGURE 4.15: Puissance récupérée pour différent valeur de " $h_1$ " en fonction de la résistance de charge R

#### 4.2.2.2. Effet de la distance entre la surface libre d'huile et la céramique pyroélectrique (niveau d'huile)

Cette partie vise à présenter les résultats expérimentaux qui concernent l'étude de l'effet de la distance séparant la surface libre d'huile et la céramique pyroélectrique noté " $h_2$ ", cette distance désigne également le niveau d'huile par rapport à la position de la céramique pyroélectrique. Nous mentionnons que lorsque " $h_2$ " est supérieure à zéro, c'est à dire que la céramique et l'huile ne sont pas en contact, les convections considérées sont causées par l'air chaud. Cependant, lorsque " $h_2$ " est nulle, la céramique pyroélectrique est en contact direct avec l'huile chaude, de sorte que l'excitation est assurée par l'huile chaude en convection et non pas par l'air chaud. Toujours de la même manière, la convection produite dans le bain d'huile fournit une variation de température récupérée par la céramique pyroélectrique et convertie en une tension électrique par activité pyroélectrique.

Nous présentons dans la figure (Fig.4.16) l'évolution temporelle de la tension générée par la céramique pyroélectrique pour différentes hauteurs " $h_2$ " : 2 cm, 1 cm, 0,5 cm et 0 cm. Les allures

présentées dans la figure (Fig.4.16) montrent que l'amplitude de la tension augmente avec la diminution de " $h_2$ ". Cela veut dire que plus la céramique pyroélectrique est proche du bain d'huile, plus elle est excitée davantage et donc la réponse pyroélectrique devient importante.

Les valeurs maximales de tension correspondant aux valeurs de " $h_2$ " :  $2\text{ cm}$ ,  $1\text{ cm}$ ,  $0,5\text{ cm}$  et  $0\text{ cm}$  sont respectivement de  $150\text{ mV}$ ,  $200\text{ mV}$ ,  $260\text{ mV}$  et  $300\text{ mV}$ .

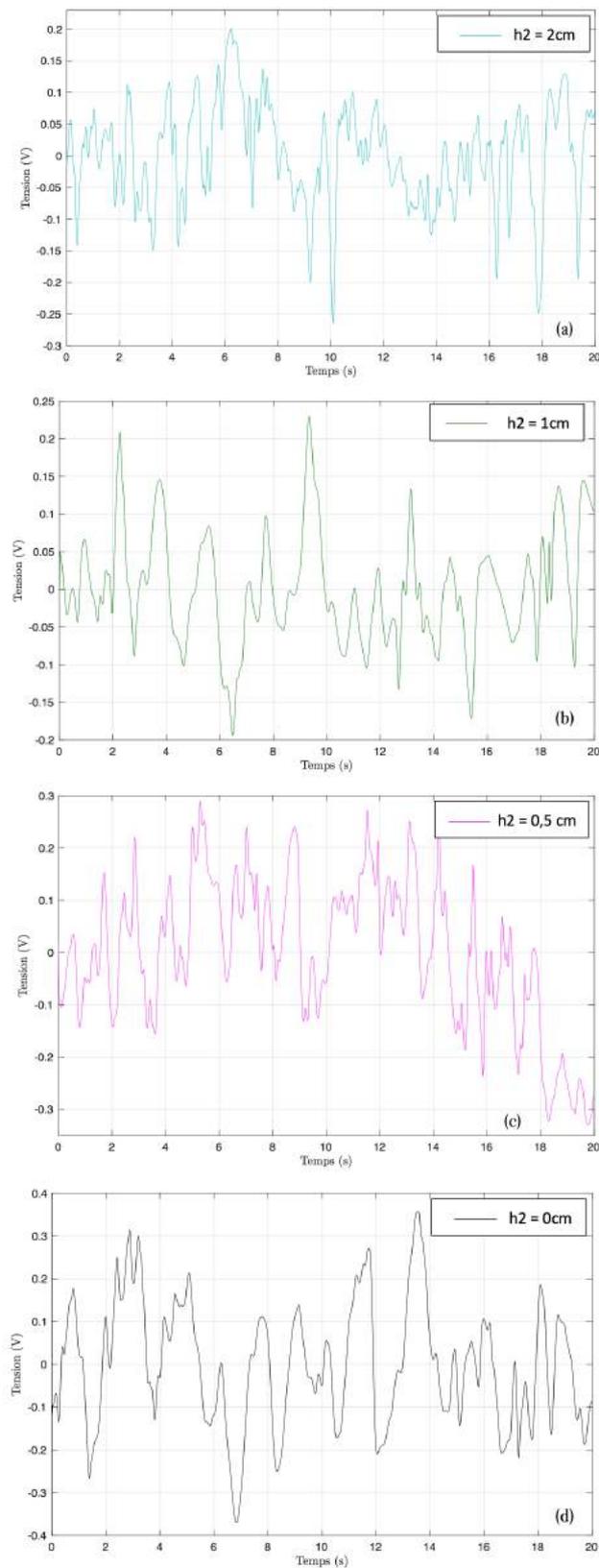


FIGURE 4.16: Tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique en fonction de temps pour différent valeur de  $h_2$  : (a)  $h_2 = 2\text{ cm}$ , (b)  $h_2 = 1\text{ cm}$ , (c)  $h_2 = 0,5\text{ cm}$ , (d)  $h_2 = 0\text{ cm}$ .

Pour plus de précision, nous suggérons la figure (Fig.4.17) qui montre la tension électrique en considérant une large gamme de hauteur allant de 0 à 5 cm. Cette courbe nous permettra d'attribuer chaque hauteur à une valeur de tension. Ensuite, il sera possible connaître le niveau d'huile à partir d'une valeur de tension, et vice versa.

Ces données expérimentales nous aideront à développer un capteur de niveau d'huile autonomes en termes d'énergie que nous décrivons son concept général et son principe de fonctionnement dans ce qui suit.

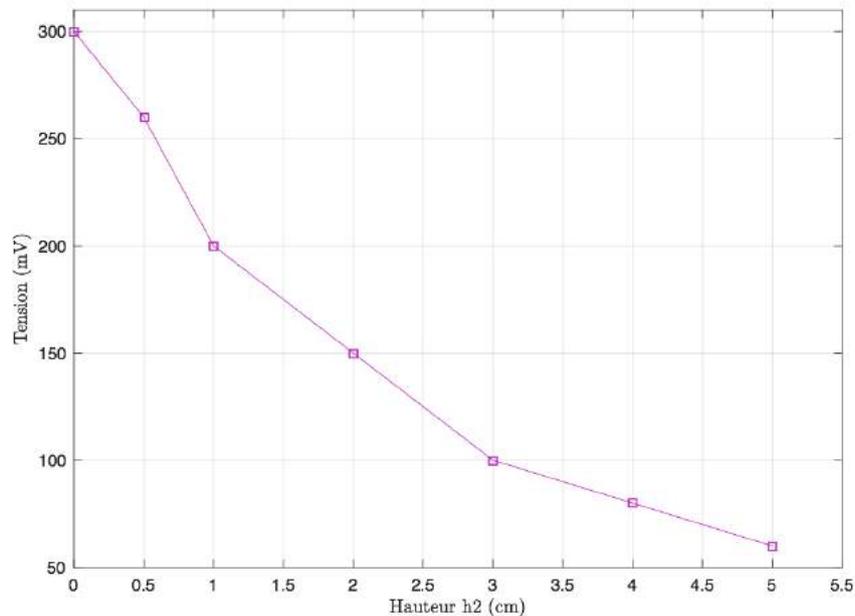


FIGURE 4.17: Tension électrique en sortie de la céramique en fonction de " $h_2$ "

De la même façon, nous traçons le courant induit par la céramique pyroélectrique pour différentes valeurs de " $h_2$ ". La figure (Fig.4.18) présente quatre allures de l'évolution temporelle du courant induit par la céramique pyroélectrique en fonction de " $h_2$ ". A partir de ces allures nous observons une augmentation des amplitudes maximales avec la diminution de " $h_2$ ". Cette augmentation est due au fait que les convections par air chaud ( $h_2 \neq 0$ ) chauffent faiblement la céramique pyroélectrique, tandis que les convections par huile ( $h_2 = 0$ ) chauffent parfaitement la céramique pyroélectrique. Les valeurs maximales obtenues pour " $h_2 = 1$  cm, 0,5 cm et 0 cm" sont respectivement de  $6 \mu A$ ,  $7 \mu A$  et  $10 \mu A$ .

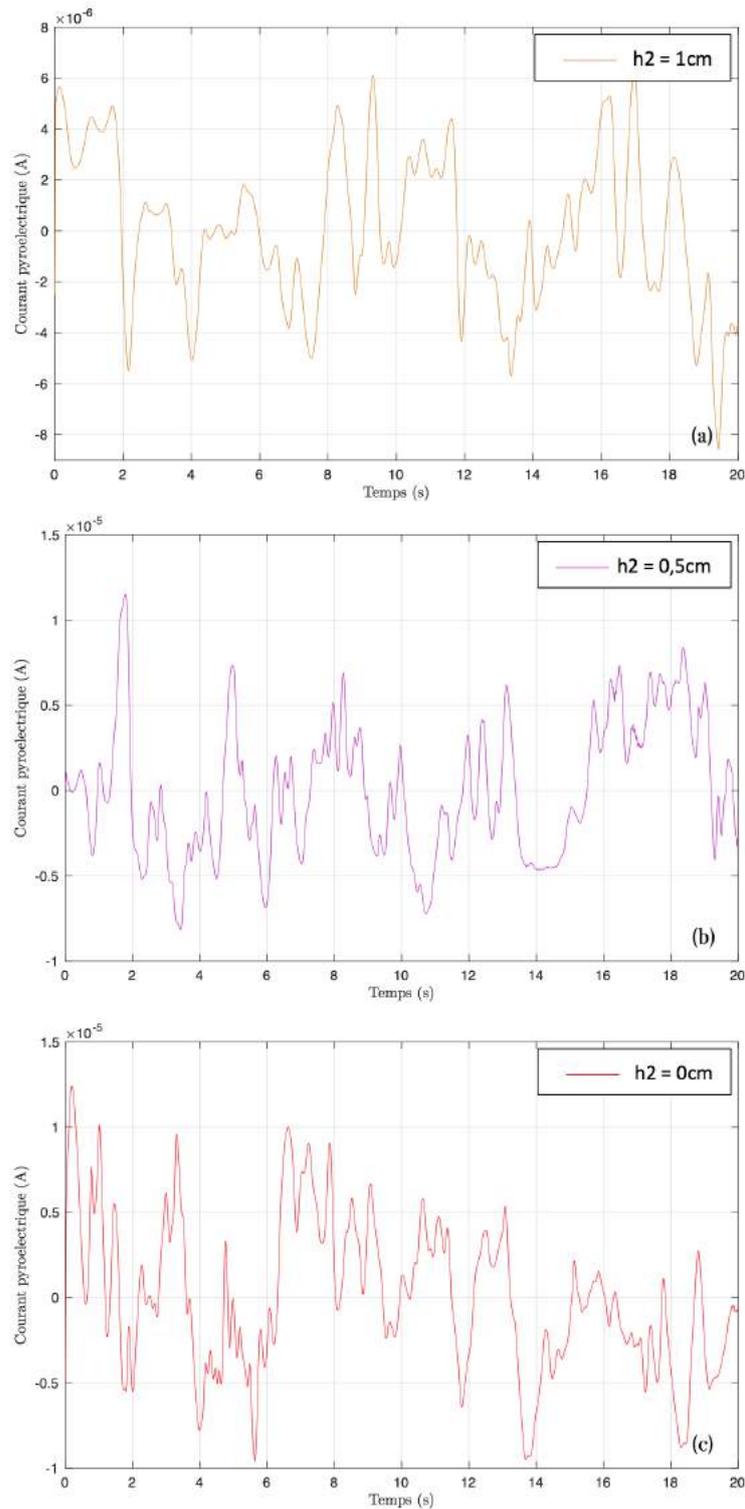


FIGURE 4.18: Evolution du courant induit par la céramique pyroélectrique en fonction de temps pour différentes valeurs de " $h_2$ " : (a)  $h_2 = 1\text{cm}$ , (b)  $h_2 = 0,5\text{cm}$ , (c)  $h_2 = 0\text{cm}$ .

Nous suivons la même méthode pour effectuer des mesures expérimentales de la puissance récupérée c'est à dire que nous la calculons à partir de la tension électrique en sortie de la céramique

pyroélectrique. Nous illustrons dans la figure (Fig. 4.19) la puissance récupérée en fonction de la résistance de charge que nous connectons en parallèle avec la céramique pyroélectrique.

Lorsque nous comparons les valeurs de puissance récupérée obtenues pour différentes valeurs de " $h_2$ " nous observons une augmentation significative de la puissance qui passe de 0,35 mW à 0,8 mW. Ces résultats montrent clairement que la puissance augmente en diminuant " $h_2$ ". Donc, pour avoir une puissance récupérée maximale, la céramique pyroélectrique doit être en contact direct avec le fluide chaud.

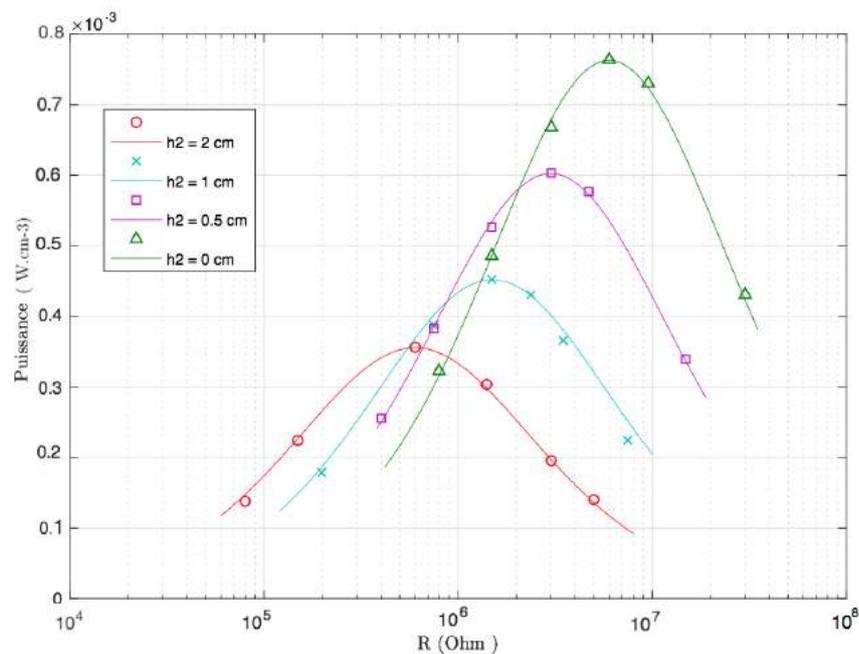


FIGURE 4.19: Puissance récupérée en fonction de la résistance de charge  $R$  pour quatre niveau d'huile

Nous concluons à partir des deux études menées :

- Effet du volume en variant la hauteur du système convectif
- Effet de la distance entre la surface libre d'huile et la céramique pyroélectrique (niveau d'huile)

Que pour avoir un système optimal, rapide et efficace, il est nécessaire que la céramique pyroélectrique soit en contact direct avec le fluide en convection tout en minimisant son volume.

#### 4.2.3. Application visée : capteur de niveau d'huile autonome en termes d'énergie

Les avancés technologiques ont contribué à l'apparition des capteurs sans fil avec des caractéristiques très importantes qui se traduit principalement par un bon traitement de signal, une meilleure précision et crédibilité de mesure. Une évolution importante de ces technologies a amené

à des nouvelles révolutions au sein des capteurs, celle de l'intelligence embarquée pour développer des capteurs appelés intelligents qui combinent l'acquisition des données et leur traitement interne et autonome [120, 121].

Le concept de capteur intelligent est illustré en figure (Fig.4.20). Un capteur intelligent est caractérisé par une capacité de calcul interne et traitement de signal en plus d'une interface de communication [122, 123].

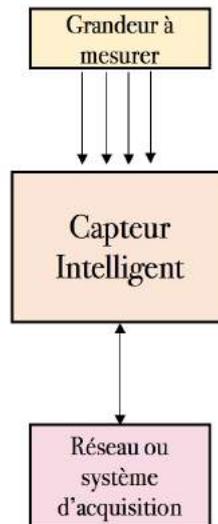


FIGURE 4.20: Principe d'un capteur intelligent

Les capteurs intelligents sans fil sont le fruit du développement technologique qui a également conduit à la miniaturisation des architectures électroniques. Avant ce développement, les réseaux des capteurs ont été combinés à des supports d'alimentation filaire coûteux et encombrant. Actuellement, certaines exigences telles qu'une durée de vie importante et un faible coût sont fortement demandées pour la conception des capteurs [123, 124, 125, 126, 127]. Avec ces exigences le capteur doit présenter les caractéristiques suivantes :

- Faible complexité matérielle et logicielle : le capteur doit posséder une partie matérielle et une partie logicielle aussi simple que possible car qui dit complexité dit une consommation importante d'énergie. Donc pour éviter d'augmenter les consommations, une faible complexité des fonctionnalités mises en œuvre est nécessaire.
- Faible consommation : cette caractéristique constitue une exigence très importante dans plusieurs applications puisqu'elle traduit une longue durée de vie.

L'autonomie et la durée de vie constituent donc le principal défi pour la conception d'un

capteur sans fil. Pour assurer la notion « sans fil » des capteur, l'alimentation sans câblages est généralement remplacée par des batteries. Les conditions prises en considération lors de l'usage des batteries sont : un faible poids, une taille réduite, une capacité en charge qui résiste à différents usages, une autodécharge lente pour espérer une durée de vie la plus longue possible. En dépit que les batteries résolvent le problème de câblage encombrant, les capteurs à batterie posséderont toujours une durée de vie limitée. Aujourd'hui, des systèmes de récupération de l'énergie environnementale sont utilisés pour prolonger l'état de charge de la batterie ou carrément assurer l'autonomie des capteurs [128, 128]. Dans cet objectif, nous décrivons dans le paragraphe suivant, une application que nous visons et qui concerne le développement d'un capteur sans fil de niveau d'huile autonome basée sur l'étude expérimentale présentée préalablement.

#### 4.2.3.1. Concept général du capteur proposé

Par définition, un capteur est tout dispositif capable de transformer une grandeur physique observée telle que la pression, la température . . . en une autre grandeur utilisable comme l'intensité électrique. Pour cela, il possède au moins un transducteur qui assure la conversion de grandeur d'entrée en une autre. Dans les capteurs intelligents la partie transducteur est souvent basée sur des matériaux intelligents. Plusieurs capteurs de ce type ont été développés tels que les capteurs piézoélectriques. Le choix de matériau intelligent pour réaliser un capteur est toujours lié à la nature du grandeur d'entrée et de sortie. Concernant le cas traité dans les travaux de cette thèse, la grandeur d'entrée est la température, et la grandeur de sortie est l'électricité. Le capteur sera donc réalisé en utilisant un matériau pyroélectrique.

Nous avons montré au cours des travaux présenté dans ce manuscrit que la céramique pyroélectrique de type PZT possède des caractéristiques très importantes telles qu'une sensibilité et une efficacité élevées qui doivent certainement mises en profite afin de développer un capteur de niveau d'huile. Le capteur proposé sera capable de détecter le niveau de remplissage d'un réservoir d'huile véhiculaire, car chaque valeur de tension est attribuée à un niveau d'huile (Fig. 4.17) d'après l'étude expérimentale que nous avons menée et qui concerne l'effet de niveau d'huile sur la réponse pyroélectrique. Le concept général de l'application visée est illustré dans la figure (Fig. 4.21A). La céramique sera donc utilisée en tant qu'un convertisseur pyroélectrique des fluctuations thermiques, provenant du réservoir véhiculaire contenant une huile, en électricité qui assure par conséquent l'alimentation du capteur. La position du capteur proposé par rapport au réservoir d'huile est indiquée dans la figure (Fig. 4.21B). L'information sur le niveau d'huile sera indiquée sur un tableau de bord, ce qui aide à garder toujours un bon fonctionnement et prévenir tout cas indésirable.

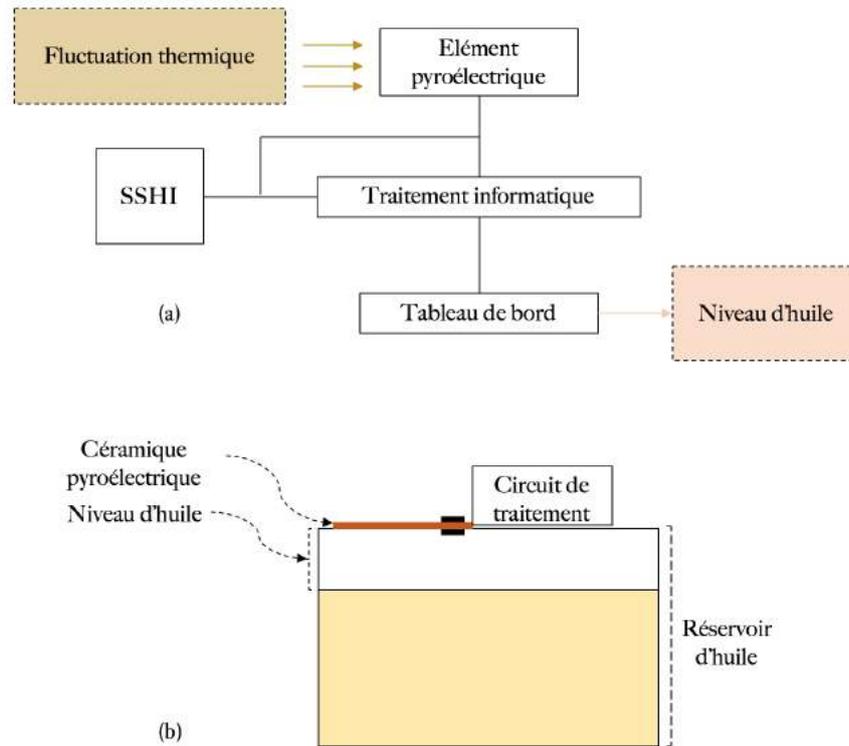


FIGURE 4.21: Application visée : (a) Concept général du capteur, (b) Position du capteur

#### 4.2.3.2. Principe de fonctionnement du capteur proposé

La variation de la température dans le réservoir véhiculaire produira une énergie thermique qui sera convertie en énergie électrique à l'aide de la céramique pyroélectrique combinée à un circuit électronique conçu à filtrer la réponse électrique dédiée au stockage ou à un usage direct pour l'alimentation du capteur. Un système d'acquisition est nécessaire pour la mesure de la tension en sortie. Une option plus simple est de lire la mesure directement sur un indicateur dans le tableau de bord. Le circuit électrique du capteur proposé est illustré dans la figure (Fig. 4.22). Le premier composant du circuit est constitué de la céramique pyroélectrique connectée en parallèle avec un interrupteur et une inductance, c'est un assemblage qui permet une augmentation artificielle de la conversion pyroélectrique (technique SSHI). Le second composant du circuit est un pont redresseur qui permet le redressement du signal alternatif pour le transformer en un signal continu puis en faire un signal stable. Avec ce pont, le signal pyroélectrique ne sera jamais négatif car les diodes du pont dévieront ce signal négative vers le chemin adéquat. Le troisième composant du circuit est un condensateur dédié au stockage de l'énergie récupérée au cas de besoin. Le dernier composant est la résistance de charge  $R$  qui représente l'impédance d'entrée du dispositif électrique (traitement informatique).

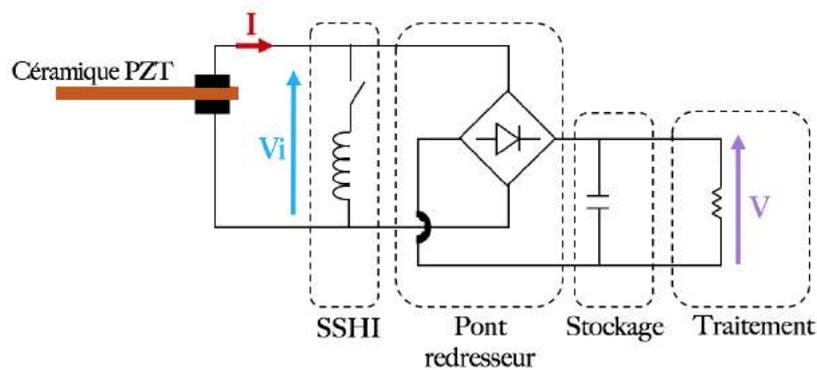


FIGURE 4.22: Circuit électrique du capteur proposé

Le capteur proposé possède toutes les exigences qui sont normalement demandées par plusieurs applications. Il s'agit d'un capteur d'une conception aussi simple que possible (aucune complexité) avec une taille réduite, il se réalise à faible coût et est également autonome en terme d'énergie (aucun câblage encombrant n'est présent). Cette autonomie lui accorde une durée de vie très importante.

## Conclusion

LES propriétés pyroélectriques et les capacités de récupération d'énergie des matériaux pyroélectriques sont d'une grande importance non seulement en point de vue de l'intérêt technologique mais aussi dans la compréhension fondamentale. Les travaux présentés dans ce présent chapitre concernent des études expérimentales dédiées à la conversion pyroélectrique de l'énergie thermique. Nous avons utilisé un concept original pour récupérer de l'énergie thermique et la convertir en électricité basé sur la convection naturelle et forcée qui nous a permis de créer des fluctuations de température (à partir d'une source de chaleur fixe) nécessaires au fonctionnement d'une céramique pyroélectrique. Cette dernière a démontré une excellente capacité à convertir l'énergie thermique en énergie électrique. Les convections Rayleigh-Bénard, qui constituent le cas le plus simple des convections naturelles, ont maintenu la céramique pyroélectrique sous des fluctuations thermiques (chauffage et refroidissement), par conséquent une réponse pyroélectrique a été générée. Avec ce concept original, nous avons récupéré une puissance qui vaut  $0,28\text{ mW}$ , cette valeur a été améliorée en utilisant la technique SSHI, pour atteindre  $0,55\text{ mW}$ . Dans le but de maximiser encore plus la quantité de puissance récupérée, nous avons essayé d'améliorer le système convectif en optimisant les conditions de transfert convectif pour une meilleure excitation de la céramique et donc une meilleure réponse pyroélectrique. L'efficacité du transfert convectif est

liée directement à la viscosité du fluide utilisé. D'après l'étude menés sur quatre fluides différentes nous avons trouvé que le fluide le plus favorable est l'huile de colza que nous avons utilisé dans toutes les études expérimentales qui suivent. En ce qui concerne l'étude expérimentale qui traite l'effet de la géométrie du système convectif sur la réponse pyroélectrique, nous avons constaté que, pour avoir un maximum d'énergie récupérée, il est nécessaire de maintenir un contact direct entre la céramique pyroélectrique et le fluide chaud. Une amélioration en terme de puissance récupérée a été observé. Nous avons pu donc augmenter la puissance récupérée pour atteindre  $0,8mW$ . En se basant sur les résultats de cette étude nous avons développé un capteur de niveau d'huile autonome en terme d'énergie capable de fournir des informations sur le niveau d'huile et de récupérer de l'énergie pour sa propre alimentation. Ce capteur peut être appliqué dans tout système convectif.

# AMÉLIORATION DE LA RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE THERMIQUE PAR NANOFUIDE EN CONVECTION

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> . . . . .	111
<b>5.1 LES NANOFUIDES ET LEUR RAPPORT AVEC L'AUGMENTATION DU TRANSFERT CONVECTIF</b> . . . . .	111
<b>5.2 CHOIX DES NANOPARTICULES/FLUIDE DE BASE ET MÉTHODE DE PRÉPARATION</b> . . . . .	113
<b>5.3 PROPRIÉTÉS THERMOPHYSIQUES DES NANOFUIDES</b> . . . . .	114
<b>5.3.1 Conductivité thermique</b> . . . . .	114
<b>5.3.2 Viscosité dynamique</b> . . . . .	115
<b>5.3.3 Capacité calorifique</b> . . . . .	116
<b>5.3.4 Masse volumique</b> . . . . .	116
<b>5.4 ÉTUDE EXPÉRIMENTALE</b> . . . . .	117
<b>5.4.1 Préparation d'un nanofluide à base de nanoparticules de cuivre et l'huile de colza</b> . . . . .	117
<b>5.4.2 Propriétés thermophysiques du nanofluide préparé</b> . . . . .	118
<b>5.4.3 Résultats et discussions</b> . . . . .	119
<b>CONCLUSION</b> . . . . .	123

## Introduction

Le transfert convectif se classe selon la nature du mouvement du fluide. Si ce dernier est imposé par des moyens externes tels qu'une aide mécanique ou des additifs pour le fluide, on parle alors du transfert convectif forcé. Dans le cas où le mouvement du fluide est dû essentiellement à l'instabilité causée par la variation de la masse volumique du fluide en présence d'un gradient thermique, la convection est dite naturelle ou libre. Dans le chapitre précédent nous avons étudié le cas des convections naturelles tandis que ce chapitre sera consacré à l'étude des convections forcées par l'ajout des nanoparticules dans un fluide caloporteur afin de réaliser des gains en transfert de chaleur car les nanofluides s'inscrivent parfaitement dans cette technique d'intensification du transfert convectif. L'apparition et le développement des nanofluides, est en plein essor. Ce sont des fluides qui permettent d'intensifier le transfert thermique en y dispersant une faible concentration de nanoparticule, généralement 0.1 % jusqu'à 5 %, ayant une forte conductivité thermique. Un nombre important de recherches montre que l'on peut accroître les propriétés thermiques, notamment la conductivité thermique, de 20 % voire plus. Comme expliqué précédemment, jouer sur les propriétés thermophysiques du fluide caloporteur, particulièrement sa viscosité intervient directement dans l'augmentation du transfert de chaleur par convection. Maintenant, avec les nanofluides, l'attention des chercheurs est orientée vers un autre paramètre important qui est la conductivité thermique qui traduit la performance des fluides dans le transfert de chaleur.

Nous allons étudier dans ce chapitre, l'intérêt de disperser des nanoparticules dans un fluide pur pour intensifier le transfert de chaleur en convection dans la configuration de Rayleigh-Bénard afin d'améliorer la conversion pyroélectrique de l'énergie. Nous dressons une brève description sur des compositions des nanofluides couramment utilisés et leurs méthodes de préparation. Ensuite, la préparation d'un nanofluide à base des nanoparticules de cuivre et huile de colza sera présentée. Une discussion concernant les propriétés thermophysiques du nanofluide utilisé sera effectuée et, finalement, le chapitre sera conclu avec une discussion sur les résultats expérimentaux liés à la conversion pyroélectrique du transfert de chaleur par convection dans le nanofluide proposé.

## 5.1. Les nanofluides et leur rapport avec l'augmentation du transfert convectif

La convection forcée désigne le flux thermique induit par système convectif sous une force externe, elle est populaire dans les applications où un taux de transfert de chaleur particulier est souhaité. Il existe de nombreuses recherches, à la fois numériques et théoriques, sur la convection forcée puisque la prédiction du transfert de chaleur convective dans certains systèmes est précieuse car elle fournit directement les conditions de conception et de fonctionnement dans de nombreux

appareils et procédés nécessitant un transfert thermique particulier. L'augmentation de transfert thermique peut se faire par méthode actives, passives ou composées [129]. Quelques exemples de ces techniques sont donnés dans le tableau 5.1. Les méthodes passives permettent une amélioration du transfert thermique sans apport externe de puissance. A titre d'exemple, amélioration des fluides en convection par l'ajout des additifs ou encore utiliser des géométries spéciales. Tandis que les méthodes actives ont besoin d'une force externe comme l'agitation mécanique. Les méthodes composées, comme son nom l'indique, elles combinent simultanément deux ou plusieurs techniques dans le but d'augmenter plus davantage le transfert thermique.

Méthode passives	Méthodes actives
Additifs pour les fluides	Agitation mécanique
Promoteurs de turbulence	Champs électrostatiques
Surfaces étendues	Champs acoustiques
Surfaces rigoureuses	Vibration du fluide
Surface traitées	Succion ou injection

Tableau 5.1: Différentes méthodes pour forcer les convections thermiques.

La plupart des méthodes d'augmentation du transfert convectif ont touché la nature physico-chimique des fluides en convection et la géométrie des systèmes. Mais cela reste limité au niveau macroscopique et microscopique jusqu'à l'apparition et le développement rapide des nanosciences et nanotechnologies. C'est au niveau nanométrique de la matière du milieu convectif que les récents travaux ont été concentrés. De nos jours, la nanotechnologie a un impact sur un large éventail de domaines, y compris la médecine, la production et le stockage de l'énergie, la construction ... etc. La recherche en nanotechnologie se présente principalement dans les domaines de la chimie, de la physique, de la biologie et de l'ingénierie. L'un des fruits de la nanotechnologie est les nanofluides présentant des propriétés physico-chimiques particulières et intéressantes telle qu'une conductivité importante. Bien que de nombreuses recherches ont été réalisées, il reste encore très peu d'enquête sur le transfert de chaleur convectif des nanofluides.

Le nanofluide a été développé et, dans certains cas, a démontré qu'il avait un grand potentiel pour améliorer les propriétés de transfert de chaleur. Eastman et al [130] ont montré que la conductivité thermique des nanofluides préparés avec 1% de concentration volumique en nanoparticule de cuivre ou de nanotubes de carbone suspendus dans de l'éthylène glycol ou de l'huile, a été augmenté de 40% et 150% par rapport aux fluide de base. D'autres études de recherche

ont démontré que le transfert thermique dans un nanofluide basé sur des nanoparticule d'oxyde d'aluminium  $Al_2O_3$  et l'eau a été améliorée de 30 % [131]. 10 % d'augmentation a été observé lorsqu'une concentration volumique de 4,3 % de nanoparticules de tailles 13 nm et 40 nm suspendues dans le fluide de base [132]. Et jusqu'à 40 % d'augmentation si des particules de cuivre d'une taille de 10 nm à une concentration beaucoup plus faible de 0,3 % ont été suspendues dans l'eau [133].

Nous consacrons cette dernière partie du manuscrit à présenter une étude expérimentale qui concerne l'ajout des nanoparticules dans l'huile pour augmenter le transfert convectif. Cela sera dans le but de chauffer d'avantage la céramique pyroélectrique pour améliorer la conversion de l'énergie thermique.

## 5.2. Choix des nanoparticules/fluide de base et méthode de préparation

Le développement considérable récent des recherches traitant des nanofluides est dû au fait qu'il est possible, pour certaines applications, d'accroître de façon appréciable les transferts de chaleur en introduisant dans un fluide pure une faible concentration de nanoparticules. Rappelons que les nanofluides sont des solutions colloïdales obtenues en dispersant dans un fluide de base des particules solides de taille nanométrique. A très faible concentration, certaines de ces solutions se sont révélées très efficaces pour améliorer, sous certaines conditions les transferts de chaleur.

Une variété de nanofluides peut être produite en fonction de la combinaison du fluide de base et des nanoparticules. Si le nanofluide doit être utilisé dans des applications de transfert de chaleur, il est avantageux de choisir des nanoparticules à haute conductivité thermique, comme les métaux ou les oxydes métalliques. Les meilleurs nanofluides sont ceux qui comprennent l'alumine  $Al_2O_3$ , le cuivre  $Cu$  et le dioxyde de titane  $TiO_2$  pour les nanoparticules, et l'eau, l'éthylène glycol et les huiles pour les fluides de base. La combinaison des nanoparticules et du fluide doit être inerte, avec d'autres exigences particulières incluent une stabilité des suspensions et une agglomération négligeable de nanoparticules [134]. Pour cette raison, certaines combinaisons sont évitées, par exemple  $CuO/eau$  montre une amélioration de transfert de chaleur, mais elle présente également des caractéristiques explosives à des températures supérieures à 100 °C lorsqu'elle entre en contact avec l'air [135].

Propriétés	Commentaires
Fluide de base	Eau, huile, éthylène glycol (EG)
Matériaux des particules	Métaux purs, oxydes métallique, semi-conducteur, Céramique, nanotube de carbone . . . etc. Les plus fréquents : $Al_2O_3$ , $CuO$ , $TiO_2$ , $SiC$ , $TiC$ , $Ag$ , $Au$ , $Cu$ et $Fe$
Taille des particules	1 à 100nm de diamètre pour les particules sphériques
Géométrie des particules	Sphère, cylindre, disque, tube
Fraction volumique	0.1 % à 10 %

Tableau 5.2: Nanofluides, informations générales [136, 137].

L'élaboration des nanofluides peut se faire par deux méthodes [138] :

- Un processus en deux étapes : les nanoparticules sont élaborées, ensuite dispersées dans le fluide, mais les particules ont tendance à s'agglomérer avant de se disperser, ce qui en fait le choix le moins favorable.
- Un processus en une étape : les nanoparticules sont simultanément élaborées et dispersées empêchant l'oxydation des nanoparticules.

### 5.3. Propriétés thermophysiques des nanofluides

La dispersion des nanoparticules solides dans un fluide, modifie ses propriétés physiques, particulièrement sa conductivité et sa viscosité. Le transfert thermique dans un nanofluide en convection, dépend à la fois des propriétés thermophysiques des nanoparticules (phase solide) et du fluide (phase liquide). La conductivité thermique du nanofluide dépend généralement de la nature de chacune des phases, de la température de l'ensemble et de la concentration volumique en nanoparticule. Il existe plusieurs modèles théoriques permettant l'estimation, sous certaines conditions, les propriétés thermophysiques des suspensions. Nous présenterons dans cette partie les modèles les plus utilisés dans le cas des nanofluides.

#### 5.3.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique constitue une propriété très importante pour l'amélioration des performances thermiques d'un fluide. Le premier modèle qui estime la conductivité thermique d'une suspension contenant des particules a été développé par Maxwell [139]

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} - 2\varphi_v(\lambda_{fb} - \lambda_{np})}{\lambda_{np} + 2\lambda_{fb} + 2\varphi_v(\lambda_{fb} - \lambda_{np})} \quad (5.1)$$

Où  $\lambda_{nf}$ ,  $\lambda_{fb}$  et  $\lambda_{np}$  représentent respectivement la conductivité thermique du nanofluide, du fluide de base et des nanoparticules.  $\varphi_v$  représente la concentration volumique des nanoparticules. Ce modèle concerne le cas des nanofluides à des faibles concentrations volumiques des nanoparticules, ainsi qu'il ne tient pas compte de la géométrie ni de la taille des particules.

Un modèle complémentaire à celui de Maxwell (Eq. 5.2) considère des concentrations volumiques élevées [140].

$$\varphi_v \left( \frac{\lambda_{np} - \lambda_{nf}}{\lambda_{np} + 2\lambda_{nf}} \right) + (1 - \varphi_v) \left( \frac{\lambda_{fb} - \lambda_{nf}}{\lambda_{fb} + 1\lambda_{nf}} \right) \quad (5.2)$$

Une extension du modèle de Maxwell (Eq. 5.3) prenant en considération la géométrie sphérique des particules est exprimée par l'équation suivante [141] :

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{fb}} = \frac{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} - (n-1)(\lambda_{fb} - \lambda_{np})\varphi_v}{\lambda_{np} + (n-1)\lambda_{fb} + (n-1)(\lambda_{fb} - \lambda_{np})\varphi_v} \quad (5.3)$$

En effet, pour les particules non-sphériques, un facteur géométrique appelé sphéricité, et noté  $\Psi$  doit être intégré dans ce modèle. Ce coefficient est défini comme le rapport de l'aire d'une sphère de même volume que la particule considérée sur l'aire de cette même particule. Le coefficient "n" est un facteur de forme empirique donné par :  $n = \frac{\Psi}{3}$ . Ce modèle peut être utilisé lorsque la conductivité thermique des particules est 100 fois plus élevée que celle du fluide de base [141].

### 5.3.2. Viscosité dynamique

La viscosité dynamique et la conductivité thermique sont étroitement corrélées. Si l'ajout des nanoparticules augmente et améliore la conductivité thermique du nanofluide, il entraîne également une augmentation défavorable de la viscosité dynamique. Plusieurs études expérimentales et théoriques ont été effectuées pour mesurer ou estimer la viscosité dynamique des nanofluides [142, 143, 144], ainsi qu'il existe de nombreux modèles théoriques [145, 146] qui permettent la prédiction de l'évolution de la viscosité dynamique avec l'ajout des nanoparticules et qui tiennent en considération la géométrie des nanoparticules, leur diamètre ainsi que la gamme de température du système.

Le travail fondamental d'Einstein (1906) basé sur l'hypothèse que l'énergie a une dépendance linéaire avec la viscosité, fait l'origine de la plupart des formules existantes. Cette dépendance linéaire de la viscosité des suspensions avec la concentration est exprimée par [147] :

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2,5\varphi_v) \quad (5.4)$$

Cette formule concerne le cas des nanofluides de particules sphériques à des concentrations volumiques très faibles, généralement inférieures à 1%.

Une formule complémentaire (Eq. 5.5) à celle développée par Einstein considère des concentrations volumiques qui ne dépasse pas 4% [148].

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \frac{1}{(1 - \varphi_v)^{2,5}} \quad (5.5)$$

Le modèle proposé par Krieger et Dougherty [149] satisfait le cas des concentrations volumiques des nanoparticules plus élevées

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} \left(1 - \frac{\varphi_v}{\varphi_M}\right)^{-\eta\varphi_M} \quad (5.6)$$

avec  $\eta$  est le coefficient d'Einstein, dans le cas de particules sphériques  $\eta = 2,5$  et  $\varphi_M = 0,64$ . Ce modèle permet de calculer la viscosité dynamique d'un nanofluide en supposant que l'ajout des nanoparticules se fait d'une manière successive.

### 5.3.3. Capacité calorifique

Les propriétés thermophysiques les plus étudiées dans le cas des nanofluides sont la conductivité thermique et la viscosité dynamique. Quant à la capacité calorifique, elle n'a été que très peu étudiée. En effet l'ajout des nanoparticules dans un fluide, se traduit également par une augmentation ou une diminution de la capacité calorifique du nanofluide selon l'ordre de grandeur de la capacité calorifique des nanoparticules (faible ou importante) par rapport à celle du fluide de base.

Pour déterminer la chaleur spécifique des nanofluides, deux modèles sont les plus utilisés dans la plupart des études trouvées dans la littérature. Le premier modèle (Eq 5.7) [150] se base sur l'hypothèse d'équilibre thermique entre les particules et le fluide de base [151] et le deuxième modèle (Eq 5.8) [152] est basé sur la loi de mélange.

$$C_{p,nf} = \frac{\varphi_v(\rho c_p)_{np} + (1 - \varphi_v)(\rho c_p)_{fb}}{\varphi_v \rho_{np} + (1 - \varphi_v) \rho_{fb}} \quad (5.7)$$

$$C_{p,nf} = \varphi_v(\rho c_p)_{np} + (1 - \varphi_v)(c_p)_{fb} \quad (5.8)$$

### 5.3.4. Masse volumique

La masse volumique des nanofluides augmente avec l'ajout des nanoparticules car elle est proportionnelle à la concentration volumique des particules dispersées. Le calcul de la masse volumique des nanofluides se fait souvent à partir de la loi de mélange [152, 153].

$$\rho_{nf} = \varphi_v \rho_{np} + (1 - \varphi_v) \rho_{fb} \quad (5.9)$$

## 5.4. Etude expérimentale

### 5.4.1. Préparation d'un nanofluide à base de nanoparticules de cuivre et l'huile de colza

Dans le cadre de notre étude, le fluide pur choisi comme milieu caloporteur est l'huile de colza dans lequel nous dispersons des nanoparticules de cuivre. Cette combinaison permet de réaliser des suspensions homogènes et stables sans avoir recours à des additifs chimiques perturbateurs. Nous avons utilisé la méthode d'élaboration en deux étapes, car nous avons utilisé des nanoparticules commercialisées (*Aldrich : nanoparticules Cu99, 8 %*) qui sont prêtes à l'usage dont les propriétés sont regroupées dans le tableau 5.3.

Taille (nm)	Masse volumique ( $g.cm^{-3}$ )	Conductivité thermique ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )	Température de fusion °C
100	8.94	400	1083

Tableau 5.3: Propriétés des nanoparticules de cuivre.

L'élaboration se fait sous une hotte à flux laminaire (Fig. 5.1c) pour éviter toute contamination et tout risque qui peuvent être causés lors de la manipulation avec les particules de cuivre de taille nanométrique. Nous avons préparé des nanofluides avec diverses concentrations volumiques en nanoparticules 0.5 %, 1 %, 1.5 %, 2 % afin d'étudier l'influence de la concentration sur le transfert convectif et également sur la réponse pyroélectrique.

Après avoir pesé la quantité de nanoparticule qui correspond à 0.5 %, 1 %, 1.5 % et 2 % nous les avons dispersées dans l'huile sous agitation mécanique pendant quelques heures à l'aide d'un simple barreau magnétique pour homogénéiser la solution et éviter l'agglomération des nanoparticules au sein d'huile. Nous avons placé ensuite le nanofluide dans un bain ultrason (Fig. 5.1d) dans le but d'assurer une meilleure dispersion des nanoparticules au sein du fluide porteur. La viscosité d'huile de colza était adéquate pour pouvoir garder une stabilité de nanofluide pour des durées largement suffisantes.



FIGURE 5.1: Procédure de préparation du nanofluide : (a) fluide de base : huile de colza, (b) Nanoparticule de cuivre, (c) hotte à flux laminaire, (d) bain ultrason (e) Aspect du nanofluide Cu/huile colza

En effet, Il n'y a pas de réactivité chimique particulière d'huile de colza vis à vis les nanoparticules de cuivre. Cela nous a permis de mettre les nanoparticules de cuivre en suspension sans fonctionnalisation particulière et sans additif chimique favorisant la dispersion. Cette propriété de neutralité est très importante car elle nous permettra d'identifier l'influence réelle de l'ajout de ces nanoparticules sur le transfert thermique et donc sur la réponse pyroélectrique.

#### 5.4.2. Propriétés thermophysiques du nanofluide préparé

Les propriétés thermophysiques du nanofluide utilisé dans notre étude expérimentale sont obtenues en utilisant les équations présentées dans la section 5.3. La conductivité du nanofluide préparé est calculée en utilisant le modèle d'Hamilton-Crosser (Eq.5.3) car il satisfait le cas où la conductivité thermique des nanoparticules est au moins 100 fois plus élevée que celle du fluide de base. Nous obtenons la viscosité du nanofluide préparé à partir de la relation donnée par Brinkman (Eq.5.5) puisqu'elle considère des concentrations volumiques inférieures à 4 %. En ce qui concerne la capacité calorifique et la masse volumique, elles sont obtenues par les équations 5.8) et 5.9). Nous dressons dans le tableau 5.4) l'évolution des propriétés thermophysiques du nanofluide en fonction de la concentration des nanoparticules dispersées.

	$\varphi$	$\lambda$	$\rho$	$\mu$	$C_p$	$Pr$
	%	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$g.cm^{-3}$	$Kg.m^{-1}.s^{-1}$	$J.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$	
Cu	---	400	8,94	---	0,385	---
Huile de colza	---	0,1698	0,916	0,454	3,744	1,001
huile de colza + Cu	0.5	0,1728	0,956	0,459	3,727	0,989
	1	0,1747	0,996	0,465	3,710	0,987
	1.5	0,1774	1,036	0,471	3,693	0,980
	2	0,1800	1,076	0,477	3,676	0,974

Tableau 5.4: Propriétés thermophysiques du nanofluide (huile de colza + Cu) en fonction de la concentration volumique en nanoparticule de Cu.

Il ressort de l'examen du tableau 5.4) que la conductivité thermique augmente avec l'ajout des nanoparticules. Le nombre de Prandtl diminue avec l'augmentation de la concentration volumique en nanoparticules cela montre que la diffusivité thermique est supérieure à la diffusivité cinématique ce qui traduit que le transport diffusif de chaleur est dominant par rapport au transport de quantité de mouvement. Donc nous estimons que l'utilisation de nanofluide à base d'huile de colza et nanoparticule de Cu augmentera le transfert convectif par conséquent la réponse pyroélectrique sera améliorée.

#### 5.4.3. Résultats et discussions

L'idée de cette étude expérimentale, était basée sur de nombreux travaux théoriques, numériques et expérimentaux [154, 155, 156, 157, 158] qui ont montré un grand intérêt d'ajouter des nanoparticules dans un fluide pur pour augmenter d'une manière significative le transfert thermique. Notre but principal sera donc augmenter le transfert convectif via l'utilisation d'un nanofluide afin d'assurer une meilleure excitation thermique de la céramique pyroélectrique dans le but de maximiser la réponse électrique et améliorer la conversion thermoélectrique.

Après avoir préparé les nanofluides de diverses concentrations volumiques en nanoparticules, nous les avons placés séparément dans des coupelles de même géométrie et chauffés à 250 °C tout en déposant la céramique pyroélectrique en dessous des nanofluides. Nous avons gardé les mêmes conditions de travail des autres études expérimentales pour pouvoir identifier d'une manière précise l'effet des nanoparticules sur les convections et donc sur la réponse pyroélectrique. Nous exposons et discutons dans ce qui suit les résultats expérimentaux correspondant à l'étude expérimentale proposée.

Nous illustrons dans les figures ci-dessous l'évolution temporelle de la tension en sortie de la céramique pyroélectrique pour différentes concentrations volumiques en nanoparticule de Cu. Les allures montrent une très nette augmentation au niveau des amplitudes maximales de la tension en sortie de la céramique.

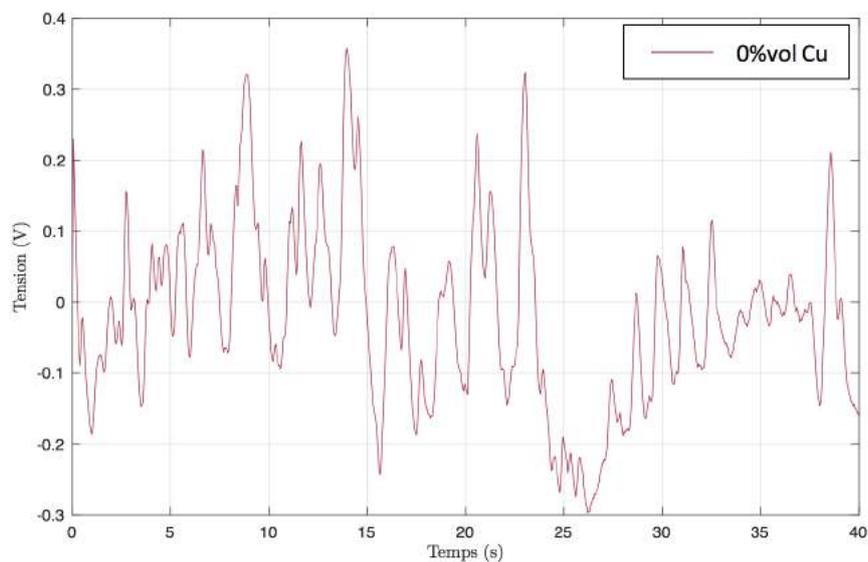


FIGURE 5.2: Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza sans ajout de nanoparticule de cuivre

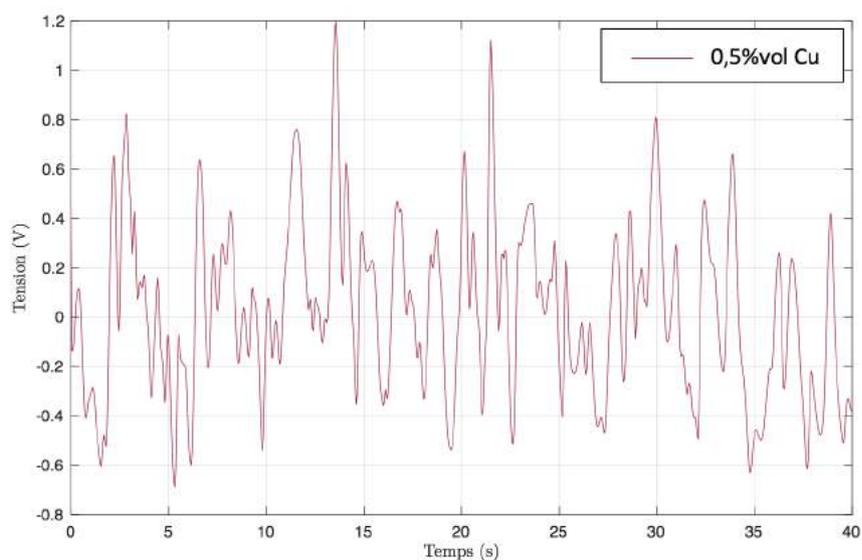
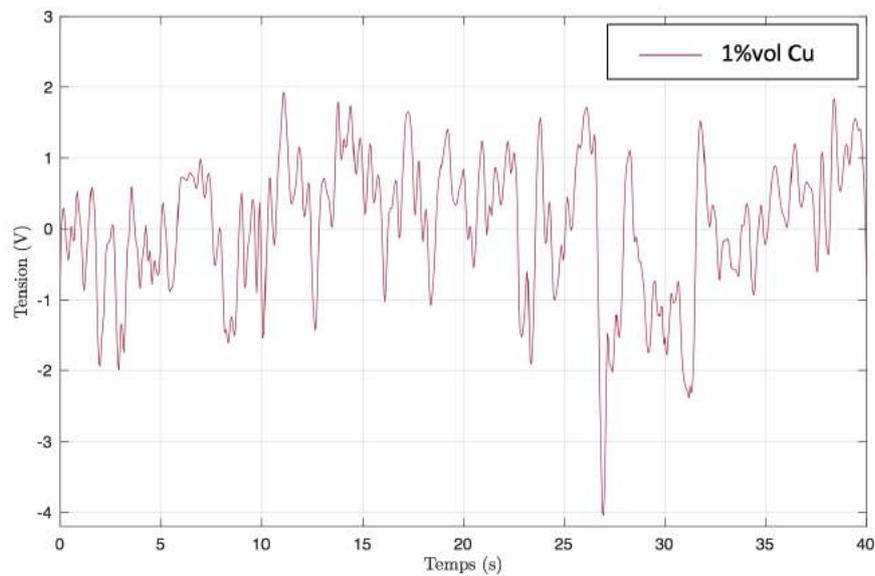
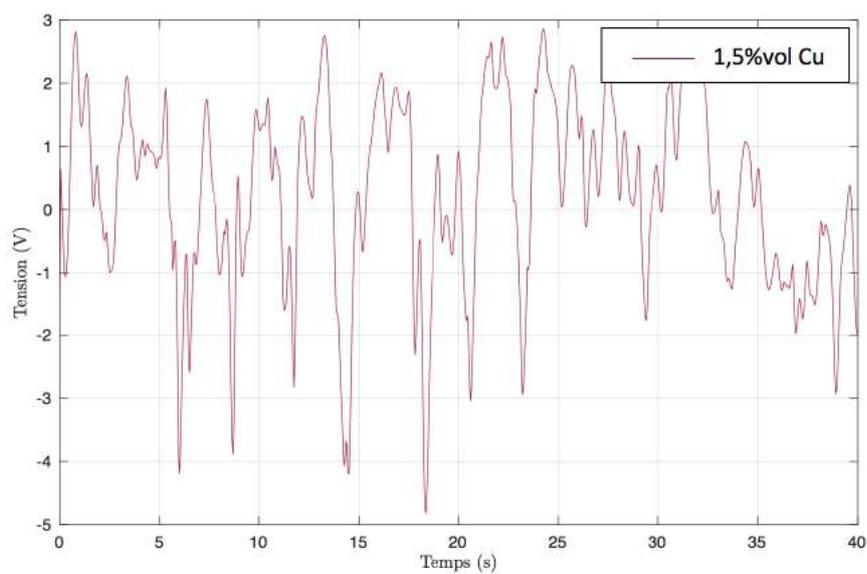


FIGURE 5.3: Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 0,5%vol de Cu

FIGURE 5.4: Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 1%vol de *Cu*FIGURE 5.5: Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 1,5%vol de *Cu*

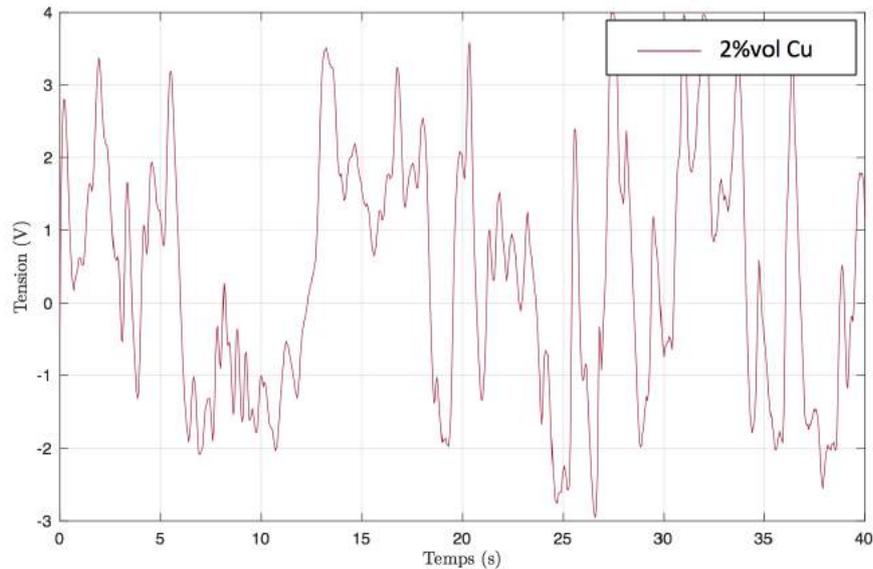


FIGURE 5.6: Evolution temporelle de la tension en sortie de la céramique en utilisant huile de colza + 2%vol de Cu

On note par exemple pour une concentration de 0 %vol de Cu c'est à dire huile de colza pure sans ajout de nanoparticule, les amplitudes maximales ne dépassent pas 350mV, tandis que pour des concentrations 0,5%, 1 %, 1,5 % et 2 %, la tension est augmentée pour atteindre respectivement 770 mV, 1,5 V, 2,8 V, 3,5 V. Cette observation montre le fait que les résultats obtenus dépendent non seulement de l'ajout des nanoparticules considérées mais aussi de leur concentration volumique. L'augmentation de la tension électrique en sortie de la céramique pyroélectrique traduit une amélioration au niveau de la réponse pyroélectrique, cela ne peut être expliqué que par le fait que le flux de chaleur en convection est devenu important. Remarquons que la tension passe de 350 mV à 3.5 V, c'est une augmentation significative d'un facteur de 10. L'ajout des nanoparticules ont parfaitement contribué à l'augmentation de la réponse pyroélectrique. Nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de ce paragraphe illustrent clairement l'influence d'ajout des nanoparticules de Cu et qui se traduit par une augmentation de transfert thermique et donc une amélioration de la réponse pyroélectrique. L'augmentation était très importante et tout à fait logique et en accord avec les meilleurs résultats obtenus dans le cas des nanofluides à base de nanoparticule de cuivre [159, 160, 161, 162].
- Le paramètre de concentration joue également un rôle dans l'amélioration de la réponse pyroélectrique. Plus la concentration volumique en nanoparticule est importante plus nous observons une augmentation au niveau de la réponse pyroélectrique, cette augmentation est considérable et contribue à l'amélioration de la conversion thermoélectrique.

## Conclusion

L'ÉTUDE expérimentale présentée dans ce dernier chapitre, propose l'utilisation d'un nanofluide dans le but d'intensifier le transfert thermique par convection. Le fluide pur choisi comme milieu caloporteur est l'huile de colza dans lequel nous avons dispersé des nanoparticules de cuivre. Cette combinaison nous a permis de réaliser des suspensions homogènes et stables sans avoir recours à des additifs chimiques perturbateurs. Les propriétés thermophysiques du nanofluide étudié ont estimé que le transfert de chaleur par convection soit amélioré. Cette étude expérimentale a abouti à des résultats importants et originaux et a montré que le nanofluide a réellement contribué dans l'amélioration de la conversion pyroélectrique de l'énergie. En utilisant le nanofluide proposé, la réponse pyroélectrique a été améliorée d'un facteur d'environ de 10 par rapport au cas où le fluide seul sans ajout de nanoparticule est utilisé.

Effectuer deux études simultanées en fonction de paramètre de taille et concentration des nanoparticules semble une idée intéressante pour pouvoir proposer un système convectif optimisé basé sur des nanofluides dans le but de maximiser la réponse pyroélectrique et donc la conversion thermo-électrique de l'énergie.

# CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'OBJECTIF de cette thèse était de développer et de contribuer à une recherche significative dans le domaine de la récupération d'énergie, considéré un domaine prometteur qui correspond bien à la tendance actuelle. Le travail présenté dans cette thèse porte sur la récupération d'énergie issue des variations temporelles de la température (radiations infrarouges et convections) via un matériau ayant la propriété de pyroélectricité.

L'aperçu bibliographique que nous avons donné sur le concept de la récupération d'énergie et sur l'ensemble des différentes ressources énergétiques exploitables dans l'environnement nous a permis d'apercevoir d'une façon claire l'insuffisance des travaux réalisés concernant l'utilisation de l'énergie thermique comme source ambiante sachant que les déperditions en énergie thermique étant très importantes qui rend, la récupération sur ce type d'énergie, relativement facile. Dans les travaux de cette thèse, nous nous sommes intéressés par les transferts radiatif et convectif comme deux sources des variations de température dans le but de chauffer un échantillon pyroélectrique et produire gratuitement l'énergie électrique. Le manuscrit était donc devisé en deux grandes parties :

La première partie du manuscrit a concerné l'étude expérimentale de la récupération des rayonnements infrarouges via une céramique pyroélectrique de type PZT. Nous avons proposé deux techniques pour améliorer la puissance récupérée : la première consiste à connecter le matériau pyroélectrique à un dispositif de commutation autoalimenté pour mettre en oeuvre la technique SSHI, et la deuxième consiste à augmenter la surface du matériau pyroélectrique pour améliorer de façon significative la puissance récupérée. En ce qui concerne la conversion pyroélectrique de l'énergie thermique, les résultats expérimentaux ont permis de valider la technique SSHI, la réponse pyroélectrique a été augmenté d'un facteur de 2. Les résultats expérimentaux qui rentrent dans le cadre de l'amélioration de réponse pyroélectrique en fonction de la surface de la céramique PZT confirment le comportement de courant et de la puissance prévus par la théorie. Une céramique pyroélectrique de type PZT, d'une surface de  $5 \text{ cm}^2$  peut fournir une puissance qui vaut 0,8 mW, cette valeur a été augmentée d'un facteur de 3 pour atteindre 2,4 mW quand la surface de l'élément pyroélectrique est de l'ordre de  $20 \text{ cm}^2$ .

La seconde partie du manuscrit a présenté un deuxième concept pour récupérer de l'énergie

thermique issue des convections Rayleigh-Bénard qui nous ont permis de créer des fluctuations de température (à partir d'une source de chaleur fixe) converties ensuite en électricité par une céramique pyroélectrique. Cette dernière a démontré une excellente capacité à convertir l'énergie thermique en énergie électrique. Les convections Rayleigh-Bénard, qui constituent le cas le plus simple des convections naturelles, ont maintenu la céramique pyroélectrique sous des fluctuations thermiques (chauffage et refroidissement), par conséquent une réponse pyroélectrique a été générée. Nous avons ensuite associé ce concept original à la technique SSHI pour améliorer la puissance récupérée. Nous avons récupéré une puissance qui vaut 0,28 mW, cette valeur a été améliorée en utilisant la technique SSHI, pour atteindre 0,55 mW. Nous avons quantifié expérimentalement et analysé les effets des différents paramètres qui peuvent influencer sur la réponse pyroélectrique à savoir la nature des fluides en convection (nombre de Prandtl), la température (nombre de Rayleigh) et le volume de système en convection (géométrie). D'après l'étude menée sur quatre fluides différents nous avons trouvé que le fluide le plus favorable est l'huile de colza. Nous avons constaté également que pour avoir un maximum d'énergie récupérée, il est nécessaire de maintenir un contact direct entre la céramique pyroélectrique et le fluide chaud. Une amélioration en terme de puissance récupérée a été observée. Nous avons pu donc augmenter la puissance récupérée pour atteindre 0,8 mW. Toujours dans le but d'améliorer la puissance récupérée, une étude sur l'intensification du transfert thermique convectif pour une meilleure conversion pyroélectrique a été proposée. Il s'agit de disperser des particules de taille nanométrique dans un fluide de base pour mettre en évidence le potentiel thermique des nanofluides. Le travail mené au cours de cette étude a permis d'étudier en détail le comportement de l'élément pyroélectrique en présence des nanoparticules dans un fluide en convection. Le nanofluide proposé était à la base d'huile de colza et des nanoparticules de cuivre. Nous avons montré que l'ajout des nanoparticules de cuivre dans l'huile de colza permet d'améliorer considérablement la réponse pyroélectrique thermique d'un facteur de 10.

Pour la suite de ce travail, il serait pertinent de mener des essais avec d'autres types de matériaux comme les polymères pyroélectriques qui sont généralement faciles à élaborer, flexibles, se réalisent à faible coût et ils possèdent une durée de vie importante. Voire même la possibilité de travailler avec des composites, basés sur des polymères et des particules de PZT à titre d'exemple. Nous nous sommes intéressés par une piste complémentaire aux travaux qui concernent l'utilisation des nanofluides pour la récupération d'énergie. Il s'agit de mener des études avec d'autres combinaisons nanoparticule/fluide avec des meilleures propriétés thermophysiques.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Lossec, Systèmes multisources de récupération d'énergie dans l'environnement humain : modélisation et optimisation du dimensionnement, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan (2011).
- [2] S. Roundy, P. K. Wright, J. Rabaey, A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes, *Computer communications* 26 (11) (2003) 1131–1144.
- [3] A. Eddiai, Caractérisation et modélisation des polymères électro-actifs : Application à la récupération d'énergie, Thèse de doctorat, INSA de Lyon ; Université Chouaib Doukkali (2013).
- [4] F. Gallee, Micro-ondes et économie d'énergie, *Proc. of Journée TIC et développement durable*.
- [5] A. Khaligh, P. Zeng, C. Zheng, Kinetic energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic technologies - state of the art, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 57 (3) (2010) 850–860.
- [6] J. M. Donelan, Q. Li, V. Naing, J. Hoffer, D. Weber, A. D. Kuo, Biomechanical energy harvesting : generating electricity during walking with minimal user effort, *Science* 319 (5864) (2008) 807–810.
- [7] Y. Liu, K. Ren, H. F. Hofmann, Q. Zhang, Electrostrictive polymers for mechanical energy harvesting, in : *Smart Structures and Materials, International Society for Optics and Photonics, 2004*, pp. 17–28.
- [8] F. Belhora, A. Hajjaji, E. Fatnani, F. Zahra, A. Rjafallah, D. Guyomar, et al., Energy harvesting using hybridization of dielectric nanocomposites and electrets, *Polymers for Advanced Technologies* 26 (6) (2015) 569–573.
- [9] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, T. C. Green, Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, *Proceedings of the IEEE* 96 (9) (2008) 1457–1486.
- [10] J. A. Paradiso, T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, *IEEE Pervasive computing* 4 (1) (2005) 18–27.
- [11] F. Simjee, P. H. Chou, Everlast : long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node, in : *Low Power Electronics and Design, 2006. ISLPED'06. Proceedings of the 2006 International Symposium on, IEEE, 2006*, pp. 197–202.
- [12] I. Stark, Invited talk : Thermal energy harvesting with thermo life, in : *Wearable and Implantable Body Sensor Networks, 2006. BSN 2006. International Workshop on, IEEE, 2006*, pp. 19–22.
- [13] D. Guyomar, G. Sebald, S. Pruvost, M. Lallart, Ambient energy harvesting using ferroelectric materials [6928-07], in : *PROCEEDINGS-SPIE THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICAL ENGINEERING, Vol. 6928, International Society for Optical Engineering ; 1999, 2008*, p. 6928.
- [14] S. Lang, *Ferroelectrics and related phenomena*, New York : Gordon and Breach Science Publishers (1974) 562.
- [15] S. B. Lang, Pyroelectricity : from ancient curiosity to modern imaging tool, *Physics today* 58 (8) (2005) 31–36.
- [16] G. Gaussorgues, *La thermographie infrarouge : principes-technologie-applications*.
- [17] J. Marshall, F. Schott, Open-ocean convection : Observations, theory, and models, *Reviews of Geophysics* 37 (1) (1999) 1–64.
- [18] A. Cuadras, M. Gasulla, V. Ferrari, Thermal energy harvesting through pyroelectricity, *Sensors and Actuators A : Physical* 158 (1) (2010) 132–139.
- [19] G. Sebald, S. Pruvost, D. Guyomar, Energy harvesting based on ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic, *Smart Materials and Structures* 17 (1) (2007) 015012.
- [20] F. Y. Lee, A. Navid, L. Pilon, Pyroelectric waste heat energy harvesting using heat conduction, *Applied thermal engineering* 37 (2012) 30–37.
- [21] M. Grätzel, Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells, *Inorganic chemistry* 44 (20) (2005) 6841–6851.
- [22] C. X. Guo, G. H. Guai, C. M. Li, Graphene based materials : enhancing solar energy harvesting, *Advanced Energy Materials* 1 (3) (2011) 448–452.
- [23] F. Belhora, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, L. Petit, L. Lebrun, A. Hajjaji, M. Mazroui, Y. Boughaleb, Optimization of energy harvesting conversion using the hybridization of electrostrictive polymers and electrets, *Sensors and Actuators A : Physical* 189 (2013) 390–398.

- [24] C. Graf, J. Maas, D. Schapeler, Energy harvesting cycles based on electro active polymers, in : SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics, 2010, pp. 764217–764217.
- [25] C. Navau, J. Prat-Camps, A. Sanchez, Magnetic energy harvesting and concentration at a distance by transformation optics, *Physical review letters* 109 (26) (2012) 263903.
- [26] H. Reinisch, S. Gruber, H. Unterassinger, M. Wiessflecker, G. Hofer, W. Pribyl, G. Holweg, An electromagnetic energy harvesting system with 190 nW idle mode power consumption for a BAW based wireless sensor node, *IEEE Journal of solid-state circuits* 46 (7) (2011) 1728–1741.
- [27] S. Priya, Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers, *Journal of electroceramics* 19 (1) (2007) 167–184.
- [28] J. K. Ward, S. Behrens, Adaptive learning algorithms for vibration energy harvesting, *Smart Materials and Structures* 17 (3) (2008) 035025.
- [29] H. Zhu, Thermal energy harvesting from temperature fluctuations, Thèse de doctorat, Lyon, INSA (2011).
- [30] J. A. Paradiso, T. E. Starner, Human-generated power for mobile electronics, in : *Low-power electronics design*, CRC Press, 2004, pp. 45–1.
- [31] T. Markvart, *Solar electricity*, Vol. 6, John Wiley & Sons, 2000.
- [32] S. P. Beeby, M. J. Tudor, N. M. White, Energy harvesting vibration sources for microsystems applications, *Measurement Science and Technology* 17 (12) (2006) R175–R195.
- [33] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, T. C. Green, Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices, *Proceedings of the IEEE* 96 (9) (2008) 1457–1486.
- [34] C. Jean-Mistral, S. Basrour, Récupération de l'énergie des vibrations mécaniques pour générer de l'électricité, *Techniques de l'Ingenieur* (2010) RE135.
- [35] L. Solymar, D. Walsh, *Lectures on the electrical properties of materials*.
- [36] K. W. Kwok, H. L. W. Chan, C. L. Choy, Evaluation of the material parameters of piezoelectric materials by various methods, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 44 (4) (1997) 733–742.
- [37] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, N. Gershenfeld, Parasitic power harvesting in shoes, in : *Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on*, IEEE, 1998, pp. 132–139.
- [38] A. Badel, D. Guyomar, E. Lefeuvre, C. Richard, Efficiency enhancement of a piezoelectric energy harvesting device in pulsed operation by synchronous charge inversion, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16 (10) (2005) 889–901.
- [39] D. Guyomar, A. Badel, E. Lefeuvre, C. Richard, Toward energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 52 (4) (2005) 584–595.
- [40] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, H. Bassaler, Enhanced semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device on an inductor, in : *SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, International Society for Optics and Photonics, 2000, pp. 288–299.
- [41] Y. Liu, K. L. Ren, H. F. Hofmann, Q. Zhang, Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 52 (12) (2005) 2411–2417.
- [42] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, J. H. Lang, Vibration-to-electric energy conversion, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems* 9 (1) (2001) 64–76.
- [43] S. Roundy, P. K. Wright, J. M. Rabaey, *Energy scavenging for wireless sensor networks*, Springer, 2003.
- [44] N. Reich, M. Veefkind, E. Alsema, B. Elzen, W. van Sark, Industrial design of a PV powered consumer application : Case study of a solar powered wireless computer mouse, *Power* 1 (2) (2005) 3.
- [45] X. Jiang, J. Polastre, D. Culler, Perpetual environmentally powered sensor networks, in : *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, IEEE Press, 2005, p. 65.
- [46] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Friedman, M. Srivastava, Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems, in : *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks*, IEEE Press, 2005, p. 64.
- [47] C. Park, P. H. Chou, Ambimax : Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes, in : *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON'06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on*, Vol. 1, IEEE, 2006, pp. 168–177.
- [48] C. B. Favarel, Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité, Thèse de doctorat, Université de Pau (2014).
- [49] G. Min, D. M. Rowe, K. Kontostavlakis, Thermoelectric figure-of-merit under large temperature differences, *Journal of Physics D : Applied Physics* 37 (8) (2004) 1301.
- [50] D. M. Rowe, Thermoelectric waste heat recovery as a renewable energy source, *Int. J. Innov. Energy Syst.*

- Power 1 (1) (2006) 13–23.
- [51] S. B. Riffat, X. Ma, Thermoelectrics : a review of present and potential applications, *Applied thermal engineering* 23 (8) (2003) 913–935.
- [52] J. Safioui, Nouvelle technique de photo-inscription dans linbo3 : autofocalisation contrôlée par effet pyroélectrique, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté (2010).
- [53] B. Nogaredo, C. Henaux, J.-F. Rouchon, E. Duhayon, Electroactive materials : from piezomotors to electroactive morphing, in : *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on*, IEEE, 2006, pp. 4437–4441.
- [54] L. Nougaret, Elaboration et caractérisation de couches minces pyroélectriques de  $\text{LiTaO}_3$  par pulvérisation cathodique rf magnétron pour des applications détecteurs ir, Thèse de doctorat, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc (2007).
- [55] J. F. Nye, *Physical properties of crystals : their representation by tensors and matrices*, Oxford university press, 1985.
- [56] K. C. Kao, *Dielectric phenomena in solids*, Academic press, 2004.
- [57] G. Sebald, E. Lefeuvre, D. Guyomar, Pyroelectric energy conversion : optimization principles, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 55 (3).
- [58] G. Sebald, L. Seveyrat, D. Guyomar, L. Lebrun, B. Guiffard, S. Pruvost, Electrocaloric and pyroelectric properties of  $0.75 \text{ pb} (\text{mg } 1/3 \text{ nb } 2/3) \text{ o } 3$ – $0.25 \text{ pb ti o } 3$  single crystals, *Journal of applied physics* 100 (12) (2006) 124112.
- [59] W. Clingman, R. Moore Jr, Application of ferroelectricity to energy conversion processes, *Journal of Applied Physics* 32 (4) (1961) 675–681.
- [60] J. Childress, Application of a ferroelectric material in an energy conversion device, *Journal of Applied Physics* 33 (5) (1962) 1793–1798.
- [61] S. Hoh, Conversion of thermal to electrical energy with ferroelectric materials, *Proceedings of the IEEE* 51 (5) (1963) 838–845.
- [62] E. Fatuzzo, H. Kiess, R. Nitsche, Theoretical efficiency of pyroelectric power converters, *Journal of Applied Physics* 37 (2) (1966) 510–516.
- [63] J. A. Gonzalo, Ferroelectric materials as energy converters, *Ferroelectrics* 11 (1) (1976) 423–429.
- [64] R. B. Olsen, D. Evans, Pyroelectric energy conversion : hysteresis loss and temperature sensitivity of a ferroelectric material, *Journal of applied physics* 54 (10) (1983) 5941–5944.
- [65] R. B. Olsen, D. A. Bruno, J. M. Briscoe, E. W. Jacobs, Pyroelectric conversion cycle of vinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymer, *Journal of applied physics* 57 (11) (1985) 5036–5042.
- [66] R. B. Olsen, D. A. Bruno, J. M. Briscoe, E. W. Jacobs, High electric field resistivity and pyroelectric properties of vinylidene fluoride-trifluoroethylene copolymer, *Journal of applied physics* 58 (8) (1985) 2854–2860.
- [67] A. Navid, L. Pilon, Pyroelectric energy harvesting using olsen cycles in purified and porous poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene)[p (vdf-trfe)] thin films, *Smart Materials and Structures* 20 (2) (2011) 025012.
- [68] D. Guyomar, G. Sebald, E. Lefeuvre, A. Khodayari, Toward heat energy harvesting using pyroelectric material, *Journal of intelligent material systems and structures* 20 (3) (2009) 265–271.
- [69] G. Sebald, D. Guyomar, A. Agbossou, On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting, *Smart Materials and Structures* 18 (12) (2009) 125006.
- [70] G. Sebald, D. Guyomar, A. Agbossou, On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting, *Smart Materials and Structures* 18 (12) (2009) 125006.
- [71] H. S. Carslaw, J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford : Clarendon Press, 1959, 2nd ed.
- [72] A. Neville, *Propriétés des bétons*» éditions eyrolles (2000).
- [73] D. L. Hartmann, L. A. Moy, Q. Fu, Tropical convection and the energy balance at the top of the atmosphere, *Journal of Climate* 14 (24) (2001) 4495–4511.
- [74] P. Cardin, P. Olson, Chaotic thermal convection in a rapidly rotating spherical shell : consequences for flow in the outer core, *Physics of the earth and planetary interiors* 82 (3-4) (1994) 235–259.
- [75] D. P. McKenzie, J. M. Roberts, N. O. Weiss, Convection in the earth's mantle : towards a numerical simulation, *Journal of Fluid Mechanics* 62 (03) (1974) 465–538.
- [76] F. Cattaneo, T. Emonet, N. Weiss, On the interaction between convection and magnetic fields, *The Astrophysical Journal* 588 (2) (2003) 1183.
- [77] A. Brent, V. Voller, K. Reid, Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change : application to the melting of a pure metal, *Numerical Heat Transfer, Part A Applications* 13 (3) (1988) 297–318.
- [78] P. F. Linden, The fluid mechanics of natural ventilation, *Annual review of fluid mechanics* 31 (1) (1999) 201–

- 238.
- [79] O. Turan, N. Chakraborty, R. J. Poole, Laminar rayleigh-bénard convection of yield stress fluids in a square enclosure, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 171 (2012) 83–96.
- [80] A. Y. Gelfgat, Different modes of rayleigh-bénard instability in two-and three-dimensional rectangular enclosures, *Journal of Computational Physics* 156 (2) (1999) 300–324.
- [81] G. de Vahl Davis, Natural convection of air in a square cavity : a bench mark numerical solution, *International Journal for numerical methods in fluids* 3 (3) (1983) 249–264.
- [82] M. Gibert, H. Pabiou, J.-C. Tisserand, B. Gertjerenken, B. Castaing, F. Chilla, Heat convection in a vertical channel : Plumes versus turbulent diffusion, *Physics of Fluids* 21 (3) (2009) 035109.
- [83] J. Zhang, S. Childress, A. Libchaber, Non-boussinesq effect : Thermal convection with broken symmetry, *Physics of FLUIDS* 9 (4) (1997) 1034–1042.
- [84] J. A. Glazier, T. Segawa, A. Naert, M. Sano, Evidence against "ultrahard" thermal turbulence at very high rayleigh numbers, *Nature* 398 (6725) (1999) 307–310.
- [85] T. Segawa, A. Naert, M. Sano, Matched boundary layers in turbulent rayleigh-benard convection of mercury, *Physical Review E* 57 (1) (1998) 557.
- [86] J. Maveety, J. Leith, Heat transfer in rayleigh-benard convection with air in moderate size containers, *International journal of heat and mass transfer* 41 (4-5) (1998) 785–796.
- [87] P. Muralt, Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films, *Reports on Progress in Physics* 64 (10) (2001) 1339.
- [88] R. Whatmore, Pyroelectric devices and materials, *Reports on progress in physics* 49 (12) (1986) 1335.
- [89] M. Lee, R. Guo, A. S. Bhalla, Pyroelectric sensors, *Journal of electroceramics* 2 (4) (1998) 229–242.
- [90] J. Han, A. von Jouanne, T. Le, K. Mayaram, T. Fiez, Novel power conditioning circuits for piezoelectric micropower generators, in : *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE, Vol. 3, IEEE, 2004, pp. 1541–1546.*
- [91] G. Sebald, L. Lebrun, B. Guiffard, D. Guyomar, Morphotropic pmn-pt system investigated by comparison between ceramics and crystal, *Journal of the european ceramic society* 25 (12) (2005) 2509–2513.
- [92] S. Xu, K. D. Ngo, T. Nishida, G.-B. Chung, A. Sharma, Converter and controller for micro-power energy harvesting, in : *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, Vol. 1, IEEE, 2005, pp. 226–230.*
- [93] M. Davis, D. Damjanovic, N. Setter, Pyroelectric properties of (1- x) pb (mg 1/ 3 nb 2/ 3) o 3-x pbtio 3 and (1- x) pb (zn 1/ 3 nb 2/ 3) o 3-x pbtio 3 single crystals measured using a dynamic method, *Journal of applied physics* 96 (5) (2004) 2811–2815.
- [94] W. Ng, B. Ploss, H. L. Chan, F. G. Shin, C. Choy, Pyroelectric properties of pzt/p (vdf-trfe) 0-3 composites, in : *Applications of Ferroelectrics, 2000. ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on, Vol. 2, IEEE, 2000, pp. 767–770.*
- [95] D.-S. Kang, M.-S. Han, S.-G. Lee, S.-H. Song, Dielectric and pyroelectric properties of barium strontium calcium titanate ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 23 (3) (2003) 515–518.
- [96] A. Peláiz Barranco, F. Calderón Piñar, O. Pérez Martínez, Plzt ferroelectric ceramics on the morphotropic boundary phase. study as possible pyroelectric sensors, *Physica status solidi (a)* 186 (3) (2001) 479–485.
- [97] A. Cuadras, M. Gasulla, V. Ferrari, Thermal energy harvesting through pyroelectricity, *Sensors and Actuators A : Physical* 158 (1) (2010) 132–139.
- [98] S. Dalola, V. Ferrari, D. Marioli, Pyroelectric effect in pzt thick films for thermal energy harvesting in low-power sensors, *Procedia Engineering* 5 (2010) 685–688.
- [99] Y. Xu, *Ferroelectric Materials and Their applications*, North-Holland, 1991.
- [100] E. Minazara, D. Vasic, F. Costa, G. Poulin, Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting, *Ultrasonics* 44 (2006) e699–e703.
- [101] V. BORISYONOK, T. VOLK, A. KOSHELEV, E. NOVITSKII, S. SHRAMCHENKO, L. SHUVALOV, Measurement of the pyroelectric coefficient of some crystals by dynamic and static methods (1988).
- [102] V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, A. Taroni, Array of pzt pyroelectric thick-film sensors for contactless measurement of xy position, *IEEE sensors journal* 3 (2) (2003) 212–217.
- [103] A. Cuadras, M. Gasulla, A. Ghisla, V. Ferrari, Energy harvesting from pzt pyroelectric cells, in : *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2006. IMTC 2006. Proceedings of the IEEE, IEEE, 2006, pp. 1668–1672.*
- [104] A. Chynoweth, Dynamic method for measuring the pyroelectric effect with special reference to barium titanate, *Journal of applied physics* 27 (1) (1956) 78–84.
- [105] D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, C. Richard, M. Lallart, Synchronized switch harves-

- ting applied to selfpowered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless transmitters, *Sensors and Actuators A : Physical* 138 (1) (2007) 151–160.
- [106] M. Lallart, D. Guyomar, Y. Jayet, L. Petit, E. Lefeuvre, T. Monnier, P. Guy, C. Richard, Synchronized switch harvesting applied to self-powered smart systems : Piezoactive microgenerators for autonomous wireless receivers, *Sensors and Actuators A : Physical* 147 (1) (2008) 263–272.
- [107] A. Khodayari, Harvesting energy from temperature variations, Thèse de doctorat, Villeurbanne, INSA (2009).
- [108] H. A. Sodano, D. Guyomar, G. Sebald, S. Pruvost, M. Lallart, A. Khodayari, C. Richard, Energy harvesting from ambient vibrations and heat, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20 (5) (2009) 609–624.
- [109] C. Richard, D. Guyomar, D. Audigier, G. Ching, Semi-passive damping using continuous switching of a piezoelectric device, in : 1999 symposium on smart structures and materials, International Society for Optics and Photonics, 1999, pp. 104–111.
- [110] M. Penella, M. Gasulla, A review of commercial energy harvesters for autonomous sensors, in : Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007. IEEE, IEEE, 2007, pp. 1–5.
- [111] A. Harb, Energy harvesting : State-of-the-art, *Renewable Energy* 36 (10) (2011) 2641–2654.
- [112] P. Mane, J. Xie, K. K. Leang, K. Mossi, Cyclic energy harvesting from pyroelectric materials, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 58 (1) (2011) 10–17.
- [113] P.-J. Cottinet, D. Guyomar, B. Guiffard, C. Putson, L. Lebrun, Modeling and experimentation on an electrostrictive polymer composite for energy harvesting, *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 57 (4) (2010) 774–784.
- [114] M. Lallart, D. Guyomar, An optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output, *Smart Materials and Structures* 17 (3) (2008) 035030.
- [115] A. Eddiai, M. Meddad, K. Sbiaai, Y. Boughaleb, A. Hajjaji, D. Guyomar, A new technique for maximizing the energy harvested using electrostrictive polymer composite, *Optical Materials* 36 (1) (2013) 13–17.
- [116] M. Meddad, A. Eddiai, D. Guyomar, S. Belkhiat, A. Hajjaji, K. Yuse, Y. Boughaleb, Evaluation by fast fourier transforms analysis of energy harvesting in electrostrictive polymers driven by an electric field and a mechanical excitation, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 24 (4) (2013) 411–420.
- [117] M. Meddad, A. Eddiai, A. Cherif, D. Guyomar, A. Hajjaji, Enhancement of electrostrictive polymer power harvesting using new technique sshi-max, *Optical and Quantum Electronics* 48 (2) (2016) 94.
- [118] M. Amokrane, A. Baysse, B. Nogarede, M. Rguiti, Pyroelectric power harvesting using a lead-lanthanum-zirconate-titanate (7/60/40 plzt) pyroelectric cell, in : Electronics, Control, Measurement, Signals and their application to Mechatronics (ECMSM), 2013 IEEE 11th International Workshop of, IEEE, 2013, pp. 1–6.
- [119] J. Dewulf, H. Van Langenhove, B. Van De Velde, Exergy-based efficiency and renewability assessment of biofuel production, *Environmental science & technology* 39 (10) (2005) 3878–3882.
- [120] J. A. Rice, K. Mechitov, S.-H. Sim, T. Nagayama, S. Jang, R. Kim, B. F. Spencer Jr, G. Agha, Y. Fujino, Flexible smart sensor framework for autonomous structural health monitoring, *Smart structures and Systems* 6 (5-6) (2010) 423–438.
- [121] S. Jang, H. Jo, S. Cho, K. Mechitov, J. A. Rice, S.-H. Sim, H.-J. Jung, C.-B. Yun, B. F. Spencer Jr, G. Agha, Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using smart sensor technology : deployment and evaluation, *Smart Structures and Systems* 6 (5-6) (2010) 439–459.
- [122] Q. Chi, H. Yan, C. Zhang, Z. Pang, L. Da Xu, A reconfigurable smart sensor interface for industrial wsn in iot environment, *IEEE transactions on industrial informatics* 10 (2) (2014) 1417–1425.
- [123] G. J. Pottie, W. J. Kaiser, Wireless integrated network sensors, *Communications of the ACM* 43 (5) (2000) 51–58.
- [124] J. M. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. Da Silva, D. Patel, S. Roundy, Picoradio supports ad hoc ultra-low power wireless networking, *Computer* 33 (7) (2000) 42–48.
- [125] E. H. Callaway Jr, *Wireless sensor networks : architectures and protocols*, CRC press, 2003.
- [126] N. Correal, N. Patwari, *Wireless sensor networks : Challenges and opportunities*, in : MPRG/Virgina Tech Wireless Symposium, Citeseer, 2001.
- [127] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, *Wireless sensor networks : a survey*, *Computer networks* 38 (4) (2002) 393–422.
- [128] W. K. Seah, Z. A. Eu, H.-P. Tan, *Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (wsn-heap)-survey and challenges*, in : *Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology*, 2009. Wireless VITAE 2009. 1st International Conference on, Ieee, 2009, pp. 1–5.
- [129] L. Wang, F. Yuan, Vibration energy harvesting by magnetostrictive material, *Smart Materials and Structures*

- 17 (4) (2008) 045009.
- [130] A. Jacobi, R. Shah, Heat transfer surface enhancement through the use of longitudinal vortices : a review of recent progress, *Experimental Thermal and Fluid Science* 11 (3) (1995) 295–309.
- [131] J. A. Eastman, S. Phillpot, S. Choi, P. Keblinski, Thermal transport in nanofluids 1, *Annu. Rev. Mater. Res.* 34 (2004) 219–246.
- [132] K.-L. Teng, P.-Y. Hsiao, S.-W. Hung, C.-C. Chieng, M.-S. Liu, M.-C. Lu, Enhanced thermal conductivity of nanofluids diagnosis by molecular dynamics simulations, *Journal of nanoscience and nanotechnology* 8 (7) (2008) 3710–3718.
- [133] S. Li, J. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *J. Heat Transf* 121 (2) (1999) 280–289.
- [134] J. A. Eastman, S. Choi, S. Li, W. Yu, L. Thompson, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied physics letters* 78 (6) (2001) 718–720.
- [135] X.-Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids : a review, *International journal of thermal sciences* 46 (1) (2007) 1–19.
- [136] S. K. Das, N. Putra, W. Roetzel, Pool boiling characteristics of nano-fluids, *International journal of heat and mass transfer* 46 (5) (2003) 851–862.
- [137] S. Ozerinc, Heat transfer enhancement with nanofluids, Middle East Technical University.
- [138] E. V. Timofeeva, J. L. Routbort, D. Singh, Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids, *Journal of Applied Physics* 106 (1) (2009) 014304.
- [139] J. C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, Vol. 1, Clarendon press, 1881.
- [140] D. Bruggeman, Calculation of various physics constants in heterogenous substances i dielectricity constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances, *Ann. Phys* 24 (7) (1935) 636–664.
- [141] R. Hamilton, O. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *Industrial & Engineering chemistry fundamentals* 1 (3) (1962) 187–191.
- [142] P. Estellé, S. Halefadi, N. Doner, T. Maré, Shear history effect on the viscosity of carbon nanotubes water-based nanofluid, *Current Nanoscience* 9 (2) (2013) 225–230.
- [143] B. Aladag, S. Halefadi, N. Doner, T. Maré, S. Duret, P. Estellé, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, *Applied energy* 97 (2012) 876–880.
- [144] C. Nguyen, F. Desgranges, N. Galanis, G. Roy, T. Maré, S. Boucher, H. A. Mintsa, Viscosity data for al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid-hysteresis : is heat transfer enhancement using nanofluids reliable, *International Journal of Thermal Sciences* 47 (2) (2008) 103–111.
- [145] I. Mahbubul, R. Saidur, M. Amalina, Latest developments on the viscosity of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 55 (4) (2012) 874–885.
- [146] Y. Li, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, et al., A review on development of nanofluid preparation and characterization, *Powder Technology* 196 (2) (2009) 89–101.
- [147] A. Einstein, A new determination of molecular dimensions, *Ann. Phys* 19 (2) (1906) 289–306.
- [148] H. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *The Journal of Chemical Physics* 20 (4) (1952) 571–571.
- [149] I. M. Krieger, T. J. Dougherty, A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres, *Transactions of the Society of Rheology* 3 (1) (1959) 137–152.
- [150] Y. Xuan, W. Roetzel, Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids, *International Journal of heat and Mass transfer* 43 (19) (2000) 3701–3707.
- [151] H. O’Hanley, J. Buongiorno, T. McKrell, L.-w. Hu, Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry, *Advances in Mechanical Engineering*.
- [152] H. O’Hanley, J. Buongiorno, T. McKrell, L.-w. Hu, Measurement and model validation of nanofluid specific heat capacity with differential scanning calorimetry, *Advances in Mechanical Engineering*.
- [153] S. Ferrouillat, A. Bontemps, O. Poncelet, O. Soriano, J. Gruss, Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer of water-based zno nanofluids : performance evaluation criterion, *Int J Mech Ind Eng* 1 (2) (2011) 7–13.
- [154] Q. Li, Y. Xuan, J. Wang, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer* 125 (2003) (2003) 151–155.
- [155] H. Salhi, M. Si-Ameur, Convection naturelle dans les enceintes : nanofluide, *Revue des Energies Renouvelables* 15 (1) (2012) 121–130.
- [156] G. Bachir, R. Sawli, C. Fakih, A. MOJTABI, Etude du transfert de chaleur en convection naturelle dans les nanofluides, *Congès de la Société Française de Thermique* (2008) 1–6.

- [157] A. Hadaoui, Effets de taille et de concentration sur les propriétés thermiques et rhéologiques des nanofluides, Thèse de doctorat, Université d'Orléans (2010).
- [158] W. Yu, H. Xie, A review on nanofluids : preparation, stability mechanisms, and applications, *Journal of Nanomaterials* 2012 (2012) 1.
- [159] A. K. Santra, S. Sen, N. Chakraborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2) (2009) 391–400.
- [160] H. Jiang, H. Li, C. Zan, F. Wang, Q. Yang, L. Shi, Temperature dependence of the stability and thermal conductivity of an oil-based nanofluid, *Thermochimica Acta* 579 (2014) 27–30.
- [161] S. Z. Heris, S. G. Etemad, M. N. Esfahany, Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 33 (4) (2006) 529–535.
- [162] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 28 (2) (2007) 211–219.

# PRODUCTION SCIENTIFIQUE

## \* Articles publiés dans des revues scientifiques avec comité de lecture

- [1] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, F. Belhora, M. Mazroui, Y. Boughaleb, A. Hajjaji, A new concept to harvest thermal energy using pyroelectric effect and Rayleigh Benard convections, *The European Physical Journal - Plus*, Août 2016.
- [2] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, F. Belhora, M. Mazroui, Y. Boughaleb, Optimization and improvement of thermal energy harvesting by using pyroelectric materials, *Optical Materials*, Janvier 2016.
- [3] F. Belhora, A. Hajjaji, M. Mazroui, F. Z. El fatnani, A. Rjafallah, D. Guyomar, Energy harvesting using hybridization of dielectric nanocomposites and electrets, *Polymers Advanced Technologies*, Février 2015.

## \* Articles soumis dans des revues scientifiques avec comité de lecture

- [1] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, F. Belhora, M. Mazroui, Y. Boughaleb, A. Hajjaji, Optimization of pyroelectric energy trough natural convection : Application in oil level sensor, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Soumis le 28 Mars 2017.
- [2] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, M. Mazroui, Y. Boughaleb, F. Belhora, Infrared radiation for pyroelectric energy harvesting using PZT ceramic buzzer, *Sensor Letters*, Soumis le 02 Mai 2017.

## \* Communications orales dans des congrès nationaux et internationaux

- [1] F. Z. El fatnani, F. Belhora, D. Guyomar, M. Mazroui, Y. Boughaleb, Mechanical and thermal energy harvesting using smart materials, *st International Conference on Solar Energy and Materials*, 21-23 Mars 2016, Marrakech, Maroc
- [2] F. Z. El fatnani, M. Mazroui, D. Guyomar, F. Belhora, Y. Boughaleb, Thermal Energy Harvesting Using Pyroelectric Effect, *International meeting on Nano and smart materials for Renewable Energy*, 28-29 Avril 2016, Casablanca, Maroc.

- [3] F. Z. El fatnani, M. Mazroui, D. Guyomar, F. Belhora, Y. Boughaleb, Thermal Energy Harvesting Through Natural Convection and Pyroelectric Material, *1<sup>st</sup> International Conférence On Theoretical Physics and High Energy Physics*, 22-24 Septembre 2016, Casablanca, Maroc.
- [4] F. Z. El fatnani, M. Mazroui, D. Guyomar, F. Belhora, Y. Boughaleb, Récupération d'énergie thermique par effet pyroélectrique, *Journée Thématique internationale sur les matériaux avancés pour les nouvelles technologies*, 18 Juin 2014, Casablanca, Maroc.
- [5] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, F. Belhora, M. Mazroui, Y. Boughaleb, Optimization and Improvement of Energy Harvesting by Using Hybridization of Dielectric Nanocomposites and Electrets, *Conférence Internationale sous le thème : Les Matériaux Fonctionnels et leurs Applications Technologiques*, 24 Octobre 2014, Casablanca, Maroc.

✱ **Communications posters dans des congrès nationaux et internationaux**

- [1] F. Z. El fatnani, M. Mazroui, D. Guyomar, F. Belhora, Y. Boughaleb, Optimization and improvement of thermal energy harvesting by using pyroelectric materials and Infrared rays, *Journée scientifique sur les Matériaux avancés : Applications et Devenir* 02 Juin 2016, Khouribga, Maroc
- [2] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, M. Mazroui, F. Belhora, Y. Boughaleb. Thermal Energy Harvesting Through Pyroelectric effect and Heat transfer. *Journée GDR Seeds, intitulée : Matériaux actifs et phénomènes couplés*, 24 Novembre 2016, Lyon, France.
- [3] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, M. Mazroui, F. Belhora, Y. Boughaleb. Thermal Energy Harvesting Through Heat conduction and PZT Ceramic Buzzer. *5<sup>ème</sup> Journée Nationale sur la Récupération et le Stockage d'Énergie*, 20-21 Mai 2015, Orsay, France.
- [4] F. Z. El fatnani, D. Guyomar, M. Mazroui, F. Belhora, Y. Boughaleb. Improvement of Energy Harvesting Performance of Electrostrictive Polymers. *1<sup>st</sup> International Workshop on Advanced Materials and Energy Application*, 07-08 Mai 2014, Meknes, Maroc.





FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA-LYON

NOM : **EL FATNANI**

DATE de SOUTENANCE : **14/10/2017**

Prénoms : **Fatima Zahra**

TITRE : **Récupération d'énergie issue des variations temporelles de la température par effet pyroélectrique**

NATURE : **Doctorat**

Numéro d'ordre : 2017LYSEI088

Ecole doctorale : **EEA**

Spécialité : **Génie Electrique**

RESUME : Cette thèse, de nature expérimentale, rentre dans le cadre de la récupération d'énergie pour les micro-générateurs et l'autonomie des dispositifs électroniques à faible consommation. Ce travail propose les possibilités de récupérer de l'énergie thermique par effet pyroélectrique. L'énergie thermique à convertir est une variation temporelle de température. Nous avons proposé deux principales techniques pour produire de l'énergie électrique via une céramique pyroélectrique de type PZT. La première est centrée sur la récupération des radiations infrarouges associé à la technique SSHI. Originellement, la technique SSHI a été développée dans le cas de la récupération d'énergie piézoélectrique, mais nous l'avons appliqué dans le cas de la pyroélectricité et qui nous a permis de maximiser la puissance récupérée d'un facteur de 2. La seconde technique proposée concerne la récupération des fluctuations thermiques provenant des mouvements convectifs naissant à l'intérieur d'un fluide dans la configuration de Rayleigh-Bénard. Nous avons mené plusieurs études pour augmenter le transfert convectif dans le but d'améliorer la réponse pyroélectrique et donc maximiser la puissance récupérée. Dans le cas des convections naturelles, le choix de fluide adéquat et l'optimisation des paramètres de contrôle de la configuration Rayleigh-Bénard constituent des étapes primordiales pour aboutir à un meilleur transfert thermique par convection. Dans le cas des convections forcée, il a été étudié l'intérêt de disperser des particules de Cuivre de taille nanométrique dans un fluide porteur pour augmenter plus davantage le transfert convectif. Avec ce nanofluide, la réponse pyroélectrique a été maximisée d'un facteur de 10.

MOTS-CLÉS : Récupération d'énergie, énergie thermique, effet pyroélectrique, radiation infrarouge, technique SSHI, convections, nanofluide.

Laboratoire (s) de recherche : **LGEF-INSA Lyon / LPMC-Univ Hassan II Casablanca**

Directeur de thèse : **Daniel GUYOMAR / M'hammed MAZROUI**

Président de jury : **Yahia BOUGHALEB**

Composition du jury : **Y. Boughaleb, A. Dezairi, Z. Sassi, T. Mouhib, N. Laraqi, C. Courtois, D. Guyomar, M. Mazroui**