

Étude de la conversion thermoélectrique indirecte:
Application aux amplificateurs de puissance

par

Mohamed Amine ABDELKEFI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE, CONCENTRATION
ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE
M.Sc.A.

MONTRÉAL, LE 20 MAI 2020

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ammar B. Kouki, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Ambrish Chandra, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Pascal Giard, membre du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 5 MAI 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Mes travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre d'un programme de maîtrise dispensé par l'École de Technologie Supérieure, et c'est ici que j'adresse mes vifs remerciements et mes sincères sentiments de reconnaissance à tous ceux qui m'ont aidé à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de mémoire Monsieur Ammar B. Kouki Professeur à l'École de Technologie Supérieure, qui n'a pas cessé de m'encourager pendant la durée du projet de recherche, ainsi pour sa générosité en matière de formation et d'encadrement. Je le remercie également pour l'aide et les conseils concernant les missions évoquées dans ce rapport, qu'il m'a apporté lors des différents suivis, et la confiance qu'il m'a témoignée.

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'examiner mon travail. Que ce travail soit l'expression de ma haute considération et mon plus profond respect.

Mes vifs remerciements s'adressent à toute l'équipe du laboratoire de recherche LACIME et du laboratoire LTTC@ÉTS pour leur accueil sympathique, leur conseil et leur aide.

Je remercie mon très cher père Youssef et ma très chère mère Nabila, en signe d'amour et de reconnaissance, pour m'avoir donné la meilleure éducation, pour m'avoir permis de faire des études gratifiantes et pour le soutien moral et affectif qu'ils me procurent à chaque instant.

Je remercie ma chère soeur Imen, mon cher frère Achref, ma belle-soeur Asma et mon beau-frère Anouar pour leur amour et disponibilité. Mes meilleurs souhaits de succès et de bonheur.

Par ailleurs, je remercie mes ami(e)s : Dorra, EL Muzzammel, Amen, Anis, Abdelhak, Issa, Mohamed, Rayen, Amir, Chokri de m'avoir épaulé et soutenu.

Étude de la conversion thermoélectrique indirecte: Application aux amplificateurs de puissance

Mohamed Amine ABDELKEFI

RÉSUMÉ

La gestion thermique des composants électroniques télématiques est un souci majeur. Certains systèmes tels que les amplificateurs de puissance (AP) possèdent des pertes thermiques assez importantes qui nuisent au bon fonctionnement des circuits et pèsent sur la facture énergétique. De ce fait, assurer le refroidissement des circuits et apporter des solutions écoénergétiques est primordial. L'objectif de ce mémoire est de concevoir une structure écoresponsable permettant la récupération de la chaleur perdue des AP tout en maintenant une température de fonctionnement adéquate. Notre système tend à transformer la puissance perdue des AP en électricité en se basant sur les propriétés des matériaux piézoélectriques. Pour ce faire, nous concevons une géométrie adaptée à de faibles niveaux de puissance. Elle permet une conversion thermomécanique nécessaire pour solliciter le matériau piézoélectrique. Ensuite, nous développons un modèle analytique de la structure. Nous implémentons ce modèle sur Matlab, d'une part, pour le dimensionnement du système suite à une étude de matériaux préalable et, d'autre part, pour simuler la réponse du générateur piézoélectrique. Suite à la définition complète du récupérateur, nous réalisons une simulation multiphysique avec COMSOL Multiphysic. Cette simulation vérifie la robustesse du modèle analytique et modélise, avec plus de précision, les interactions entre les phénomènes thermiques, mécaniques et piézoélectriques. Étant donné les ressemblances des résultats des deux méthodes de simulations, nous fabriquons un prototype expérimental et nous analysons les mesures obtenues. Le générateur conçu est une structure innovante pour la récupération de la chaleur. Il permet d'utiliser un matériau piézoélectrique en mode de couplage 33 peu étudié en littérature. De plus, il est adapté pour un fonctionnement en faibles puissances. La réponse du système est prometteuse. Le rendement théorique s'élève à 4.48% pour une puissance dissipée de 3W. En outre, la structure assure également le refroidissement du circuit en maintenant un niveau de température aux alentours de 45°C. Par ailleurs, les mesures expérimentales reproduisent l'allure de la réponse simulée.

Mots-clés : gestion thermique, amplificateur de puissance, écoénergétique, générateur piézoélectrique, refroidissement.

Study of indirect thermoelectric conversion: Application to power amplifier

Mohamed Amine ABDELKEFI

ABSTRACT

Thermal management of telematic electronic components is a major concern. Some systems such as power amplifiers (PA) have fairly large heat losses which affect the proper functioning of the circuits and weigh on the energy bill. Therefore, ensuring the cooling of the circuits and providing energy-efficient solutions is essential. The objective of this thesis is to design an eco-responsible structure allowing PA-heat recovery while maintaining an adequate operating temperature. Our system tends to transform the dissipated power of PA into electricity based on the properties of piezoelectric materials. To do this, we design a geometry suitable for low power levels applications. It produces a thermomechanical energy conversion necessary to stress the piezoelectric material. Then, we develop an analytical model of the structure. We implement this model on Matlab to size the system based on a preliminary material study, and to simulate the response of the piezoelectric generator. Once our recuperator is fully defined, we perform a multiphysics simulation with COMSOL Multiphysic. This simulation verifies the robustness of the analytical model and models the interactions between thermal, mechanical and piezoelectric phenomena, precisely. Given the agreements between the two simulation methods, we build an experimental prototype and analyze the measured results. The designed generator is an innovative structure for heat recovery. It uses a piezoelectric material in the coupled mode 33, little studied in literature. Besides, it is suitable for low-power operation. The system response is promising. The theoretical efficiency is of 4.48% for a dissipated power of 3W. Moreover, the structure ensures the circuit's cooling by maintaining the temperature level at approximately 45°C. Furthermore, experimental measurements reproduce the appearance of the simulated response.

Key words: thermal management, power amplifier, energy efficient, piezoelectric generator, cooling.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	29
CHAPITRE 1 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	33
1.1 Introduction.....	33
1.2 Généralités sur la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique	33
1.2.1 Conversion directe	33
1.2.2 Générateurs directs.....	36
1.2.3 Générateurs hybrides	42
1.2.4 Conversion indirecte	47
1.2.5 Générateurs indirects	49
1.2.6 Importance de la génération indirecte à transduction piézoélectrique.....	51
1.3 État de l'art sur les générateurs indirects à base des matériaux piézoélectriques.....	55
1.3.1 Effet piézoélectrique	55
1.3.2 Équations fondamentales de la piézoélectricité	57
1.3.3 Générateurs piézoélectriques	60
1.4 Généralité sur les systèmes de refroidissement des circuits intégrés.....	67
1.5 Conclusion	68
CHAPITRE 2 MODÉLISATION ET DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE ANALYTIQUE.....	69
2.1 Introduction.....	69
2.2 Concept du générateur	69
2.3 Élaboration du modèle géométrique	71
2.4 Développement du modèle analytique.....	73
2.4.1 Modélisation thermique	73
2.4.2 Modèle du couplage thermomécanique	78
2.4.3 Modèle équivalent du matériau piézoélectrique	80
2.5 Conclusion	82
CHAPITRE 3 DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION ANALYTIQUE	83
3.1 Introduction.....	83
3.2 Étude des matériaux.....	83
3.2.1 Choix du matériau piézoélectrique pour la récupération d'énergie	83
3.2.2 Choix de l'interface thermique	91
3.2.3 Choix des matériaux pour les composants restants.....	93
3.3 Dimensionnement de la géométrie.....	95
3.4 Simulations analytiques et résultats	104
3.5 Conclusion	110
CHAPITRE 4 SIMULATION MULTI-PHYSIQUE DU GÉNÉRATEUR PIÉZOÉLECTRIQUE.....	111

4.1	Introduction.....	111
4.2	Choix du logiciel de simulation.....	111
4.3	Mise au point du modèle de simulation.....	112
4.4	Résultats de la simulation multi-physique.....	114
4.5	Comparaison des résultats analytiques et multi-physiques.....	116
4.6	Conclusion	120
CHAPITRE 5 PROTOTYPAGE ET MESURES		121
5.1	Introduction.....	121
5.2	Caractéristiques des matériaux commerciaux.....	121
5.3	Simulations analytiques et multi-physiques.....	123
5.4	Description des équipements de test.....	126
5.5	Procédé de fabrication.....	129
5.6	Résultats expérimentaux	131
5.7	Analyse des résultats.....	133
5.8	Conclusion	137
CONCLUSION		139
RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS.....		141
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		143

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Importance de la piézoélectricité54
Tableau 1.2	Coefficients des équations fondamentales58
Tableau 1.3	État de l'art des générateurs à transduction piézoélectrique65
Tableau 2.1	Résistances thermiques du modèle proposé.....77
Tableau 3.1	Facteurs de mérites pour la récupération d'énergie.....88
Tableau 3.2	Comparaison de matériaux piézoélectriques89
Tableau 3.3	Principales caractéristiques des interfaces thermiques92
Tableau 3.4	Propriétés de différents métaux94
Tableau 3.5	Propriétés mécaniques d'alliage de cuivre et d'aluminium94
Tableau 3.6	Matériaux choisis pour le générateur.....95
Tableau 3.7	Dimensions des matériaux104
Tableau 3.8	Paramètres de sortie du modèle théorique105
Tableau 3.9	Recherche de la charge optimale108
Tableau 3.10	Puissances générées pour différents niveaux de la puissance dissipée109
Tableau 4.1	Comparaison des techniques de modélisation112
Tableau 4.2	Propriétés utilisées pour la simulation114
Tableau 4.3	Résultats de la simulation multiphysique avec COMSOL116
Tableau 5.1	Changements apportés pour la fabrication du prototype121
Tableau 5.2	Interface thermique: Thermo-bond 95122
Tableau 5.3	PZT-4: NAVY Type I APC-840.....123
Tableau 5.4	Alliage d'acier: AISI4130123

Tableau 5.5	Cuivre.....	123
Tableau 5.6	Résultats des simulations analytiques et multiphysiques pour le prototype	124
Tableau 5.7	Charge optimale pour le prototype	125
Tableau 5.8	Puissances récupérées pour différentes valeurs de la puissance dissipée	126
Tableau 5.9	Puissances expérimentales récupérées.....	133
Table 5.10	Comparaisons des résultats expérimentaux et théoriques	133
Tableau 5.11	Température du cylindre de compression en fonction du temps	134
Tableau 5.12	Résultats de l'effet de certains types de pertes.....	136

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Effet Seebeck34
Figure 1.2	Effet pyroélectrique35
Figure 1.3	Nouvel effet direct de la conversion de l'énergie thermique en électricité36
Figure 1.4	Module de Seebeck37
Figure 1.5	Évolution du facteur de mérite pour les matériaux thermoélectriques38
Figure 1.6	Comparaison entre l'efficacité d'un TEG et les techniques de production usuelles.....39
Figure 1.7	Cellule pyroélectrique de base ayant une polarisation spontanée P_s40
Figure 1.8	Cellule d'un générateur thermoïonique41
Figure 1.9	Configuration parallèle: 1:PV module, 2: TEG, 3: Dissipateur.....43
Figure 1.10	Configuration avec composant réfléchissant43
Figure 1.11	Générateur solaire thermique-thermoélectrique44
Figure 1.12	Générateur piézoélectrique-thermoélectrique45
Figure 1.13	Générateur piézoélectrique-pyroélectrique46
Figure 1.14	Générateur galvano-pyroélectrique.....46
Figure 1.15	Générateur triboélectrique-piézoélectrique-pyroélectrique47
Figure 1.16	Transformations possibles de la chaleur dissipée48
Figure 1.17	Types de transductions possibles48
Figure 1.18	Générateur PV-Thermique.....49
Figure 1.19	Générateur thermique-magnétique-électrique50
Figure 1.20	Générateur thermique-vibratoire-électrostatique50

Figure 1.21	Niveau de conscience envers les énergies renouvelables	52
Figure 1.22	Densité de puissance en fonction du voltage pour différentes technologies	53
Figure 1.23	Revenu total du marché des matériaux piézoélectriques 2015-2025 (USD Milliard).....	53
Figure 1.24	Revenu des É.U du marché des matériaux intelligents selon l'application, 2014-2025 (USD Milliard)	54
Figure 1.25	Effets piézoélectriques	56
Figure 1.26	Séparation des centres de gravité des charges positives et des charges négatives de la maille du SiO_2	56
Figure 1.27	Repère lié au matériau piézoélectrique et mouvements possibles	58
Figure 1.28	Schématique du couplage électromécanique	59
Figure 1.29	Coefficients des matrices pour un matériau piézoélectrique	60
Figure 1.30	Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique.....	60
Figure 1.31	Générateur thermoacoustique à transduction piézoélectrique	61
Figure 1.32	Générateur thermomagnétique à transduction piézoélectrique	62
Figure 1.33	Générateur thermomécanique (SMA) à transduction piézoélectrique.....	63
Figure 1.34	Générateur thermomécanique (bilames) à transduction piézoélectrique ...	64
Figure 1.35	Générateur thermomécanique (fluide) à transduction piézoélectrique	65
Figure 2.1	Concept du générateur	70
Figure 2.2	Amplificateur fabriqué dans notre laboratoire.....	70
Figure 2.3	Générateur d'impulsion	72
Figure 2.4	Géométrie du générateur proposé	72
Figure 2.5	Composition finale du générateur proposé	73
Figure 2.6	Classes de modélisation thermique.....	75
Figure 2.7	Analogie thermique-électrique.....	75

Figure 2.8	Modèle thermique du générateur proposé.....	77
Figure 2.9	Schéma explicatif des forces mécanique	79
Figure 2.10	Schéma électrique équivalent d'un matériau piézoélectrique	80
Figure 3.1	Catégories des matériaux piézoélectriques	84
Figure 3.2	Comparaison de propriétés piézoélectriques pour différentes catégories de matériaux.....	87
Figure 3.3	Comparaison du voltage sous 1000N de charge de pointe pour les trois PZT	91
Figure 3.4	Courbe contrainte déformation pour dur PZT-4 parallèle à la direction de polarisation	97
Figure 3.5	Schéma thermique pour le dimensionnement de l'interface thermique	99
Figure 3.6	Schéma thermique pour le dimensionnement de la résistance équivalente Req.....	100
Figure 3.7	Schéma thermique distribué de la résistance équivalente Req	101
Figure 3.8	Courbe de variation de l'épaisseur totale (Disque PZT et Cylindre de compression) en fonction du coefficient P.....	103
Figure 3.9	Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du générateur piézoélectrique	105
Figure 3.10	Variation de la résistivité du PZT-4 en fonction de la température pour différentes fréquences.....	107
Figure 3.11	Variation de la résistivité en fonction de la température pour plusieurs matériaux piézoélectriques	107
Figure 3.12	Adaptation de charge résistive: courbe de variation de la puissance en fonction de la résistance de charge	109
Figure 4.1	Schéma synoptique de la simulation COMSOL	113
Figure 4.2	Géométrie de la structure: a) Sans maillage b) Avec maillage tétraédrique	114
Figure 4.3	Distribution de la température (°C) pour une puissance dissipée de 3(W)	115

Figure 4.4	Distribution de la contrainte mécanique suivant l'axe Z (N/m^2) pour une puissance dissipée de 3(W).....	115
Figure 4.5	Comparaison de la température du cylindre de compression	117
Figure 4.6	Comparaison de la température du boîtier	117
Figure 4.7	Flux total d'énergie (lignes rouges) et flux total de la chaleur (flèches vertes)	118
Figure 4.8	Comparaison de la contrainte mécanique exercée sur le disque piézoélectrique	118
Figure 4.9	Comparaison du voltage à vide généré	119
Figure 5.1	Distribution de la température du prototype (degC) pour une puissance dissipée de 3(W)	124
Figure 5.2	Distribution de la contrainte mécanique du prototype suivant l'axe Z (N/m^2) pour une puissance dissipée de 3(W)	125
Figure 5.3	Adaptation de charge résistive du prototype.....	126
Figure 5.4	Élément chauffant	127
Figure 5.5	Schéma électrique du circuit de mesure.....	127
Figure 5.6	Circuit de mesure	128
Figure 5.7	Équipements de mesure	128
Figure 5.8	Composants de la structure	129
Figure 5.9	Fixation de la structure.....	130
Figure 5.10	Banc d'essai	130
Figure 5.11	Tension mesurée pour 3W de puissance injectée	131
Figure 5.12	Tension mesurée pour 2W de puissance injectée	132
Figure 5.13	Tension mesurée pour 1W de puissance injectée	132
Figure 5.14	Variation des puissances récupérées expérimentales et théoriques corrigées en fonction de la puissance dissipée.....	134
Figure 5.15	Changements mécaniques.....	135

Figure 5.16	Changement électrique.....	136
-------------	----------------------------	-----

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMF	Alliages à mémoire de forme
AP	Amplificateur de puissance
FM	Facteur de mérite
GES	Gaz à effet de serre
MCF	Micro Fibre Composite
PG	Générateur pyroélectrique
PMN-PT	Plomb niobate de magnésium – titanate de plomb
PTFE	Polytétrafluoroéthylène
PV	Photovoltaïque
PVDF	Polyfluorure de vinylidène
PZN-PT	Plomb niobate de zinc- titanate de plomb
PZT	Titano-Zirconate de Plomb
RF	Radiofréquence
TE	Thermoélectrique
TEG	Générateur thermoélectrique
TGS	Sulfate de Triglycine
TIC	Technologie de l'information et de communication

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Constante de Richardson [$A/(m^2K^2)$]
c	Tenseur des constantes élastiques [N/m^2]
cm	Capacité thermique massique [J/KgK]
C_s	Capacité du matériau piézoélectrique [F]
C_v	Capacité thermique volumique [J/m^3K]
d	Tenseur des constantes de charge piézoélectriques [(C/N) ou (m/V)]
$\vec{D}$	Induction électrique [C/m^2]
dL	Augmentation de la dimension [m]
dPi	Variation infinitésimale de la polarisation instantanée [C/m^2]
dT	Variation infinitésimale de la température [K]
d_{33}	Constante de charge piézoélectrique du mode 33 [(C/N) ou (m/V)]
d_{31}	Constante de charge piézoélectrique du mode 31 [(C/N) ou (m/V)]
$\vec{E}$	Champ électrique [N/C]
E	Module de Young du matériau [GPa]
e	Tenseur des constantes piézoélectriques [(C/m^2) ou (N/Vm)]
ep	Épaisseur [mm]
eti	Épaisseur de l'interface thermique suivant la direction de propagation de chaleur [mm]
E_1	Module de Young du matériau du cylindre de compression [GPa]
E_2	Module de Young du matériau piézoélectrique [GPa]
F	Force de compression [N]

F_E	Figure de mérite pyroélectrique
F'_E	Figure de mérite pyroélectrique
F1	Force exercée par le disque de compression sur le PZT [N]
F2	Force exercée par le PZT sur le disque de compression [N]
g	Tenseur des constantes de tension piézoélectriques [(Vm/N) ou (m ² /C)]
h	Tenseur des constantes piézoélectriques [(m/V) ou (N/C)]
hc	Coefficient de convection [W/m ² K]
hcy	Épaisseur du cylindre de compression [cm]
hpiezo	Épaisseur du matériau piézoélectrique [m]
Ic	Courant dans le circuit de charge [A]
I_{rms}	Moyenne quadratique du courant [A]
$J_{thermionic}$	Intensité du courant thermoïonique [A/m ²]
k	Couplage électromécanique
k _B	Constante de Boltzmann [J/K]
k_{33}	Couplage électromécanique du mode 33
k_{31}	Couplage électromécanique du mode 31
L_0	Dimension d'un objet à la température T_0 [m]
P	Coefficient positif de proportionnalité
P_{avg}	Puissance moyenne générée [W]
pi	Coefficient pyroélectrique [C/m ² K]
P_{in}	Puissance dissipée [W]
P_v	Puissance volumique dissipée dans le volume [W/m ³]
$\vec{q}$	Flux de chaleur surfacique reçu par le volume [W/m ²]

Q_m	Facteur de qualité mécanique
R	Rayon des disques [mm]
R_c	Résistance de charge [Ω]
R_{cy}	Résistance de conduction du cylindre de compression [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{cy,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale du cylindre de compression [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_d	Résistance de conduction du diffuseur [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{d,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale du diffuseur [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{eq}	Résistance équivalente [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{loss}	Résistance modélisant les pertes diélectriques [Ω]
$R_{leakage}$	Résistance de fuite [Ω]
$R_{measure}$	Résistance de mesure [Ω]
$R_{optimale}$	Résistance de charge optimale [Ω]
R_{piez}	Résistance de conduction du matériau piézoélectrique [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{piez,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale du matériau piézoélectrique [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{p1}	Résistance de conduction de la plaque rigide 1 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{p1,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale de la plaque rigide 1 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{p2}	Résistance de conduction de la plaque rigide 2 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{p2,c}$	Résistance de convection de la surface de base de la plaque rigide 2 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
$R_{p2,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale de la plaque rigide 2 [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{ti}	Résistance de conduction de l'interface thermique [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]
R_{totale}	Résistance thermique totale [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]

$\vec{S}$	Déformation relative
s	Tenseur des susceptibilités élastiques [m^2/N^1]
S	Surface [m^2]
$\vec{T}$	Contrainte [N/m^2]
T	Température absolue [K]
T_A	Température ambiante 25°C (Conditions standards) [°C]
T_{amb}	Température ambiante [°C]
$\tan\delta$	Facteur de dissipation diélectrique
T_c	Température du boîtier [°C]
T_{cy}	Température cylindre de compression [°C]
T_j	Température de jonction [°C]
T_0	Température initiale du corps [°C]
T_1	Température du milieu [°C]
T_{11}	Température du cylindre de compression après chauffage [°C]
T_{12}	Température du matériau piézoélectrique après chauffage [°C]
U_c	Tension de la charge [V]
U_m	Tension mesurée [V]
V	Voltage [V]
V	Volume [m^3]
V_a	Tension à vide générée [V]
V_{PEG}	Voltage piézoélectrique [V]
V_{TEG}	Voltage thermoélectrique [V]

V_{rms}	Moyenne quadratique de la tension [V]
ω	Pulsation d'opération du générateur [rad/s]
ZT	Facteur de mérite thermoélectrique
ΔV	Variation de voltage [V]
ΔT	Variation de Température [T]
Φ	Travail de sortie du matériel [eV]
α_s	Coefficient de Seebeck [V/K]
α	Coefficient de dilatation thermique [1/K]
α_1	Coefficient de dilatation thermique du cylindre de compression [1/K]
α_2	Coefficient de dilatation thermique du matériau piézoélectrique [1/K]
σ	Contrainte mécanique [N/m ²]
σ_e	Conductivité électrique [S/m]
λ	Conductivité thermique [W/mK]
ρ	Masse volumique [Kg/m ³]
ν	Coefficient de poisson
ε	Permittivité électrique [F/m ¹]
ε_0	Permittivité électrique du vide [F/m ¹]
ε_r	Permittivité relative du matériau
ε_{33}^σ	Permittivité dans la direction de polarisation à contrainte constante [F/m ¹]
ε_{th}	Allongement relatif thermique
ε_y	Déformation limite
β	Constante d'imperméabilité diélectrique [m/F ¹]

θ_{Jc}	Résistance thermique entre la jonction et le boîtier [K]
θ_{CS}	Résistance thermique de l'interface thermique [K]
θ_{SA}	Résistance thermique du dissipateur [K]

INTRODUCTION

Motivation et contexte

Avec l'émergence de l'industrie 4.0 et l'envahissement des technologies de l'information et de la communication (TIC), le monde subit une transition graduelle vers un contrôle intelligent des différentes commodités de vie. Ce nouvel aspect génère un accroissement des flux de données échangées et une variété des types d'informations collectées. Accentuée par la démarche progressive au nom de 'More than Moore', les dispositifs électroniques sont devenus miniaturisés. Ainsi, les infrastructures de communications et les dispositifs intelligents associés sont devenus de plus en plus énergivores. Selon la société BP, la part de l'énergie utilisée pour la génération de l'électricité augmentera et atteindra 47% d'ici 2035 (BP, 2017). Cette augmentation de la consommation électrique est alarmante. Elle suscite une stratégie d'économie d'énergie appropriée axée sur d'une part, la production de l'électricité verte et, d'autre part, la conception de systèmes plus énergétiquement efficaces.

Dans ce contexte, une récupération des pertes thermiques des dispositifs télématiques et une amélioration de leurs performances s'imposent. En effet, le domaine des TIC présente des menaces pesantes sur notre environnement avec une contribution totale dans l'empreinte carbone estimée à 14% (Belkhir & Elmeligi, 2018) de l'empreinte carbone mondiale du niveau de l'année 2016 d'ici 2040. Cette émission croissante de gaz à effet de serre est d'autant plus visible à travers la contribution des centres de données et des téléphones intelligents dans l'empreinte carbone totale des TIC. Par suite, la valorisation de la chaleur contribue à la lutte contre le réchauffement climatique. De plus, la récupération de la chaleur dissipée procure des profits économiques prometteurs dans la mesure où ces systèmes plus efficaces auront une durée de vie importante et ainsi, ils sont de plus en plus compétitifs. En outre, l'essor de ce marché implique certaines exigences de réduction des coûts conjointement à une baisse de consommation énergétique ce qui permettra de diminuer la facture énergétique tout en conservant l'originalité du dispositif.

Problématique

Dans cet esprit de réflexion, notre laboratoire pousse les recherches vers une amélioration de l'efficacité énergétique des amplificateurs de puissance (AP). En effet, les APs sont l'épine dorsale de la chaîne de télécommunication. Ils permettent d'amplifier le faible signal d'entrée en un signal plus puissant et transmissible sur de longues distances tout en maintenant les caractéristiques du signal d'entrée. Malgré l'évolution des technologies de fabrication des amplificateurs, des contraintes de gestion thermique et d'efficacité persistent. Dans les applications hautes puissances, la modulation de phase et d'amplitude engendre un rapport puissance crête à puissance moyenne (Peak-to-Average Power ratio) important. Pour maintenir un fonctionnement dans la zone linéaire de l'amplificateur et éviter une perte des informations du signal, la tension d'alimentation est maintenue à un niveau supérieur égal à la tension maximale du signal radiofréquence (RF) et un recul par rapport à la puissance maximale. Cela implique des pertes énergétiques sous forme de chaleur. Pour améliorer l'efficacité énergétique, certaines techniques se concentrent sur la diminution de la consommation par l'utilisation d'architecture innovante d'amplificateur de puissance. Tandis que d'autres méthodes visent le recyclage de la chaleur dégagée. Trouver une approche durable pour récupérer une partie de cette énergie perdue, valoriser la chaleur dissipée et l'exploiter pour l'auto-alimentation de ces dispositifs est un souci majeur. Par ailleurs, assurer le refroidissement du circuit électrique est primordial pour maintenir le bon fonctionnement total et éliminer tous risques d'emballements thermiques.

Objectifs du mémoire

Les efforts de recherches sont orientés vers le développement d'un système de récupération écoénergétique. Ainsi, nous proposons de concevoir un convertisseur d'énergie thermique en énergie électrique à transduction piézoélectrique de manière à produire de la puissance et refroidir le circuit conjointement. Elle consiste à une conversion thermomécanique basée sur la dilatation thermique des matériaux. Cette dilatation varie selon le niveau de puissance dissipée par le dispositif. L'allongement obtenu exerce des contraintes sur un matériau

piézoélectrique utilisé pour la conversion mécanique-électrique et la production d'électricité.

Pour ce faire, nous nous fixons certains objectifs :

- Concevoir la géométrie d'un récupérateur de chaleur en faible puissance et développer un modèle analytique indispensable pour le dimensionnement du système
- Dimensionner la structure et effectuer des simulations de la puissance récupérée en se basant sur une étude des matériaux
- Effectuer des simulations multiphysiques du récupérateur
- Fabriquer un prototype et réaliser des mesures expérimentales

Contribution

Les contributions de ce mémoire peuvent être résumées en deux volets :

- La conception d'un générateur piézoélectrique innovant pour la récupération de la chaleur.
- L'utilisation du mode 33 de déformation d'un matériau piézoélectrique pour la récupération de la chaleur en faible puissance.

Organisation du mémoire

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à l'étude bibliographique. Il recouvre les principes et les phénomènes physiques qui interagissent dans les systèmes de récupération de chaleur. Par suite, il présente les avancées de recherche dans ce domaine. Par ailleurs, il met en évidence l'importance des matériaux piézoélectriques pour le développement de ce domaine et explique les fondamentaux de la piézoélectricité. Ainsi, il expose l'état de l'art des générateurs indirects à transduction piézoélectrique. Finalement, ces générateurs nécessitent le maintien de températures adéquates exigées par le fonctionnement des circuits intégrés. Cela est assuré par l'utilisation de méthodes de refroidissement décrite vers la fin du chapitre.

Le deuxième chapitre porte sur la conception de notre structure et le développement du modèle analytique. Dans un premier temps, nous définissons une configuration géométrique assurant le couplage thermique-mécanique-électrique. Subséquemment, nous établissons le modèle théorique de notre structure. Ce modèle recouvre les aspects thermique, thermomécanique et piézoélectrique du système. Il est crucial pour le dimensionnement de la structure.

Le troisième chapitre présente la méthode de dimensionnement du récupérateur et le niveau de puissance récupérée. Nous faisons une étude préalable des matériaux au dimensionnement de la géométrie. Puis, le modèle analytique est implémenté sur Matlab pour déterminer les niveaux de température, la contrainte mécanique et la tension à vide du récupérateur. Une simulation par Simulink tend à estimer la puissance produite.

Le quatrième chapitre s'intéresse au déploiement d'un modèle numérique via une simulation multiphysique avec le logiciel COMSOL Multiphysics. Cette simulation multiphysique permet d'approximer le fonctionnement de notre structure et les interactions entre les différents phénomènes physiques. Ainsi, nous comparons les résultats issus de la simulation multiphysique avec celles du modèle théorique pour vérifier la consistance de notre approche.

Le dernier chapitre est dédié pour le développement du prototype. Nous présentons les propriétés des matériaux commerciaux utilisés ainsi que les modifications apportées. Ensuite, nous décrivons les équipements de mesure et le procédé de fabrication de la structure. Finalement, nous examinons les résultats expérimentaux trouvés. Ces résultats seront analysés et comparés avec les résultats théoriques.

CHAPITRE 1

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, nous présentons un aperçu des diverses technologies de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique et les structures de récupération associées. Par la suite, nous mettons en évidence l'importance de la piézoélectricité pour la récupération d'énergie. Nous expliquons le principe de cet effet et ses équations fondamentales. Ainsi, nous nous intéressons aux générateurs à base de matériaux piézoélectriques. L'intégration de ces générateurs dans les circuits intégrés nécessite l'utilisation de systèmes de refroidissement pour le maintien de température d'opération adéquate. Nous décrivons donc les principales méthodes de refroidissement utilisées.

1.2 Généralités sur la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique

Cette section décrit les méthodes possibles pour la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique : nous introduisons les principaux phénomènes physiques responsables de la génération de puissance ainsi que des exemples de générateurs développés en littérature tout en mettant en évidence l'importance des matériaux piézoélectriques pour la récupération de l'énergie thermique.

1.2.1 Conversion directe

Toute transformation directe de l'énergie thermique en énergie électrique est basée sur un phénomène physique permettant un couplage entre les grandeurs thermiques et les grandeurs électriques exercées sur des matériaux.

Dans un premier temps, nous distinguons l'effet thermoélectrique direct ou encore l'effet de Seebeck. Cet effet est découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck

(Williams, 2016). Il consiste à transformer un gradient spatial de température en électricité. Le principe de la transformation repose sur l'assemblage de deux matériaux conducteurs distincts (A et B voir figure 1.1) thermiquement en parallèle. Au bout des deux jonctions obtenues, nous appliquons des niveaux de températures différentes de façon à avoir un gradient de température ΔT non nul. Une différence de potentiel électrique ΔV émerge. La figure 1.1 illustre bien ce principe.

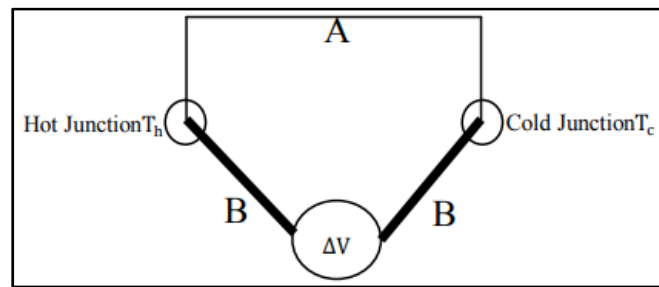


Figure 1.1 Effet Seebeck
Tirée de Xu (2015, p2)

La relation entre le potentiel électrique et la variation de la température est donnée par (B. Xu, 2015) :

$$\alpha_s = \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (1.1)$$

Adapté de B.Xu (2015, p2)

Où α_s est appelé le Coefficient de Seebeck du thermocouple

L'effet de Seebeck est décrit comme une migration des porteurs de charges du côté de la jonction chaude vers le côté de la jonction froide en vue d'assurer un état d'équilibre thermique. Cette diffusion est d'autant plus visible pour les matériaux dopés qui possèdent plus de charges libres (électrons ou trous), ce qui produit un potentiel induit plus important.

Dans un deuxième temps, nous présentons un autre effet physique pour la transformation de l'énergie thermique en électricité : c'est l'effet Pyroélectrique. Cet effet est découvert vers le dix-huitième siècle et ses fondements théoriques majeurs sont énoncés en 1878 par Lord Kelvin (Amokrane, 2013) . Il consiste à transformer une variation temporelle de température

en électricité. Ce phénomène est visible sur une catégorie de matériau appelé les matériaux pyroélectriques. Ces matériaux sont des cristaux ayant une polarisation spontanée selon un axe unique. De ce fait, la pyroélectricité se traduit en une variation temporaire de la polarisation spontanée du matériau en fonction de la température. En utilisant des électrodes en haut et en bas d'un matériau pyroélectrique, un courant peut être mesuré par un ampèremètre (Bhatia, 2014). La polarisation spontanée entraîne l'accumulation de charges sur les surfaces du cristal. Ces charges attirent les charges libres des électrodes. Ainsi, une variation de la polarisation due à une variation de la température crée une diffusion des charges libres des électrodes pour modérer cette variation de polarisation comme illustrée dans la figure 1.2.

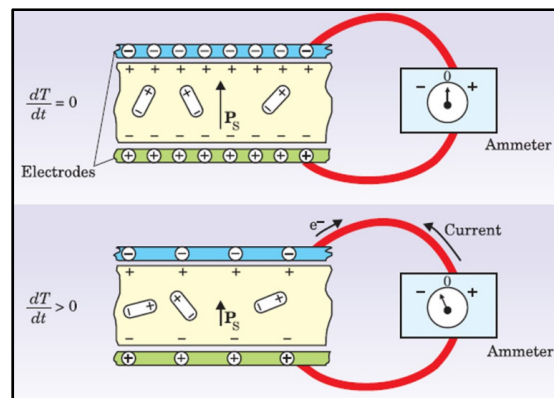


Figure 1.2 Effet pyroélectrique
Tirée de Bhatia (2014, p3)

L'effet pyroélectrique couple la variation temporelle de la température et la variation de la polarisation spontanée des cristaux pyroélectriques suivant l'équation (Silva, 2017) :

$$dPi = pi * dT , \quad (1.2)$$

Tiré de Silva (2017, p4)

Où dPi est appelé la variation de la polarisation instantanée

pi est appelé le coefficient pyroélectrique

dT est appelé la variation de la température

Au-delà de ces deux effets scientifiques cités, Jie Ren du Laboratoire national de Los Alamos a révélé une troisième possibilité à travers une prépublication en 2014. D'une part, elle utilise une variation temporelle de la température contrairement à l'effet Seebeck, d'autre part, elle ne se limite pas aux cristaux polaires comme la pyroélectricité mais se généralise pour tout matériau conducteur. Ce nouvel effet se base sur les fondamentaux de la thermodynamique hors équilibre. En effet, le chercheur a révélé ce phénomène par l'utilisation d'un nano-dispositif auprès de deux matériaux en plomb. La figure 1.3 montre le nano-dispositif au centre entre deux matériaux en plomb (Ren, 2014).

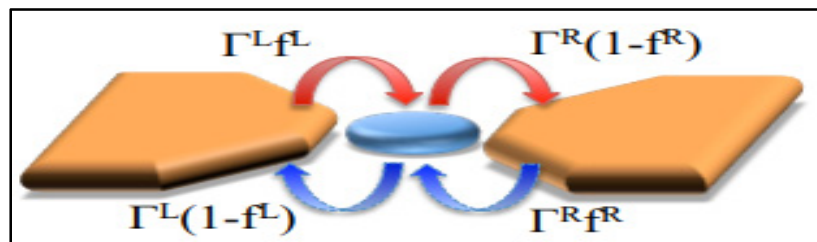


Figure 1.3 Nouvel effet direct de la conversion
de l'énergie thermique en électricité
Tirée de Ren (2014, p2)

En dehors de tout changement de température, le dispositif et le plomb sont en équilibre thermodynamique. Cependant, pour une fluctuation de température, la population d'électron varie sur le niveau de fermi du plomb et l'équilibre thermodynamique est rompu. Il émerge ainsi un transfert d'électron du dispositif vers le plomb, et vice versa, pour trouver un nouvel état d'équilibre thermodynamique. Ainsi, le phénomène peut être expliqué par une redistribution dynamique des charges à travers les fluctuations de la température et il est étudié par la théorie de la mécanique quantique.

1.2.2 Générateurs directs

Les générateurs directs reposent essentiellement sur les effets de conversions directs ou encore sur une combinaison d'un effet direct et un autre effet scientifique (générateur hybride) afin d'améliorer les performances du générateur.

- **Générateur thermoélectrique TEG**

Un générateur thermoélectrique est un dispositif capable de transformer l'énergie thermique en énergie électrique suivant l'effet de Seebeck. Ce dispositif est composé de Modules thermoélectriques ou Modules de Seebeck. Autant dire, le groupement des extrémités d'un semi-conducteur dopé n et un autre semi-conducteur dopé p crée une cellule élémentaire connue sous le nom de Thermo-élément. Une connexion de plusieurs thermo-éléments électriquement en séries et thermiquement en parallèle représente un module de Seebeck. La génération de courant électrique est effectuée à partir du gradient de la température entre le haut et le bas du module comme l'illustre la figure 1.4 (Prieto Vargas, 2015).

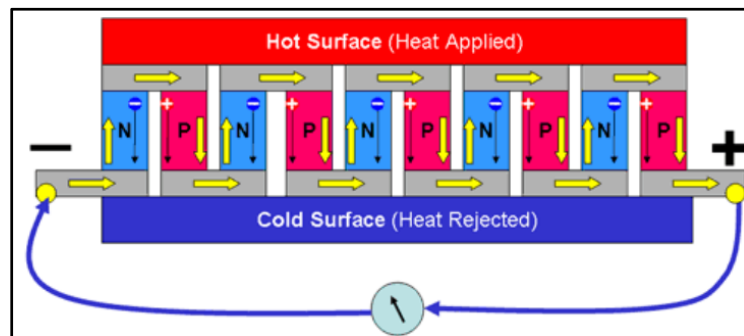


Figure 1.4 Module de Seebeck
Tirée de Prieto Vargas (2015, p8)

Les performances des générateurs thermoélectriques dépendent de la nature des matériaux thermoélectriques, du gradient de température, de la température moyenne de fonctionnement ainsi que des caractéristiques géométriques du dispositif. De là, concevoir un générateur thermoélectrique nécessite l'optimisation des différents paramètres clés pour avoir une solution adaptable à l'application désirée à savoir des applications hautes puissances ayant de grands modules thermoélectriques et des applications basses puissances basées sur la technologie des couches minces. De surcroît, plusieurs chercheurs ont travaillé au cours des années pour développer des matériaux plus performants. Une grandeur adimensionnelle appelé le facteur de mérite ZT évalue la performance d'un tel matériau et s'exprime par (Belhadj, 2015) :

$$ZT = \frac{\alpha_s^2 * \sigma_e}{\lambda} * T, \quad (1.3)$$

Adapté de Belhadj (2015, p7)

Où σ_e est appelé la conductivité électrique

λ est appelé la conductivité thermique

T est appelé la température absolue

Ce facteur de mérite a connu une amélioration depuis 1950 pour atteindre des valeurs de l'ordre de 2.5 comme l'indique la figure 1.5 (Haras & Skotnicki, 2018).

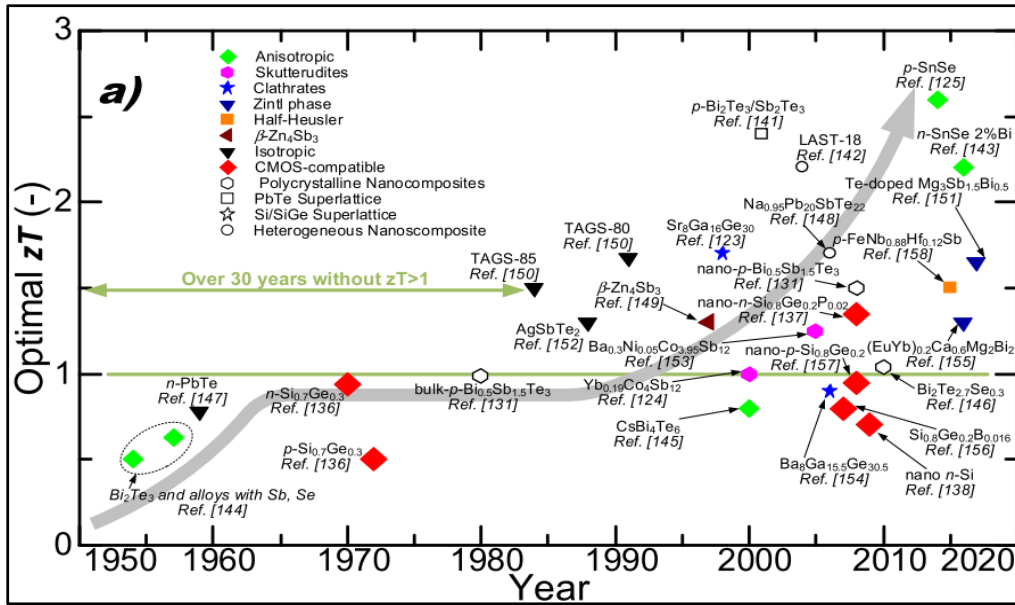


Figure 1.5 Évolution du facteur de mérite pour les matériaux thermoélectriques
Tirée de Haras & Skotnicki (2018)

Avec cette augmentation des performances des matériaux, les générateurs thermoélectriques sont de plus en plus compétitifs et leurs efficacités globales sont prometteuses. D'après l'étude de Pennelli en 2014, avec un bon matériau, l'efficacité d'un TEG peut être comparable à celle des centrales thermiques comme indiqué dans la figure 1.6 présentant l'efficacité des TEGs en fonction de la température de la source chaude à une température de la source froide égale à 300K pour différents matériaux (Pennelli, 2014).

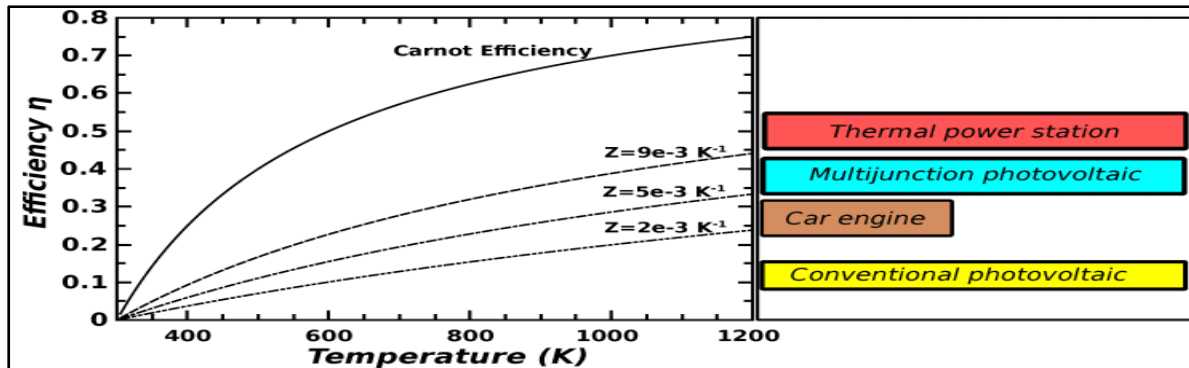


Figure 1.6 Comparaison entre l'efficacité d'un TEG et les techniques de production usuelles
Tirée de Pennelli (2014, p1272)

Les TEGs sont très répandus et possèdent différentes catégories d'applications (Favarel, 2014)

- La production d'électricité en milieu extrême : Sources dédiées au TEG
- La production d'électricité décentralisée : sources d'énergies renouvelables
- Le solaire thermoélectrique
- La récupération de la chaleur perdue : Utilisation des sources chaudes à optimiser
- La micro-production

• Générateur Pyroélectrique (PG)

Les générateurs pyroélectriques sont des dispositifs de conversion de l'énergie thermique en énergie électrique suivant l'effet pyroélectrique. Ces générateurs utilisent différentes méthodes pour augmenter les fluctuations de températures dans les matériaux pyroélectriques, ce qui engendre une grande variété de forme. Cependant, il existe une cellule pyroélectrique de base constituée d'une couche d'un matériau pyroélectrique entre deux électrodes utilisées pour la collecte du courant généré. Cette cellule est semblable à une capacité et un exemple de cellule de base est illustré dans la figure 1.7 avec la couche active représentant le matériau pyroélectrique (Sultana, Alam, Middya, & Mandal, 2018).

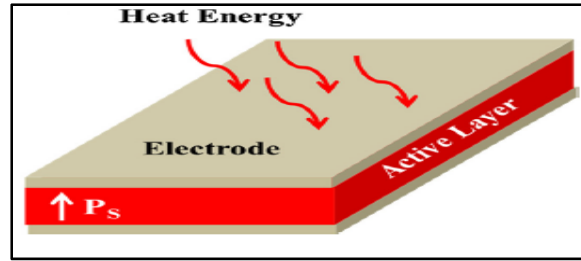


Figure 1.7 Cellule pyroélectrique de base
ayant une polarisation spontanée P_s
Tirée de Sultana et al (2018)

Les performances des générateurs pyroélectriques dépendent des caractéristiques du matériau utilisé, de la température de la source de chaleur, et des paramètres géométriques du générateur. Ils ont une efficacité limite estimée à 50% du rendement de Carnot (Ravindran, Huesgen, Kroener, & Woias, 2011). D'une part, pour favoriser le processus thermique, des modèles équivalents de cycles de conversions thermodynamiques ont été développés tel que le cycle d'Olsen, le premier cycle établi par Olsen Groupe (H. Zhu, 2011). D'autre part, pour les applications de récupération d'énergie, les matériaux pyroélectriques en vrac ont été étudiés. Deux figures de mérite possibles F_E et F'_E dont F'_E tient compte de la capacité thermique des matériaux permettent de comparer l'efficacité de ces matériaux (Bowen et al., 2014) :

$$F_E = \frac{pi^2}{\varepsilon_{33}^\sigma} ; F'_E = \frac{pi^2}{\varepsilon_{33}^\sigma * C_v^2}, \quad (1.4)$$

Adapté de Bowen et al (2014, p3840)

Où pi est appelé le coefficient pyroélectrique

ε_{33}^σ est appelé la permittivité dans la direction de polarisation à contrainte constante

C_v est appelé la capacité thermique volumique

D'après les études de Bowen et al. (2014), le sulfate de triglycine (TGS) est potentiellement le meilleur matériau pour la conversion pyroélectrique suivie du monocristal de Plomb niobate de magnésium – titanate de plomb (PMN-PT). D'ailleurs, pour choisir un matériau pyroélectrique, une bonne figure de mérite doit être associée à la température d'opération de notre application. En effet, en dépassant une température limite appelée Température de Curie,

les matériaux pyroélectriques perdent leurs pouvoirs de conversion par effet pyroélectrique. De ce fait, pour chaque niveau de température de la source de chaleur, il existe un matériau pyroélectrique plus adéquat (Zabek, 2016). Avec l'avancement technologique, des générateurs se basant sur des couches minces, des nano-fils et des nano-fibres (Lingam, Parikh, Huang, Jain, & Minary-Jolandan, 2013) ont été développés. Ces matériaux pyroélectriques intelligents présentent une haute densité énergétique, de meilleures propriétés mécaniques et plus de flexibilité que les matériaux en vrac. Ceci a permis d'améliorer l'efficacité des générateurs pyroélectriques.

- **Générateur thermoïonique**

Les générateurs thermoïoniques sont composés de deux électrodes : une électrode connectée à la source chaude de chaleur et l'autre électrode est connectée à la source froide ou encore à un dissipateur de chaleur. Ces deux électrodes sont séparées par un espacement. Cet espacement peut être sous vide ou rempli de vapeur comme le montre la figure 1.8 (Percy et al., 2014).

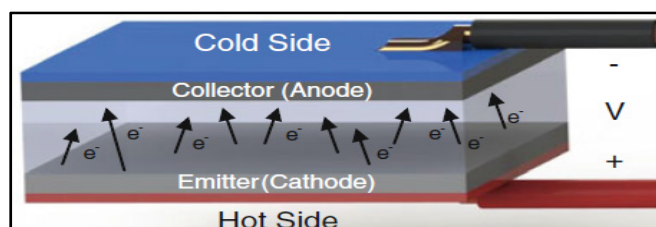


Figure 1.8 Cellule d'un générateur thermoïonique
Tirée de Percy et al (2014, p52)

Le principe de fonctionnement se base sur l'émission d'électrons d'un solide par effet de chaleur. Autrement dit, lorsqu'une électrode est chauffée à un niveau très haut de température, des électrons de surface peuvent s'échapper du solide. Cette électrode est dite émettrice (cathode). En plaçant une deuxième électrode étroitement à côté de l'émettrice et ayant une plus faible température, les électrons libres se collent sur celle-ci : électrode collectrice (anode). Ainsi, la collectrice présente une accumulation de charges négatives et une différence de potentiel entre les deux électrodes se produit. La connexion d'une charge induit un courant

électrique dont l'intensité est donnée par la loi de Richardson (Khalid, Leong, & Mohamed, 2016):

$$J_{thermionic} = AT^2 e^{\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right)}, \quad (1.5)$$

Tiré de Khalid et al (2016, p2)

Où T est appelé la température absolue de la surface émettrice en Kelvin

A est appelé la constante de Richardson

Φ est appelé le travail de sortie du matériel

k_B est appelé la constante de Boltzmann

En général, ces générateurs opèrent pour des températures très élevées par rapport à la température ambiante de l'ordre de 1000 K (Percy et al., 2014).

1.2.3 Générateurs hybrides

Les TEGs et les PGs sont plus développés en littérature. De plus, il existe des cas de commercialisation de certains récupérateurs thermoélectriques dans les circuits intégrés AEM30940 et AEM20940 de la société 'e-peas' (<https://e-peas.com>). Cependant, en quête de performance, les convertisseurs TEG et PG sont associés à d'autres formes de conversion pour développer des générateurs hybrides compétitifs en termes de puissance de sortie et d'efficacité. Ces générateurs varient selon la nature de l'application utilisée et nous présentons les principaux générateurs hybrides étudiés en littérature.

- **Générateur Photovoltaïque-thermoélectrique (PV-TE)**

Ce type de générateur permet de diviser le rayonnement solaire incident en deux parties : les rayonnements à courtes longueurs d'onde adaptés pour les cellules PV et les rayonnements à grandes longueurs d'onde qui seront la source de chaleur pour les cellules TE. Cette division a pour objectif d'optimiser la récupération du spectre solaire dans un système PV qui présente des limitations dues aux énergies des gaps des cellules PV. Deux configurations possibles permettant le captage des différents rayonnements. La première méthode utilise un composant réfléchissant et la deuxième méthode (figure 1.9) par la mise en parallèle des modules PV et

TE (Huen & Daoud, 2017). Un exemple de générateur PV-TE avec composant réfléchissant est fabriqué en se basant sur une ampoule comme source de radiation (voir figure 1.10) (Mustofa, Djafar, Syafaruddin, & Piarah, 2018).

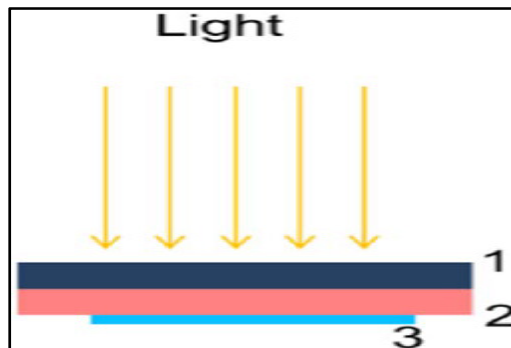


Figure 1.9 Configuration parallèle:
1:PV module, 2: TEG, 3: Dissipateur
Tirée de Huen & Daoud (2017, p1297)

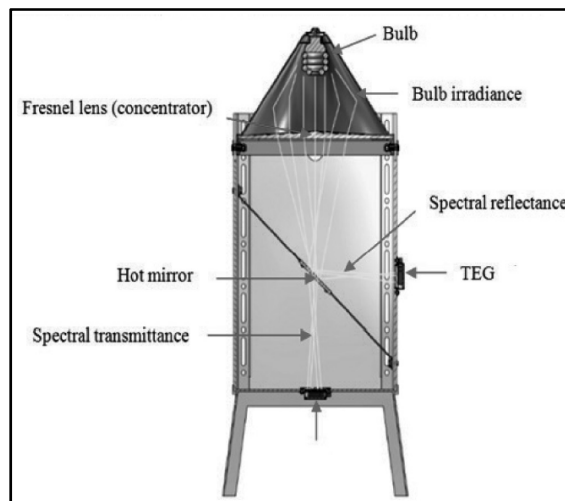


Figure 1.10 Configuration avec composant réfléchissant
Tirée de Mustofa et al (2018, p70)

- **Générateur solaire thermique-thermoélectrique**

Ces générateurs permettent de générer simultanément de la chaleur et du courant. En effet, un générateur thermique solaire produit de la chaleur avec le principe de pompe de chaleur tandis

que le TEG joue le rôle de la production de courant. Un modèle typique du générateur thermique solaire-TE est réalisé en connectant un module TE sur le condensateur de la pompe. Ce module est refroidi par de l'eau ou par l'air comme présenté dans la figure 1.11 (Ong, 2015).

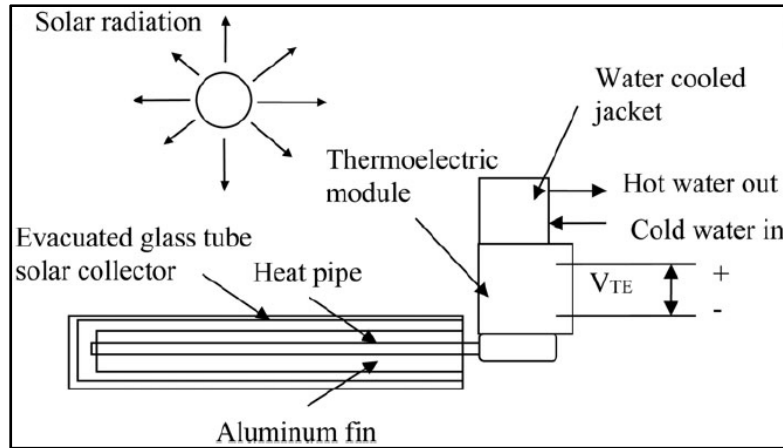


Figure 1.11 Générateur solaire thermique-thermoélectrique
Tirée de Ong (2015, p461)

- **Générateur piézoélectrique-thermoélectrique**

En général, les générateurs thermoélectriques et les générateurs piézoélectriques sont incompatibles vu la difficulté des mécanismes lors du couplage et lors de la récupération de la tension de sortie. Cependant, des chercheurs de l'université de Wake Forest University ont développé une métastructure avec des couches minces spécifiques à fin d'assurer un couplage entre ces deux types différents de générateurs. La structure réalisée est présentée dans la figure 1.12 (Montgomery, Hewitt, & Carroll, 2016).

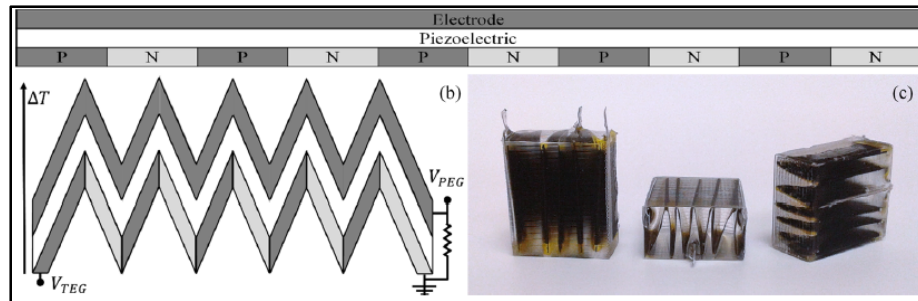


Figure 1.12 Générateur piézoélectrique-thermoélectrique
Tirée de Montgomery et al (2016, p2)

Dans cette structure, l'électrode en bas d'un générateur piézoélectrique est remplacée par une alternance d'électrode thermoélectrique de type-p et de type-n. Avec une masse commune, le voltage thermoélectrique V_{TEG} est mesuré entre la première et la dernière électrode thermoélectrique, tandis que le voltage piézoélectrique V_{PEG} est mesuré entre l'électrode en haut et l'électrode en bas.

- **Générateur piézoélectrique-pyroélectrique**

Puisque tout matériau pyroélectrique est piézoélectrique, il est intéressant de pouvoir utiliser ces deux propriétés conjointement. Kang et Yeatman (2016) ont proposé une structure d'une poutre bilame vibrante sous l'effet de température. L'étude de cette structure montre que l'effet pyroélectrique est dominant. Ainsi, ils ont ajouté des aimants en haut de la poutre pour augmenter le régime vibratoire et, dans ce cas, le générateur piézoélectrique a une contribution importante sous conditions optimales. La représentation schématique de la structure proposée est donnée par la figure 1.13 (Kang & Yeatman, 2016).

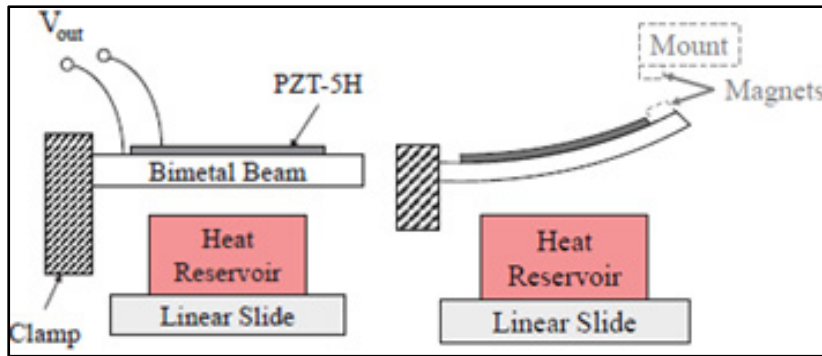


Figure 1.13 Générateur piézoélectrique-pyroélectrique
Tirée de Kang & Yeatman (2016, p2)

- **Générateur thermo-galvanique-pyroélectrique**

Ce générateur consiste en l'association d'une cellule thermo-galvanique, d'un générateur pyroélectrique, d'un système d'absorbeur solaire, ainsi qu'une éponge trempée d'électrolyte de la cellule thermo-galvanique. Ce système est spécifiquement conçu par Ding et al. (2018) à fin de collecter le rayonnement solaire. Le système permet une transformation du rayonnement solaire en chaleur pour créer une variation temporelle de température. Cette variation active directement le générateur pyroélectrique et par transmission la cellule galvanique. Le schéma du principe de la structure est présenté par la figure 1.14 (Ding et al., 2018).

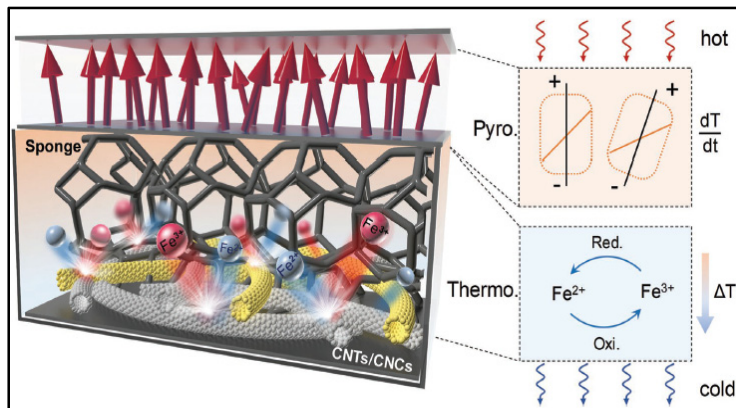


Figure 1.14 Générateur galvano-pyroélectrique
Tirée de Ding et al (2018, p2)

- **Générateur triboélectrique-piézoélectrique-pyroélectrique**

Zi et al. (2015) ont développé ce type de générateur. C'est une structure planaire et multicouche en mettant une cellule pyroélectrique en bas d'une cellule triboélectrique donnée par la figure 1.15 (Zi et al., 2015).

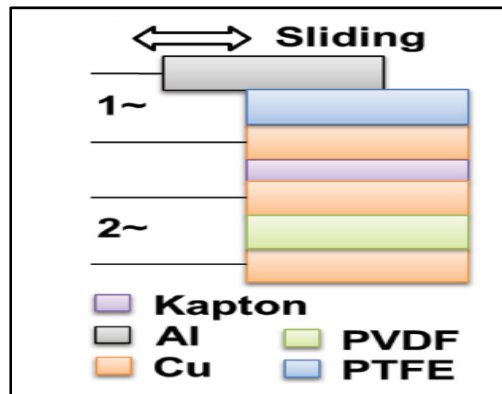


Figure 1.15 Générateur triboélectrique
-piézoélectrique-pyroélectrique
Tirée de Zi et al (2015, p2)

Avec le mouvement de glissement de la partie en aluminium sur une couche de polytétrafluoroéthylène (PTFE), la structure génère du courant par triboélectricité. Le générateur hybride pyroélectrique-piézoélectrique représenté par la couche du polyfluorure de vinylidène (PVDF) entre les électrodes en cuivre en bas récupère la chaleur induite par friction et l'énergie mécanique induite par la force normale. Le kapton est utilisé comme un isolateur électrique et conducteur thermique.

1.2.4 Conversion indirecte

À première vue, la conversion directe de l'énergie thermique en électricité semble être assez développée et efficace. Néanmoins, cette conversion présente des limites technologiques la rendant inadéquate pour plusieurs applications. A cet égard, les recherches tendent vers une conversion indirecte. Dans une première étape, la conversion indirecte consiste en une transformation de la chaleur dissipée en une autre forme d'énergie. Cette transformation est reliée aux propriétés de certains matériaux (exemple : les matériaux thermoélastiques) ou à une

forme géométrique spécifique du générateur étudié. Les principales transformations évoquées en littérature sont présentées dans la figure 1.16.

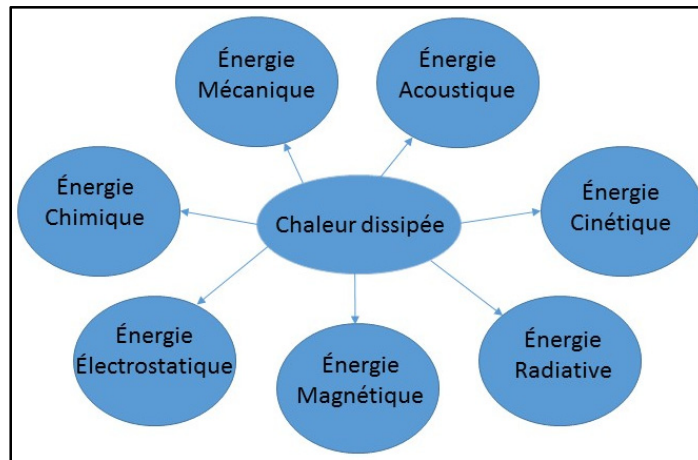


Figure 1.16 Transformations possibles de la chaleur dissipée

En particulier, la transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique est la plus riche. Elle se manifeste par créations de forces, de contraintes, de déformations et de vibrations. Dans une deuxième étape, le générateur indirect assure la transformation de cette énergie obtenue en électricité à travers plusieurs types de transducteurs. Les principaux transducteurs évoqués en littérature sont présentés dans la figure 1.17.

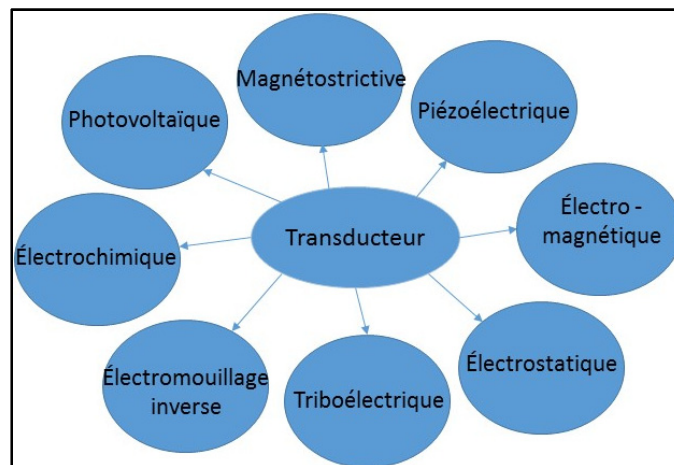


Figure 1.17 Types de transductions possibles

1.2.5 Générateurs indirects

Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu de certains générateurs indirects développés.

- **Générateur PV-thermique**

Ce générateur permet de transformer la chaleur dissipée en énergie radiative (rayonnement thermique) en utilisant un microémetteur. Les rayons générés sont filtrés pour extraire les rayons ayant une énergie supérieure à la bande interdite du semi-conducteur. Puis, ces radiations sont transformées en électricité avec des cellules photovoltaïques comme le montre la figure 1.18 (Selvan & Mohamed Ali, 2016).

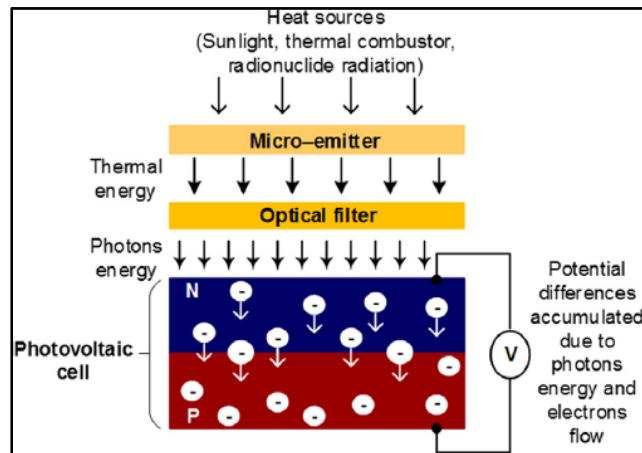


Figure 1.18 Générateur PV-Thermique
Tirée de Selvan & Mohamed Ali (2016, P1040)

- **Générateur thermique-magnétique-électrique**

Ce générateur permet la récupération de la chaleur en changeant les propriétés magnétiques d'un matériau magnétocalorique, en particulier un matériau ferromagnétique. En effet, ces matériaux possèdent une température de transition nommée température de Curie. Au-delà de cette température, ces matériaux deviennent paramagnétiques. Le schéma de la structure est présenté par la figure 1.19 (Kishore & Priya, 2018).

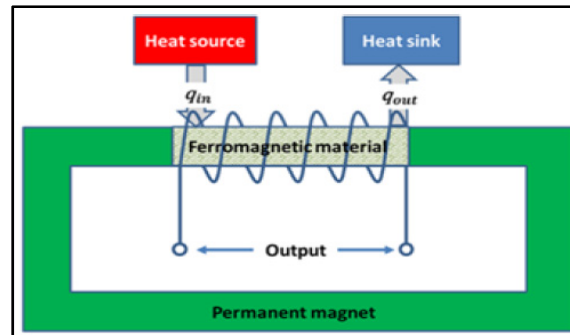


Figure 1.19 Générateur thermique-
magnétique-électrique
Tirée de Kishore & Priya (2018, p22)

Le principe de fonctionnement se base sur un cycle de chauffage (par la chaleur dissipée) et de refroidissement (par un dissipateur de chaleur) d'un matériau ferromagnétique placé en dérivation par rapport à un aimant permanent en forme de C. De plus, le matériau ferromagnétique est inséré au cœur d'un bobinage. Ce cycle de chaleur résulte en une variation du flux magnétique. Une force électromotrice induite dans le circuit émerge par la loi d'induction électromagnétique de Faraday.

- **Générateur thermique-vibratoire-électrostatique**

Ce type de générateur transforme la chaleur dissipée en un cloquage dans une structure bilame. Cette structure est utilisée comme une contre-électrode en contact avec des électrets associés à des électrodes. Le mouvement de cloquage permet de modifier la capacité de l'ensemble en fonction du temps, ce qui génère une puissance débitée dans le circuit extérieur comme le montre la figure 1.20 (Onoriu Puscasu, 2014).

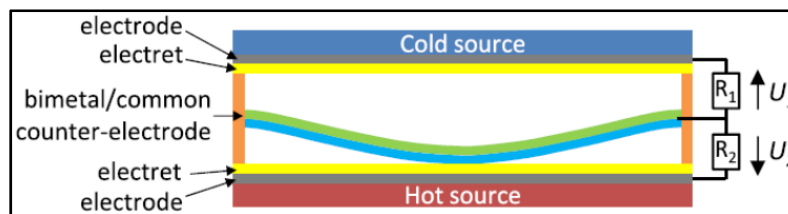


Figure 1.20 Générateur thermique-vibratoire-électrostatique
Tirée de Onoriu Puscasu (2014, p63)

1.2.6 Importance de la génération indirecte à transduction piézoélectrique

Malgré les mérites des générateurs directs, ces derniers présentent certaines limitations technologiques discutées dans ce qui suit (Tang, Wang, Cattley, Gu, & Ball, 2018) (Onoriu Puscasu, 2014) (Salamon, 2018) (Rendon hernandez, 2018).

D'une part, la majorité des matériaux thermoélectriques ont une haute toxicité et ils sont dangereux pour la santé en particulier pour les applications à basse température (tellure/antimoine). De plus, à cause de la bonne conductivité thermique de ces matériaux, nous devons toujours maintenir un gradient de température élevé et constant pour assurer la production d'électricité. De ce fait, la plupart des générateurs sont associés obligatoirement à un radiateur externe. En outre, l'efficacité de la conversion d'énergie est faible et elle est accentuée par une rareté de certains matériaux (Tellure). Ceci engendre un coût élevé de fabrication essentiellement pour de grands dispositifs.

D'autre part, en ce qui concerne la pyroélectricité, cette technologie est attrayante mais plus difficile à exploiter. En effet, elle nécessite des fluctuations temporelles de la température avec des fréquences élevées. Ces variations sont peu communes et inhabituelles. Également, les générateurs pyroélectriques sont associés à des cycles thermiques de rendements maximaux limités (rendement de Carnot). Au surplus, le nombre de matériaux présentant des propriétés pyroélectriques est limité et ces propriétés sont perdues au-delà d'une température critique appelée température de Curie.

Par ailleurs, des recherches sur les générateurs indirects émergent avec différents types de transductions possibles. Parmi lesquelles, la transduction piézoélectrique requière une attention importante. C'est un axe de recherche prometteur dans la mesure où il s'inscrit dans une perspective de développement durable. En premier lieu, la piézoélectricité est une source d'énergie propre et renouvelable. Elle permet de respecter la politique de diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES) avec zéro émission de carbone (Walubita et al., 2018). Selon l'étude de Kour et Charif (2016), les scientifiques sont encore inconscients de l'importance de cette technologie comme le montre la figure 1.21. Cependant, 73% de leur population de recherche éprouvent de l'attention pour le potentiel de cette énergie et expectent une augmentation de ses applications dans le futur.

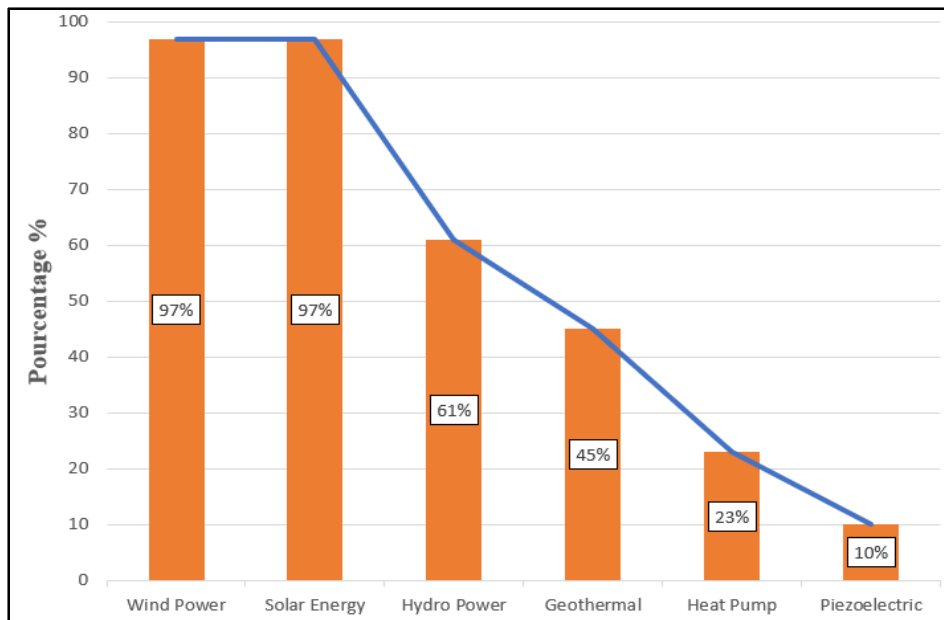


Figure 1.21 Niveau de conscience envers les énergies renouvelables
Adaptée de Kour & Charif (2016)

En outre, les matériaux piézoélectriques possèdent une densité de puissance assez élevée. Cette densité est comparable avec les autres technologies utilisées à savoir les batteries lithium-ion et les sources de courant électromagnétiques comme le montre la figure 1.22. Ainsi, la piézoélectricité nécessite plus de recherche pour pouvoir bien l'exploiter (Cook-Chennault, Thambi, Bitetto, & Hameyie, 2008).

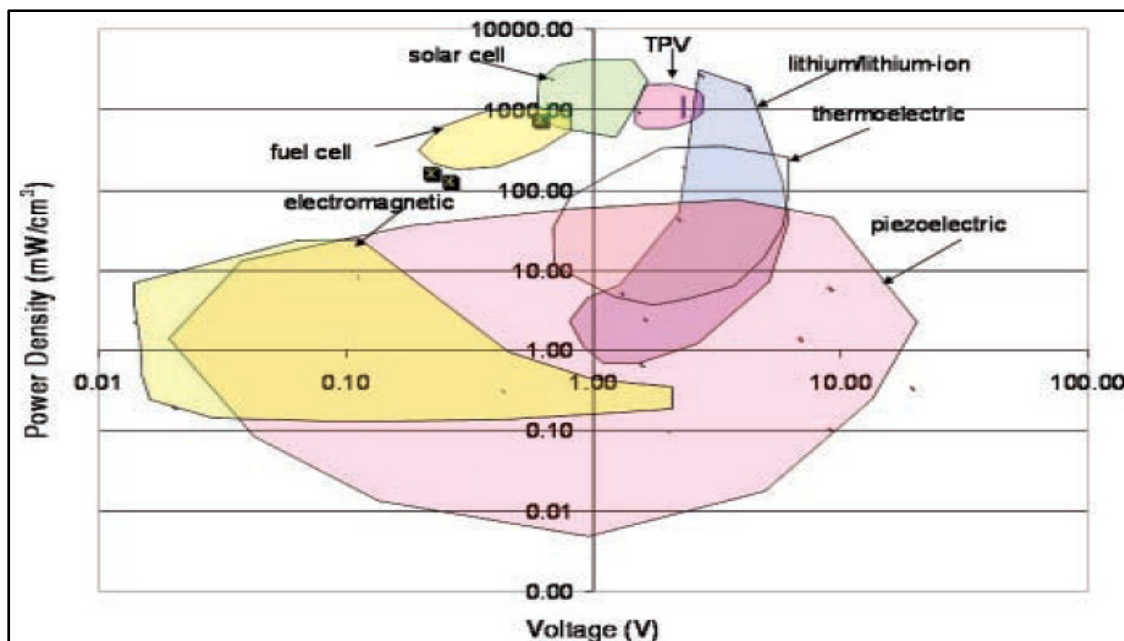


Figure 1.22 Densité de puissance en fonction du voltage pour différentes technologies
Tirée de Cook-Chennault et al (2008, p497)

De surcroît, grâce à leurs propriétés spéciales et leur rentabilité économique, les matériaux piézoélectriques sont de plus en plus utilisés dans différentes applications. Ce changement augmente la demande des matériaux piézoélectriques dans le marché économique pour atteindre 1,7 milliard USD en 2017 avec une estimation de croissance annuelle comme le montre la figure 1.23 (ADROIT Market Research, 2019).

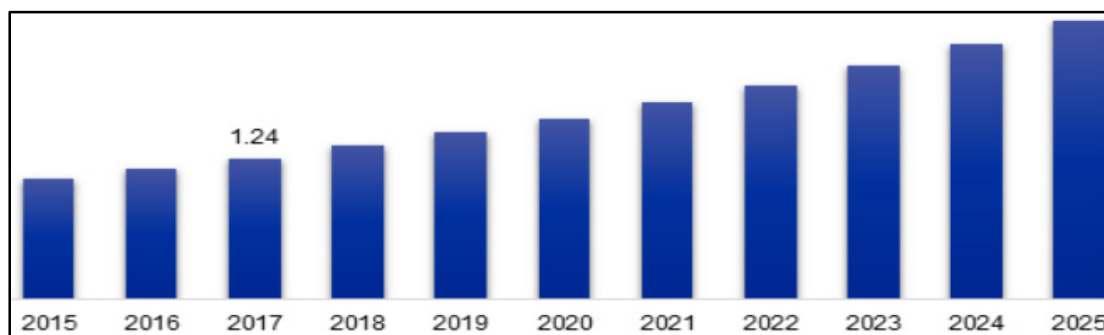


Figure 1.23 Revenu total du marché des matériaux piézoélectriques 2015-2025(USD Milliard)
Tirée de ADROIT Market Research (2019)

Ce marché est non seulement croissant, mais aussi le plus important en comparaison avec les autres marchés des matériaux intelligents comme illustre la figure1.24. Les matériaux piézoélectriques atteignent 54% des revenus du marché global en 2016 (Grand View Research, 2017).

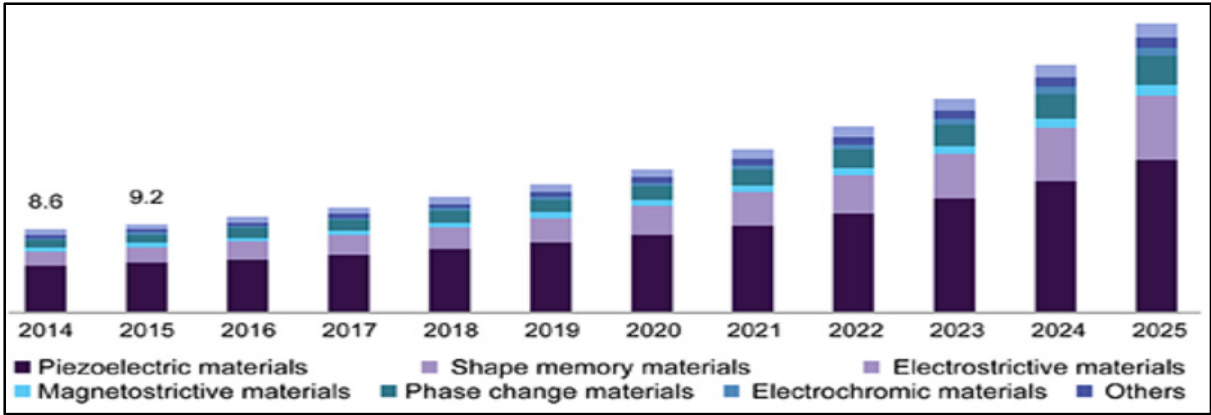


Figure 1.24 Revenu des É.U du marché des matériaux intelligents selon l'application, 2014-2025 (USD Milliard)
Tirée de Grand View Research (2017)

À cet égard, l'intégration des matériaux piézoélectriques dans les récupérateurs de chaleur est primordiale pour le développement de solutions innovantes et rentables. De surcroît, ces matériaux sont simples à manipuler et peuvent être fabriqués avec des formes et des dimensions variables. De ce fait, nous choisissons cette transduction pour notre modèle. Le tableau 1.1 résume les principaux points décrits dans cette partie.

Tableau 1.1 Importance de la piézoélectricité

Avantages de la piézoélectricité	Limites de la thermoélectricité	Limites de la pyroélectricité
Source d'énergie propre et renouvelable (zéro GES)	Matériaux toxiques et rares Gradient de température élevé	Fréquence élevée des fluctuations temporelles de la température

Tableau 1.1 Importance de la piézoélectricité (suite)

Avantages de la piézoélectricité	Limites de la thermoélectricité	Limites de la pyroélectricité
Densité de puissance assez élevée Rentabilité économique (Marché économique développé) Facilité d'utilisation	Faible efficacité de conversion Coût de fabrication élevé	Faible rendement des cycles thermiques associés Nombre limité de matériaux pyroélectriques

1.3 État de l'art sur les générateurs indirects à base des matériaux piézoélectriques

Cette partie s'intéresse aux propriétés des matériaux piézoélectriques et aux équations fondamentales du couplage mécanique-électrique. Elle met en avant les générateurs thermiques à transduction piézoélectrique.

1.3.1 Effet piézoélectrique

La piézoélectricité est un phénomène qui se manifeste dans certains matériaux non conducteurs (diélectriques ou semi-conducteurs) ne possédant pas un centre de symétrie. Il consiste à créer des charges électriques suite à une excitation par contraintes mécaniques extérieures (Effet piézoélectrique direct), ou inversement, à déformer le matériau par l'application d'une tension extérieure (Effet piézoélectrique indirect) comme le montre la figure 1.25. Ce phénomène a été découvert par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880 suite à leurs études sur les matériaux pyroélectriques. Ils ont pu mettre en évidence l'effet piézoélectrique direct présent dans certains minéraux cristallins à savoir le quartz, la tourmaline, etc. L'effet piézoélectrique indirect est envisagé un an après par G.Lippmann (Amokrane, 2013).

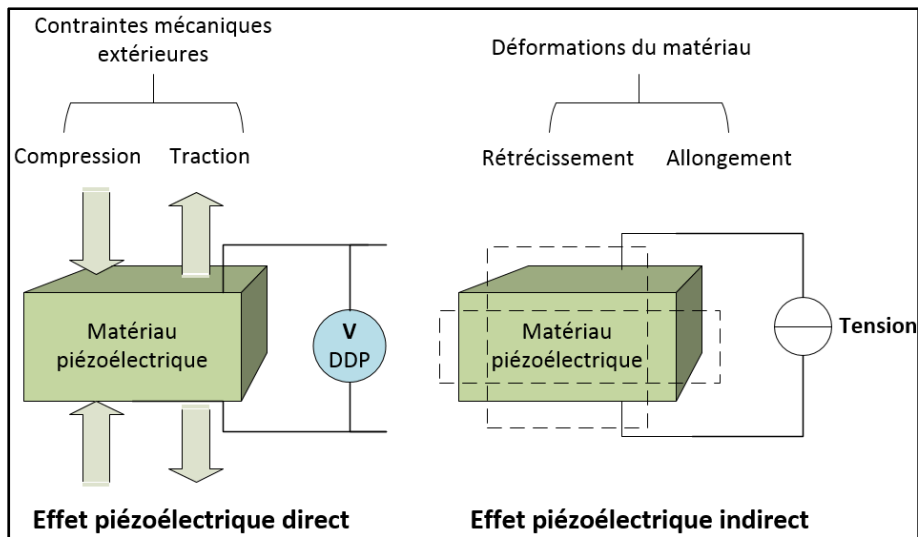


Figure 1.25 Effets piézoélectriques

La piézoélectricité est expliquée à échelle cristalline par une polarisation de la maille non-centrosymétrique initialement électriquement neutre. En effet, lorsque nous appliquons des contraintes mécaniques sur un matériau piézoélectrique, nous séparons le centre de gravité des charges positives du centre de gravité des charges négatives de manière à créer des dipôles internes tel est le cas par exemple de la maille du quartz SiO_2 présentée dans la figure 1.26 (Richardot, 2016).

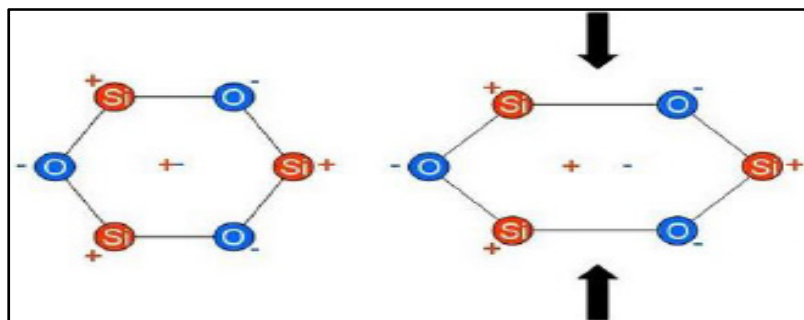


Figure 1.26 Séparation des centres de gravité des charges positives et des charges négatives de la maille du SiO_2
Tirée de Richardot (2016, p20)

1.3.2 Équations fondamentales de la piézoélectricité

Les effets piézoélectriques permettent le couplage entre, d'une part, les propriétés électriques du matériau à savoir le champ électrique $\vec{E}$ (Vm⁻¹) et l'induction électrique $\vec{D}$ (C.m⁻²) et, d'autre part, les propriétés mécaniques du matériau à savoir la déformation relative $\vec{S}$ (m/m) et la contrainte $\vec{T}$ (N.m⁻²). L'association de ces propriétés dans un matériau piézoélectrique est formalisée à l'aide de quatre systèmes d'équations tensorielles possibles selon le couple de paramètres indépendants choisis (Carloioz, 2009).

$$\begin{aligned} (S, D) \begin{cases} T = c^D S - h^t D \\ E = -hS + \beta^S D \end{cases} ; (T, D) \begin{cases} S = s^D T + g^t D \\ E = -gT + \beta^T D \end{cases} \\ (T, E) \begin{cases} S = s^E T + d^t E \\ D = dT + \varepsilon^T E \end{cases} ; (S, E) \begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = eS + \varepsilon^S E \end{cases} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Tiré de Carloioz (2009, p63)

Les exposants (E, D, S, T) sur les coefficients représentent la grandeur considérée comme constante ou nulle tandis que l'exposant (t) signifie la transposée de la matrice. Les coefficients de proportionnalité sont identifiés dans le tableau 1.1.

Au premier chef, il faut souligner que les matériaux piézoélectriques sont anisotropes. Cette propriété est à l'origine d'une écriture tensorielle des propriétés électriques et mécaniques des matériaux ainsi que des coefficients de proportionnalité. Par convention, l'axe 3 d'un trièdre direct est choisi suivant la direction de polarisation du matériau. Les mouvements possibles sont trois translations (1, 2, 3) et trois rotations (4, 5, 6) liées au vecteurs du trièdre direct comme le montre la figure 1.27.

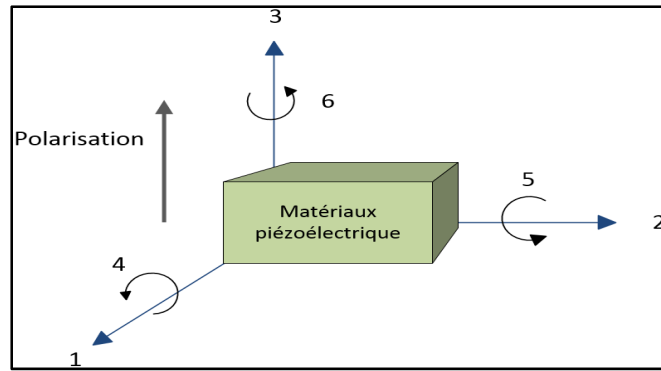


Figure 1.27 Repère lié au matériau piézoélectrique et mouvements possibles

De ce fait, pour différentier les coefficients des différentes matrices, des indices (i, j) sont utilisés à savoir l'indice 'i' correspond à la direction de la mesure électrique et l'indice 'j' correspond à la direction de la mesure mécanique. Cette différence de direction possible entre excitation électrique et excitation mécanique présente différents modes d'opérations possibles. Les matrices de D et E sont de taille (3,1) tandis que celles de T et S sont de taille (6,1). Les autres coefficients utilisés sont donnés dans le tableau 1.1 (Richardot, 2016).

Tableau 1.2 Coefficients des équations fondamentales

Abréviations (Unités)	Définition	Taille de matrice
ϵ (F/m)	Permittivité électrique	(3,3)
β (m/F)	Constante d'imperméabilité diélectrique	(3,3)
c (N/m ²)	Tenseur des constantes élastiques	(6,6)
s (m ² /N)	Tenseur de susceptibilité élastique	(6,6)
d (C/N ou m/V)	Tenseur des constantes de charge piézoélectriques (proportionnalité entre la charge et la contrainte)	(3,6)
e (C/m ² ou N/V.m)	Tenseur des constantes piézoélectriques (Proportionnalité entre la charge et la déformation)	(3,6)
g (V.m/N ou m ² /C)	Tenseur des constantes de tension piézoélectriques (Proportionnalité entre le champ et la contrainte)	(3,6)

Tableau 1.2 Coefficients des équations fondamentales (Suite)

Abréviations (Unités)	Définition	Taille de matrice
g (V.m/N ou m^2/C)	Tenseur des constantes de tension piézoélectriques (Proportionnalité entre le champ et la contrainte)	(3,6)
h (m/V ou N/C)	Tenseur des constantes piézoélectriques (Proportionnalité entre le champ et la déformation)	(3.6)

Les différentes relations de couplage électromécanique peuvent être schématisées par la figure 1.28 (Boris Gusarov, 2015).

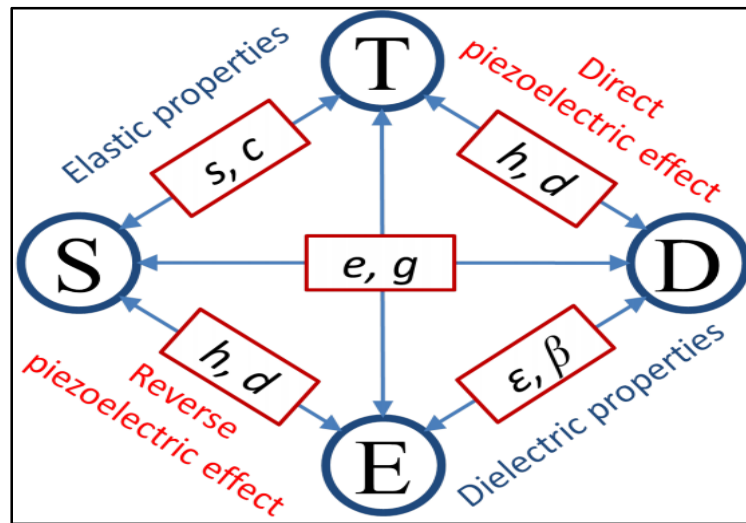


Figure 1.28 Schématisation du couplage électromécanique
Tirée de Boris Gusarov (2015, p11)

En général, pour totalement définir le comportement piézoélectrique, il suffit d'exprimer les paramètres s , d , et ϵ . Les autres paramètres peuvent être déterminés à partir de ses trois derniers. A premier aperçu, un total de 63 coefficients à connaître. Cependant, les symétries du réseau cristallin du matériau piézoélectrique permettent de diminuer ce nombre à 13 données dans la figure 1.29 (Boris Gusarov, 2015) et de se limiter à trois modes principaux de déformations à savoir le mode transversal (3-1 ou 3-2), le mode longitudinal (3-3) et le mode de cisaillement (1-5) (Garbuio, 2006) tel illustrés dans la figure 1.30.

$$s = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{22} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(s_{11} - s_{12}) \end{bmatrix} \quad d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Figure 1.29 Coefficients des matrices pour un matériau piézoélectrique
Tirée Boris Gusarov (2015, p12)

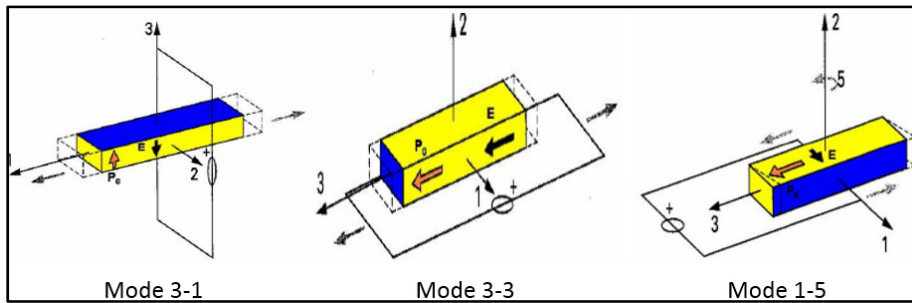


Figure 1.30 Modes de déformation d'un matériau piézoélectrique
Tirée de Garbuio (2006, p207)

1.3.3 Générateurs piézoélectriques

Dans cette section, nous intéressons aux convertisseurs de l'énergie thermique en électricité par transduction piézoélectrique. Ce nouvel axe de recherche est non seulement attrayant pour résoudre les problèmes actuels de récupération de la chaleur, mais aussi, de toute évidence, un important axe de recherche futur pour une transition vers une énergie propre et écologique. Les principaux concepts des générateurs développés en littérature sont présentés.

- **Générateur thermique acoustique à transduction piézoélectrique**

Ce type de générateur transforme la chaleur dissipée en une onde acoustique stationnaire qui fait vibrer un matériau piézoélectrique (Timmer, de Blok, & van der Meer, 2018; Zhao, 2013). Smoker, Nouh, Aldraihem, et Baz (2012) présentent un prototype illustré dans la figure 1.31. En effet, à l'aide d'un échangeur de chaleur, la chaleur crée un gradient de température dans

l'empilement de l'échangeur qui est directement transformé en une onde acoustique. L'oscillation de l'onde acoustique est amplifiée dans une cavité d'Helmholtz. L'onde résultante est récupérée par un diaphragme piézoélectrique et est transformée en électricité.

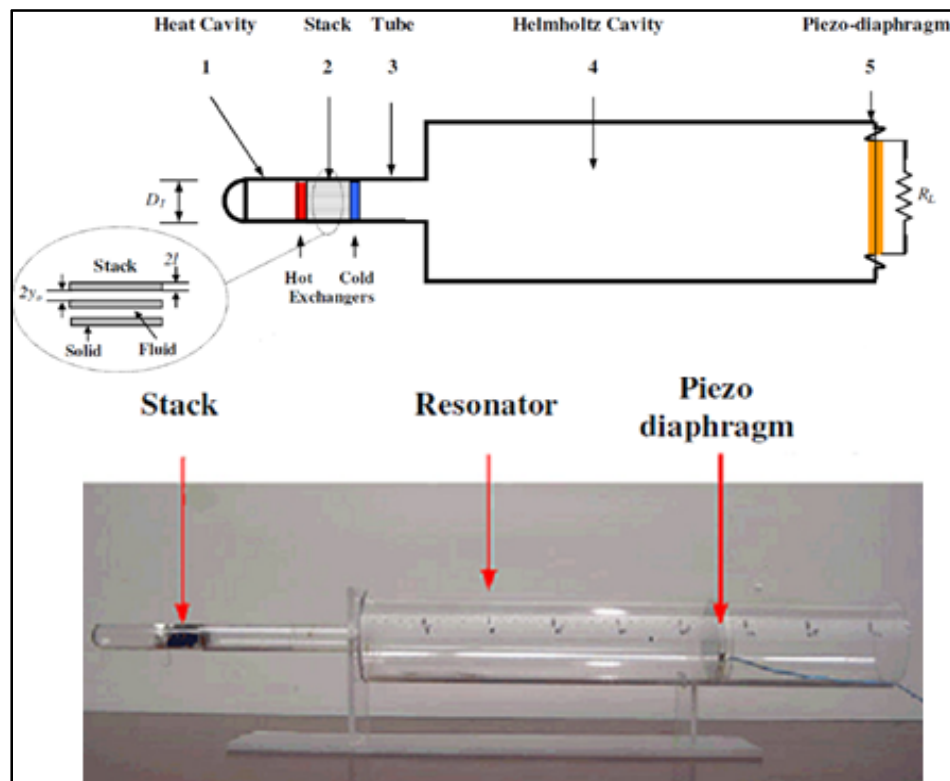


Figure 1.31 Générateur thermoacoustique à transduction piézoélectrique
Tirée de Smoker et al (2012)

Ce prototype génère une densité de puissance maximale égale à 0.21 mW/cm^3 correspondant à une puissance de sortie de 0.128 mW pour une puissance thermique d'entrée égale à 44.82 W

- **Générateur thermique magnétique à transducteur piézoélectrique**

Ce générateur se base sur les matériaux ferromagnétiques pour créer une vibration. Cette vibration sera transformée en électricité avec un transducteur piézoélectrique (Chin-Chung et al., 2015; Rendon hernandez, 2018). Un exemple de générateur est présenté dans la figure 1.32 (Chun et al., 2017).

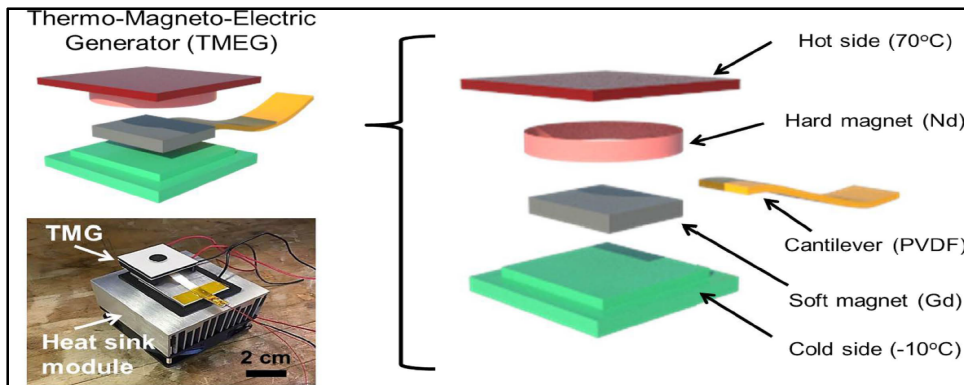


Figure 1.32 Générateur thermomagnétique à transduction piézoélectrique
Tirée de Chun et al (2017, p2)

A l'état initial, un aimant doux est ferromagnétique sous sa température de Curie maintenue par le contact avec un dissipateur de chaleur (partie froide). Il est attiré par l'aimant dur (mouvement ascendant). L'aimant dur est toujours attaché à la partie haute température maintenue au-delà de la T_c . De ce fait, l'aimant doux se chauffe et devient paramagnétique. Il se détache de l'aimant dur (mouvement descendant). Un matériau piézoélectrique est toujours attaché à l'aimant doux pour transformer la vibration résultante en électricité (Chun et al., 2017). Ce prototype génère une puissance de $158\mu\text{W}$ avec une fréquence comprise entre 1Hz et 3Hz sous un gradient de température de 80°C .

- **Générateur thermique mécanique à transducteur piézoélectrique**

La transformation thermomécanique est la transformation la plus étudiée pour une transduction piézoélectrique due à la nature des sollicitations mécaniques souhaitées par les matériaux piézoélectriques. Différentes approches sont explorées en littérature.

Certains chercheurs ont utilisé les propriétés des alliages à mémoire de forme (AMF). En effet, ces matériaux peuvent alterner entre deux phases cristallographiques appelées martensitique et austénitique sous l'effet d'un changement de température. Ce changement de phases est associé à des mouvements de contractions et de détentes. Ces mouvements sont exploités pour solliciter un matériau piézoélectrique. Les principaux concepts de générateurs permettent de vibrer la structure 'Cantilever' piézoélectrique ou poutre vibrante, une structure communément utilisée pour la récupération de l'énergie vibratoire (B. Gusarov et al., 2016; Todorov, Nikolov,

Todorov, & Ralev, 2018). Avirovik, Kumar, Bodnar, et Priya (2013) ont proposé d'attacher un fil AMF à une structure cantilever piézoélectrique comme le montre la figure 1.33.

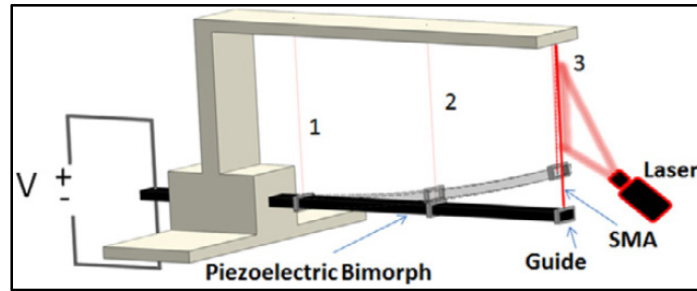


Figure 1.33 Générateur thermomécanique (SMA)
à transduction piézoélectrique
Tirée de Avirovik et al (2013, p2)

La source de chaleur est la lumière d'un laser. En chauffant le fil, l'AMF change de son état martensitique à l'état austénitique. Le fil se contracte et la partie libre de la poutre s'élève en générant une déformation de la couche piézoélectrique et par suite, une génération de charges électriques. Le refroidissement du fil va générer le mouvement inverse. Ce prototype génère une puissance maximale de $0.05 \mu\text{W}$ avec une fréquence entre 0.6Hz et 0.8Hz sous température du fil aux alentours de 110°C .

D'autres études ont utilisé le principe d'un bilame thermique situé entre une source chaude de chaleur en bas et une source froide de chaleur en haut pour transformer l'échauffement du bilame en une flexion exploitable par un matériau piézoélectrique. Le bilame thermique est composé de deux couches de métal superposées ayant deux coefficients d'expansion thermique assez écartés de manière à avoir des dilatations thermiques inégales suite à une variation de la température. Le bilame se met en flexion à fin de permuter entre deux états : état haut ou état de refroidissement et état basse ou état d'échauffement. Pour transformer cette énergie mécanique en électricité, certains chercheurs ajoutent une couche mince de matériau piézoélectrique en dessus du bilame pour déformer le matériau piézoélectrique directement, tandis que d'autres vibrent une structure cantilever piézoélectrique ou claquent sur une plaque de métal support d'un matériau piézoélectrique.(Boughaleb et al., 2018; Trioux, Monfray, & Basrour, 2017). Un exemple de bilames thermiques claquants a été développé par O. Puscasu

et al. (2014) produisant une puissance électrique de $12\mu\text{W}$ comme preuve de concept avec une plaque chauffante à 130°C . Le signal généré ainsi qu'un prototype avec plusieurs disques piézoélectriques sont donnés dans la figure 1.34.

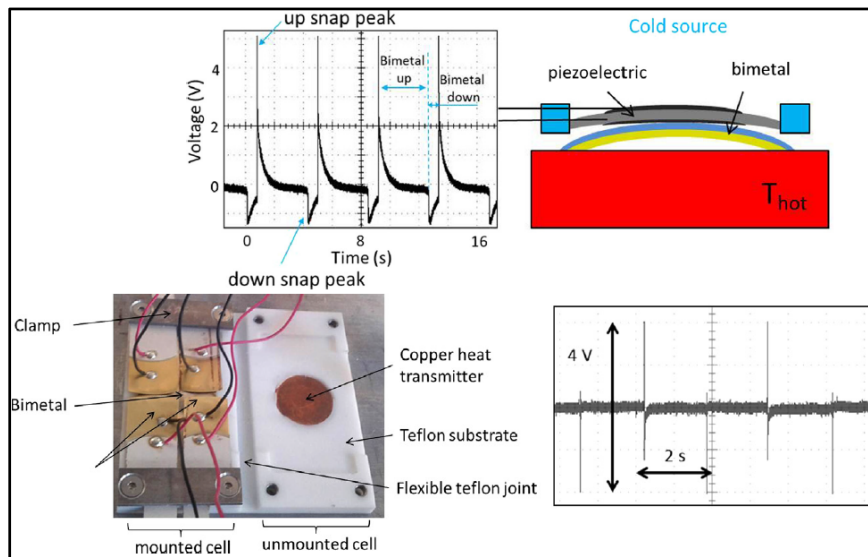


Figure 1.34 Générateur thermomécanique (bilames)
à transduction piézoélectrique
Tirée de O.Puscasu et al (2014, p555-556)

Par ailleurs, certains scientifiques ont transformé la chaleur en une surpression à travers le changement de phase liquide-vapeur d'un fluide initialement en état liquide. Ils permettent de faire des cycles d'évaporation-condensation d'un fluide de travail à fin de solliciter un matériau piézoélectrique directement par une élévation de pression ou à fin de faire vibrer une structure cantilever. Divers prototypes sont développés en utilisant soit des cycles ouverts du fluide de travail, soit des cycles fermés. (Léveillé, Mirshekari, Monfray, Skotnicki, & Fréchette, 2012; Monin et al., 2016). La récente étude de Salamon (2018) met en évidence un générateur fluide fabriqué avec du silicium et de l'eau comme fluide de travail. Dans les conditions optimales et avec un système de refroidissement extérieur, ce générateur produit une puissance maximale de 1nW avec une fréquence de 6.8 Hz pour une température de chauffage entre 122°C - 128°C . Cette étude montre aussi que le prototype n'est fonctionnel que pour une gamme de température restreinte comprise entre 120°C et 135°C accouplée à un taux de remplissage

d'eau dans la chambre d'évaporation entre 10% et 30%. La figure 1.35 présente le prototype décrit (Salamon, 2018).

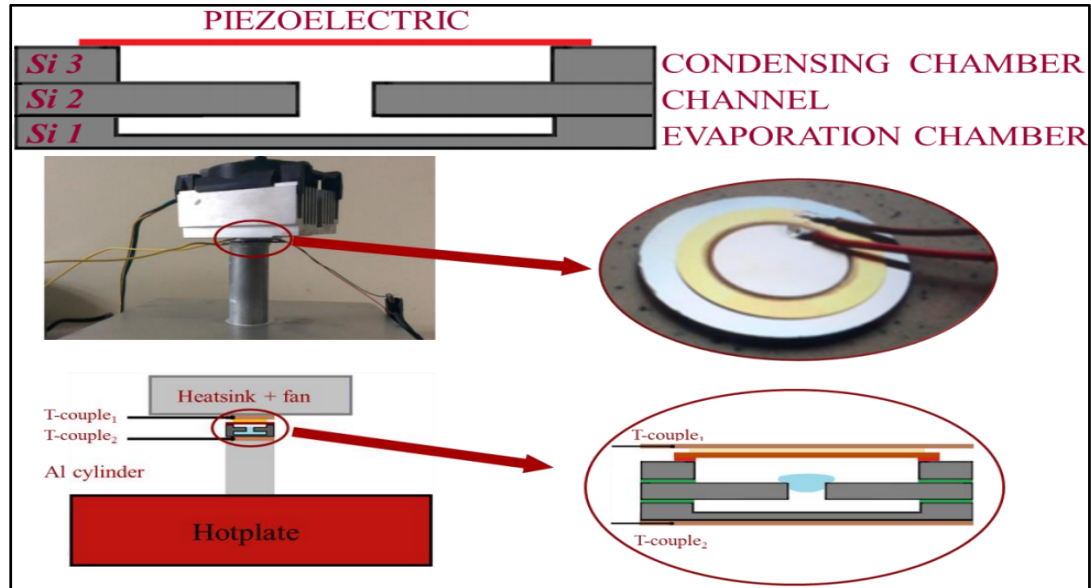


Figure 1.35 Générateur thermomécanique (fluide) à transduction piézoélectrique
Tirée de Salamon (2018, p80, p121)

En somme, les caractéristiques des différents types de générateurs à transduction piézoélectrique sont détaillées dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 État de l'art des générateurs à transduction piézoélectrique

Publication	Matériau piézoélectrique	Transformation	Source de la chaleur	Énergie ou Puissance de sortie	Mode
(Zhao, 2013)	PZT	Thermo-acoustique	Température (177°C-26°C) 151°C	2.1mW	3-3
(Smoker et al., 2012)	PZT-5A	Thermo-acoustique	Puissance 44.82 W	0.128 mW	3-3
(Rendon hernandez, 2018)	PZT-5H	Thermo-magnétique	Température (41°C – 24°C) 17°C	0.88 μWcm^{-3}	3-1

Tableau 1.3 État de l'art des générateurs à transduction piézoélectrique (Suite)

Publication	Matériau piézoélectrique	Transformation	Source de la chaleur	Énergie ou Puissance de sortie	Mode
(Chun et al., 2017)	PVDF	Thermo-magnétique	Température (-10°C – 70°C) 80°C	158μW	3-1
(Chin-Chung et al., 2015)	PZT	Thermo-magnétique	Température (6.7°C-26.7°C) 20°C	3.96pW	3-1
(Todorov et al., 2018)	Micro Fibre Composite (MCF)	Thermo-mécanique (AMF)	Température 62°C	0.5 μW	3-1
(B. Gusarov et al., 2016)	PVDF	Thermo-mécanique (AMF)	Température (-40°C-21°C) 20°C	0.41 mJcm ⁻³	3-1
(Avirovik et al., 2013)	APC 40-2030	Thermo-mécanique (AMF)	Température 110°C	0.05 μW	3-1
(Boughaleb et al., 2018)	PZT	Thermo-mécanique (bilames)	Température (Source chaude 84°C) 6°C	10nW	3-1
(Trioux et al., 2017)	ALN	Thermo-mécanique (bilames)	Température (63°C – 53°C) 10°C	2.45μJ.cm ⁻³	3-1
(O. Puscasu et al., 2014)	PZT	Thermo-mécanique (bilames)	Température 130°C	12 μW	3-1
(Salamon, 2018)	PZT 7BB-15-6	Thermo-mécanique (fluide)	Température 122°C-128°C	1nW	3-1
(Monin et al., 2016)	PZT-buzzer	Thermo-mécanique (fluide)	Température 140°C	1 μW	3-1
(Léveillé et al., 2012)	PZT-buzzer	Thermomécanique (fluide)	Température ~145°C	1.6 μWcm ⁻²	3-1

En comparant la puissance développée pour ces générateurs, nous remarquons que l'ordre de grandeur est de microwatt. Cependant, nous avons une production plus élevée de l'ordre de milliwatt pour le cas des générateurs thermoacoustique opérant en mode 3-3. En effet, les propriétés des matériaux piézoélectriques sont plus élevées pour le mode 3-3 que pour le mode 3-1, ce qui explique la différence de production entre les générateurs. Toutefois, ce mode est moins utilisé en littérature puisqu'il n'existe pas une géométrie standard de sollicitation pour ce mode. En outre, nous constatons que les niveaux de température utilisés sont dans la plupart des cas au-delà de 60°C. Ceci est fortement lié aux natures des matériaux dans la première transformation de l'énergie thermique (Ferromagnétique, AMF, fluide) et à la géométrie du générateur tel est le cas des bilames claquantes. De ce fait, ces transformations sont un peu limitées. À fin d'étendre les connaissances dans ce domaine, il est nécessaire de développer de nouvelles technologies de fabrication, d'améliorer les performances des matériaux et de concevoir de nouvelles géométries.

1.4 Généralité sur les systèmes de refroidissement des circuits intégrés

Le fonctionnement des circuits intégrés est généralement lié à une dissipation de chaleur et une élévation de la température. Ce phénomène engendre des risques d'emballement thermique, de dégradation des performances et de diminution de la durée de vie des composants électroniques (Fourmigue, 2014). De ce fait, les récupérateurs de chaleur doivent être associés à des méthodes de refroidissement. Plusieurs types de systèmes de refroidissement existent. Dans une première approche, les systèmes de refroidissement peuvent être répertoriés suivant la nature du fluide caloporteur en systèmes de refroidissement à air et en systèmes de refroidissement par liquide caloporteur. Ces derniers sont plus complexes vu la nécessité d'utiliser un circuit d'alimentation avec réservoir et une pompe (Fourmigue, 2014). Dans une deuxième approche, nous pouvons discerner deux types de refroidissement suivant que le transfert de chaleur est naturel ou amorcé artificiellement. Nous parlons ainsi de systèmes actifs à convection forcée qui peuvent extraire une grande quantité de chaleur. Ces systèmes nécessitent une consommation d'énergie supplémentaire et un circuit externe d'évacuation. D'autre part, les systèmes de refroidissements passifs à convection naturelle permettant un

transfert de chaleur avec l'air ambiant. Ces derniers sont divisés en systèmes passifs directs si le fluide caloporteur est en contact avec les composants électroniques et en systèmes indirects dans le cas échéant (AREELIS Technologies & Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg, 2015). Communément, les systèmes de refroidissement passifs sont plus utilisés puisqu'ils sont plus simples à mettre en œuvre et ils présentent le moins d'encombrement spatial possible. Nous nous intéressons spécifiquement aux drains thermiques ('Heat sink') qui sont les systèmes les plus utilisés pour des faibles puissances thermiques dissipées inférieures à 10W. Un drain thermique se compose d'un diffuseur de chaleur, d'une interface thermique et d'un dissipateur (AREELIS Technologies & Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg, 2015).

1.5 Conclusion

L'échauffement des composants des circuits intégrés peut endommager ces derniers et, en général, des méthodes de refroidissement sont adoptées pour assurer le bon fonctionnement. Néanmoins, cette chaleur dissipée représente un potentiel thermique que nous pouvons récupérer à fin de diminuer la consommation énergétique et alléger le coût environnemental. Sous cet aspect, plusieurs technologies sont prospectées en littérature et nous reconnaissons les mérites de la piézoélectricité. De multiples récupérateurs piézoélectriques existent. À travers l'étude des concepts de générateurs piézoélectriques développés en littérature, nous déduisons que nous devons explorer le mode 33, un mode intéressant pour la récupération de chaleur. De plus, pour un fonctionnement en faible puissance, nous devons définir une nouvelle géométrie adéquate. Ainsi, pour valoriser les pertes des amplificateurs de puissance, nous concevons un générateur piézoélectrique. Ce générateur devrait d'être sollicité en mode 3-3 avec fonctionnement en faible puissance. Dans le chapitre 2, nous exposons la méthode de construction et de modélisation de notre générateur proposé.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION ET DÉVELOPPEMENT DU MODÈLE ANALYTIQUE

2.1 Introduction

Pour améliorer l'efficacité énergétique des amplificateurs de puissance, nous proposons une solution verte : un récupérateur de chaleur à transduction piézoélectrique sollicité en mode 3-3. Les performances de ce générateur dépendent des propriétés de la source de chaleur à savoir la puissance maximale dissipée et l'encombrement spatial disponible. De ce fait, nous commençons le deuxième chapitre en expliquant le concept du générateur et en définissant notre source d'étude. Puis, nous proposons la composition de la géométrie du générateur et explicitons la démarche développée. En dernier lieu, nous modélisons la structure construite. Ce modèle va servir à dimensionner la structure et déterminer les performances du générateur.

2.2 Concept du générateur

Nous développons un générateur permettant de transformer la chaleur perdue d'un amplificateur de puissance en une puissance récupérée. Ce générateur doit respecter des contraintes thermiques liées au bon fonctionnement du circuit électrique. En effet, le générateur servira aussi à refroidir le circuit électrique pour éliminer les risques de détérioration de ses performances. En outre, le récupérateur répondra à certaines contraintes mécaniques pour assurer la stabilité de la structure et éviter les risques de fracture. La conception du générateur nécessite la définition de la géométrie et ses dimensions. Toutefois, le dimensionnement dépend de la nature des matériaux choisis et se repose sur le modèle analytique du générateur comme l'illustre la figure 2.1. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à quantifier la puissance dissipée, définir la géométrie et développer le modèle analytique.

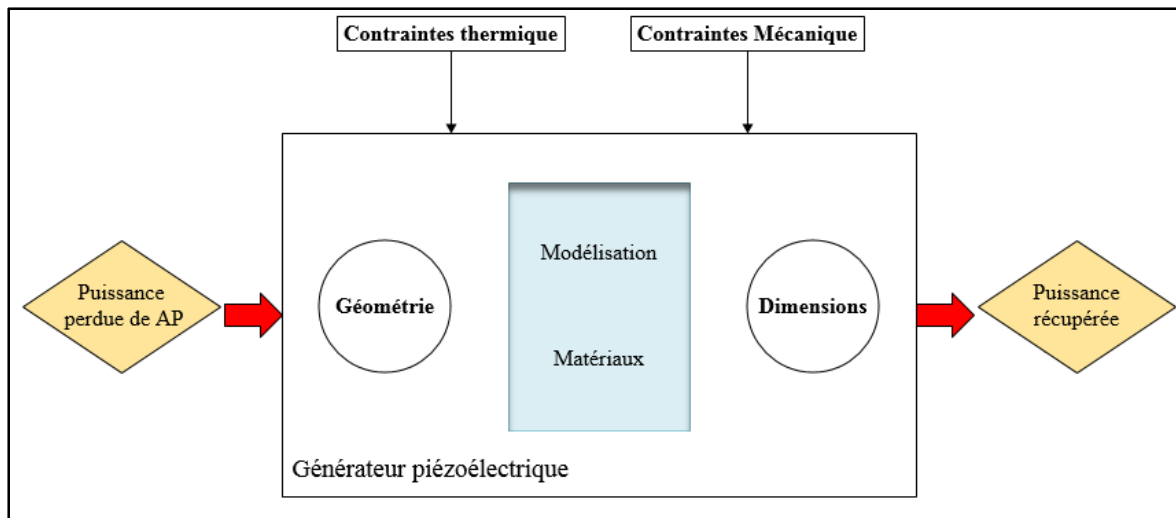


Figure 2.1 Concept du générateur

Pour construire notre générateur, nous nous basons sur les travaux réalisés dans notre laboratoire. En effet, une recherche qui tend à développer un amplificateur de puissance efficace de classe F en utilisant un transistor avec un ordre de 6W de puissance saturée de modèle CREECGHV1J006D. Les résultats expérimentaux présentent une efficacité (« Drain Efficiency ») maximale de 58.79% pour une puissance de sortie de 36.23 dBm (4.2W) (Elarbi, 2018). Avec ces conditions, la puissance dissipée est estimée à 2.944 W. Ainsi, dans notre étude, nous pouvons limiter le niveau maximal de la puissance dissipée à 3W. Par ailleurs, l'amplificateur fabriqué en laboratoire avec le transistor CREE CGHV1J006D est présenté dans la figure 2.2 (Elarbi, 2018).

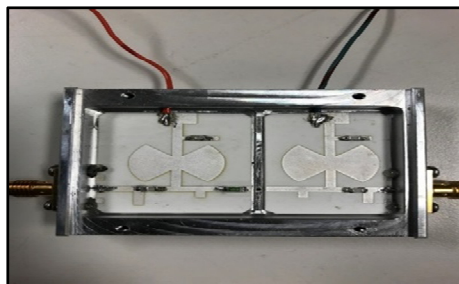


Figure 2.2 Amplificateur fabriqué dans notre laboratoire
Tirée de Elarbi (2018, p78)

Il est d'une longueur de 4.46 cm et de largeur de 3.54 cm. Par la suite, notre convertisseur aura des dimensions comparables avec une longueur de 4.4 cm et une largeur de 3.5 cm permettant l'interception du flux de chaleur.

2.3 Élaboration du modèle géométrique

Dans un premier temps, notre objectif est la récupération de l'énergie perdue sous forme de chaleur par l'amplificateur de puissance. Cependant, le système développé doit permettre aussi un refroidissement du composant électronique. Notre structure doit être insérée dans un système de refroidissement. D'après l'étude réalisée conjointement par AREELIS Technologies et Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg (2015), le refroidissement passif direct par un « drain thermique » est le plus approprié dans notre cas vu la nature de notre problème : faible puissance thermique perdue ($3W < 10W$) et un encombrement minimal souhaité. Nous construisons une structure inspirée de la composition du drain thermique mais qui permet aussi l'installation de notre système de récupération piézoélectrique. La première couche à retenir est la structure métallique communément nommée « diffuseur de chaleur » qui a une très bonne conductivité thermique et une surface importante pour diffuser le flux de chaleur concentré dans le circuit. Généralement, l'épaisseur du diffuseur de chaleur est entre 1mm et 2mm (Fourmigue, 2014). De plus, il existe certains types de matériaux d'interface thermique qui assurent de meilleures performances de couplage thermique entre notre récupérateur et le circuit dissipatif. Dans notre étude, nous choisissons un « adhésif thermique » qui permet de lier les structures mécaniquement et thermiquement. Il permet aussi d'isoler électriquement le récupérateur du circuit actif. La deuxième partie a pour objectif d'intégrer le matériau piézoélectrique dans le dissipateur. Pour ce faire, nous choisissons d'utiliser la structure d'un générateur d'impulsion piézoélectrique. Ce type de générateur transmet une force extérieure à un disque piézoélectrique contraint par une plaque rigide à travers une masse de compression. La configuration basique d'un tel type de générateur est présentée dans la figure 2.3 (Pinkston & Engel, 2005).

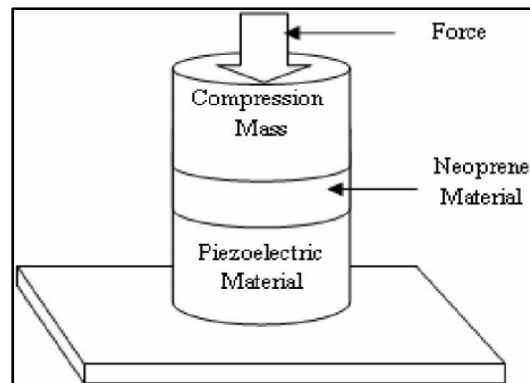


Figure 2.3 Générateur d'impulsion
Tirée de Pinkston & Engel (2005, p768)

Toutefois, la masse de compression dans notre modèle est directement en contact avec le matériau piézoélectrique. De plus, la force exercée sur le matériau piézoélectrique est causée par les efforts thermiques engendrés par une dilatation thermique linéaire de la masse de compression. En effet, avec l'élévation de la température, le disque de compression se dilate. Cette dilatation doit être possible du côté du matériau piézoélectrique et bloqué de l'autre côté. Par la suite, l'ajout d'une autre plaque rigide sera nécessaire pour assurer l'encastrement du couple disque piézoélectrique et masse de compression, comme illustre la figure 2.4.

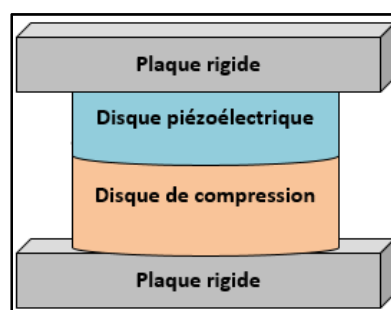


Figure 2.4 Géométrie
du générateur proposé

La structure proposée est la superposition du diffuseur de chaleur avec le récupérateur. Pour transformer toute l'énergie dissipée, les plaques rigides ont les mêmes dimensions du diffuseur

et les disques ont un diamètre maximal égal à la largeur des plaques. La géométrie totale en incluant l'interface thermique est donnée par la figure 2.5.

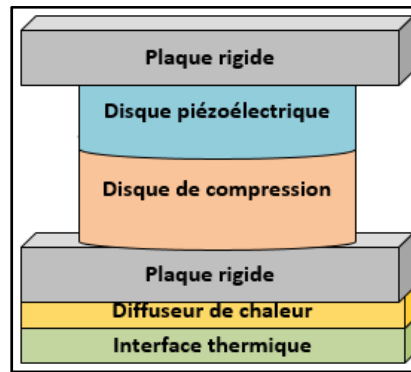


Figure 2.5 Composition finale du générateur proposé

2.4 Développement du modèle analytique

Dans cette section, nous développons un modèle analytique permettant la détermination des performances du générateur à savoir son pouvoir à transformer la chaleur dissipée par le circuit en électricité tout en maintenant un niveau de température adéquat. Ce modèle est aussi crucial pour faire le dimensionnement dans une étape ultérieure. Pour ce faire, l'analyse se décompose en trois parties essentielles : l'étude de l'aspect thermique du générateur, le couplage thermomécanique et par suite la génération de puissance par le matériau piézoélectrique.

2.4.1 Modélisation thermique

La gestion thermique des circuits électriques est bien développée en littérature. Elle tend à déterminer les paramètres nécessaires pour une évacuation efficace de chaleur. Pour ce faire, plusieurs modèles thermiques permettant la résolution de l'équation 2.1 du bilan thermique sur un système de volume V et de surface S (Fourmigue, 2014) :

$$\int_V C_v \frac{\partial T}{\partial t} dv = \int_S \vec{q} \cdot \vec{ds} + \int_V P_v dv , \quad (2.1)$$

Tiré de Fourmigue (2014, p25)

Où C_v est appelé la capacité volumique thermique

T est appelé la température au sein du volume

$\vec{q}$ est appelé le flux de chaleur surfacique reçu par le volume

P_v est appelé la puissance volumique dissipée dans le volume

Les modèles thermiques diffèrent par l'approche adoptée pour la résolution de l'équation 2.1 du bilan thermique appliqué à un mode de transfert thermique. Dans ce qui suit, nous présentons un survol sur les modèles thermiques et nous précisons le modèle choisi dans ce mémoire. Par ailleurs, l'analyse du comportement thermique peut se classer en trois classes de modélisation : analytique, compact et numérique. Ces classes utilisent des outils de calculs mathématiques différents. Conséquemment, ils se distinguent par leurs complexité, temps de traitement et robustesse comme expliqués dans le schéma de la figure 2.6 (Fourmigue, 2014) ; (Aouina, 2017). Pour notre étude, nous choisissons une modélisation thermique compacte. En effet, ce choix est justifié par le fait que non seulement nous nous intéressons à certains niveaux de température, mais aussi qu'une étude rapide permettant le dimensionnement de la structure est souhaitée. Toutefois, une analyse numérique robuste sera utilisée ultérieurement dans le chapitre 3.

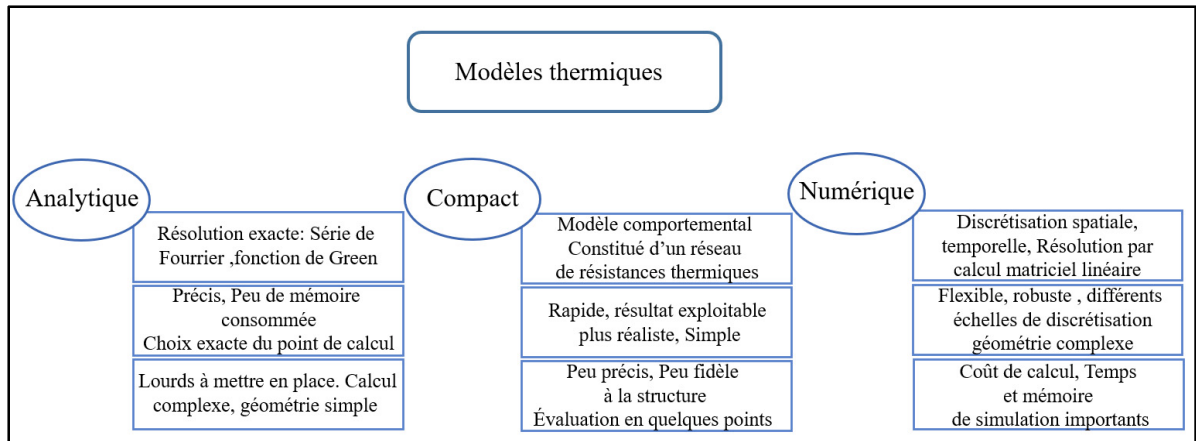


Figure 2.6 Classes de modélisation thermique

Le principe de la modélisation thermique compacte est l'abstraction de la structure physique de façon à reproduire facilement le comportement thermique par l'utilisation d'éléments de modélisation issus de l'analogie entre les modèles électriques et les modèles thermiques (Zhang, 2012). Cette analogie est représentée dans la figure 2.7.

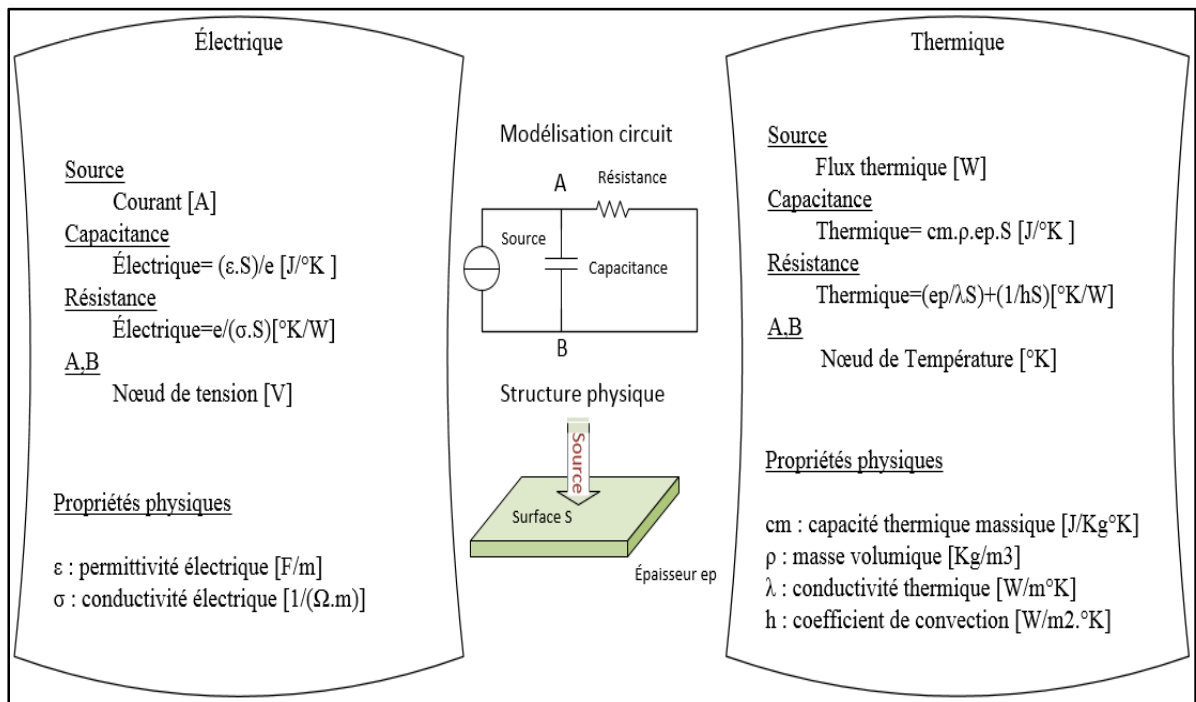


Figure 2.7 Analogie thermique-électrique

Vu que le générateur est quasi-statique et ses dimensions sont faibles, le régime de transfert de chaleur est stable ou encore c'est un régime permanent. De ce fait, les capacitances thermiques représentant le régime transitoire sont omises. Le modèle thermique est alors un simple réseau de résistance thermique. Certes, le flux de chaleur dissipée traversera notre générateur par conduction. En outre, le contact avec l'air est à l'origine d'un flux thermique dissipé par convection naturelle. Ce qui explique l'existence de résistance thermique de conduction ' $\frac{ep}{\lambda S}$ ', et de résistance thermique de convection ' $\frac{1}{hS}$ ', dans l'expression de la résistance thermique totale. En utilisant l'analogie thermique-électrique, chaque composant de notre générateur est modélisé par une résistance thermique équivalente. La décomposition du chemin thermique ainsi que le modèle thermique total du générateur sont illustrés dans la figure 2.8. Dans notre modèle thermique, l'indice 'c' indique que cette résistance thermique est de nature convective. Si cet indice est seul alors la surface convective désignée est la surface orthogonale à la direction de propagation de la chaleur. Si l'indice est accompagné de l'indice 'L', alors la surface convective est la surface orthogonale aux directions possibles différentes de la direction de propagation suivant le système de coordonnées local lié au matériau. En absence d'indice, la résistance est une résistance de conduction. Le tableau 2.1 définit toutes les résistances du modèle thermique.

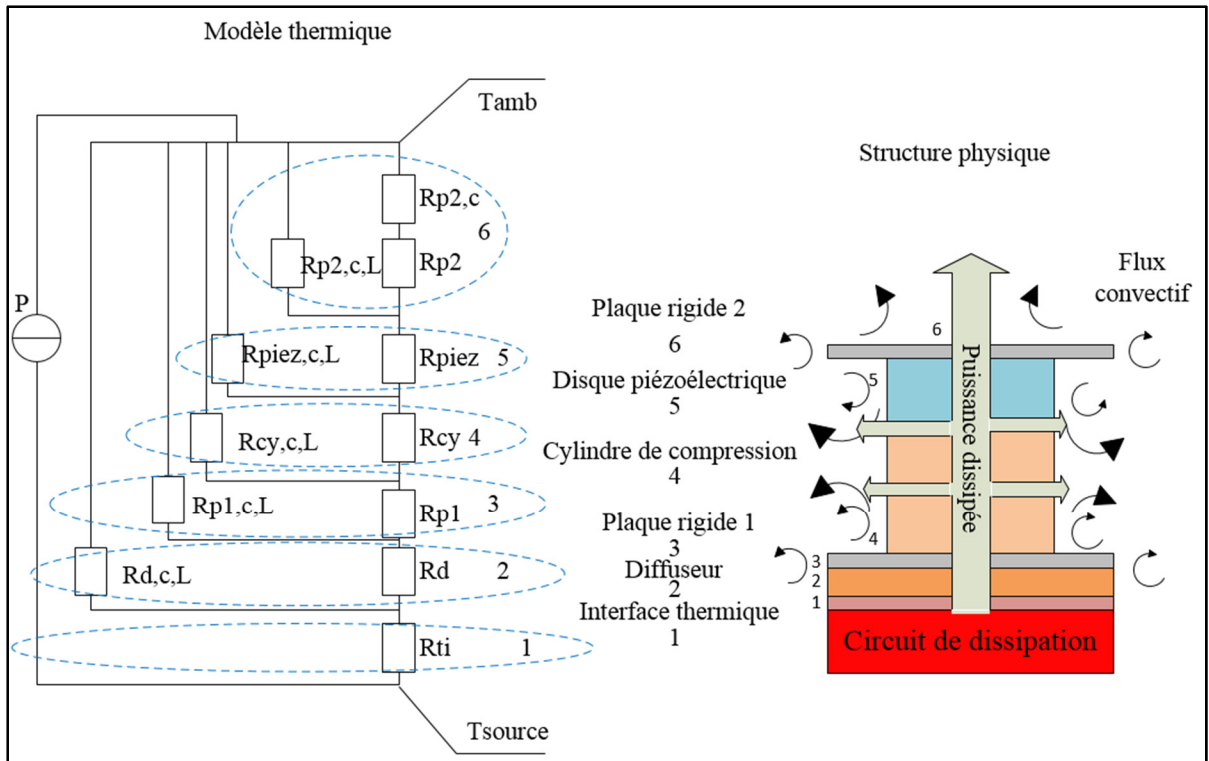


Figure 2.8 Modèle thermique du générateur proposé

Tableau 2.1 Résistances thermiques du modèle proposé

Résistance thermique	Signification
R_{ti}	Résistance de conduction de l'interface thermique
R_d	Résistance de conduction du diffuseur
$R_{d,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale du diffuseur
R_{p1}	Résistance de conduction de la plaque rigide 1
$R_{p1,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale de la plaque rigide 1
R_{cy}	Résistance de conduction du cylindre de compression
$R_{cy,c,L}$	Résistance de convection de la surface latérale du cylindre de compression

Tableau 2.1 Résistances thermiques du modèle proposé (Suite)

Résistance thermique	Signification
Rpiez	Résistance de conduction du matériau piézoélectrique
Rpiez,c,L	Résistance de convection de la surface latérale du matériau piézoélectrique
Rp2	Résistance de conduction de la plaque rigide 2
Rp2,c	Résistance de convection de la surface de base de la plaque rigide 2
Rp2,c,L	Résistance de convection de la surface latérale de la plaque rigide 2

2.4.2 Modèle du couplage thermomécanique

Une étude mécanique consiste à déterminer la valeur de la force de compression subite par le matériau piézoélectrique à partir d'un gradient de température généré par la chaleur dissipée. Pour ce faire, nous adoptons l'approche de Kingery développée pour un matériau homogène isotrope et de comportement mécanique linéaire élastique parfaitement fragile. Pour le cas où la pièce initialement à T_0 est brutalement placée dans un milieu de température T_1 , la surface est soumise à une contrainte mécanique σ (N/m²) donnée par la loi de Hooke (Jeong, 2003) :

$$\sigma = E \varepsilon_{th} f(v) ; \varepsilon_{th} = \alpha(T_1 - T_0) , \quad (2.2)$$

Adapté de Jeong (2003, p34)

Où E est appelé le module de Young du matériau

α est appelé le coefficient de dilatation thermique

ν est appelé le coefficient de poisson

ε_{th} est appelé l'allongement relatif thermique

La fonction $f(v)$ est égale à 1 si la contrainte est uniaxiale, elle est égale à $\frac{1}{1-\nu}$ si la contrainte est biaxiale, et elle est égale à $\frac{1}{1-2\nu}$ si la contrainte est tri-axiale.

Dans notre étude, nous supposons que les plaques de fixations utilisées présentent des liaisons d'encastrement et les disques du matériau piézoélectrique et du matériau de compression sont

libres de se dilater dans la direction transversale. Ainsi, à la surface de contact, nous avons seulement des contraintes normales suivant l'axe Z. La force $F1$ (N) exercée par le disque de compression sur le PZT et la force $F2$ (N) exercée par le PZT sur le disque de compression sont représentées dans la figure 2.9.

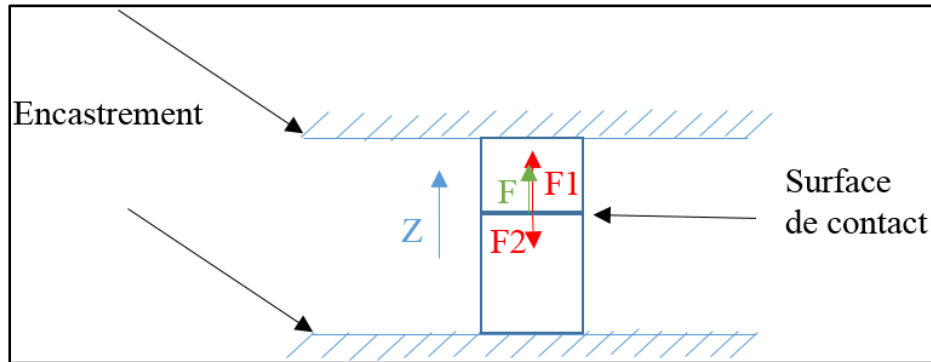


Figure 2.9 Schéma explicatif des forces mécanique

Par suite, la force F (N) de compression résultante exercée sur le PZT est :

$$F = F1 - F2 \quad (2.3)$$

Nous sommes dans le cas d'une contrainte uniaxiale, ainsi l'expression de la contrainte thermique est donnée d'après l'équation 2.2 par :

$$\sigma = E\alpha(T_1 - T_0) \quad (2.4)$$

De plus, la contrainte mécanique de compression exercée par une force F sur une surface S est exprimée par:

$$\sigma = \frac{F}{S} ; F = \sigma * S \quad (2.5)$$

Par suite, nous utilisons les équations 2.4 et 2.5 pour exprimer $F1$, $F2$ et F :

$$F1 = E_1\alpha_1(T_{11} - T_0) * S , \quad (2.6)$$

$$F2 = E_2\alpha_2(T_{12} - T_0) * S , \quad (2.7)$$

$$F = (E_2 \alpha_2 (T_{12} - T_0) - E_1 \alpha_1 (T_{11} - T_0)) * S, \quad (2.8)$$

Où E_1 est appelé le module de Young du matériau du cylindre de compression

E_2 est appelé le module de Young du matériau piézoélectrique

α_1 est appelé le coefficient de dilatation thermique du cylindre de compression

α_2 est appelé le coefficient de dilatation thermique du matériau piézoélectrique

T_{11} est appelé la température du cylindre de compression après chauffage

T_{12} est appelé la température du matériau piézoélectrique après chauffage

2.4.3 Modèle équivalent du matériau piézoélectrique

Pour quantifier la réponse du générateur de puissance piézoélectrique sous l'effet de la contrainte de compression extérieure, ce générateur est modélisé par un circuit électrique équivalent (Keawboonchuay & Engel, 2003). En effet, le matériau piézoélectrique se comporte comme un condensateur. Ce condensateur se charge lors des contraintes mécaniques exercées sur le matériau piézoélectrique et la charge considérée est modélisée par un potentiel variable. Les pertes ohmiques et diélectriques sont modélisées par des résistances en série. Le circuit électrique équivalent est donné par la figure 2.10.

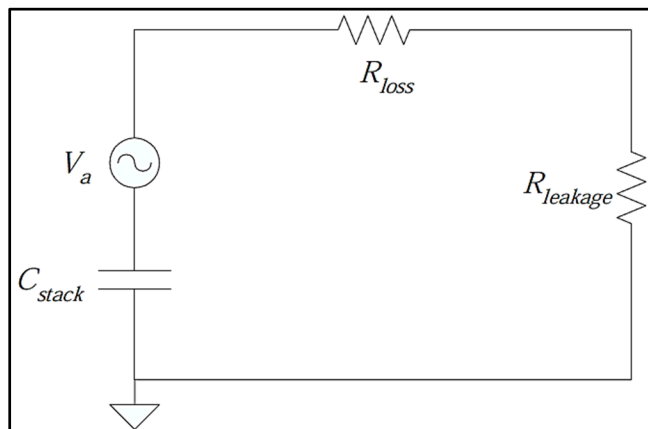


Figure 2.10 Schéma électrique équivalent
d'un matériau piézoélectrique
Tirée de Keawboonchuay & Engel (2003, p1378)

Ce circuit est un circuit RC en série avec une source de tension alternative V_a . En effet, la capacité C_s (F) du condensateur (C_{stack} dans la figure 2.10) est calculée à partir des propriétés diélectriques et géométriques du matériau piézoélectrique donnée par (Keawboonchuay & Engel, 2003) :

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{h_{piezo}} , \quad (2.9)$$

Adapté de Keawboonchuay & Engel (2003, p1378)

Où ϵ_0 est appelé la permittivité électrique du vide
 ϵ_r est appelé la permittivité relative du matériau
 S est appelé la surface du disque du matériau piézoélectrique
 h_{piezo} est appelé l'épaisseur du matériau piézoélectrique

Cette capacité se charge sous l'effet des contraintes compressives et l'énergie générée est modélisée par une source de tension en série V_a . Sa valeur maximale représente la tension à vide générée sous une contrainte donnée par (Staines, Hofmann, Dommer, Altgilbers, & Tkach, 2003) :

$$V_a = - \frac{d_{33} F}{C_s} , \quad (2.10)$$

Adapté de Staines et al (2003, p)

Où d_{33} est appelé la constante de charge piézoélectrique du mode 3-3

Les pertes diélectriques sont représentées par une résistance en série $R_{loss}(\Omega)$ donnée par (Keawboonchuay & Engel, 2003) :

$$R_{loss} = \frac{\tan \delta}{\omega C_s} , \quad (2.11)$$

Tiré de Keawboonchuay & Engel (2003, p1378)

Où ω est appelé la pulsation d'opération du générateur
 $\tan \delta$ est appelée le facteur de dissipation diélectrique

De plus, les pertes par conduction non négligeable en basse fréquence sont représentées par la résistance de fuite $R_{leakage}$ (Ω) donnée par (Morel, Pillonnet, Wanderoild, & Badel, 2018) :

$$R_{leakage} = \frac{\rho_p h_{piez}}{S}, \quad (2.12)$$

Adapté de Morel et al (2018, p245)

Où ρ_p est appelé la résistivité du matériau piézoélectrique

h_{piez} est appelé l'épaisseur du matériau piézoélectrique

S est appelé la surface des électrodes du matériau piézoélectrique

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons créé un récupérateur piézoélectrique. Le modèle analytique développé permet de représenter les aspects thermique, mécanique et piézoélectrique séparément. Nous avons adopté des approximations du comportement réel à savoir l'utilisation du modèle thermique compact, des conditions de fixation directement sur les disques actifs et la schématisation électrique du matériau piézoélectrique. Toutefois, le modèle analytique est indispensable pour la détermination des dimensions du générateur et de son fonctionnement. De ce fait, dans le chapitre suivant, nous nous fondons d'une part sur ce modèle analytique et, d'autre part, sur la nature des matériaux et les contraintes de refroidissement pour calculer les différentes hauteurs des composants de la géométrie.

CHAPITRE 3

DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION ANALYTIQUE

3.1 Introduction

Pour concevoir le générateur piézoélectrique, nous avons déterminé le modèle géométrique ainsi que le modèle analytique requis. Par conséquent, nous procédons à la détermination des étapes restantes pour intégralement définir notre système. Pour ce faire, nous nous débutons par choisir les matériaux adéquats. Ensuite, nous proposons une méthode de dimensionnement qui respecte les contraintes thermiques de refroidissement et les contraintes mécaniques. Une fois que nous avons calculé les dimensions de la structure, nous réalisons une simulation sur MATLAB en vue d'identifier la réponse du générateur et la puissance récupérée.

3.2 Étude des matériaux

Nous présentons dans cette partie les différentes catégories de matériaux possibles pour chaque composant de notre générateur et la justification du choix des matériaux adéquats pour notre application.

3.2.1 Choix du matériau piézoélectrique pour la récupération d'énergie

- **Les catégories des matériaux piézoélectriques**

Avec le développement continu des procédés de fabrication, une variété de matériaux piézoélectriques émerge. Ces matériaux sont utilisés dans différentes applications et possèdent diverses caractéristiques. Ces matériaux peuvent être classifiés sous quatre grands groupes comme le montre la figure 3.1.

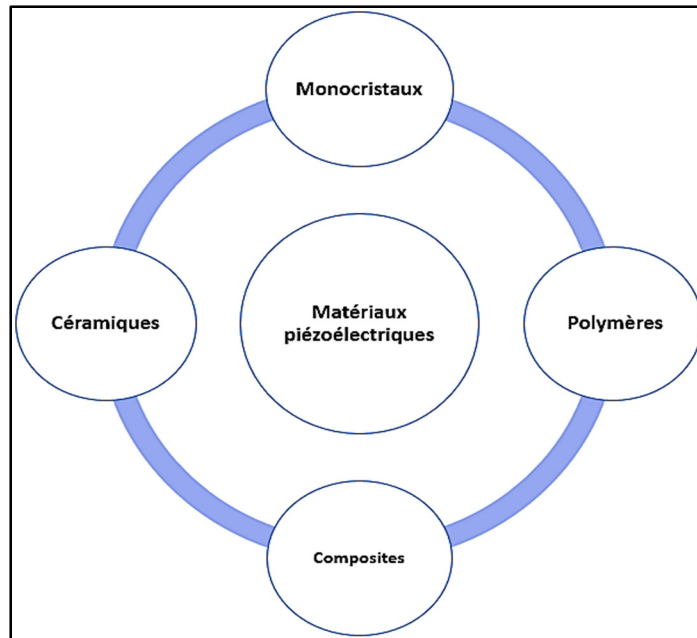


Figure 3.1 Catégories des matériaux piézoélectriques

Les Monocristaux : Ce sont des matériaux composés d'arrangements cristallins d'un seul type de cristal de taille unique. Les monocristaux piézoélectriques sont encore subdivisés en oxydes non ferroélectriques (Richardot, 2016) tels que le quartz SiO_2 qui possèdent en général de faibles coefficients piézoélectriques mais une bonne linéarité mécanique et en oxydes ferroélectriques. Ces derniers peuvent avoir une structure en domaine : mono-domaine et poly-domaine (Domenjoud, 2012). De plus, ces matériaux ont les plus grands coefficients piézoélectriques et les meilleurs couplages électromécaniques. Les monocristaux les plus connus sont le PMN-PT et le Plomb niobate de zinc- titanate de plomb (PZN-PT).

Les Polymères piézoélectriques : Ce sont des polymères essentiellement organiques qui présentent un effet piézoélectrique. Grâce à leur nature polymérique, ces matériaux sont flexibles, permettant une déformation facile mais ayant de faibles coefficients piézoélectriques. On distingue les polymères polaires semi-cristallins ou amorphes, les polymères cellulaires (polymères avec des vides remplis de gaz, exemple Polypropylène cellulaire) et les polymères composites (Ramadan, Sameoto, & Evoy, 2014). Le matériau fréquemment utilisé est le β -PVDF et ses copolymères.

Les céramiques piézoélectriques : Ce sont des matériaux formés de plusieurs cristaux mélangés ayant des orientations au hasard. Ces cristaux sont associés par des joints de grains. Les céramiques piézoélectriques nécessitent une polarisation pour orienter les différents dipôles électriques. Les céramiques les plus connues sont le Titanate de baryum de formule chimique BaTiO_3 , qui est le premier oxyde ferroélectrique et le Titano-Zirconate de Plomb (PZT) de formule chimique $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ de structure pérovskite (Liu, Zhong, Lee, Lee, & Lin, 2018). Le BaTiO_3 présente des limitations importantes à savoir une faible température de curie (120°C) et un faible coefficient de couplage de l'ordre de 0.35. De ce fait, les PZT sont les piézo-céramiques les plus intéressantes et les mieux développés dans la littérature. Ces structures peuvent être dopées pour altérer certaines propriétés électriques et mécaniques du matériau. Plusieurs formes du PZT existent à savoir les PZT-durs dopés avec des accepteurs (valence plus faible que celle du site remplacé, Fe^{3+}) et les PZT-mous dopés avec des donneurs (valence plus forte que celle du site remplacé, Nb^{5+}) (Kobor, 2005). En outre, le nitrure d'aluminium de formule AlN , un semi-conducteur et céramique, présente des propriétés piézoélectriques intéressantes en couches minces.

Les composites piézoélectriques: Ces matériaux sont formés par une association de différents types de matériaux piézoélectriques pour avoir un nouveau matériau de propriétés électriques et mécaniques intermédiaires : les composites modèrent les inconvénients du premier matériau avec les avantages de l'autre matériau. Couramment, les composites piézoélectriques sont de deux natures :

- Les composites à matrices organiques constitués par une matrice flexible de polymère piézoélectrique renforcée par des particules ou des fibres ou des barres de céramiques piézoélectriques particulièrement celle du PZT selon des arrangements spatiaux spécifiques. Ces composites sont caractérisés par de meilleures propriétés piézoélectriques que celles des polymères et une flexibilité importante par rapport aux céramiques PZT. Parmi les exemples de ces composites, nous citons les polyamides-PZT et le PVDF-ZnO (Li, Tian, & Deng, 2014).
- Les composites à matrices céramiques ou céramiques piézoélectriques texturées constitués d'un film de monocristal implanté sur un substrat céramique par épitaxie. Ils permettent d'augmenter les propriétés piézoélectriques de la céramique par les celles des monocristaux

tout en maintenant l'homogénéité requise des céramiques citant comme exemple le PMN-PT céramiques (Maurya, Yan, & Priya, 2015).

- **Critères de choix des matériaux piézoélectriques**

Devant la variété des matériaux piézoélectriques, nous devons sélectionner le matériau adéquat pour notre recherche. De ce fait, une étude sur les différents critères de choix utilisés en littérature nous amène à les définir en points présentés dans ce qui suit.

- Nature de l'application

L'application du matériau exige des contraintes sur sa nature. Au préalable, nous nous intéressons au volume du matériau. En effet, plus la fréquence d'opération est faible plus le matériau piézoélectrique est grand (Li et al., 2014). De ce fait, en basses fréquences le matériau est massif. Les monocristaux et les céramiques PZT sont plus commodes pour ces applications. Néanmoins, en haute fréquence et pour des applications en couches minces et en microéchelle, l'AlN et le ZnO sont favorisés (Defosseux, 2011);(Yang, Zhou, Zu, & Inman, 2018). Également, il faut tenir compte de la nature de la source d'énergie mécanique. Les monocristaux et les PZT étant plus rigides sont utilisés pour une excitation en contrainte mécanique tandis qu'une excitation en déformation nécessite plus de flexibilité permise par les polymères (Rödig, Schönecker, & Gerlach, 2010).

- Propriétés mécaniques

Les matériaux piézoélectriques se diffèrent par leurs propriétés mécaniques. En systèmes de récupération d'énergie, les propriétés d'intérêt sont : la fragilité, la rigidité et la fatigue. Communément, les monocristaux et les céramiques sont plus fragiles que les polymères (Ducarne, 2009) (Li et al., 2014). Par contre, ils sont plus rigides contrairement aux polymères flexibles et légers (Liu et al., 2018). Cette rigidité facilite l'adaptation d'impédance mécanique. Concernant la fatigue, les polymères et les céramiques possèdent une bonne résistance à la fatigue tandis que cette capacité est limitée pour les monocristaux (Shin et al., 2018; Yang et al., 2018).

- Propriétés électriques

Majoritairement, les monocristaux ferroélectriques présentent les meilleurs coefficients piézoélectriques d et un bon couplage électromécanique k , suivi des céramiques (les PZT dans

la zone morphotropique) et en dernier lieu les polymères (Li et al., 2014; Liu et al., 2018). La figure 3.2 (Troler-McKinstry, Zhang, Bell, & Tan, 2018) illustre ce constat en considérant seulement le mode 3-3 de constante de charge piézoélectrique d_{33} et de couplage k_{33} .

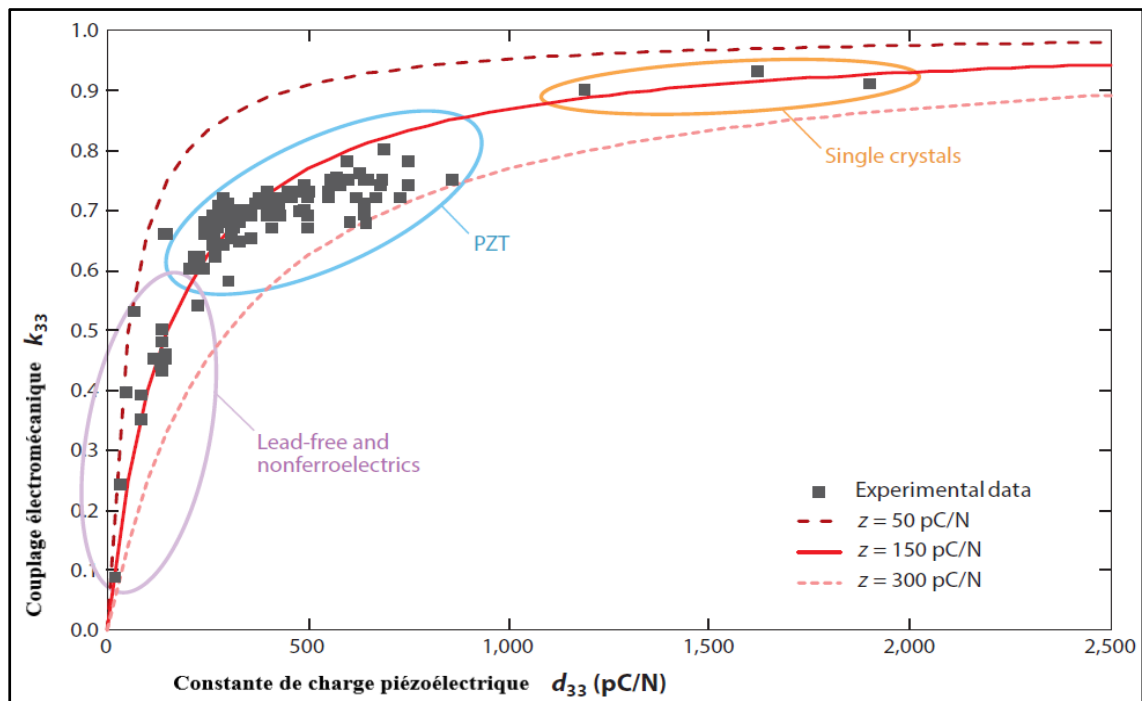


Figure 3.2 Comparaison de propriétés piézoélectriques pour différentes catégories de matériaux

Adaptée de Troler-McKinstry et al (2018)

Nous devons spécifier que ces propriétés sont moins importantes pour les PZT durs que celles des PZT mous. Par contre, les PZT mous sont moins linéaires et plus susceptibles de dépolariser (Davoudi, 2012). En outre, lorsque le matériau piézoélectrique est soumis à un champ électrique opposé à sa direction de polarisation, les monocristaux sont plus susceptibles de perdre leurs propriétés piézoélectriques que les céramiques PZT (Li et al., 2014). Quant à la permittivité diélectrique et aux pertes diélectriques, ils sont faibles dans les polymères. Par contre, les céramiques et les monocristaux se caractérisent par une haute permittivité électrique et de faibles pertes diélectriques à l'exception des PZT mous qui possèdent des pertes diélectriques assez importantes vues leur nature du dopage (Li et al., 2014) (Defosseux, 2011).

-Facteur de mérite (FM)

Un matériau piézoélectrique permet de convertir une sollicitation mécanique en une énergie électrique. Ses différentes propriétés mécaniques, électriques et piézoélectriques réagissent ensemble pour assurer une meilleure efficacité de conversion de l'énergie. Pour caractériser les performances des matériaux piézoélectriques, plusieurs facteurs de mérite quantifiant l'efficacité de conversion sont utilisés en littérature. L'article de revue réalisé par R. Xu et Kim (2012) résume les facteurs de mérite des matériaux piézoélectriques utilisés dans des applications de récupération d'énergie. En notant Q_m le facteur de qualité mécanique, u_i l'énergie de déformation d'une couche mince, u_{piez} l'énergie de déformation de la couche piézoélectrique et ε_y la déformation limite, les différents facteurs de mérites sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Facteurs de mérites pour la récupération d'énergie

FM	Expression	Remarque
1	$k^2 = d * g * E = \frac{d^2 * E}{\varepsilon} = \frac{e^2}{\varepsilon * E}$	Représente l'efficacité de transduction pour une même énergie mécanique d'entrée
2	$d * g = \frac{d^2}{\varepsilon} = \frac{e^2}{E^2 * \varepsilon}$	Représente l'efficacité de transduction pour matériaux sollicités à un même niveau de contrainte
3	$\frac{e^2}{\varepsilon}$	Défini pour le cas des couches minces en cantilever
4	$\left(\frac{K_{31}^2 * Q_m}{S_{11}^E}\right)_{\text{on-resonance}} * \left(\frac{d_{31} * g_{31}}{\tan \delta}\right)_{\text{off-resonance}}$	Défini pour le cas d'une sollicitation en mode 3-1
5	$\frac{k^2 * u_{piez}}{\sum u_i}$	Défini pour le cas des couches minces en cantilever composite
6	$\frac{d^2 * E^2 * \varepsilon_y^2}{2 * \varepsilon} = \frac{e^2 * \varepsilon_y^2}{2 * \varepsilon}$	Prend en considération l'efficacité de transduction et la capacité maximale du matériau à absorber l'énergie mécanique.

La recherche fournit une comparaison entre six matériaux communément utilisés en récupération d'énergie selon les différents facteurs de mérite décrits dans le tableau 3.2. Elle recommande aussi le sixième facteur de mérite pour toute étude de matériau postérieure.

Tableau 3.2 Comparaison de matériaux piézoélectriques
Adapté de R.Xu & Kim (2012, p467)

	FM1	FM2	FM3	FM5	FM6
PVDF	0.0205	0.0936	0.0012	0.0013	0.0495
ALN	0.0527	0.0011	0.6480	0.4226	0.0669
BaTiO ₃	0.0989	0.0135	0.1937	0.1927	/
PZT	0.5424	0.0786	1.0000	1.0000	0.1835
PZN-PT	0.8044	0.7932	0.2180	0.2353	1.0000
PMN-PT	0.9157	1.0000	0.2240	0.2421	0.0148

Nous constatons que les matériaux comparés sont de natures différentes : monocristaux (PMN-PT, PZN-PT), céramiques (PZT, BaTiO₃, AlN), et le polymère (PVDF). Nous constatons qu'en général les PZT et les monocristaux sont plus performants que les polymères. En particulier, la recherche recommande le FM6 puisqu'il reflète simultanément le taux et la capacité de conversion. Pour ce facteur, le PZN-PT est le meilleur choix suivi par les PZT.

-Propriétés thermiques

Les propriétés piézoélectriques sont affectées par un changement de température et elles sont perdues au-delà de la température de Curie. De ce fait, le niveau de température de l'application doit être inférieur à cette température critique. Les céramiques PZT possèdent de hautes températures de Curie de l'ordre de 400°C et une meilleure stabilité à la température par rapport aux différents matériaux piézoélectriques usuels (Li et al., 2014). Précisément, les PZT durs sont meilleurs que les PZT mous (Rödig et al., 2010) (Davoudi, 2012). Par ailleurs, les monocristaux ferroélectriques et les polymères sont plus sensibles à l'augmentation de la température et ont de faibles températures de Curie de l'ordre de 150°C et 100°C respectivement (Liu et al., 2018; Yang et al., 2018). Nous devons mentionner que certaines recherches tendent à développer des matériaux à haute température de Curie tels que le BiFeO₃-

PbTiO_3 avec une température de Curie de l'ordre de 635°C (Troler-McKinstry et al., 2018), mais ces matériaux restent à faibles propriétés piézoélectriques.

-Fabrication

La fabrication, le traitement post-fabrication ainsi que les procédés de dépôt des matériaux piézoélectriques sont des facteurs primordiaux pour certaines applications. En général, la fabrication d'un monocristal est plus complexe que ce soit pour son dépôt en couche mince ou en matériau large et homogène. Sa fabrication est très couteuse ce qui limite son utilisation (Li et al., 2014; Maurya et al., 2015). Toutefois, la fabrication de la céramique PZT est plus maîtrisée et économique (Yang et al., 2018) (Defosseux, 2011). La fabrication d'un polymère est assez spécifique surtout pour les polymères piézoélectriques cellulaires (Qaiss, 2010).

-Environnement

L'effet néfaste du plomb sur la santé et l'environnement pousse la recherche vers des matériaux écologiques connus sous l'appellation 'Sans plomb'. Les matériaux sans plomb les plus inspectés sont les céramiques de composition basée sur le $(\text{K}_{1-x}\text{Na}_x)\text{NbO}_3$, $\text{Ba}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ et le BaTiO_3 . Même si certains de ces matériaux présentent des propriétés piézoélectriques importantes, ils ont de faibles températures de Curie ($\sim 250^\circ\text{C}$) et sont très sensibles à la variation de température (Troler-McKinstry et al., 2018; L.-F. Zhu et al., 2018).

• **Choix du matériau piézoélectrique adéquat pour notre application**

Pour faire notre choix, nous nous basons sur les différents critères décrits. Dans un premier lieu, notre application nécessite un matériau massif sollicité en contrainte de compression. De ce fait, les monocristaux et les piézo-céramiques sont les mieux adaptés. De plus, ils ont les meilleures propriétés piézoélectriques et les plus hauts facteurs de mérite. Dans un deuxième lieu, notre application nécessite une bonne stabilité à la température du fait que le récupérateur est incorporé dans le dissipateur de chaleur. Par la suite, nous retenons les PZT qui sont stables en température même s'ils contiennent du plomb. Spécifiquement, nous choisissons un PZT dur qui est approprié pour le haut niveau de contrainte et de température même en ayant des propriétés piézoélectriques plus faibles que les PZT mous. De surcroît, les PZT durs sont plus linéaires avec un couplage électromécanique élevé, de faibles pertes diélectriques, une rigidité requise et une bonne résistance à la fatigue. Une étude réalisée pour comparer trois PZT

commerciaux fréquemment utilisés : PZT-4(dur), PZT-8(dur) et le PZT5-H(mou) soumis à un test de compression en mode d-33 sous différentes charges de pointe pour utilisation en trottoir présentent la variation du voltage de sortie en fonction de la fréquence comme illustre la figure 3.3 (X. Xu, Cao, Yang, & He, 2018).

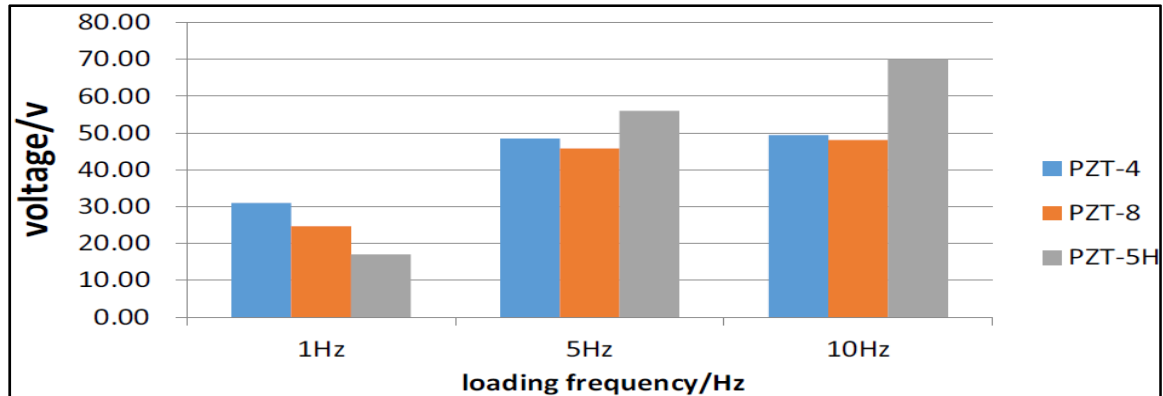


Figure 3.3 Comparaison du voltage sous 1000N de charge de pointe pour les trois PZT
Tirée de X.Xu et al (2018, p391)

Cette étude montre qu'en faibles fréquences, les PZT5-H et PZT-4 sont meilleurs. Nous nous choisissons le PZT-4 (dur) communément utilisé (Davoudi, 2012).

3.2.2 Choix de l'interface thermique

Notre structure nécessite l'utilisation d'interface thermique qui permet de joindre le dissipateur au circuit de la source de chaleur et d'isoler le circuit électriquement. En effet, nous évitons d'utiliser les attaches mécaniques pour assembler la partie directement connectée à la source de chaleur pour éviter tout endommagement ou contraintes mécaniques sur le circuit. Toutefois, la plaque rigide 2 éloignée sera fixée par des vis. Une interface thermique permet de remplir les vides et d'augmenter l'aire de contact dans la jonction entre une source de chaleur et un dissipateur avec un matériau thermiquement conducteur pour diminuer la résistance thermique de l'interface. Il existe plusieurs types d'interfaces thermiques utilisés en littérature dont les principaux sont les pâtes et matelas thermiques, les interfaces métalliques (les matériaux à changement de phase MCP, lames de métal), les matrices polymères chargées

et les adhésifs thermo-conducteurs. Une description des principaux avantages et inconvénients de ces types d'interfaces est donnée dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 Principales caractéristiques des interfaces thermiques

Interface Thermique	Avantages	Inconvénients	Références
Pâtes thermiques	Bonne conductivité thermique Faible coût	Couler, Séparation de Phases, dessèchement, épaisseur incontrôlable, contamination Serrage mécanique nécessaire Pas d'isolation électrique	(Sarvar, Whalley, & Conway, 2006) (Suh, Dillon, & Tseng, 2015) (Forsback, 2017)
Lames de métal	Conductivité thermique très élevée, Possibilité d'adhérence avec un processus de refusion	Faible absorption de contrainte Haute température du processus de refusion	(J. Hansson, Zandén, Ye, & Liu, 2016) (Forsback, 2017)
MCP	Facilité d'application, Pas de dégradation	Couler, Faible conductivité thermique, Serrage mécanique nécessaire	(J. Hansson et al., 2016) (Suh et al., 2015)
Matrices polymères chargées	Isolation électrique Forte résistance aux conditions environnementales, Facilité d'application	Faible conductivité thermique Serrage mécanique nécessaire, Coût plus élevé que les pâtes	(Sarvar et al., 2006) (Forsback, 2017)
Adhésifs thermo-conducteurs	Forte Adhérence Isolation électrique Compatibilité avec plusieurs types de substrats	Conductivité thermique moyenne	(Josef Hansson, Nilsson, Ye, & Liu, 2017) (Suh et al., 2015) (Singh, Panda, Mohanty, Nayak, & Gupta, 2017)

Dans notre cas, le pouvoir d'adhérence est un caractère sélectif pour notre choix. Par ailleurs, nous choisissons la catégorie des adhésifs thermo-conducteurs. Parmi les adhésifs possibles, nous choisissons les adhésifs de type époxyde : Ces adhésifs ont une bonne adhérence sur les aciers et sur les céramiques (Gaussens, 2010) . En plus, les polymères à base d'époxyde possèdent des propriétés importantes à savoir un faible rétrécissement, une faible expansion thermique, une stabilité physique et chimique, une bonne isolation électrique (Sahu, Mondloe, & Upadhyay, 2017) ainsi qu'une capacité d'accepter plusieurs types de fibre (Singh et al., 2017). En particulier, nous choisissons un adhésif époxyde chargé de nitrure de bore (BN) puisqu'il présente une meilleure isolation électrique.

3.2.3 Choix des matériaux pour les composants restants

Le diffuseur thermique doit avoir une haute conductivité thermique. En général, l'aluminium ou le cuivre sont choisis. Pour notre cas, nous choisissons le cuivre puisqu'il possède la plus grande conductivité thermique (400 W/m K) et une plus faible dilatation thermique (17×10^{-6} 1/K). La plus faible dilatation thermique est souhaitée puisque nous essayons de limiter les contraintes mécaniques dans la structure. En plus, le cuivre est plus rigide ce qui donne plus de stabilité mécanique.

Le cylindre de compression joue un double rôle : d'une part, il exerce les efforts de compression sur le disque piézoélectrique, et d'autre part, il dissipe la chaleur par convection à travers sa surface latérale. De ce fait, deux aspects sont à retenir. Premièrement, le cylindre doit être suffisamment rigide pour résister à la déformation subite par les contraintes thermiques du disque piézoélectrique et plus tenace pour ne pas présenter des fissurations. Deuxièmement, tout en augmentant la longueur de cylindre pour élargir la surface de convection, nous devons minimiser la résistance thermique de conduction du cylindre et cela en augmentant la conductivité thermique du cylindre. Le tableau 3.4 (Wong, Kwok, Man, & Cheng, 2012) indique que le cuivre et l'aluminium possèdent les meilleures conductivités thermiques. De plus, en considérant les propriétés mécaniques des deux matériaux présentés

dans le tableau 3.5 (Cambridge University Engineering Department, 2003), le cuivre est plus rigide avec un module de Young de l'ordre de 110 GPa.

Tableau 3.4 Propriétés de différents métaux
Tiré de Wong et al (2012, p292)

Metal	Density (g/cm ³)	Softening temperature (°C)	Melting temperature (°C)	Thermal conductivity (W/m K)	Resistivity (nΩ.m)	Brinell hardness (H _B)
Cu	8.9	190	1083	397	17	35
Cr	7.0	600	1615	91.3	125	90
W	19.3	1000	3390	147	52.8	350
Ni	8.8	520	1452	88.5	70	70
Al	2.7	150	660	238	28	27
Ti	4.5	500	1668	21.6	420	110

Tableau 3.5 Propriétés mécaniques d'alliage de cuivre et d'aluminium
Tiré de Cambridge University Engineering Department (2003, p11-13)

Matériau	Alliage de Cuivre	Alliage d'Aluminium
Module de Young (GPa)	112-148	68-82
Résistance à la rupture (MPa√m)	30-90	22-35

Cette rigidité est souhaitée puisqu'elle s'approche de celle du PZT-4 ayant un module de Young de l'ordre du 115GPa. De surcroit, le cuivre résiste plus à la rupture et il est plus dur que l'aluminium. Ainsi, le cuivre est choisi pour le cylindre de compression.

Par suite, nous choisissons le matériau pour la plaque rigide. Comme le montre le tableau 2.5, le Titane (Ti) et le chrome (Cr) présentent des duretés largement supérieures à celle du cuivre et sont égales à 110 et 90 respectivement. Cependant, comme l'aspect thermique est important, le chrome avec une conductivité thermique assez élevée de 91.3 (W/mK) est préférable. En outre, le chrome est largement rigide par rapport au cuivre et au PZT-4 avec un module de Young de l'ordre de 280 GPa (Holzwarth & Stamm, 2002). Nous choisissons le Chrome pour les plaques rigides. En conclusion, les matériaux choisis sont regroupés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Matériaux choisis pour le générateur

Spécifications	Matériau choisi
Interface thermique	Adhésifs époxyde chargé de nitrure de bore
Diffuseur	Cuivre pur
Cylindre de compression	Cuivre pur
Disque piézoélectrique	PZT-4
Plaques rigides	Chrome pur

3.3 Dimensionnement de la géométrie

Dans cette section, nous déterminons les dimensions des différentes parties du générateur à fin d'avoir un fonctionnement global qui respecte des contraintes mécaniques et thermiques. Comme décrit dans la section 2.2, les dimensions de notre convertisseur sont 4.4 cm de longueur et 3.5 cm de largeur. Ce sont les dimensions choisies pour toutes les plaques à mettre sauf pour la deuxième plaque rigide qui doit être plus grande avec une longueur de 4.8 cm et une largeur de 3.9 cm pour permettre une fixation avec des vis. De plus, afin de couvrir le maximum possible de surface de conduction thermique, le diamètre du cylindre de compression et du disque piézoélectrique est égal à 3.5 cm. Il suffit de déterminer les épaisseurs de tous les composants pour entièrement définir le générateur. Ces épaisseurs seront calculées en respectant les contraintes thermiques de refroidissement et les contraintes mécaniques de stabilité.

Nous débutons notre étude par rechercher les niveaux de température favorables au fonctionnement du circuit électrique. En effet, tout transistor possède une température de jonction notée T_j . Nous devons maintenir cette température aux alentours d'une température d'opération maximale admissible par les amplificateurs de puissance linéaire estimée à 85°C (Gorbachov, 2005). De plus, en considérant la résistance thermique entre la jonction et le boîtier notée θ_{jc} de valeur donnée par le constructeur du transistor CGHV1J006D égale à 13.2°C/W (Wolfspeed, 2015), nous déterminons ainsi la température souhaitée du boîtier par la relation (Nikhil, 2011) :

$$T_c = T_j - P_{in} * \theta_{jc} , \quad (3.1)$$

Adapté de Nikhil (2011)

Où T_c est appelé la température du boîtier

T_j est appelé la température de jonction

P_{in} est appelé la puissance dissipée

θ_{jc} est appelé la résistance thermique entre jonction et boîtier

Étant donné que notre structure est aussi le refroidisseur thermique, nous déterminons la résistance thermique totale du générateur par l'équation (Nikhil, 2011) :

$$\theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa} = \frac{T_j - T_A}{P_{in}} , \quad (3.2)$$

Tiré de Nikhil (2011, p2)

Où T_A est appelé la température ambiante 25°C (Température ambiante normale)

θ_{cs} est appelé la résistance thermique de l'interface thermique

θ_{sa} est appelé la résistance thermique du dissipateur

Les paramètres T_j , θ_{jc} sont déterminés à partir de la fiche technique du transistor utilisé dans l'amplificateur de puissance de référence. P_{in} est égale à 3W d'après la section 2.2. Ainsi, en utilisant les équations 3.1 et 3.2, le boîtier doit être maintenu à une température égale à 45.4 °C avec une résistance thermique totale du générateur ($\theta_{cs} + \theta_{sa}$) égale à 6.8 °C/W.

D'autre part, certaines limitations mécaniques s'appliquent sur les matériaux piézoélectriques pour maintenir un fonctionnement linéaire et éviter toute détérioration possible. D'après une étude réalisée par Cheng et Reece (2001) sur du PZT 4D commercial, la courbe contrainte déformation présente trois étages à savoir une partie linéaire avec des contraintes inférieures à 50 MPa, une partie à déformation facile avec des contraintes entre 50 MPa et 300 MPa et une dernière partie de durcissement à hautes contraintes. Lorsqu'on relâche les contraintes, il y a récupération d'une partie des déformations dues aux contraintes internes comme le montre la figure 3.4 (Cheng & Reece, 2001).

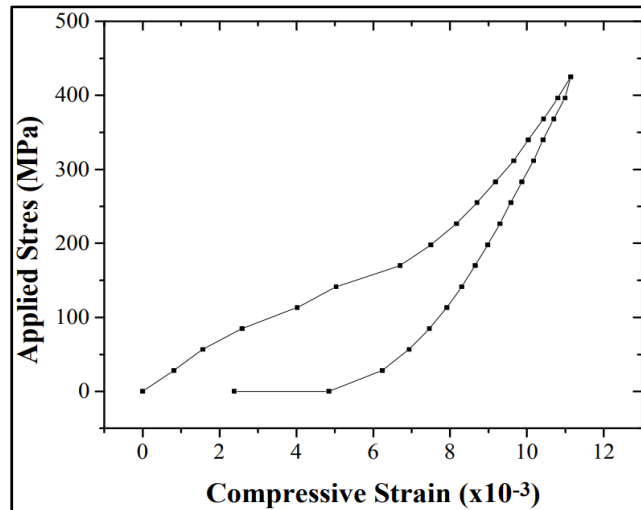


Figure 3.4 Courbe contrainte déformation pour dur PZT-4 parallèle à la direction de polarisation
Tirée de Cheng & Reece (2001, p166)

Pour notre étude, il est préférable de travailler dans une zone linéaire afin d'avoir une structure stable et éviter les changements irréversibles des paramètres élastiques et diélectriques des céramiques piézoélectriques. En plus, selon une recherche développée par Abramovich, Tsikhotsky, et Klein (2013) sur la contrainte maximale admissible pour les générateurs piézoélectriques d'impulsions opérant en mode quasi-statique, la performance de ces générateurs dépend de la reproductivité des paramètres de sortie et une contrainte maximale aux alentours de 30MPa est recommandée (Abramovich et al., 2013). Cette contrainte est la contrainte qui assure une production d'énergie maximale et stable et une efficacité élevée. Ainsi, en quête de performance, cette valeur est choisie pour référence dans notre étude.

Comme les contraintes mécaniques étudiées sont d'origine thermique, la limite de 30MPa implique un niveau de température à ne pas dépasser. En effet, les contraintes thermiques développées par le cylindre de compression dépendent du matériau utilisé et du gradient de température suivant l'équation 2.4. Ainsi, pour assurer une contrainte maximale aux alentours de 30MPa, nous devons avoir une variation de température ($T_1 - T_0$) maximale donnée par :

$$(T_1 - T_0) = \frac{\sigma}{E * \alpha} ; T_1 = \frac{\sigma}{E * \alpha} + T_0 , \quad (3.3)$$

Où le cylindre est en cuivre, la température T_0 est égale à 25°C et la température T_1 maximale est égale à 41 °C.

Ce niveau de température génère des déplacements thermiques de l'ordre de μm . De ce fait, pour que l'effet de la plaque rigide soit négligeable devant celui du cylindre de compression, elle doit avoir un déplacement thermique de l'ordre de 10^{-7} inférieur au déplacement du cylindre de l'ordre de 10^{-6} . Par la suite, l'épaisseur maximale de la plaque est déterminée suivant l'équation 3.4 (MICHEL & PITONE, 2012) :

$$\frac{dL}{L_0} = \alpha * dT ; L_0 = \frac{dL}{\alpha * dT} , \quad (3.4)$$

Tiré de MICHEL & PITONE (2012, p78)

Où L_0 est appelé la dimension d'un objet à la température T_0

dT est appelé l'augmentation de la température

dL est appelé l'augmentation de la dimension

α est appelé le coefficient de dilatation thermique du matériau à T_0

En prenant des plaques rigides en chrome, l'épaisseur de ces plaques $L_0 = 1.3 \text{ mm}$.

En prenant une épaisseur de 2 mm pour le diffuseur et ayant une température de boîte $T_c = 45.4^\circ\text{C}$ ainsi qu'une température de cylindre de $T_{cy} = 41^\circ\text{C}$, nous déterminons l'épaisseur de l'interface thermique nécessaire en se basons sur une partie du modèle thermique développé présenté dans la figure 3.5.

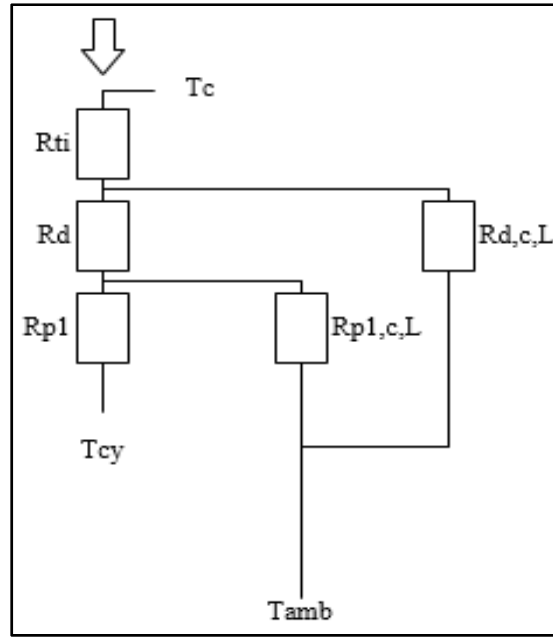


Figure 3.5 Schéma thermique pour le dimensionnement de l'interface thermique

$$\begin{aligned}
 T_{cy} = & (T_c - R_{ti} * Pin) * \left(1 + \frac{Rp1}{Rp1, c, L} + \frac{Rd + Rp1}{Rd, c, L} - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L * Rd, c, L} \right) \\
 & - \left(Rd + Rp1 - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L} \right) * Pin \\
 & - \left(\frac{Rp1}{Rp1, c, L} + \frac{Rd + Rp1}{Rd, c, L} - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L * Rd, c, L} \right) * T_{amb}
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

On note

$$C1 = \left(1 + \frac{Rp1}{Rp1, c, L} + \frac{Rd + Rp1}{Rd, c, L} - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L * Rd, c, L} \right) \quad (3.6)$$

$$C2 = \left(Rd + Rp1 - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L} \right) \quad (3.7)$$

$$C3 = \left(\frac{Rp1}{Rp1, c, L} + \frac{Rd + Rp1}{Rd, c, L} - \frac{Rp1 * Rd}{Rp1, c, L * Rd, c, L} \right) \quad (3.8)$$

Ainsi,

$$R_{ti} = \frac{T_c * C1 - C2 * Pin - C3 * Tamb - T_{cy}}{C1 * Pin} \quad (3.9)$$

$$R_{ti} = \frac{eti}{\lambda_{ti} * St_i}, \quad (3.10)$$

$$eti = \frac{T_c * C1 - C2 * Pin - C3 * Tamb - T_{cy}}{C1 * Pin} * \lambda * S,$$

Où eti est appelé l'épaisseur de l'interface thermique suivant la direction de propagation de chaleur

λ_{ti} est appelé la conductivité thermique de l'interface thermique

St_i est appelé la surface du matériau orthogonale à la direction de propagation de chaleur

Pour de l'époxyde chargé de nitrure de bore de type conductive X-thermo bond 95, l'épaisseur de l'interface thermique est 0.93 mm. Pour respecter la condition sur la résistance thermique totale de 6.8 °C/W, nous déterminons la résistance thermique équivalente Req du reste du circuit selon le schéma de la figure 3.6.

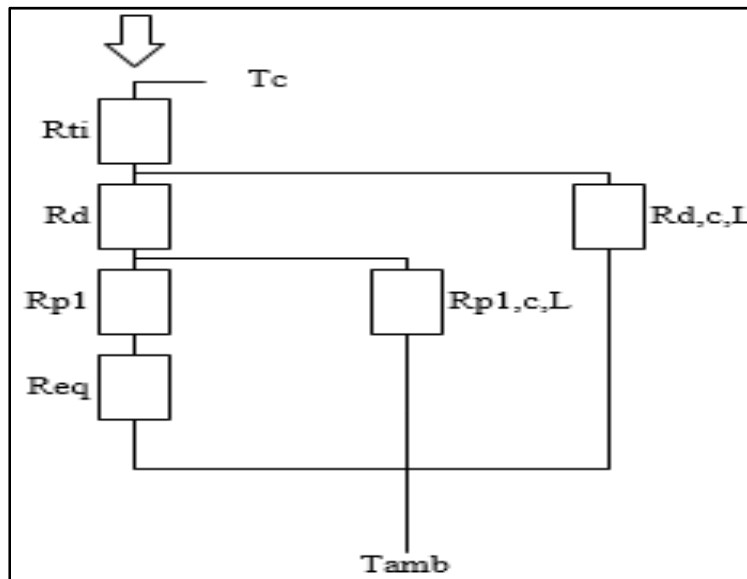


Figure 3.6 Schéma thermique pour le dimensionnement de la résistance équivalente Req

$$R_{totale} = R_{ti} + \frac{\left(\frac{(R_{eq} + R_{p1}) * R_{p1cL}}{R_{eq} + R_{p1} + R_{p1cL}} + R_d \right) * R_{dcL}}{\frac{(R_{eq} + R_{p1}) * R_{p1cL}}{R_{eq} + R_{p1} + R_{p1cL}} + R_d + R_{dcL}} \quad (3.11)$$

$$\frac{(R_{eq} + R_{p1}) * R_{p1cL}}{R_{eq} + R_{p1} + R_{p1cL}} = \frac{R_d * R_{dcL} - (R_{totale} - R_{ti}) * (R_{dcL} + R_d)}{R_{totale} - R_{ti} - R_{dcL}} = C1 \quad (3.12)$$

$$R_{eq} = \frac{C1 * (R_{p1} + R_{p1cL}) - (R_{p1} * R_{p1cL})}{R_{p1cL} - C1} \quad (3.13)$$

Nous obtenons donc une résistance thermique $R_{eq} = 6 \text{ °C/W}$. D'autre part, le modèle thermique de la résistance R_{eq} est présenté par la figure 3.7. D'abord, nous exprimons R_{eq} en fonction des résistances thermiques qui la compose. L'expression est donnée par les équations 3.14 et 3.15. Ensuite, nous déduisons l'équation 3.16 qui relie les résistances thermiques modélisant le matériau piézoélectrique et le cylindre de compression.

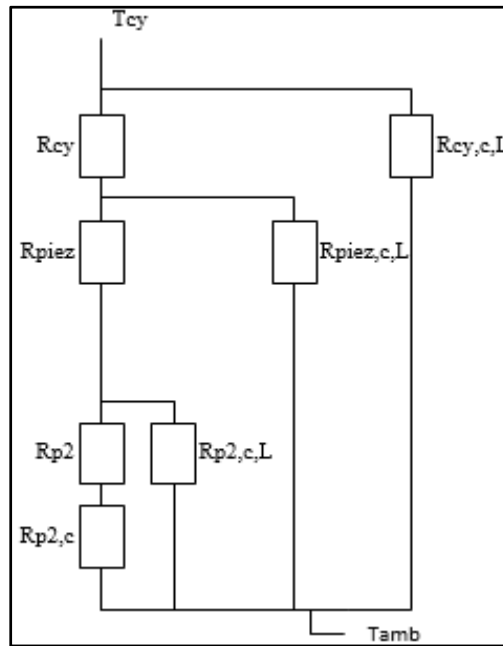


Figure 3.7 Schéma thermique distribué de la résistance équivalente R_{eq}

$$Req = \frac{\left(\frac{(Rp2t + Rpiez) * RpiezCL}{Rp2t + Rpiez + RpiezCL} + Rcy \right) * RcycL}{\left(\frac{(Rp2t + Rpiez) * RpiezCL}{Rp2t + Rpiez + RpiezCL} + Rcy + RcycL \right)} \quad (3.14)$$

$$Rp2t = \frac{(Rp2 + Rp2, c) * Rp2cL}{Rp2 + Rp2c + Rp2cL} , \quad (3.15)$$

Où $Rp2t$ est appelé la résistance équivalente de la plaque rigide 2

$$\begin{aligned} & (Rp2t + Rpiez) * (RpiezCL) * (Req - RcycL) \\ & + (Req * (Rcy + RcycL) - Rcy * RcycL) \\ & * (Rp2t + Rpiez + RpiezCL) = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Avec une épaisseur de 1.3 mm de la plaque rigide 2 en Chrome, la résistance thermique $Rp2t$ est déterminée. Il suffit de déterminer les hauteurs du disque piézoélectrique et du cylindre de compression de façon à satisfaire l'équation 3.16. Pour ce faire, nous supposons une relation de proportionnalité entre l'épaisseur du disque piézoélectrique ' $hpiez$ ' et l'épaisseur du cylindre de compression ' hcy ' donnée par l'équation 3.17 :

$$hpiez = P * hcy , \quad (3.17)$$

Où P est appelé le coefficient positif de proportionnalité

Par suite, nous exprimons les résistances thermiques du disque piézoélectrique et du cylindre de compression en fonction du coefficient P et de la hauteur hcy :

$$Rpiez = \frac{P}{\lambda piez * \pi * R^2} * hcy , \quad (3.18)$$

$$Rcy = \frac{1}{\lambda cy * \pi * R^2} * hcy , \quad (3.19)$$

$$RpiezCL = \frac{1}{2 * \pi * R * hc * P} * \frac{1}{hcy} , \quad (3.20)$$

$$R_{cyl} = \frac{1}{2 * \pi * R * hc} * \frac{1}{hcy}, \quad (3.21)$$

Où R est appelé le rayon des disques

λ est appelé la conductivité thermique d'un matériau

hc est appelé le coefficient de convection

Enfin, en intégrant les équations 3.18, 3.19, 3.20, et 3.21 dans l'équation 3.16, nous obtenons une équation à deux variables (hcy , P). En utilisant les propriétés des matériaux choisis dans la section 2.5, nous résolvons l'équation à deux variables à l'aide de Matlab. Nous traçons la courbe de la variation de l'épaisseur totale ($h_{piezo} + hcy$) en fonction du coefficient P donnée par la figure 3.8.

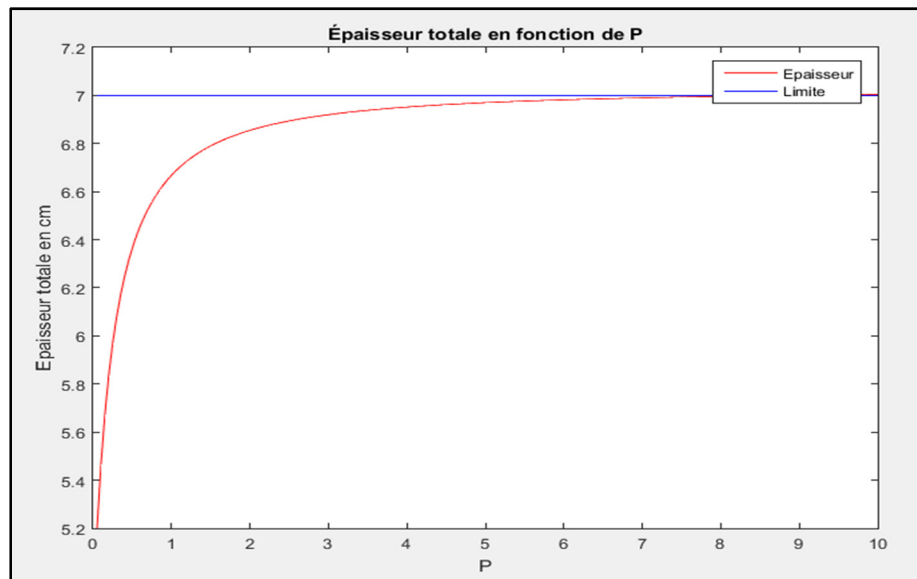


Figure 3.8 Courbe de variation de l'épaisseur totale (Disque PZT et Cylindre de compression) en fonction du coefficient P

Nous remarquons dans la courbe de la figure 3.8 un saut à partir d'une épaisseur totale de 5.8 cm. Pour des raisons de stabilités mécaniques et d'encombrement minimal, nous choisissons cette épaisseur totale qui correspond à une valeur du coefficient P égale à 0.2, à une hauteur du cylindre égale à 4.87 cm et une hauteur du matériau piézoélectrique égale

à 0.97 cm. En somme, les dimensions de tous les composants de notre structure sont regroupées dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 Dimensions des matériaux

Matériau choisi	Dimensions
Adhésifs époxyde chargé de nitrure de bore	Épaisseur=0.93mm Longueur = 44mm, Largeur = 35mm
Plaque-Cuivre	Épaisseur = 2mm, Longueur = 44mm, Largeur=35mm
Cylindre –Cuivre	Hauteur = 48.7mm, Diamètre = 35mm
Disque-PZT4	Hauteur = 9.7mm, Diamètre = 35mm
Plaque 1-Chrome	Épaisseur = 1.3mm, Longueur = 44mm, Largeur = 35mm
Plaque 2-Chrome	Épaisseur =1.3mm, Longueur = 48mm, Largeur = 39mm

3.4 Simulations analytiques et résultats

Les simulations analytiques représentent le calcul numérique des différentes températures et contraintes mécaniques selon le modèle théorique précédemment établi. Ce calcul est effectué au sein de l'environnement de développement Matlab. En outre, une étude avec la plate-forme Simulink intégrée à Matlab tend à estimer la puissance générée par le générateur à travers une charge résistive. Les paramètres d'intérêts sont la tension à vide générée, la température du cylindre de compression, la température du boîtier, la contrainte mécanique exercée sur le matériau piézoélectrique et la puissance récupérée par le générateur.

- **Détermination des paramètres de sortie**

En implémentant les modèles théoriques sous forme de script Matlab, nous déterminons les paramètres de sortie en fonction de la puissance d'entrée présentés dans le tableau 3.8.

Tableau 3.8 Paramètres de sortie du modèle théorique

Paramètres de sortie Puissance d'entrée (W)	Tension à vide (KV)	Température du cylindre (°C)	Température du boîtier (°C)	Contrainte (MPa)
1	2.2659	30.2974	31.6213	-9.2994
2	4.5318	35.5948	38.2426	-18.599
3	6.7976	40.8922	44.864	-27.898

- **Étude de la puissance développée**

Dans l'intention d'estimer la puissance récupérée par le générateur piézoélectrique développé, nous utilisons la plate-forme de simulation Simulink intégrée à Matlab. Nous réalisons le modèle Simulink basé sur la modélisation théorique développée dans la section 2.4. Subséquemment, nous étudions la puissance générée dans un circuit de charge résistive. En effet, nous nous intéressons au niveau de puissance récupéré pour un seul pic de tension tout en négligeant l'effet cyclique réel de la génération liée à une puissance dissipée variable dans le temps. Pour ce faire, la source de tension alternative du modèle théorique est un générateur d'impulsion qui débite un courant à travers le circuit RC. La résistance de charge est montée en parallèle avec la résistance de fuite comme le montre la figure 3.9.

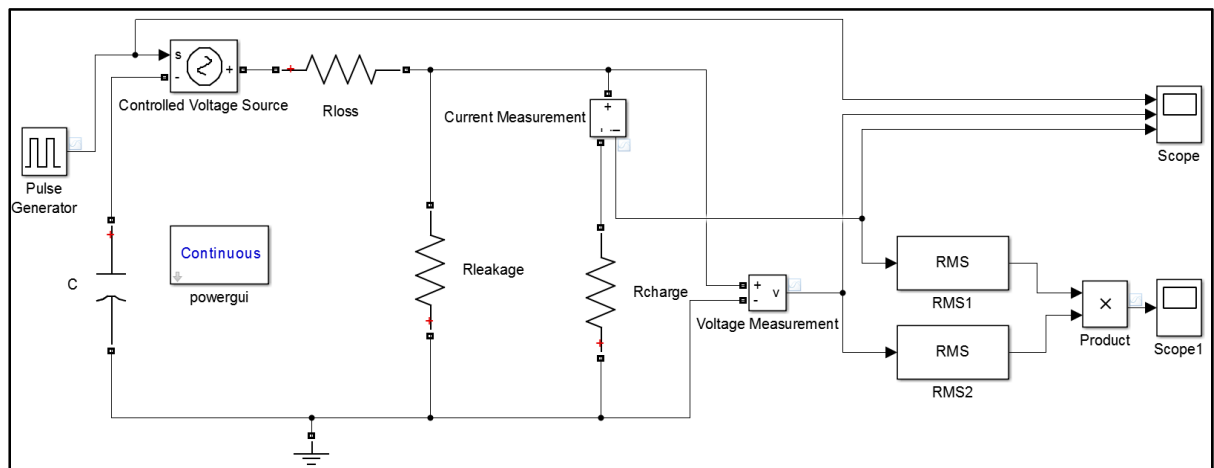


Figure 3.9 Schéma de simulation développé sous Matlab-Simulink du générateur piézoélectrique

La puissance moyenne générée ' P_{avg} ' est définie par le produit de la moyenne quadratique de la tension ' V_{rms} ' et de la moyenne quadratique du courant ' I_{rms} ' générés par le PZT (Faisal, 2016) suivant l'équation 3.22 :

$$P_{avg} = V_{rms} * I_{rms} \quad (3.22)$$

Tiré de Faisal (2016, p99)

-Estimation de la résistivité volumique du PZT-4

La théorie de la piézoélectricité ne tient pas compte de la fuite des charges électriques accumulées sur le matériau piézoélectrique. Ces fuites sont dues à la résistance ohmique interne qui devient prédominante lors d'une opération en basses fréquences. L'effet des courants de fuites générés est modélisé par une résistance en parallèle appelée résistance de fuites ou résistance d'isolement. Cette résistance interne permet une décharge de la capacité modélisée du matériau piézoélectrique lors d'une application prolongée d'une même contrainte. En hautes fréquences, cet effet est négligeable puisque le taux de changement des charges accumulées sur les électrodes suite à des contraintes mécaniques variables est plus rapide que la constante du temps de la décharge par résistance de fuite (Stevenson et al., 2015). Dans notre étude, nous estimons la valeur de la résistance de fuite du PZT-4 à partir de la résistivité du matériau (équation 2.12). En effet, la résistivité est une fonction de la fréquence d'excitation et de la température. Elle diminue considérablement avec l'augmentation de la fréquence ce qui explique que les pertes par conduction sont négligées en hautes fréquences. De surcroît, pour une même fréquence, la résistivité décroît considérablement au-delà d'une certaine température comme le montre la figure 3.10 (Hooker, 1998).

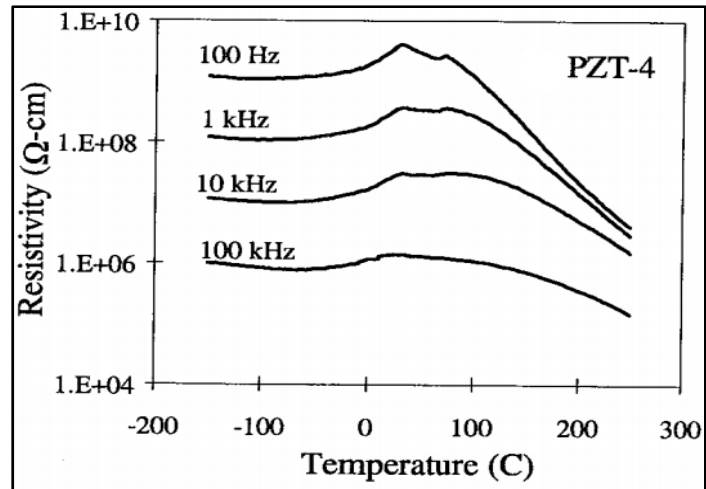


Figure 3.10 Variation de la résistivité du PZT-4 en fonction de la température pour différentes fréquences
Tirée de Hooker (1998, p10)

Pour de faibles fréquences ($\ll 0.01\text{Hz}$), l'étude réalisée par Stevenson et al. (2015) résume différentes valeurs de la résistivité volumique en fonction de la température de certains matériaux piézoélectriques rencontrés dans la littérature données dans la figure 3.11.

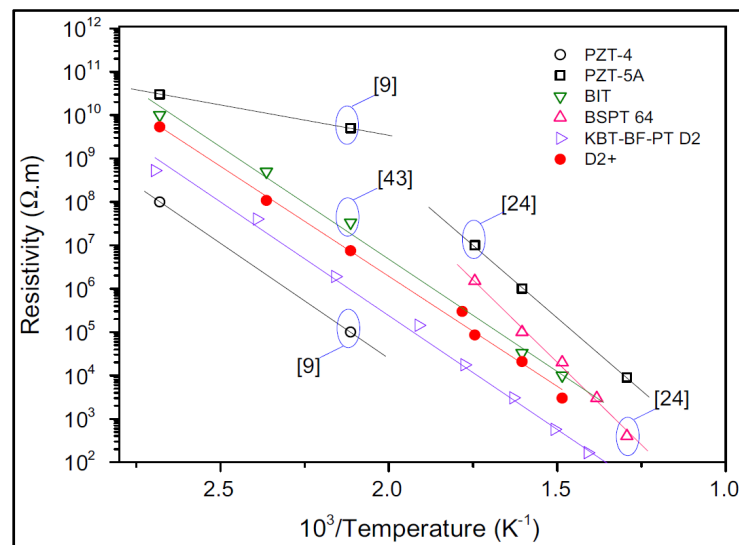


Figure 3.11 Variation de la résistivité en fonction de la température pour plusieurs matériaux piézoélectriques
Tirée de Stevenson et al (2015, p9265)

Nous remarquons que pour une température de 97 °C (~2.7 dans la figure 3.11), la résistivité volumique du PZT-4 est de l'ordre de 10^8 (Ωm). De plus, d'après l'étude de Berlincourt, Krueger, et Near (2000) de la société Morgan Electro Ceramics, la résistivité volumique de leurs céramiques de type PZT-4 est de $10^{8.5}$ (Ωm) pour 100 °C. Ainsi, pour des fins pratiques, la valeur de $10^{8.5}$ (Ωm) est adoptée pour calculer la résistance de fuites.

-Estimation de la puissance théorique récupérée

Pour une puissance d'entrée de 3W et en variant la valeur de la résistance de charge, nous déterminons la charge optimale correspondant à la puissance moyenne générée ' P_{avg} ' la plus élevée. Les valeurs des paramètres de la simulation sont calculées suivant les formules théoriques et la puissance récupérée en fonction de la résistance de charge est donnée dans le tableau 3.9. La courbe de la variation est présentée par la figure 3.12 avec les valeurs des paramètres utilisés sont : $C_s = 1.1411 \cdot 10^{-9}$ (F) ; $V_a(P=3W) = 6.7976 \cdot 10^3$ (V) ; $R_{loss}(f=1\text{Hz}, \tan\delta=0.6) = 8.3682 \cdot 10^7$ (Ω) ; $R_{leakage} = 3.1882 \cdot 10^9$ (Ω).

Tableau 3.9 Recherche de la charge optimale

$R_c[e^7]$	0.01	0.1	1	2	3	4	5	6	6.5
$P[\text{mW}]$	0.65	6.4	52.4	85.1	105.8	118.8	126.8	131.4	132.8
$R_c[e^7\Omega]$	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	100	
$P[\text{mW}]$	133.7	134.3	134.5	134.5	134.2	133.7	133.1	37.5	

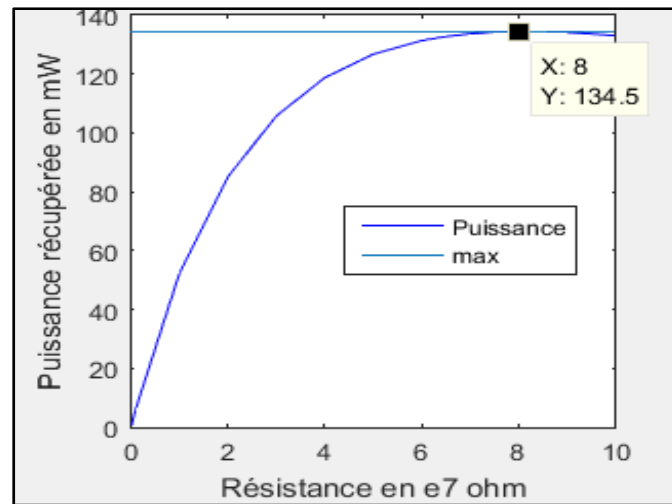


Figure 3.12 Adaptation de charge résistive: courbe de variation de la puissance en fonction de la résistance de charge

Nous déduisons que pour une charge résistive de $R_c=80 \text{ M}\Omega$, la puissance récupérée est optimale. De ce fait, pour cette charge optimale, nous calculons la puissance récupérée suivant la puissance d'entrée dissipée. Le tableau 3.10 résume les résultats.

Tableau 3.10 Puissances générées pour différents niveaux de la puissance dissipée

Puissance d'entrée (W)	0.1	1	2	3
Puissance récupérée (mW)	0.1495	14.9	59.8	134.5
Rendement (%)	0.1495	1.49	2.99	4.48

Nous remarquons que le rendement de notre générateur n'est pas constant. Il atteint un maximum pour la limite de 3W de chaleur dissipée utilisée dans notre application (section 2.2). Nous expliquons ce phénomène qualitativement. En effet, pour les faibles puissances dissipées, presque tout le flux thermique est soit dissipé dans l'air soit emmagasiné sous forme de chaleur sensible suite au passage consécutif par les deux plaques métalliques : Diffuseur et Plaque rigide 1. La faible résistance thermique de ces plaques est suffisante pour dissiper tout le flux entrant. Par suite, le cylindre de compression reçoit un pourcentage minime de la chaleur d'entrée pour se dilater et pour exercer d'effort sur le PZT. En augmentant la puissance

dissipée, la résistance thermique des plaques est insuffisante pour dissiper le flux thermique entrant. Un pourcentage plus élevé de ce flux atteint le cylindre de compression. Ce qui implique une meilleure récupération de la chaleur et un rendement de conversion plus élevé.

3.5 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons réalisé une étude des matériaux pour dimensionner le système entier. Nous avons proposé une structure capable de récupérer les pertes thermiques des circuits électriques avec une dissipation maximale de 3W. La réponse du générateur est prometteuse dans la mesure où le rendement théorique maximal atteint 4.48% avec une puissance récupérée de 134.5 mW tout en respectant les contraintes thermiques et mécaniques. La réponse du générateur se base sur le modèle analytique développé. C'est un modèle comportemental qui tient compte des différents phénomènes physiques étudiés mais reste un calcul ponctuel que nous devons vérifier sa robustesse. Par conséquent, nous réalisons dans le chapitre suivant une simulation multiphysique plus précise avec une modélisation numérique par éléments finis. Elle représente le générateur concret avec une interaction entre les phénomènes physiques.

CHAPITRE 4

SIMULATION MULTI-PHYSIQUE DU GÉNÉRATEUR PIÉZOÉLECTRIQUE

4.1 Introduction

Grâce à la modélisation analytique, nous avons construit notre générateur piézoélectrique et calculé sa réponse. Maintenant que nous avons identifié au complet notre système, nous pouvons modéliser les interactions entre les phénomènes physiques de natures différentes qui coexistent dans le générateur proposé à l'aide d'une simulation multiphysique. Ce type de simulation est souvent utilisé dans le secteur industriel pour assurer plus de finesse et de précision. Pour ce faire, nous commençons ce chapitre par sélectionner le logiciel de simulation le plus adapté à notre étude. Puis, nous expliquons les étapes de création d'un modèle de simulation. En dernier lieu, nous extrayons la réponse de notre générateur et nous comparons les résultats obtenus avec ceux du modèle analytique.

4.2 Choix du logiciel de simulation

Les logiciels de simulation sont d'une importance majeure dans les études scientifiques puisqu'ils permettent une reproduction des phénomènes physiques réels et complexes en utilisant souvent la technique des éléments finis. De ce fait, choisir le logiciel approprié pour notre application est essentiel. Une étude réalisée par Pallapa, Mohamed, et Chen (2010) compare la modélisation à éléments regroupés avec les logiciels candidats pour la simulation d'un générateur piézoélectrique à faible puissance en se basant sur une structure vibrante standard d'une poutre en porte-à-faux avec une masse sismique. Le tableau 4.1 résume les résultats de la recherche.

Tableau 4.1 Comparaison des techniques de modélisation
Tiré de Pallapa et al (2010, p)

	ANSYS	COMSOL	Coventor	Lumped
Simulation Time	x	xx	xxx	xxx
Robustness	x	xx	xx	xxx
Controllability	xx	xx	xx	xxx
Vertical Integration	x	xx	xxx	-
System Integration	xx	x	xxx	xxx

Au premier aperçu, Coventor semble être le logiciel présentant le plus de performances selon les critères de comparaison choisis suivis du logiciel COMSOL. Cependant, pour notre étude, un autre critère primordial de sélection doit être pris en compte : la possibilité de faire des simulations thermiques. De ce fait, COMSOL MULTIPHYSICS est le meilleur candidat pour notre étude malgré sa grande faiblesse dans le critère 'System Integration' qui représente l'aptitude de conjointre les éléments du circuit de charge avec la simulation du dispositif piézoélectrique.

4.3 Mise au point du modèle de simulation

Nous utilisons le logiciel de simulation COMSOL MULTIPHYSICS version 5.3. C'est un logiciel de simulation numérique permettant une résolution des équations différentielles temporelles et spatiales issues de la théorie physique suivant une approximation par éléments finis. La création d'une simulation nécessite certaines étapes présentées dans la figure 4.1.

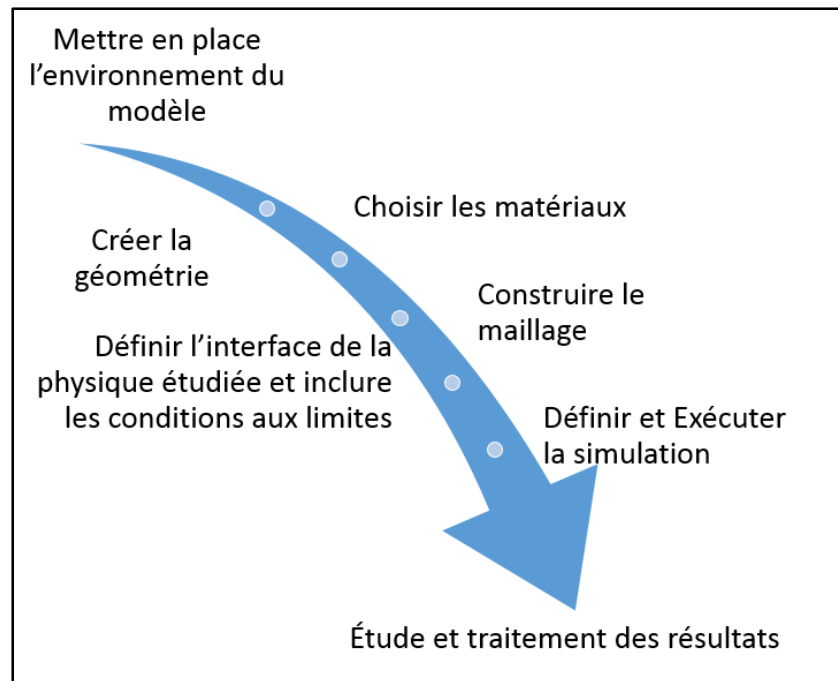


Figure 4.1 Schéma synoptique de la simulation COMSOL

En somme, notre simulation intègre trois physiques essentielles : le transfert de chaleur dans les solides (ht), la mécanique des solides (solid) et l'électrostatique (es). Avec ces trois modules généraux, nous réalisons un couplage pour extraire ' l'effet piézoélectrique' (solid/es) et 'la dilatation thermique' (ht/solid). La simulation est réalisée pour un régime stationnaire avec des conditions aux limites appropriées à l'environnement réel à savoir essentiellement un flux de convection naturelle sur toutes les surfaces extérieures, un encastrement aux extrémités (surface supérieure de la plaque rigide2 et surface inférieure de l'interface thermique) et un potentiel flottant au contact entre cylindre de compression et disque piézoélectrique. La géométrie développée est illustrée dans les figures 4.2.

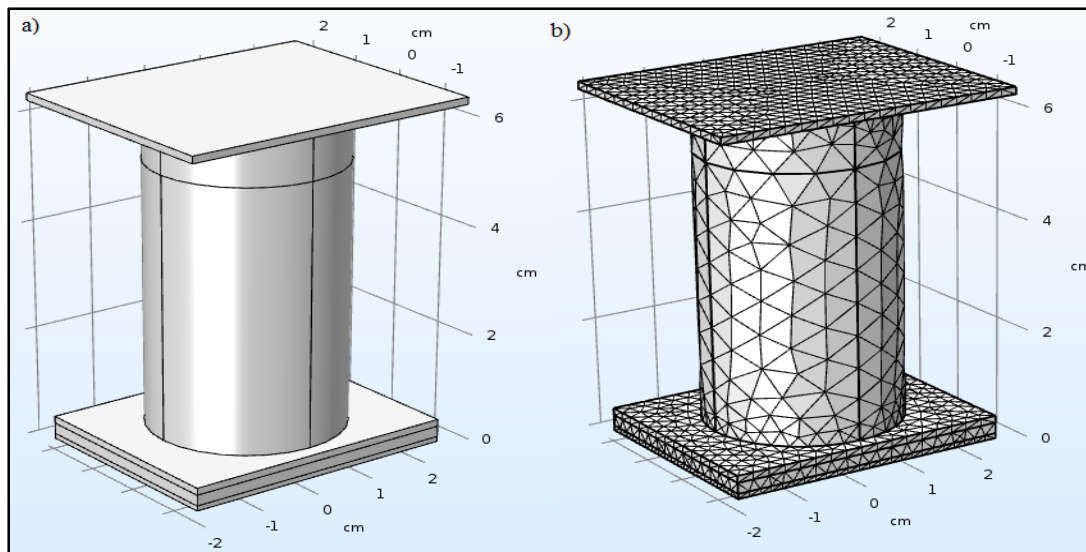


Figure 4.2 Géométrie de la structure: a) Sans maillage b) Avec maillage tétraédrique

4.4 Résultats de la simulation multiphysique

En ce qui a trait aux propriétés des matériaux utilisés dans les simulations analytiques et multiphysiques, nous avons choisi les valeurs prédéfinies présentes dans la bibliothèque des matériaux du COMSOL sauf le cas de l'interface thermique. Ces propriétés seront modifiées dans le chapitre prototypage où nous utilisons les valeurs spécifiques aux matériaux achetés. Le tableau 4.2 résume les propriétés d'intérêts utilisées.

Tableau 4.2 Propriétés utilisées pour la simulation

Matériaux	Propriétés
PZT-4	$d_{33}=2.89 \cdot 10^{-10}(\text{C/N})$, $\epsilon_r=1300$, $E=115.412(\text{GPa})$, $\alpha=10^{-6}(1/\text{K})$, $\lambda=1.1 (\text{W/mK})$
Cuivre	$\alpha= 17 \cdot 10^{-6}(1/\text{K})$, $E=110(\text{GPa})$, $\lambda=400(\text{W/mK})$
Chrome	$\alpha= 4.9 \cdot 10^{-6}(1/\text{K})$, $E=279(\text{GPa})$, $\lambda=93.7(\text{W/mK})$
Interface thermique	$\alpha= 43 \cdot 10^{-6}(1/\text{K})$, $\lambda=0.46 (\text{W/mK})$, $E=2.4(\text{GPa})$

La distribution 3D de la température et la distribution 3D de la contrainte mécanique suivant la direction transversale (axe Z) pour une puissance dissipée de 3 W sont présentées dans les figures 4.3 et 4.4 respectivement.

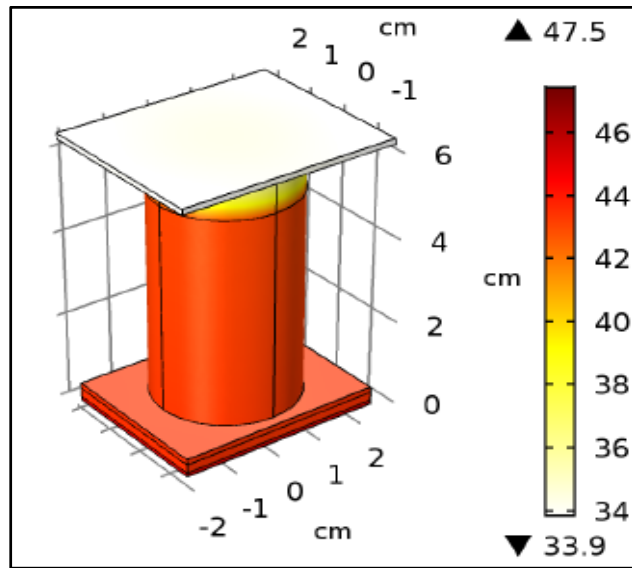


Figure 4.3 Distribution de la température ($^{\circ}\text{C}$) pour une puissance dissipée de 3(W)

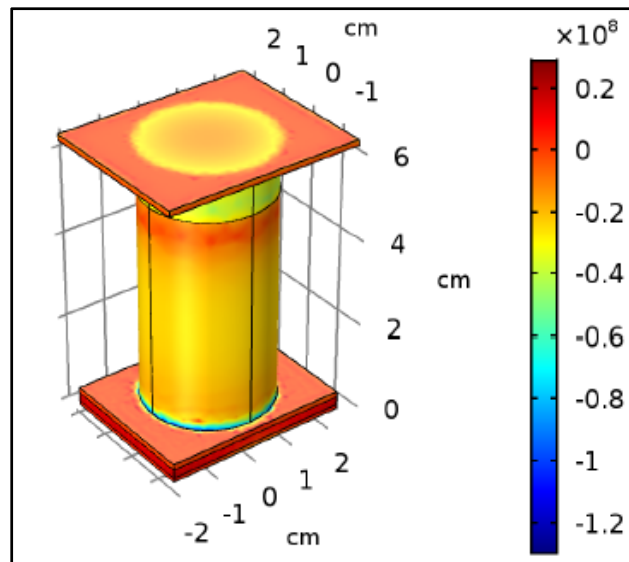


Figure 4.4 Distribution de la contrainte mécanique suivant l'axe Z (N/m^2) pour une puissance dissipée de 3(W)

Les résultats des paramètres de sortie de la simulation de COMSOL sont regroupés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 Résultats de la simulation multiphysique avec COMSOL

Paramètres Puissance	Voltage à vide (KV)		Température cylindre (°C)		Température boitier (°C)		Contrainte (MPa)	
	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol
1	2.2659	2.2552	30.2974	31.118	31.6213	32.461	-9.2994	-8.197
2	4.5318	4.5104	35.5948	37.235	38.2426	39.923	-18.599	-16.395
3	6.7976	6.7657	40.8922	43.353	44.864	47.384	-27.898	-24.593

4.5 Comparaison des résultats analytiques et multiphysiques

Notre analyse des résultats de la simulation numérique multiphysique en rapport avec les résultats de la simulation analytique tend à évaluer la consistance de la méthodologie théorique développée. Pour ce faire, notre comparaison est établie sur trois niveaux.

- Sur le plan thermique

Nous constatons que les niveaux des températures issus de la simulation numérique multiphysique sont étroitement supérieurs avec une variation maximale de 2.5°C. L'erreur relative est présentée dans les figures 4.5 et 4.6. La valeur maximale de cette erreur est de l'ordre de 6%.

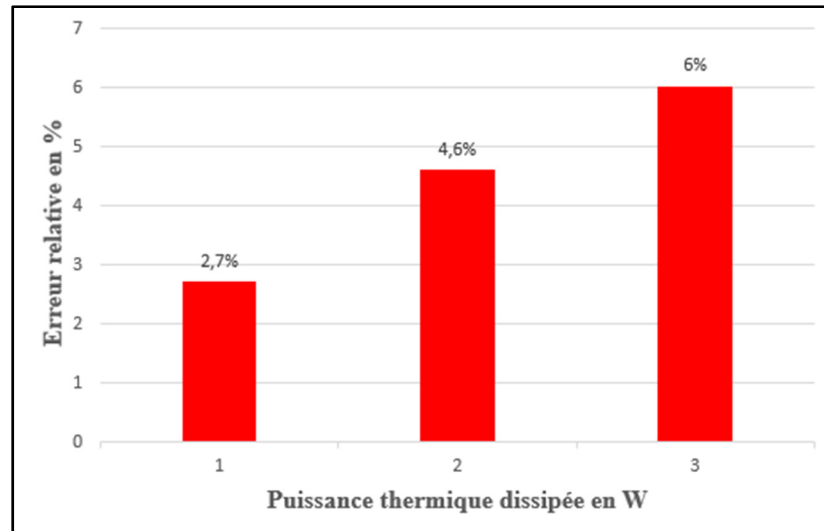


Figure 4.5 Comparaison de la température du cylindre de compression

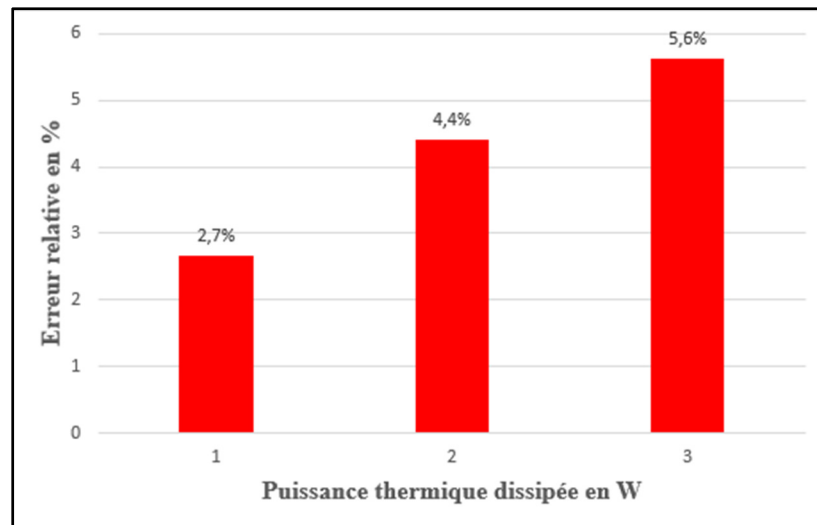


Figure 4.6 Comparaison de la température du boîtier

Ce résultat est attendu vu l'approximation de l'uniformité de la température utilisée dans le modèle thermique théorique. Au fond, le flux thermique transféré est plus concentré au milieu de la structure ce qui explique une élévation de la température par rapport au cas théorique. Les lignes de flux thermique à travers le générateur sont présentées dans la figure 4.7.

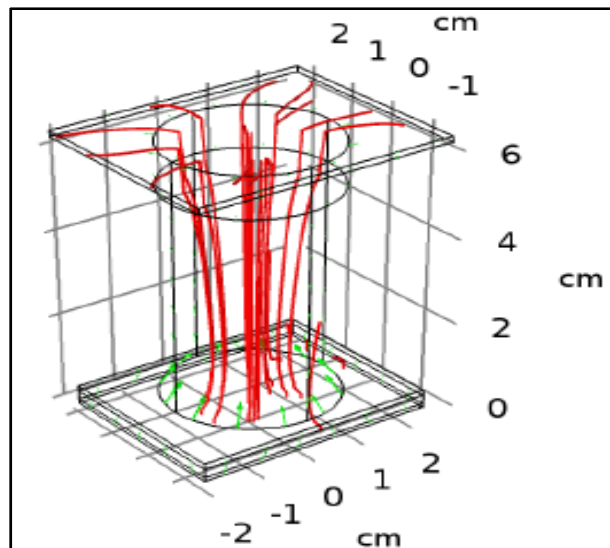


Figure 4.7 Flux total d'énergie (lignes rouges)
et flux total de la chaleur (flèches vertes)

-Sur le plan mécanique

Mécaniquement, ce que nous intéresse c'est l'intensité de la contrainte mécanique suivant la hauteur au niveau du disque piézoélectrique. Nous observons qu'il existe une différence plus visible avec un maximum de 3.3MPa. Cependant, nous remarquons que dans ce cas c'est les valeurs théoriques qui sont supérieures même avec un niveau de température plus faible. L'erreur relative est présentée dans la figure 4.8. La valeur maximale de cette erreur est de l'ordre de 12%.

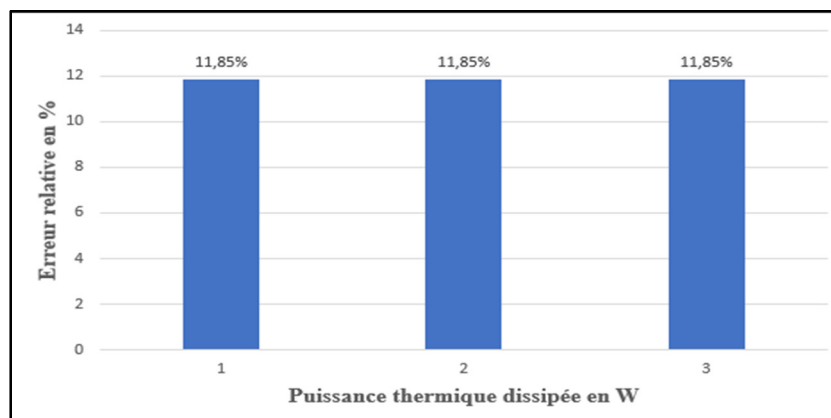


Figure 4.8 Comparaison de la contrainte
mécanique exercée sur le disque piézoélectrique

Le plus haut niveau de contrainte théorique ne représente aucun souci sur la stabilité de notre structure puisqu'il reste toujours en dessous de la limite définie dans le chapitre 3. En effet, ces résultats peuvent être expliqués par deux aspects. Au début, la différence des conditions aux limites de fixations. Dans le cas théorique, nous avons supposé que le disque piézoélectrique soit totalement fixe du côté supérieur et que le cylindre de compression est fixe du côté inférieur. Par contre, avec la simulation COMSOL plus réaliste, nous avons choisi de fixer seulement les extrémités du générateur qui seront fixées mécaniquement dans le prototype postérieur. De ce fait, il existe une relaxation due au mouvement relatif entre les cylindres et les plaques. Le second point, nous pouvons expliquer ce résultat par l'effet de relaxation des contraintes due au libre mouvement suivant la largeur puisque la structure peut se dilater latéralement.

-Sur le plan électrique

L'objectif des contraintes mécaniques est de générer un potentiel par effet piézoélectrique. Ainsi, nous comparons le voltage à vide généré par le modèle analytique et le modèle numérique multiphysique. Nous notons que ces résultats sont semblables avec un maximum de 31.4 V de différence pour 3W de puissance dissipée. Les valeurs théoriques sont plus élevées ce qui est attendu vu que les contraintes mécaniques sont plus intenses. L'erreur relative est présentée dans la figure 4.9. La valeur maximale de cette erreur est de l'ordre de 0.5%.

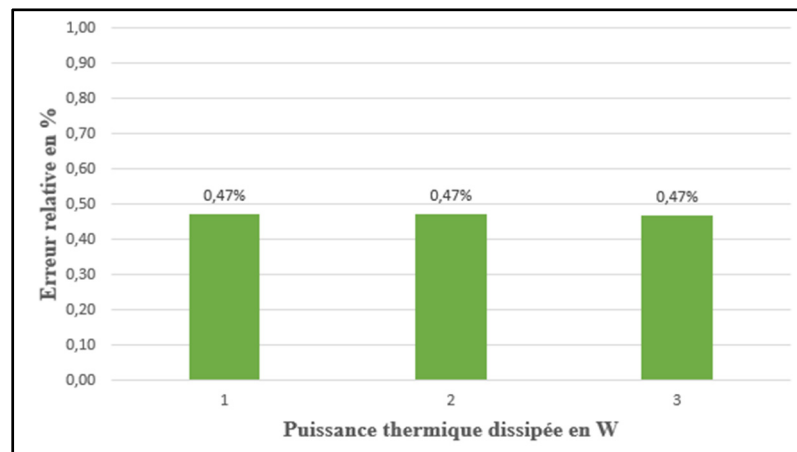


Figure 4.9 Comparaison du voltage à vide généré

4.6 Conclusion

En conclusion, nous pouvons dire que notre modèle théorique est bel et bien valide. En effet, nous nous intéressons à l'aspect thermique pour assurer la dissipation de chaleur et à l'aspect de génération de tension par effet piézoélectrique. Ces deux aspects sont plus ou moins en concordance avec la simulation multiphysique. L'erreur relative maximale est égale à 6% pour la température et à 0.5% pour le voltage à vide. Par conséquent, nous pouvons dire que les approximations établies dans l'analyse théorique n'ont pas affecté l'aspect réel de l'application qui est plus visible avec la simulation numérique multiphysique. Par ailleurs, nous pouvons procéder à l'expérimentation réelle. Ainsi, nous fabriquons un prototype du générateur que nous présenterons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5

PROTOTYPAGE ET MESURES

5.1 Introduction

Le générateur piézoélectrique conçu possède une réponse intéressante au flux de chaleur entrant. Les simulations analytiques et multiphysiques sont comparables. De ce fait, nous fabriquons un prototype permettant des mesures réelles. Dans ce présent chapitre, nous définissons premièrement les paramètres commerciaux des matériaux utilisés et les différentes modifications apportées. Ces modifications nécessitent la réalisation de nouvelles simulations. Ensuite, nous détaillons les équipements de test et le procédé de fabrication de la structure. Finalement, nous présentons les résultats expérimentaux et nous analysons la réponse de notre système.

5.2 Caractéristiques des matériaux commerciaux

Suivant notre étude, nous avons contacté plusieurs fabricants pour récupérer les pièces avec les dimensions personnalisées. Cependant, nous n'avons pas pu obtenir tous les matériaux soit en raison des longs délais de mise en œuvre, soit en raison des faibles quantités demandées. De plus, le procédé de découpage et d'usinage du chrome pur n'est pas possible dans notre laboratoire. De ce fait, pour notre prototype, nous avons opté pour certaines modifications dans les matériaux choisis et les dimensions dans les mesures possibles. Les essentiels changements apportés sont présentés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Changements apportés pour la fabrication du prototype

Spécification	Variable modifiée	État initial	Changement
Cylindre de compression	Diamètre	35mm	30mm

Tableau 5.1 Changements apportés pour la fabrication du prototype (Suite)

Spécification	Variable modifiée	État initial	Changement
Disque piézoélectrique	Hauteur	9.7 mm	4.2mm
	diamètre	35 mm	30 mm
Plaque rigide 1	Matériau-Épaisseur	Chrome pur 1.3mm	Alliage d'acier 2.032mm
Plaque rigide 2	Matériau-Épaisseur	Chrome pur 1.3mm	Alliage d'acier 2.032mm
	Longueur-	48mm	54mm
	Largeur	39mm	45mm

Les propriétés des matériaux commerciaux utilisés sont présentées dans les tableaux 5.2, 5.3, 5.4 et 5.5.

Tableau 5.2 Interface thermique: Thermo-bond 95

Propriété	λ (W/mK)	ρ (Kg/m ³)	Résistivité volumique (Ωcm)	α (1/K)	E (Pa)	c (J/KgK)	ν
Valeur	0.46	1296.1	3.4 e15	43 e-6	2.4 e9	1200	0.3
Référence	(ConductiveX)	(ConductiveX)	(ConductiveX)	(Sun Lee & Yu, 2005)	(Isarn, Ramis, Ferrando, & Serra, 2018)	(Sun Lee & Yu, 2005)	(EPOXY TECHNOLOGY, 2012)

Tableau 5.3 PZT-4: NAVY Type I APC-840

Propriété	d_{33} (10^{-12}C/N)	ε_r	E_{33} (10^{10}N/m^2)	α (1/K)	λ (W/mK)
Valeur	290	1275	6.8	1e^{-6}	1.1
Référence	(APC INTERNATIONAL)	(APC INTERNATIONAL)	(APC INTERNATIONAL)	(PI Ceramic, 2019)	(PI Ceramic, 2019)

Tableau 5.4 Alliage d'acier: AISI4130

Propriété	λ (W/mK)	E (GPa)	α (1/K)
Valeur	43	190	$7.6 \cdot 10^{-6}$
Référence	Base de données des matériaux MakeitFrom (https://www.makeitfrom.com)	Base de données des matériaux MakeitFrom (https://www.makeitfrom.com)	(McMaster-CARR)

Tableau 5.5 Cuivre

Propriété	λ (W/mK)	E (GPa)	α (1/K)
Valeur	390.8	117.21	$17 \cdot 10^{-6}$
Référence	(McMaster-CARR)	(McMaster-CARR)	(Institut Européen du Cuivre)

5.3 Simulations analytiques et multiphysiques

En utilisant les nouvelles dimensions ainsi que les propriétés des matériaux commerciaux, nous reproduisons les simulations analytiques et multiphysiques. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 5.6 et les distributions des paramètres de sortie pour une puissance dissipée de 3 W sont données par les figures 5.1 et 5.2.

Tableau 5.6 Résultats des simulations analytiques et multiphysiques pour le prototype

Paramètres Puissance	Voltage à vide (KV)		Température cylindre (C)		Température Source (C)		Contrainte (MPa)	
	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol	Matlab	Comsol
1	1.0969	1.0522	30.2772	30.473	31.619	31.851	-9.5137	-8.361
2	2.1937	2.1043	35.5543	35.946	38.238	38.702	-19.027	-16.724
3	3.2906	3.1565	40.833	41.419	44.8588	45.553	-30.5	-25.085

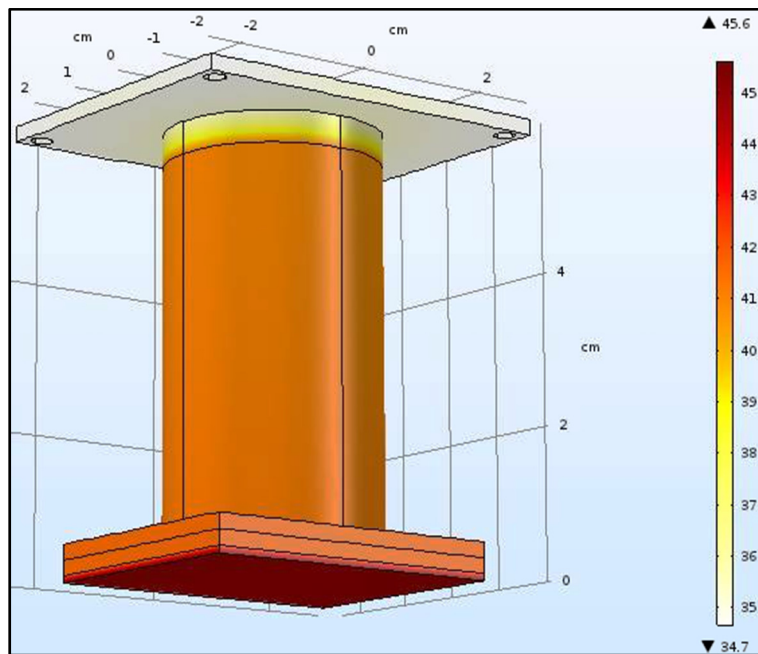


Figure 5.1 Distribution de la température du prototype (degC) pour une puissance dissipée de 3(W)

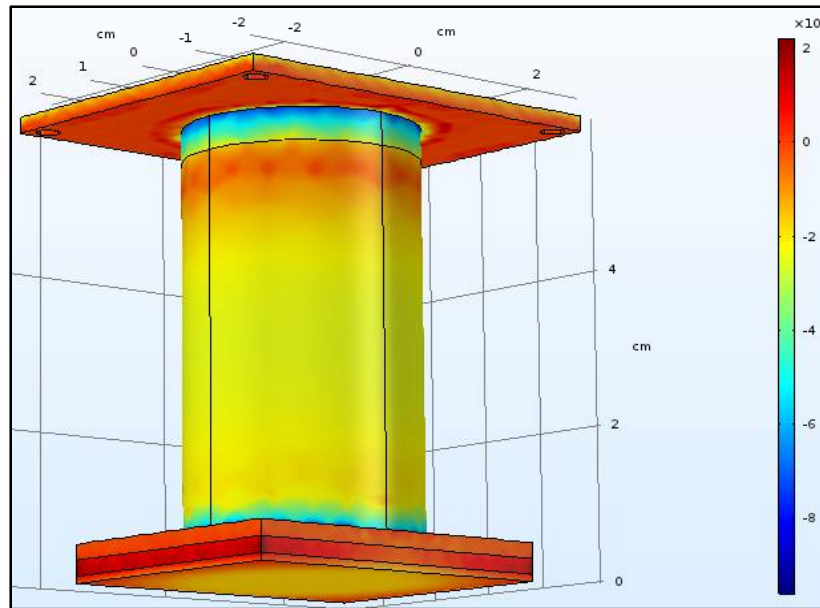


Figure 5.2 Distribution de la contrainte mécanique du prototype suivant l'axe Z (N/m²) pour une puissance dissipée de 3(W)

Selon le modèle du générateur développé dans les parties précédentes, nous déterminons la charge optimale pour le prototype. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.7 et la figure 5.3 illustre la courbe de variation de la puissance récupérée en fonction de la résistance de charge avec les valeurs des paramètres utilisés sont données par : $C_s = 1.8991 \cdot 10^{-9}$ (F); $V_a(p=3W) = 3.2906 \cdot 10^3$ (V) ; $R_{loss}(f=1Hz, \tan\delta=0.6) = 5.0285 \cdot 10^7$ (Ω); $R_{leakage} = 1.879 \cdot 10^9$ (Ω).

Tableau 5.7 Charge optimale pour le prototype

$R_c[e^7\Omega]$	0.01	0.1	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
$P[mW]$	0.47	4.2	29.6	37.7	43.2	46.9	49.4	51	51.9
$R_c[e^7\Omega]$	4.5	5	5.5	6	7	8	9	10	100
$P[mW]$	52.3	52.4	52.3	51.9	50.8	49.4	47.9	46.3	9.3

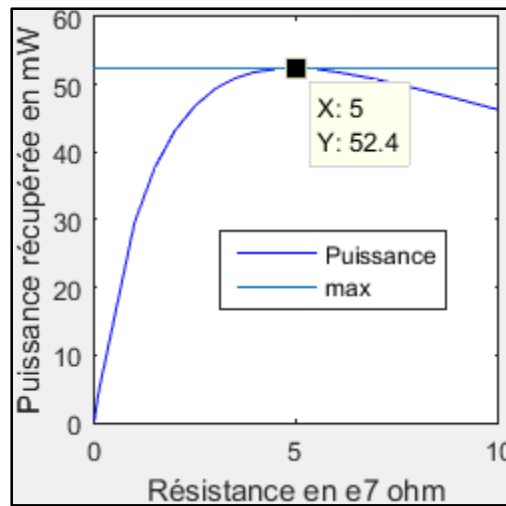


Figure 5.3 Adaptation de charge résistive du prototype

Nous déduisons que pour une charge résistive de $R_c=50 \text{ M}\Omega$, la puissance récupérée est optimale. De ce fait, pour cette charge optimale, nous calculons la puissance récupérée en fonction de la puissance d'entrée dissipée. Le tableau 5.8 résume les résultats.

Tableau 5.8 Puissances récupérées pour différentes valeurs de la puissance dissipée

Puissance entrée (W)	0.1	1	2	3
Puissance récupérée (mW)	0.0583	5.8	23.3	52.4
Rendement (%)	0.0583	0.58	1.165	1.747

5.4 Description des équipements de test

Le circuit de test est composé d'un élément chauffant en caoutchouc de Silicone et d'un circuit imprimé permettant la récupération du courant créé par effet piézoélectrique.

En effet, la source thermique est la chaleur dissipée par effet joule à travers le conducteur ohmique de l'élément chauffant de dimension 30mm*10mm montré dans la figure 5.4.

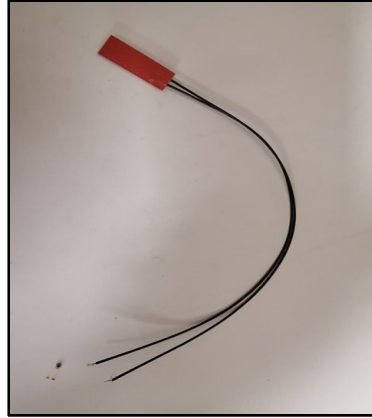


Figure 5.4 Élément chauffant

Par ailleurs, le circuit imprimé contient la charge résistive optimale $R_{optimale}$ de $50\text{M}\Omega$ en série avec une faible résistance de mesure R_{mesure} de $10\text{k}\Omega$. C'est un diviseur de tension permettant l'adaptation de l'impédance de l'oscilloscope généralement inférieure à la résistance de charge optimale du PZT (voir figure 5.5). Avec ce diviseur de tension, la simple lecture de la faible tension U_m aux bornes de la résistance $10\text{k}\Omega$ nous renseigne sur la tension générale U_c aux bornes de la charge totale ainsi que la puissance moyenne dans le circuit selon les équations 5.1 et 5.2 (Debeaux, 2012) :

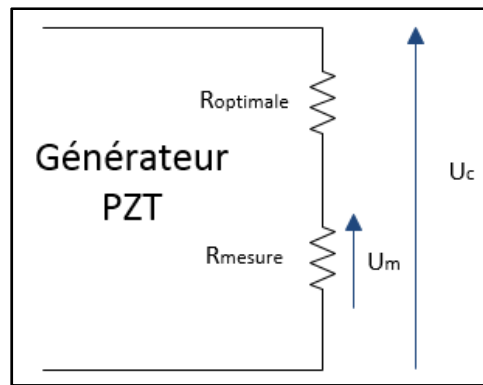


Figure 5.5 Schéma électrique du circuit de mesure

$$I_c = \frac{U_m}{R_{mesure}}, \quad U_c = (R_{mesure} + R_{optimale}) * I_c \quad (5.1)$$

$$P_{avg} = \frac{(R_{mesure} + R_{optimale})}{R_{mesure}^2} * U_m^2 \quad (5.2)$$

La figure 5.6 illustre le circuit décrit précédemment en utilisant la résistance HMC0603JT50M0 de $R_4=50\text{M}\Omega$ et la résistance RNC0603FTD10K0 de $R_5=10\text{K}\Omega$.

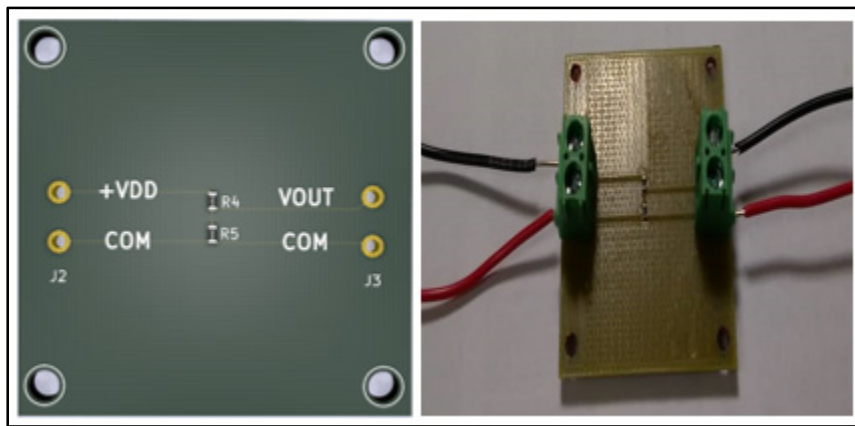


Figure 5.6 Circuit de mesure

Pour alimenter l'élément de chauffant, nous utilisons une source d'alimentation en courant continu de type HP E3631A et, pour récupérer le pic de tension, nous utilisons l'oscilloscope Agilent DSO -X 3034A-350Mhz. La figure 5.7 présente les équipements décrits.

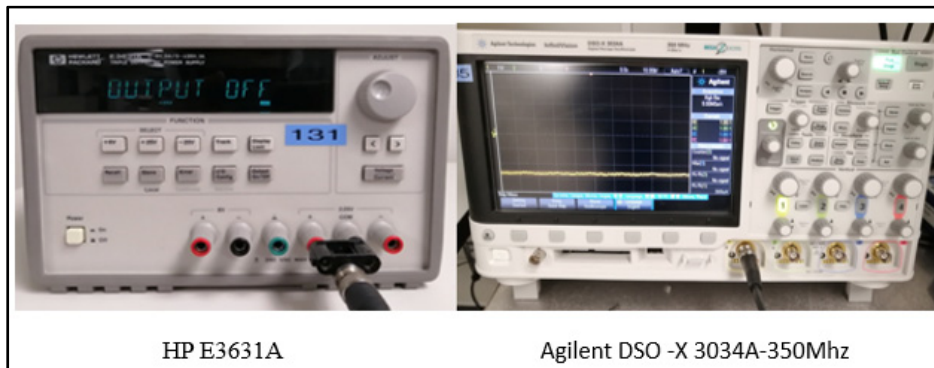


Figure 5.7 Équipements de mesure

5.5 Procédé de fabrication

Afin de construire notre prototype, nous avons utilisé certaines techniques d'usinage pour assurer les bonnes dimensions des composants. En effet, à partir de grandes plaques métalliques de cuivre et d'alliage d'acier AISI 4130, nous avons découpé de petites plaques avec ajustement d'épaisseur. En plus, nous avons découpé un cylindre de cuivre et ajusté le diamètre. Le disque piézoélectrique utilisé possède les bonnes dimensions avec des électrodes sur chaque face. Postérieurement, nous assurons la connexion électrique à l'aide de fils de connexion collés sur le cylindre de compression et la plaque rigide 2 par une pâte d'époxy argent. La figure 5.8 représente les pièces fabriquées.

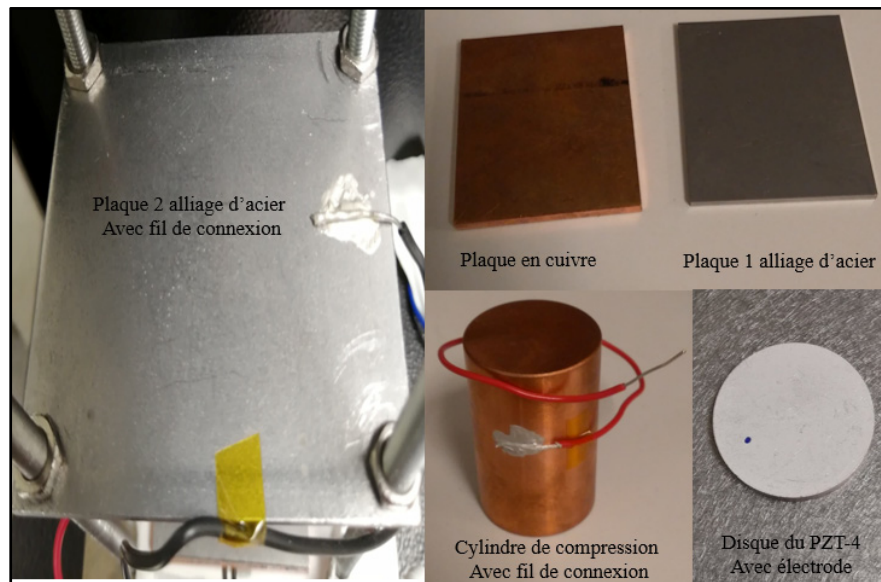


Figure 5.8 Composants de la structure

Pour assurer l'assemblage des pièces et l'encastrement aux extrémités, nous avons adopté une fixation mécanique rigide et démontable à l'aide de vis serrées par des écrous. Le serrage se fait sur la plaque rigide 2 en haut et sur un support métallique fabriqué spécialement pour le serrage en bas comme le montre la figure 5.9.

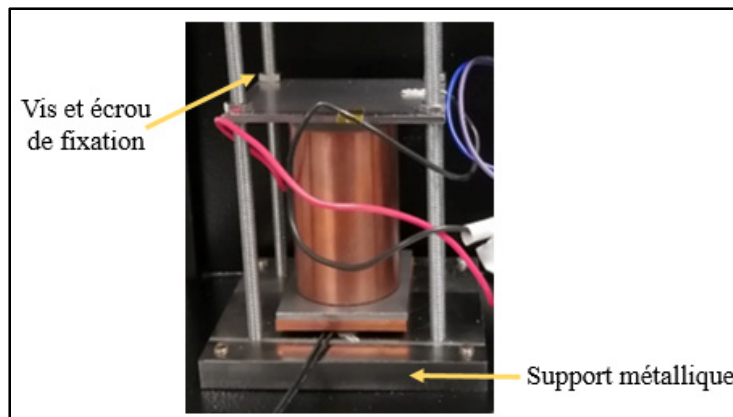


Figure 5.9 Fixation de la structure

Lors des premiers essais, nous nous sommes heurtés à deux obstacles majeurs à savoir des nuisances électriques et électromagnétiques et des vibrations extérieures qui affectent la lecture sur l'oscilloscope. Pour résoudre ces problèmes, nous avons utilisé deux précautions différentes. Premièrement, le prototype est protégé par une boîte métallique jouant le rôle d'une cage de Faraday et les connexions électriques à partir de cette boîte sont assurées par des connecteurs BNC. Deuxièmement, en vue de limiter les vibrations extérieures, le dispositif est mis sur une table pneumatique anti-vibration que nous possédons dans la salle blanche de notre laboratoire. Le banc d'essai final est représenté dans la figure 5.10.

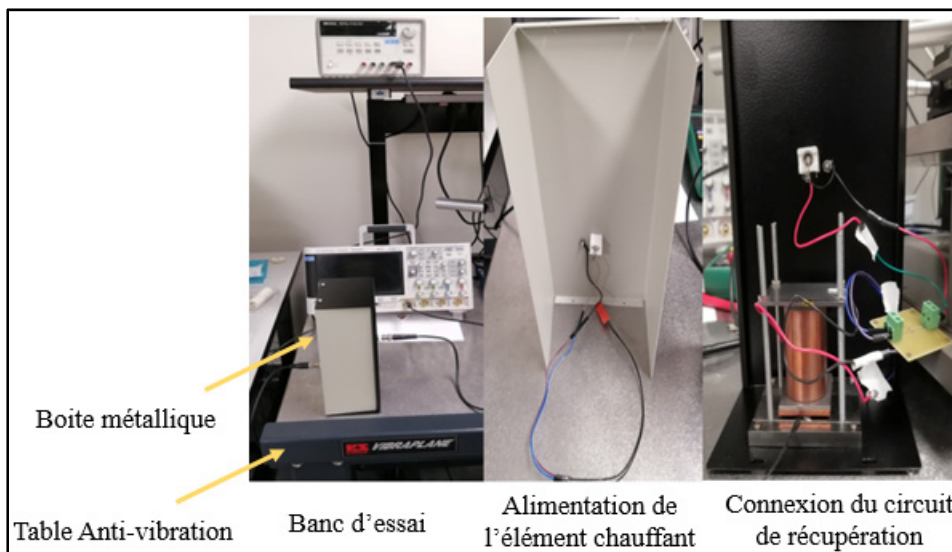


Figure 5.10 Banc d'essai

5.6 Résultats expérimentaux

Pour les différents niveaux de puissances dissipées déterminés à partir de l'alimentation courant continue, la tension du pic de la résistance de mesure est enregistrée par l'oscilloscope. Les résultats obtenus sont présentés dans les figures 5.11, 5.12 et 5.13.

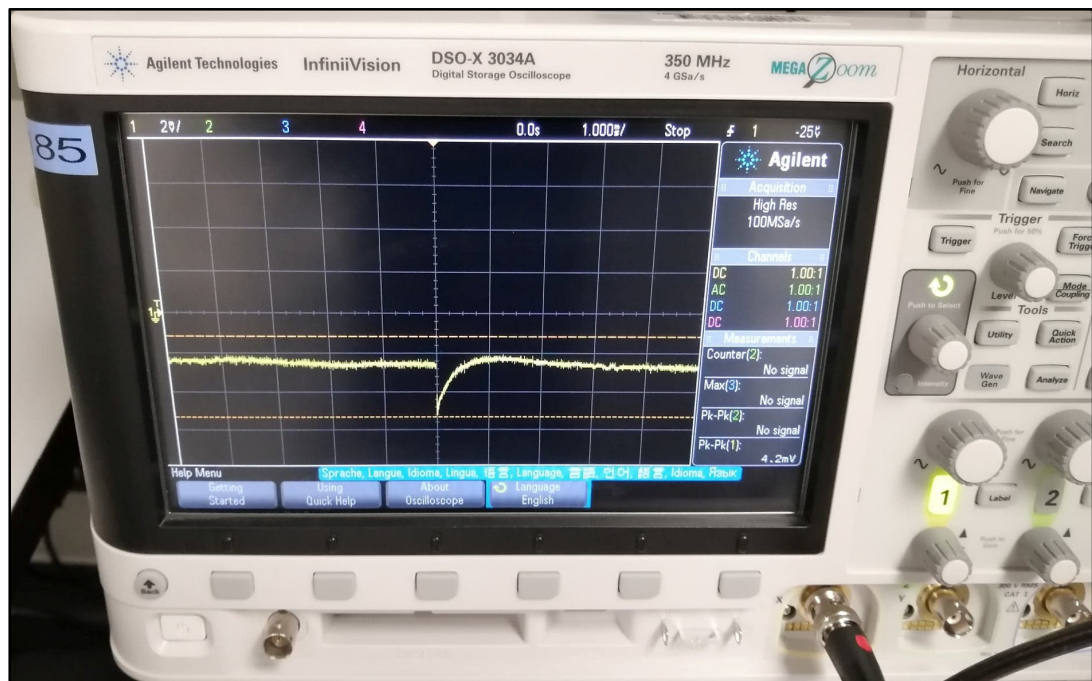


Figure 5.11 Tension mesurée pour 3W de puissance injectée

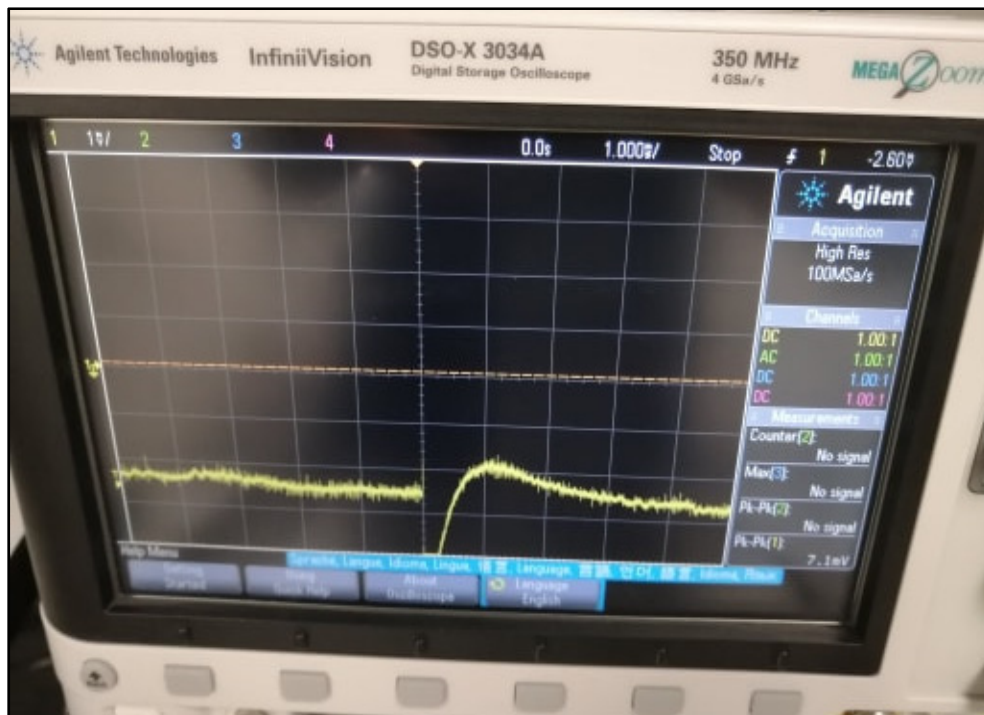


Figure 5.12 Tension mesurée pour 2W de puissance injectée

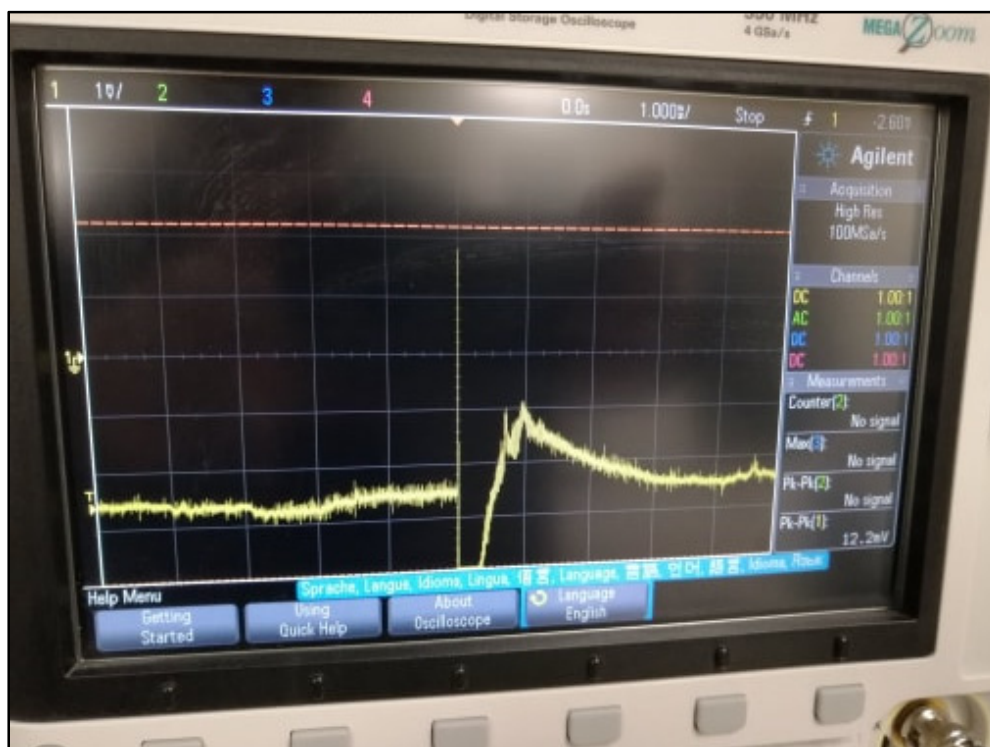


Figure 5.13 Tension mesurée pour 1W de puissance injectée

En utilisant l'équation 5.2, nous calculons la puissance récupérée. Les résultats sont regroupés dans le tableau 5.9.

Tableau 5.9 Puissances expérimentales récupérées

Puissance dissipée (W)	1	2	3
Tension mesurée (mV)	4.2	7.1	12.2
Puissance récupérée (μ W)	9.245	25.205	74.42

5.7 Analyse des résultats

Dans une première approche, nous comparons les résultats expérimentaux aux résultats théoriques dans le tableau 5.10.

Table 5.10 Comparaisons des résultats expérimentaux et théoriques

Puissance dissipée (W)	1	2	3
Puissance récupérée théorique (μ W)	5800	23300	52400
Puissance récupérée expérimentale (μ W)	9.245	25.205	74.42
Proportionnalité (%)	0.159	0.1	0.142

Nous constatons que la puissance théorique est de l'ordre du milliwatt tandis que la puissance expérimentale est de l'ordre du microwatt. De plus, il existe un facteur de proportionnalité moyen de 0.134 (%) entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques. En multipliant les puissances théoriques par le facteur de proportionnalité moyen, nous traçons la courbe de variation des puissances récupérées expérimentales et théoriques corrigées en fonction de la puissance dissipée montrée dans la figure 5.14.

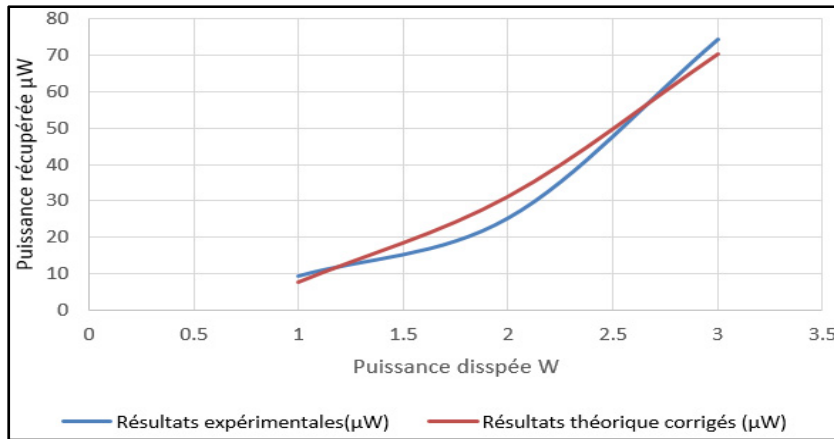


Figure 5.14 Variation des puissances récupérées expérimentales et théoriques corrigées en fonction de la puissance dissipée

La puissance récupérée expérimentale possède une évolution semblable à celle de la puissance récupérée théorique corrigée. De ce fait, nous pouvons dire que les puissances théoriques ont subi une atténuation importante au cours du déroulement expérimental. Dans l'intention d'identifier l'origine de cette atténuation, nous avons calculé les niveaux de température atteints par le cylindre de compression au cours du temps à l'aide d'un thermocouple lors de l'alimentation de l'élément chauffant avec une puissance de 3W fourni par le générateur HP E3631A. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.11.

Tableau 5.11 Température du cylindre de compression en fonction du temps

Temps (m)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T (°C)	24.3	26.3	28	29.4	30.4	31.1	31.7	32.4	32.7	33	33.3	33.4	33.4

Nous remarquons que la température se stabilise à 33.4 (°C). Cette température est largement inférieure à la température du cylindre souhaitable (COMSOL MULTIPHYSIC) de 41.4 (°C). En effet, selon le modèle analytique développé, la température du cylindre atteint 33.4 (°C) pour une puissance dissipée égale à seulement 1.6W.

Pour expliquer cet aperçu, nous pouvons dire, d'une part, que le flux thermique réellement agissant sur la structure est inférieur à 3W. Cette proposition est justifiée par deux faits essentiels. Premièrement, le support métallique utilisé pour la fixation de la structure est en aluminium qui possède une conductivité thermique élevée. Une partie de la chaleur se dissipera à travers le support métallique. Deuxièmement, l'élément chauffant est en caoutchouc de Silicone qui ne facilite pas le transfert thermique. D'autre part, la salle blanche est assez froide ayant une température aux alentours de 22°C avec des courants d'air. Ces conditions sont différentes des conditions standards ($T_A=25^\circ\text{C}$) et provoquent plus de flux de chaleur dissipée par convection. Avec ce niveau inférieur de température et par suite de puissance agissant sur la structure, la réponse du système est atténuée.

Par surcroît, nous devons prendre en considération l'atténuation due à différentes pertes éventuelles à savoir des pertes dans les connexions, des pertes électriques, des pertes mécaniques, des pertes diélectriques et piézoélectriques dues aux changements de la température, et des pertes de mesures. Nous pouvons vérifier l'effet du changement de quelques contraintes dans la simulation multiphysique sur la réponse du système. Ainsi, nous supposons que les contraintes de fixation (encastremets) ne sont pas réparties sur toutes les surfaces des plaques et qu'il existe un problème d'alignement. En plus, nous ajoutons l'effet de la collecte des charges par le côté latéral du cylindre. Finalement, nous additionnons l'effet convectif. Les figures 5.15 et 5.16 montrent les changements établis.

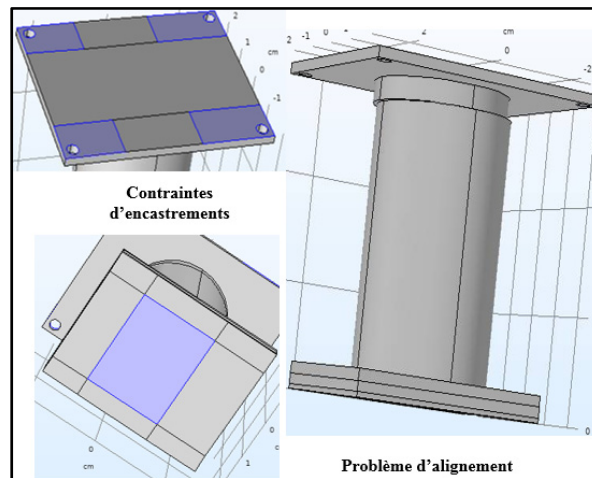


Figure 5.15 Changements mécaniques

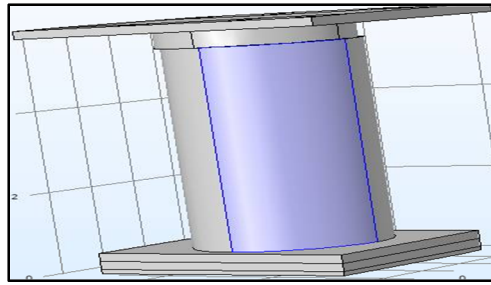


Figure 5.16 Changement électrique

En général, pour une convection forcée, le coefficient de convection thermique ' hc ' est compris entre 30 et 300 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). À titre d'exemple, nous prenons hc égale à 100 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$). Les résultats des simulations multiphysiques pour une puissance dissipée de 1W sont résumés dans le tableau 5.12.

Tableau 5.12 Résultats de l'effet de certains types de pertes

Modifications	Voltage à vide	Puissance récupérée
Aucune	1052.2 V	5.8 mW
Encastremets	505.72 V	1.2 mW
Alignements	487.24 V	1.1 mW
Collecte des charges	307.7 V	0.458 mW
Convection	71.387 V	24.67 μW

Nous constatons que l'effet cumulatif de certaines pertes possibles dégrade énormément le niveau de la puissance récupérée pour atteindre le microwatt. L'effet de la convection forcée prédomine et nous ne récupérons qu'une fraction de (1/20) de la puissance disponible en convection naturelle. De plus, l'effet du relâche de l'encastrement est assez important avec une fraction de (1/5) suivi par l'effet de la connexion latérale pour la collecte des charges avec une fraction de (1/2.5). De ce fait, dans des expériences ultérieures, nous recommandons d'avoir plus de maîtrise sur le coefficient de convection thermique et d'optimiser l'encastrement de la structure. Par ailleurs, il est essentiel d'améliorer les connexions électriques.

5.8 Conclusion

Nous avons fabriqué un prototype du générateur piézoélectrique. La réponse du système est atténuée par rapport aux attentes théoriques. Le banc de mesure est assez sensible. Certains facteurs environnementaux (vibrations, ondes électromagnétiques, salle blanche, température ambiante) ont exigé plus de contraintes sur les équipements de test et ont affecté les conditions souhaitées de l'expérience. Le contrôle des flux thermiques est essentiellement délicat. Nous n'avons pas pu l'assurer même avec une chambre environnementale. Elle exige une température constante sur toute la structure ce qui élimine les dilatations thermiques nécessaires pour la sollicitation mécanique. Cependant, en dépit des différences expérimentales observées, le prototype réalisé a permis de reproduire l'allure de la réponse théorique de la structure. L'amplitude largement atténuée nécessite plus d'optimisation et de contrôle sur les pertes, l'environnement de l'expérience et les équipements utilisés.

CONCLUSION

Le fonctionnement des amplificateurs de puissances est associé à des risques d'emballements thermiques. Une gestion efficace de la chaleur perdue est primordiale. Elle consiste dans le refroidissement du circuit afin d'assurer une température d'opération adéquate et dans la récupération de l'énergie perdue en fonction du respect des valeurs du développement durable.

Pour bien maîtriser cette énergie dissipée, nous avons conçu un système constitué d'un générateur de puissance intégré au sein d'un dissipateur de chaleur. Cette structure assure conjointement la récupération de la chaleur et le refroidissement. Grâce à une efficience économique et un aspect écologique, la transduction piézoélectrique est retenue. Elle permet de transformer des efforts mécaniques résultant d'une dilatation thermique contrainte. Le dispositif présente un bon rendement théorique de 4.48% pour une puissance dissipée de 3W et maintient la température du boîtier souhaitée de 45°C.

Suite à une revue de littérature, nous avons choisi de solliciter le matériau piézoélectrique en mode 3-3. Ce mode possède des propriétés piézoélectriques élevées. En plus, en vue d'un fonctionnement en faibles puissances et températures, la dilatation thermique est adoptée comme transformation thermomécanique.

Subséquentement, nous avons proposé une géométrie basée sur l'adaptation de la structure d'un générateur piézoélectrique d'impulsion pour manœuvrer de faibles puissances et dissiper de la chaleur par convection naturelle. Par suite, nous avons développé un modèle analytique d'estimation. Ce modèle combine les effets thermiques, mécaniques et piézoélectriques qui interagissent dans la structure. Par ailleurs, nous avons réalisé une étude des matériaux pour chaque composant de notre structure et nous avons réalisé un dimensionnement satisfaisant aux contraintes thermiques et mécaniques de ces matériaux. Ultérieurement, nous avons simulé

le modèle analytique établi avec Matlab afin de déterminer les niveaux de température atteints, la puissance récupérée et le rendement théorique.

Dans l'intention d'un aspect plus réaliste, nous avons réalisé une simulation multiphysique à l'aide du logiciel COMSOL MULTIPHYSIC. Les résultats obtenus sont en concordance avec les valeurs théoriques essentiellement sur le plan thermique avec 6% d'erreur relative et sur le plan électrique avec seulement 0.5% d'erreur relative. Une incertitude de l'ordre de 12% dans les contraintes mécaniques est observée. Cependant, elle n'a pas d'effet sur la stabilité de la structure. Elle résulte des conditions de fixation réelles définies sur COMSOL.

Finalement, nous avons fabriqué un prototype expérimental. Le prototype contient certains changements dans les matériaux et les dimensions. Ces changements sont dû essentiellement à des problèmes liés aux fabricants. De ce fait, nous avons réalisé les simulations analytiques et multiphysiques adéquates pour les matériaux disponibles. Les résultats expérimentaux obtenus reflètent la réponse théorique attendue malgré la différence dans l'amplitude de la puissance générée. Cette différence est expliquée par un flux thermique réel à l'entrée largement inférieur au flux désiré.

Notre travail a présenté une nouvelle approche de gestion d'énergie dans la mesure où il permet le couplage entre dissipation de chaleur et régénération de puissance par voie piézoélectrique. En plus, il permet d'utiliser le mode 3-3 pour la récupération d'énergie pour une application de faibles puissances. Le concept est validé par l'expérimentation. En outre, le système conçu possède un rendement théorique prometteur. Cependant, nous pouvons dégager certaines limites. En effet, le rendement expérimental ne peut pas être déterminé vu que la chaleur effectivement insérée dans le système n'est pas quantifiée. En plus, notre étude ne tient pas compte des pertes éventuelles. Ces pertes peuvent être d'origine mécanique, piézoélectrique, diélectrique ou encore électrique. Par ailleurs, notre étude est stationnaire. Elle ne permet pas de conclure sur la fréquence de la génération de puissance.

RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS

En quête de plus de performance et de développement au sein de cet axe de recherche, nous recommandons de :

- Établir une analyse temporelle tenant compte d'une source de chaleur variable afin de déterminer la fréquence de la génération et l'effet du vieillissement des matériaux.
- Quantifier les pertes éventuelles et déterminer la nature des pertes prédominantes.
- Développer des matériaux piézoélectriques thermiquement stables ayant un comportement mécanique linéaire et des contraintes mécaniques maximales admissibles plus élevées.
- Concevoir un système d'exploitation de la puissance récupérée permettant soit le stockage de l'énergie, soit l'alimentation de dispositifs de faibles puissances
- Adapter le système développé pour une intégration dans les circuits en technologie LTCC
- Étudier l'intégration de notre structure avec les systèmes de refroidissements actifs en vue de minimiser l'encombrement

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abramovich, H., Tsikhotsky, E., & Klein, G. (2013). An experimental determination of the maximal allowable stresses for high power piezoelectric generators. *J. Ceram. Sci. Technol*, 4. doi: 10.4416/JCST2013-00006
- ADROIT Market Research. (2019). Global Piezoelectric Materials Market Size 2017 by Product (Ceramics, Polymers, Composites, Others), by Applications (Actuators, Sensors, Motors, Acoustic devices, Generators, SONAR, Transducers, Others), by End-Use (Automotive, Healthcare, Information & Telecom, Consumer Goods, Aerospace & Defense, Others), By Region and Forecast 2018 to 2025. Repéré à <https://www.adroitmarketresearch.com/industry-reports/piezoelectric-materials-market>
- Amokrane, M. (2013). *Étude et mise en œuvre de couplage thermoélectrique en vue de l'intensification d'échange de chaleur par morphing électroactif* (Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Toulouse, France). Repéré à <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002569/>
- Aouina, A. (2017). *Modélisation et simulation thermique des circuits intégrés tridimensionnels* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/2711/>
- APC INTERNATIONAL. PHYSICAL AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES OF APC MATERIALS. Repéré à <https://www.americanpiezo.com/apc-materials/physical-piezoelectric-properties.html>
- AREELIS Technologies, & Laboratoire Universitaire des Sciences Appliquées de Cherbourg. (2015). *DISSIPATION THERMIQUE DANS LES COMPOSANTS/SYSTEMES ELECTRONIQUES* (n° NAE-1214-01-R1A). Normandie AeroEspace. Repéré à https://www.nae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Etude_DissipationThermique.pdf
- Avirovik, D., Kumar, A., Bodnar, R. J., & Priya, S. (2013). Remote light energy harvesting and actuation using shape memory alloy—piezoelectric hybrid transducer. *Smart Materials and Structures*, 22(5), 052001. doi: 10.1088/0964-1726/22/5/052001
- Belhadj, A. (2015). *Analyse expérimentale de la performance thermoélectrique des modules générateurs* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/1708/>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.239

- Berlincourt, D., Krueger, H., & Near, C. (2000). Properties of Morgan electro ceramic ceramics. *Technical Publication TP-226, Morgan Electro Ceramics*.
- Bhatia, B. (2014). *Nanometer-thick oxide films for pyroelectric energy conversion* (Thèse de doctorat, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL). Repéré à <http://hdl.handle.net/2142/50524>
- Boughaleb, J., Arnaud, A., Guiffard, B., Guyomar, D., Seveno, R., Monfray, S., . . . Cottinet, P. J. (2018). Coupling of PZT Thin Films with Bimetallic Strip Heat Engines for Thermal Energy Harvesting. *Sensors (Basel)*, 18(6). doi: 10.3390/s18061859. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29882829>
- Bowen, C. R., Taylor, J., LeBoulbar, E., Zabek, D., Chauhan, A., & Vaish, R. (2014). Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications. *Energy Environ. Sci.*, 7(12), 3836-3856. doi: 10.1039/c4ee01759e
- BP. (2017). *BP Energy outlook edition (2017)*. Repéré à <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2017.pdf>
- Cambridge University Engineering Department. (2003). *Materials data book*.
- Carlioz, L. (2009). *Générateur piézoélectrique à déclenchement thermomagnétique* (Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2009INPG0133/document>
- Cheng, B., & Reece, M. (2001). Stress relaxation and estimation of activation volume in a commercial hard PZT piezoelectric ceramic. *Bulletin of Materials Science*, 24(2), 165-167. doi: 10.1007/BF02710095
- Chin-Chung, C., Tien-Kan, C., Chia-Yuan, T., Chiao-Fang, H., Po-Chen, Y., & Chih-Cheng, C. (2015). A Miniature Magnetic-Piezoelectric Thermal Energy Harvester. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(7), 1-9. doi: 10.1109/tmag.2015.2395385
- Chun, J., Song, H. C., Kang, M. G., Kang, H. B., Kishore, R. A., & Priya, S. (2017). Thermo-Magneto-Electric Generator Arrays for Active Heat Recovery System. *Sci Rep*, 7, 41383. doi: 10.1038/srep41383. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28145516>
- ConductiveX. Thermally Conductive Epoxy High Heat Transfer Adhesive Electrically Insulating Boron Ni-Thermo-Bond95. Repéré à <https://conductivex.com/Thermally-Conductive-Epoxy-High-Heat-Transfer-Adhesive-Electrically-Insulating-Boron-Nitride-Filled>

- Cook-Chennault, K. A., Thambi, N., Bitetto, M. A., & Hameyie, E. B. (2008). Piezoelectric Energy Harvesting. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 28(6), 496-509. doi: 10.1177/0270467608325374
- Davoudi, S. (2012). *Effect of Temperature and Thermal Cycles on PZT Ceramic Performance in Fuel Injector Applications* (Thèse de doctorat, University of Toronto, Toronto, ON). Repéré à <http://hdl.handle.net/1807/33393>
- Debeaux, S. (2012). *Récupération d'énergie issue des déformations de structures aéronautiques à l'aide de matériaux piézoélectriques* (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke., Sherbrooke, QC). Repéré à <http://hdl.handle.net/11143/6169>
- Defosseux, M. (2011). *Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes* (Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2011GRENT090/document>
- Ding, T., Zhu, L., Wang, X.-Q., Chan, K. H., Lu, X., Cheng, Y., & Ho, G. W. (2018). Hybrid Photothermal Pyroelectric and Thermogalvanic Generator for Multisituation Low Grade Heat Harvesting. *Advanced Energy Materials*, 8(33), 1802397. doi: 10.1002/aenm.201802397
- Domenjoud, M. (2012). *Caractérisation des propriétés électro-acoustiques de structures piézoélectriques soumises à une contrainte statique de type électrique ou mécanique* (Thèse de doctorat, Université de Tours, Tours, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2012TOUR4002/document>
- Ducarne, J. (2009). *Modélisation et optimisation de dispositifs non-linéaires d'amortissement de structures par systèmes piézoélectriques commutés* (Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2009CNAM0633/document>
- Elarbi, M. (2018). *Electrothermal design and realization of high efficiency class F power amplifier* (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, QC). Repéré à <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2171>
- EPOXY TECHNOLOGY. (2012). Tech Tip 19 - Understanding Mechanical Properties of Epoxies for FEA. Repéré à https://www.epotek.com/site/technical-material-techtip/index.php?option=com_content&view=article&id=147%3Atech-tip-19-understanding-mechanical-properties-of-epoxies-for-fea
- Faisal, F. (2016). Towards the use of piezoelectric energy harvesters in pavement with passing vehicles. Dans. SPIE. Repéré à <http://hdl.handle.net/1993/32084>

- Favarel, C. B. (2014). *Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité* (Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Pau, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2014PAUU3010/document>
- Forsback, H. (2017). *Reliability of thermal interface materials for power semiconductor devices* (Thèse de doctorat, Aalto University, Espoo, Finlande). Repéré à <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201702242578>
- Fourmigue, A. (2014). *Méthodes de calcul numérique pour la simulation thermique des circuits intégrés* (Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC). Repéré à <https://publications.polymtl.ca/1580/>
- Garbuio, L. (2006). *Etude du phénomène de lubrification électroactive à l'aide d'actionneurs piézoélectriques. Application à la réduction des forces de frottement sec dans un moteur à combustion interne* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00096517>
- Gaussens, C. (2010). *Solutions adhésives et durabilité d'une liaison structurale d'un capteur céramique sur un roulement acier* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2010INPT0112/document>
- Gorbachov, O. (2005). RF Linear Power Amplifier Gain Stabilization over Ambient Temperature. *Microwave Journal*, 48. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/282237294_RF_Linear_Power_Amplifier_Gain_Stabilization_over_Ambient_Temperature
- Grand View Research. (2017). Smart Materials Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Piezoelectric, Shape Memory Alloys, Electrostrictive, Magnetostrictive, Electrochromic), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2018 - 2025. Repéré à <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-materials-market>
- Gusarov, B. (2015). *PVDF polymères piézoélectriques : caractérisation et application pour la récupération d'énergie thermique* (Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2015GREAT091/document>
- Gusarov, B., Gusarova, E., Viala, B., Gimeno, L., Boisseau, S., Cugat, O., . . . Louison, B. (2016). Thermal energy harvesting by piezoelectric PVDF polymer coupled with shape memory alloy. *Sensors and Actuators A: Physical*, 243, 175-181. doi: 10.1016/j.sna.2016.03.026
- Hansson, J., Nilsson, T. M. J., Ye, L., & Liu, J. (2017). Novel nanostructured thermal interface materials: a review. *International Materials Reviews*, 63(1), 22-45. doi: 10.1080/09506608.2017.1301014

- Hansson, J., Zandén, C., Ye, L., & Liu, J. (2016). Review of current progress of thermal interface materials for electronics thermal management applications. Dans *2016 IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO)* (pp. 371-374). doi: 10.1109/NANO.2016.7751383
- Haras, M., & Skotnicki, T. (2018). Thermoelectricity for IoT – A review. *Nano Energy*, 54, 461-476. doi: 10.1016/j.nanoen.2018.10.013
- Holzwarth, U., & Stamm, H. (2002). Mechanical and thermomechanical properties of commercially pure chromium and chromium alloys. *Journal of Nuclear Materials*, 300(2-3), 161-177. doi: 10.1016/S0022-3115(01)00745-0
- Hooker, M. (1998). *Properties of PZT-based piezoelectric ceramics between 2150 and 250 C* (n° NASA/CR-1998-208708). Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19980236888>
- Huen, P., & Daoud, W. A. (2017). Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1295-1302. doi: 10.1016/j.rser.2016.10.042
- Institut Européen du Cuivre. Les propriétés du cuivre. Repéré à <https://copperalliance.fr/le-cuivre/les-proprietes-du-cuivre/>
- Isarn, I., Ramis, X., Ferrando, F., & Serra, A. (2018). Thermoconductive Thermosetting Composites Based on Boron Nitride Fillers and Thiol-Epoxy Matrices. *Polymers (Basel)*, 10(3). doi: 10.3390/polym10030277. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30966312>
- Jeong, J. (2003). *Estimation de la fiabilité de la résistance mécanique du cristal soumis à un choc thermique* (Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Metz, France). Repéré à <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749858/document>
- Kang, M., & Yeatman, E. M. (2016). Thermal Energy Harvesting Using Pyroelectric and Piezoelectric Effect. *Journal of Physics: Conference Series*, 773, 012073. doi: 10.1088/1742-6596/773/1/012073
- Keawboonchuay, C., & Engel, T. G. (2003). Electrical power generation characteristics of piezoelectric generator under quasi-static and dynamic stress conditions. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 50(10), 1377-1382. doi: 10.1109/TUFFC.2003.1244755
- Khalid, K. A. A., Leong, T. J., & Mohamed, K. (2016). Review on thermionic energy converters. *IEEE transactions on electron devices*, 63(6), 2231-2241. doi: 10.1109/TED.2016.2556751

- Kishore, R. A., & Priya, S. (2018). A Review on Low-Grade Thermal Energy Harvesting: Materials, Methods and Devices. *Materials (Basel)*, 11(8). doi: 10.3390/ma11081433. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30110947>
- Kobor, D. (2005). *Synthèse, dopage et caractérisation de monocristaux ferroélectriques type PZN-PT par la méthode du flux* (Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2005ISAL0122/document>
- Kour, R., & Charif, A. (2016). Piezoelectric roads: energy harvesting method using piezoelectric technology. *Innov Energy Res*, 5(1), 1000132. doi: 10.4172/2576-1463.1000132
- Léveillé, E., Mirshekari, G., Monfray, S., Skotnicki, T., & Fréchette, L. (2012). A microfluidic heat engine based on explosive evaporation. *Power MEMS 2012*. Repéré à <http://cap.ee.ic.ac.uk/pdm97/powermems/2012/oral/O6A-1.pdf>
- Li, H., Tian, C., & Deng, Z. D. (2014). Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied Physics Reviews*, 1(4), 041301. doi: 10.1063/1.4900845
- Lingam, D., Parikh, A. R., Huang, J., Jain, A., & Minary-Jolandan, M. (2013). Nano/microscale pyroelectric energy harvesting: challenges and opportunities. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 4(4), 229-245. doi: 10.1080/19475411.2013.872207
- Liu, H., Zhong, J., Lee, C., Lee, S.-W., & Lin, L. (2018). A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews*, 5(4), 041306. doi: 10.1063/1.5074184
- Maurya, D., Yan, Y., & Priya, S. (2015). Piezoelectric Materials for Energy Harvesting. 143-178. doi: 10.1201/b18287-6
- McMaster-CARR. Easy-to-Weld 4130 Alloy Steel with Certification, 6" x 12" x 0.0800". Repéré à <https://www.mcmaster.com/4459T146>
- McMaster-CARR. Super-Conductive 101 Copper Rod, 1-1/4" Diameter. Repéré à <https://www.mcmaster.com/8965k74>
- MICHEL, J.-P., & PITONE, G. (2012). Dilatation et contraintes thermiques dans les solides: application aux bilames. *Bulletin d'union des physiciens*, 106, 77-92. Repéré à <http://www.delta-concept.fr/wp-content/uploads/2012/02/BUP.pdf>

- Monin, T., Tessier-Poirier, A., Léveillé, E., Juneau-Fecteau, A., Skotnicki, T., Formosa, F., . . . Fréchette, L. G. (2016). First experimental demonstration of a Self-Oscillating Fluidic Heat Engine (SOFHE) with piezoelectric power generation. *Journal of Physics: Conference Series*, 773, 012039. doi: 10.1088/1742-6596/773/1/012039
- Montgomery, D. S., Hewitt, C. A., & Carroll, D. L. (2016). Hybrid thermoelectric piezoelectric generator. *Applied Physics Letters*, 108(26), 263901. doi: 10.1063/1.4954770
- Morel, A., Pillonnet, G., Wanderoild, Y., & Badel, A. (2018). Dielectric Losses Considerations for Piezoelectric Energy Harvesting. *Journal of Low Power Electronics*, 14(2), 244-254. doi: 10.1166/jolpe.2018.1562
- Mustofa, Djafar, Z., Syafaruddin, & Piarah, W. H. (2018). A New Hybrid of Photovoltaic-thermoelectric Generator with Hot Mirror as Spectrum Splitter. *Journal of Physical Science*, 29(Supp. 2), 63-75. doi: 10.21315/jps2018.29.s2.6
- Nikhil, S. (2011). *Understanding thermal dissipation and design of a heatsink* (n° SLVA462). Repéré à <http://www.ti.com/lit/an/slva462/slva462.pdf>
- Ong, K. S. (2015). Review of solar, heat pipe and thermoelectric hybrid systems for power generation and heating. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, ctv022. doi: 10.1093/ijlct/ctv022
- Pallapa, M., Mohamed, A., & Chen, A. (2010). Modeling and Simulation of a Piezoelectric Micro-Power Generator. Dans *Proceedings of the COMSOL Conference (Boston)*. Repéré à <https://www.comsol.fr/paper/modeling-and-simulation-of-a-piezoelectric-micro-power-generator-9128>
- Pennelli, G. (2014). Review of nanostructured devices for thermoelectric applications. *Beilstein J Nanotechnol*, 5, 1268-1284. doi: 10.3762/bjnano.5.141. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25247111>
- Percy, S., Knight, C., McGarry, S., Post, A., Moore, T., & Cavanagh, K. (2014). *Thermal energy harvesting for application at MEMS scale*. SpringerLink. doi: 10.1007/978-1-4614-9215-3
- PI Ceramic. (2019). Piezoelectric Materials. Repéré à <https://www.piceramic.com/en/products/piezoelectric-materials/#c15162>
- Pinkston, C. S., & Engel, T. G. (2005). High Energy Piezoelectric Pulse Generator. Dans *2005 IEEE Pulsed Power Conference* (pp. 767-770). doi: 10.1109/PPC.2005.300774
- Prieto Vargas, L. (2015). *Optimisation du rendement thermoélectrique de modules générateurs à pattes segmentées* (Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal,

Montréal, QC). Repéré à https://www.erudit.org/en/theses/polymtl/2015/?page=2&sort_by=author_desc

Puscasu, O. (2014). *Dispositifs innovants pour la récupération de l'énergie thermique* (Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2014ISAL0012/document>

Puscasu, O., Monfray, S., Maître, C., Cottinet, P. J., Rapisarda, D., Savelli, G., . . . Skotnicki, T. (2014). A disruptive technology for thermal to electrical energy conversion. *Microelectronics Journal*, 45(5), 554-558. doi: 10.1016/j.mejo.2013.12.003

Qaiss, A. (2010). *Mise en oeuvre des films polymères cellulaires piézoélectriques* (Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, QC). Repéré à <http://hdl.handle.net/20.500.11794/21537>

Ramadan, K. S., Sameoto, D., & Evoy, S. (2014). A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers. *Smart Materials and Structures*, 23(3), 033001. doi: 10.1088/0964-1726/23/3/033001

Ravindran, S., Huesgen, T., Kroener, M., & Woias, P. (2011). A self-sustaining pyroelectric energy harvester utilizing spatial thermal gradients. Dans *2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference* (pp. 657-660). IEEE.

Ren, J. (2014). The Third Way of Thermal-Electric Conversion beyond Seebeck and Pyroelectric Effects. *arXiv preprint arXiv:1402.3645*. Repéré à <https://arxiv.org/abs/1402.3645>

Rendon hernandez, A. A. (2018). *Design, modeling and evaluation of a thermo-magnetically activated piezoelectric generator* (Thèse de doctorat, Grenoble Alpes, Grenoble, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2018GREAT070/document>

Richardot, T. (2016). *Développement d'un matériau piézoélectrique sans plomb pour la réalisation de sondes ultrasonores haute fréquence* (Thèse de doctorat, Université de Tours, Tours, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2016TOUR4011/document>

Rödig, T., Schönecker, A., & Gerlach, G. (2010). A Survey on Piezoelectric Ceramics for Generator Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 93(4), 901-912. doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03702.x

Sahu, A., Mondloe, D. S., & Upadhyay, S. (2017). A review on thermal properties of epoxy composites as thermal interface material. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 4, 579-586. Repéré à <https://www.semanticscholar.org/paper/A-review-on-thermal-properties-of-epoxy-composites-Sahu-Mondloe/79e4b9634b11c3002238b2f0c93eb498db549952>

- Salamon, N. (2018). *Développement de systèmes de récupération d'énergie thermique* (Thèse de doctorat, Grenoble Alpes, Politechnika Łódzka, Grenoble, France). Repéré à <http://www.theses.fr/2018GREAI011/document>
- Sarvar, F., Whalley, D. C., & Conway, P. P. (2006). Thermal Interface Materials - A Review of the State of the Art. Dans *2006 1st Electronic Systemintegration Technology Conference* (Vol. 2, pp. 1292-1302). doi: 10.1109/ESTC.2006.280178
- Selvan, K. V., & Mohamed Ali, M. S. (2016). Micro-scale energy harvesting devices: Review of methodological performances in the last decade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1035-1047. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.046
- Shin, Y. H., Jung, I., Park, H., Pyeon, J. J., Son, J. G., Koo, C. M., . . . Kang, C. Y. (2018). Mechanical Fatigue Resistance of Piezoelectric PVDF Polymers. *Micromachines (Basel)*, 9(10). doi: 10.3390/mi9100503. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30424436>
- Silva, J. L. (2017). *Pyroelectric Ceramics as Temperature Sensors for Energy System Applications* (Mémoire de maitrise, University of Texas--El Paso, El paso, TX). Repéré à <https://digitalcommons.utep.edu/dissertations/AAI10284080>
- Singh, A. K., Panda, B. P., Mohanty, S., Nayak, S. K., & Gupta, M. K. (2017). Recent Developments on Epoxy-Based Thermally Conductive Adhesives (TCA): A Review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 57(9), 903-934. doi: 10.1080/03602559.2017.1354253
- Smoker, J., Nouh, M., Aldraihem, O., & Baz, A. (2012). Energy harvesting from a standing wave thermoacoustic-piezoelectric resonator. *Journal of Applied Physics*, 111(10), 104901. doi: 10.1063/1.4712630
- Staines, G., Hofmann, H., Dommer, J., Altgilbers, L., & Tkach, Y. (2003). Compact Piezo-Based High Voltage Generator-Part I: Quasi-Static Measurements. *Electromagn. Phenom*, 3, 373-383. Repéré à <http://www.emph.com.ua/11/pdf/staines.pdf>
- Stevenson, T., Martin, D. G., Cowin, P. I., Blumfield, A., Bell, A. J., Comyn, T. P., & Weaver, P. M. (2015). Piezoelectric materials for high temperature transducers and actuators. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(12), 9256-9267. doi: 10.1007/s10854-015-3629-4
- Suh, J.-o., Dillon, R. P., & Tseng, S. (2015). *Thermal interface materials selection and application guidelines: In perspective of Xilinx Virtex-5QV thermal management* (n° 20160001771). National Aeronautics and Space Administration-NASA. Repéré à <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160001771>

- Sultana, A., Alam, M. M., Middya, T. R., & Mandal, D. (2018). A pyroelectric generator as a self-powered temperature sensor for sustainable thermal energy harvesting from waste heat and human body heat. *Applied Energy*, 221, 299-307. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.003
- Sun Lee, W., & Yu, J. (2005). Comparative study of thermally conductive fillers in underfill for the electronic components. *Diamond and Related Materials*, 14(10), 1647-1653. doi: 10.1016/j.diamond.2005.05.008
- Tang, X., Wang, X., Cattley, R., Gu, F., & Ball, A. D. (2018). Energy Harvesting Technologies for Achieving Self-Powered Wireless Sensor Networks in Machine Condition Monitoring: A Review. *Sensors (Basel)*, 18(12). doi: 10.3390/s18124113. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30477176>
- Timmer, M. A. G., de Blok, K., & van der Meer, T. H. (2018). Review on the conversion of thermoacoustic power into electricity. *J Acoust Soc Am*, 143(2), 841. doi: 10.1121/1.5023395. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29495704>
- Todorov, T., Nikolov, N., Todorov, G., & Ralev, Y. (2018). Modelling and Investigation of a Hybrid Thermal Energy Harvester. Dans *MATEC Web of Conferences* (Vol. 148, pp. 12002). EDP Sciences. doi: 10.1051/mateconf/201814812002
- Trioux, E., Monfray, S., & Basrour, S. (2017). Micro thermal energy harvester design optimization. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 27(11), 114001. doi: 10.1088/1361-6439/aa7dfe
- Trolier-McKinstry, S., Zhang, S., Bell, A. J., & Tan, X. (2018). High-Performance Piezoelectric Crystals, Ceramics, and Films. *Annual Review of Materials Research*, 48(1), 191-217. doi: 10.1146/annurev-matsci-070616-124023
- Walubita, L., Sohoulane Djebou, D., Faruk, A., Lee, S., Dessouky, S., & Hu, X. (2018). Prospective of Societal and Environmental Benefits of Piezoelectric Technology in Road Energy Harvesting. *Sustainability*, 10(2), 383. doi: 10.3390/su10020383
- Williams, N. E. (2016). *Efficiency Enhancement of Micro-Thermoelectric Generators via Scaling and Minority Carrier Extraction* (Thèse de doctorat, University of Connecticut Graduate School, Storrs, CT). Repéré à <http://digitalcommons.uconn.edu/dissertations/1037>
- Wolfspeed. (2015). CGHV1J006D. Repéré à <https://www.wolfspeed.com/cghv1j006d>
- Wong, P. K., Kwok, C. T., Man, H. C., & Cheng, F. T. (2012). Laser surface alloying (LSA) of copper for electrical erosion resistance. 288-319. doi: 10.1533/9780857095831.2.288

- Xu, B. (2015). *Si/SiGe thermoelectric generator* (Thèse de doctorat, Imperial College London, Londres, Royaume-Uni). Repéré à <http://hdl.handle.net/10044/1/25750>
- Xu, R., & Kim, S. (2012). Figures of merits of piezoelectric materials in energy harvesters. *Proceedings of the PowerMEMS*, 464-467. Repéré à <http://cap.ee.ic.ac.uk/~pdm97/powermems/2012/poster/P-057.pdf>
- Xu, X., Cao, D., Yang, H., & He, M. (2018). Application of piezoelectric transducer in energy harvesting in pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(4), 388-395. doi: 10.1016/j.ijprt.2017.09.011
- Yang, Z., Zhou, S., Zu, J., & Inman, D. (2018). High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications. *Joule*, 2(4), 642-697. doi: 10.1016/j.joule.2018.03.011
- Zabek, D. A. (2016). *Pyroelectric Structures and Devices for Thermal Energy Harvesting* (Thèse de doctorat, University of Bath, Bath, Royaume-Uni). Repéré à <https://researchportal.bath.ac.uk/en/studentTheses/pyroelectric-structures-and-devices-for-thermal-energy-harvesting>
- Zhang, Z. (2012). *Gestion thermique des composants d'électronique de puissance-Utilisation du diamant CVD* (Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00835346>
- Zhao, D. (2013). Waste thermal energy harvesting from a convection-driven Rijke–Zhao thermo-acoustic-piezo system. *Energy Conversion and Management*, 66, 87-97. doi: 10.1016/j.enconman.2012.09.025
- Zhu, H. (2011). *Thermal energy harvesting from temperature fluctuations* (Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, France). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00698421/document>
- Zhu, L.-F., Liu, Q., Zhang, B.-P., Cen, Z.-Y., Wang, K., Li, J.-j., . . . Li, J.-F. (2018). Temperature independence of piezoelectric properties for high-performance BiFeO₃–BaTiO₃ lead-free piezoelectric ceramics up to 300 °C. *RSC Advances*, 8(62), 35794-35801. doi: 10.1039/c8ra07553k
- Zi, Y., Lin, L., Wang, J., Wang, S., Chen, J., Fan, X., . . . Wang, Z. L. (2015). Triboelectric-pyroelectric-piezoelectric hybrid cell for high-efficiency energy-harvesting and self-powered sensing. *Adv Mater*, 27(14), 2340-2347. doi: 10.1002/adma.201500121. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25727070>

