

***UNIVERSITÉ CHOUAIB DOUKKALI
FACULTÉ DES SCIENCES, EL JADIDA, MAROC.***

EN VUE DE L'OBTENTION DU
***DIPLOME DE MASTER EN Matériaux et Rayonnement, Énergie et
Environnement***

Thème

***Récupération d'énergie à partir des fluctuations thermiques
par l'effet pyroélectrique***

Encadré par :

Pr. ENNAWAOUI CHOUAIB, ENSAJ

Soutenue le : 14 septembre 2023, Par :

REMAIDI MOHAMMED

Devant le jury :

Pr., FSJ.

Pr., FSJ.

Pr., FSJ.

Année Universitaire : 2022-2023.

Table des matières

Table des figures	3
Liste des tableaux	4
I) Notions fondamentales et État de l'art sur la récupération d'énergie	10
A) Introduction	10
B) Caractéristique diélectrique et polarisation	10
1) La polarisation	11
2) Axe diélectrique d'un milieu linéaire homogène anisotrope	12
3) Polarisation d'un milieu linéaire homogène anisotrope	13
4) Transition de phase solide solide	14
a) Transition de phase de type ordre-désordre	14
b) Transition de phase de type displacifs	17
5) Approche de landau	18
a) Hypothèse de landau	19
b) Approche thermodynamique	19
C) État de l'art sur la récupération d'énergie	20
1) Techniques de conversion des ressources énergétiques	20
a) Conversion thermique-électrique	20
1) l'effet thermoélectrique	21
2) Conversion pyroélectrique	22
3) Applications	22
b) Conversion de la lumière en électricité.	23
1) l'effet photoélectrique	23
2) Conversion photovoltaïque	23
3) Applications	24
c) Conversion mécanique-électrique	25
1) Conversion piézoélectrique	25
2) Conversion électrostatique	26
3) Applications	26
2) Les ressources énergétiques ambiantes	27

a)	Ressources électromagnétiques	27
1)	Les rayonnements de hauts fréquence	28
2)	La lumière	28
b)	Les ressources thermiques	29
1)	Les sources de chaleur ambiante	29
2)	La chaleur du corps humain	29
c)	Les ressources mécaniques	30
1)	Les vibrations ambiantes	30
2)	Les ressources du corps humain	30
D)	Zirconate Titanate de Plomb (PZT)	31
1)	la structure perovskite de PZT	32
2)	Diagramme de phase de la solution solide PZT	33
E)	Conclusion	33
II) L'effet pyroélectrique :modèle,simulation et Expérience		35
A)	Introduction et Fenêtre historique	35
B)	Interprétation thermodynamique des cristaux pyroélectriques et principe de la Pyroélectricité.	36
1)	Interprétation thermodynamique des cristaux pyroélectriques	36
2)	Principe de la Pyroélectricité	36
a)	Cas de régime statique	37
b)	Cas de régime dynamique	38
3)	Le coefficient pyroélectrique :expression et ordre de grandeur.	38
a)	Expression du coefficient pyroélectrique	38
b)	Ordre de grandeur	39
C)	Modélisation de l'effet pyroélectrique	40
1)	Potentiel pyroélectrique	41
2)	Courant pyroélectrique	42
3)	Puissance pyroélectrique	43
D)	Simulation sous comsol de l'effet pyroélectrique	44
1)	Description de la simulation	45
2)	Résultats de la simulation	47
a)	Variation temporelle de la température au centre du PZT	47
b)	Variation temporelle du potentiel et l'intensité de courant pyroélectrique	49
c)	Puissance pyroélectrique instantané	51
E)	Expérience de la récupération d'énergie par l'effet pyroélectrique	52
1)	Description des expériences	53
a)	Expérience 1	54

b)	Expérience 2	54
2)	Résultats pratiques et discussion	55
F)	Conclusion	56
III) Application de l'effet pyroélectrique.		57
A)	Introduction	57
B)	Application : détecteur autonome de niveau d'un fluide chaud.	58
1)	Conception du capteur.	58
2)	Simulation de détecteur de niveau.	58
a)	Description de la simulation	59
b)	Résultats de la simulation	60
1)	Impact de h_{air}	61
2)	Effet d'augmentation de la température pour différentes hauteurs	61
2).1	$h_{air}=1(\text{mm})$	61
2).2	$h_{air}=10(\text{mm})$	63
2).3	$h_{air}=100(\text{mm})$	66
3)	Interprétations et conclusion	68
C)	Conclusion et perspectives.	69

Table des figures

I).1 contributions à la polarisation	12
I).2 Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la température	15
I).3 Représentation d'un cycle d'hystérésiste d'une couche mince de $PbZr_{0,57}Ti_{0,43}O_3$ [1]	16
I).4 Illustration de la croissance des domaines au sein d'un monocristal ferro-électrique. [2]	17
I).5 Variation de l'inverse de la permittivité (ε) en relation avec la température (T).	18
I).6 Différentes classes cristallines [3].	18
I).7 Principe de fonctionnement d'un thermogénérateur (TEG)	21
I).8 Illustration de l'effet Seebeck.	21
I).9 Illustration de l'effet Peltier.	22
I).10 Générateur récupérant la chaleur du corps humain alimentant un électroencéphalographie [14].	22
I).11 Principe d'une cellule photovoltaïque et son réseau de caractéristiques électroniques	24
I).12 Vision nocturne	24
I).13 Photo et structure du système Everlast [17]	25

I).14 – Chaussures piézoélectriques développées par le MIT[22]	26
I).15 Genouillère récupérant l'énergie de la marche[23]	27
I).16 Chaussures avec générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur [24]	27
I).17 Spectre électromagnétique [25]	28
I).18 Évolution du champ électrique généré par une antenne WiFi en fonction de la distance (émetteur-récepteur)[26]	29
I).19 Structure perovskite cubique de PZT [32].	32
I).20 Phases quadratique et rhomboédrique de PZT, Les pointillés délimitent la phase cubique de base[33]	32
I).21 Diagramme de phase du PZT[36]	33
II).1 Comportement d'un cristal pyroélectrique, E_c :champ de compensation dû au charges libres, E_{int} :champ dû à la polarisation spontanée, E_{pyro} :champ pyroélectrique[38].	37
II).2 Principe de l'effet pyroélectrique [48]	40
II).3 Modèle de la partie électrique et schéma du circuit	42
II).4 Densité de puissance récupérée en fonction de la résistance	44
II).5 Dimensions et structure de Buzzer	45
II).6 Définition de flux	46
II).7 Modèle et types d'études utiliser.	46
II).8 Sélection de la physique étudie.	47
II).9 Distribution de la température dans le volume à différents instants. 0(s),0.5(s),1 (s).	47
II).10Allures de la température en fonction de tempe	48

II).11	Allures de la température en fonction de tempe : impact hcv	49
II).12	Allures de l'intensité de courrent et le potentiel électrique en fonction de tempe.	50
II).13	Variation de la puissance récupérée en fonction du temps	51
II).14	Variation de la puissance récupérée en fonction du temps : impact de hcv.. .	52
II).15	Schéma de mesure pour l'élément pyroélectrique.	53
II).16	Éléments de l'expérience.	54
II).17	Tension générée par un Buzzer soumis à une source de chaleur en fonction du temps.	55
III).1	Concept du détecteur	58
III).2	Configuration plane de système étudie.	59
III).3	Composants de simulation.	60
III).4	Variation de la température au centre de PZT en fonction du temps pour différent valeurs de h_{air}	62
III).5	Résultats thermique et électrique de Buzzer pour $hair = 1\text{mm}$	63
III).6	Résultats thermique et électrique de Buzzer pour $hair = 10\text{mm}$	64
III).7	Résultats thermique et électrique de Buzzer pour $hair = 100\text{mm}$	67
III).8	Intensité de courant maximale i_p en fonction de h_{air}	68

Liste des tableaux

Dédicaces

C'est avec grande gratitude et sincères mots ,que je dédie ce travail.

— A mes chers parents :

Qui ont sacrifié pour notre réussite et nous ont éclairé le chemin par leurs conseils judicieux,je souhaite que ce travail soit un témoignage de ma profonde affection et reconnaissance de sacrifice de nos parents.

— A ma famille :

Pour tous les soutiens qui m'ont parvenu durant tout ma période d'étude et au-delà des temps

— A mes professeurs :

Qui m'ont tout appris et m'ont éclairé le chemin pendant mon parcours.

— Au professeur M.Monkade :

Pour l'opportunité du master,et l'effort qu'il a fait chaque jour pour accompagner les étudiants .

Remerciement

Je tiens également à remercier vivement mon encadrant de l'ENSAJ, le Pr. Ennawaoui Chouaib, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa collaboration et son soutien, des éléments qui m'ont aidé à accomplir mon stage dans les meilleures conditions.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toute l'équipe du laboratoire de Physique de la Matière Condensée, en particulier le Professeur MONKADE MOHAMED, pour sa remarquable qualité tant sur le plan humain que scientifique. Nous tenons également à remercier tous les autres professeurs qui ont contribué à notre formation.

Enfin, je remercie les honorables membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail, ainsi que toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Ce manuscrit s'inscrit dans le contexte de la récupération d'énergie par le biais de micro-générateurs autonomes. Nous avons examiné la possibilité de capter l'énergie thermique en régime transitoire en exploitant l'effet pyroélectrique.

Dans cette démarche, nous avons développé deux simulations qui illustrent les principales méthodes pour récupérer de l'énergie en utilisant des céramiques pyroélectriques, notamment celles désignées sous le nom de "Buzzer". La première simulation vise à récupérer un flux variable dans l'espace et dans le temps. Ses objectifs sont d'améliorer notre compréhension de l'effet étudié, de définir le rôle des paramètres (intrinsèques et extrinsèques), et d'obtenir une estimation de l'ordre de grandeur des propriétés pyroélectriques.

En outre, ce travail nous a permis d'appliquer cet effet à une autre technique fondée sur la convection de Rayleigh-Bénard. Cela implique le chauffage de l'air par un fluide maintenu à une température constante à l'intérieur d'un réservoir, le but étant de déterminer la distance qui sépare la source de chaleur du matériau pyroélectrique.

Introduction générale

L'énergie disponible dans l'environnement (énergie solaire, vibratoire, thermique, etc.) peut alimenter plusieurs types de capteurs autonomes, lesquels, à leur tour, transmettent des informations à d'autres capteurs ou vers une unité de traitement

Les capteurs autonomes se distinguent par leur structure simple et leur faible consommation d'énergie, ce qui leur permet de maintenir un équilibre énergétique avec les faibles niveaux d'énergie collectée. Leurs principales applications sont les suivantes :

- L'optimisation des réseaux et des systèmes de production intelligents.
- La détection de dysfonctionnements au cœur des systèmes.
- Le suivi des variables environnementales.
- La cartographie dynamique de l'évolution des variables.

Concernant les mesures, on distingue plusieurs types de capteurs : capteurs de pression, capteurs d'effort, capteurs de température, capteurs de déplacement, capteurs de niveau, capteurs de concentration, capteurs de vibration, etc. Les matériaux couramment utilisés sont les matériaux à mémoire de forme (certains laitons), les polymères électron-actifs, les céramiques, etc., qui offrent une fiabilité et un prix acceptables pour l'utilisateur.

En général, tous les matériaux subissent une légère variation de leurs dimensions lorsqu'ils sont soumis à des contraintes extérieures telles qu'un champ électrique et/ou magnétique, un champ de contraintes mécaniques, une variation de température, etc. En particulier, les structures cristallines non-centrosymétriques de certains cristaux ioniques réagissent par un changement de polarisation électrique interne de l'édifice, provoquant différents effets liés à la distribution de charge. On définit ainsi une famille de matériaux dits polaires.

Il s'agit des cristaux dont le réseau cristallin est composé, d'une part, d'ions (positifs et négatifs) et, d'autre part, le centre de charge positif ne coïncide pas avec celui des charges négatives (non-centrosymétrique). Comme la variation de polarisation entraîne des changements dans différentes propriétés physiques (structure électronique, conductivité électrique et thermique, variation de température, elasticité, etc.), cela se traduit par l'utilisation de matériaux polaires dans diverses applications humaines.

Grâce aux développements dans le domaine de l'électronique, certains dispositifs tels que les capteurs portables (utilisés dans les systèmes de surveillance des bâtiments, les

GPS, etc.) sont devenus très utiles jusqu'à aujourd'hui. L'alimentation de ces composants nécessite de l'espace et des ressources financières, et la solution classique a longtemps été l'utilisation de batteries électrochimiques. Cette solution a semblé être la meilleure ces dernières années, mais elle reste très limitée en raison de la durée de vie limitée des batteries et des risques potentiels.

Afin de réduire l'utilisation de batteries et d'assurer l'autonomie énergétique de ces systèmes, la conversion de l'énergie ambiante disponible dans l'environnement en source d'électricité s'avère être une solution optimale, permettant aux dispositifs électroniques de fonctionner indéfiniment. Dans la vie quotidienne, la transformation d'énergie à partir de différentes sources s'accompagne toujours de pertes, en particulier dans la conversion des sources thermiques. Cette dernière est disponible partout, car tous les systèmes thermiques dissipent et/ou libèrent une partie de l'énergie reçue au cours de leurs différentes phases de fonctionnement. Plutôt que de laisser cette énergie être perdue, il est préférable de la récupérer pour créer une source d'énergie électrique gratuite. De plus, la récupération de ce type d'énergie est relativement simple et permet d'obtenir des niveaux de puissance récupérée de l'ordre de plusieurs dizaines de milliwatts (mw)

Notions fondamentales et État de l'art sur la récupération d'énergie

A) Introduction

Les effets ferroélectrique, piézoélectrique et pyroélectrique (utilisés aujourd’hui dans la plupart des détecteurs) ont de nombreuses applications dans le monde moderne. Le point commun entre ces trois effets réside dans la dépendance de la polarisation du matériau aux contraintes extérieures. Cette variation est liée à un changement de la structure électronique d'une part, et d'autre part à une modification de la structure cristalline pour maintenir l'équilibre.

Ce chapitre comprend trois sections principales, qui constituent une étude bibliographique. Le but de cette étude est de se familiariser avec les différents phénomènes contribuant à l'effet pyroélectrique, de présenter les diverses méthodes de récupération d'énergie qui en découlent, et de définir les matériaux utilisés pour la suite de notre étude.

B) Caractéristique diélectrique et polarisation

Un milieu solide réel comprend à la fois des porteurs de charge liés et des porteurs de charges libres, tels que des électrons, des ions et des impuretés, qui peuvent se déplacer sous l'influence d'un champ extérieur et créer des moments dipolaires permanents lorsque le centre de masse des charges nucléaires ne correspond pas à celui du nuage électronique. On parle alors de milieux polaires (ou diélectriques).

Même si un système est électriquement neutre à l'échelle macroscopique, à l'échelle microscopique, la centrosymétrie des charges intérieures n'est pas forcément présente, et

des dipôles électrostatiques peuvent exister, soit spontanément soit induits par l'application d'un champ électrique. Ce caractère est dû à la nature de la liaison chimique présente dans certains types de cristaux, qui est à la fois covalente et ionique, et qui donne naissance à des propriétés physiques très riches.(piézo-électricité et pyro-électricité vue dans $BaTiO_3$ et le PZT par exemple).

Les caractéristiques d'un solide diélectrique sont liées à sa permittivité, sa structure et à ses constituants élémentaires. Ce type de matériau ne peut établir aucun courant généré par des charges intrinsèques en réponse à une contrainte extérieure s'il est parfait. Ces charges ne sont susceptibles de se déplacer que sur de courtes distances sous l'influence de cette contrainte, d'où l'apparition de dipôles. Pour un nombre macroscopique N de dipôles occupant un volume V , on définit la polarisation comme le moment dipolaire moyen total par unité de volume :

$$\vec{P} = \frac{N}{V} \cdot \langle \vec{p} \rangle \quad (\text{I}.1)$$

En distingue deux catégories principales des milieux polaires :

- Les milieux ferroélectriques présentent une polarisation spontanée non nulle pour des températures T_c inférieures à une température critique. Cependant, pour $T > T_c$, l'agitation thermique l'emporte en général, ce qui induit un comportement paraélectrique. Cela s'applique également à certains composés de la famille des pérovskites, tels que $BaTiO_3$ ou $PbTiO_3$.
- Les milieux para-électriques se caractérisent par une polarisation spontanée nulle en raison de l'agitation thermique, qui désordonne les dipôles. Cependant, sous l'effet d'un champ électrique extérieur, les moments dipolaires ont tendance à s'aligner dans le sens du champ électrique. C'est le cas, par exemple, de l'eau pure.

1) La polarisation

La polarisation d'un matériau ferroélectrique n'est pas uniquement liée à l'existence de moments dipolaires permanents, mais aussi aux électrons, aux ions et aux charges qui peuvent se fixer sur les surfaces. Ainsi, on distingue plusieurs contributions :

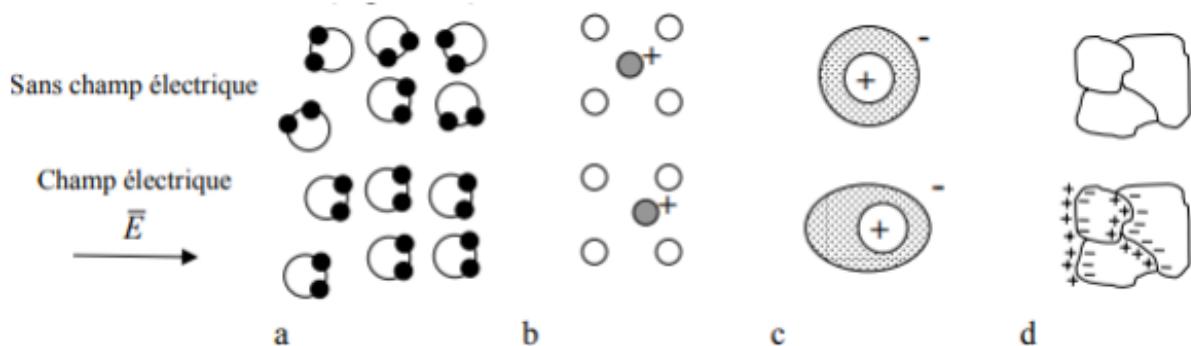


FIGURE I).1 – contributions à la polarisation

- (a) Polarisation d'orientation : Lorsque les molécules du diélectrique possèdent un moment dipolaire, les dipôles répartis au hasard tendent à s'orienter sous l'effet d'un couple dans la direction du champ électrique, ce qui entraîne l'apparition d'une polarisation dite induite.
- (c) Polarisation de déformation : Elle est le résultat, d'une part, de la distribution des trajectoires électroniques et, d'autre part, des déplacements des ions de leur position d'équilibre.
- (b et d) Polarisation par charge d'espace : Dans certains solides, il peut exister des charges d'espace dues à des électrons ou des ions (par exemple, des impuretés ou des défauts) qui ne sont pas complètement libres de se déplacer pour atteindre les armatures du matériau. La présence de ces charges d'espace entraîne une polarisation de déplacement qui est expérimentalement impossible à séparer des autres mécanismes de polarisation. Elle apparaît en particulier dans les matériaux ferroélectriques à des températures élevées et se manifeste par une augmentation significative de la permittivité diélectrique.

2) Axe diélectrique d'un milieu linéaire homogène anisotrope

Dans la plupart des cristaux, on peut généralement supposer que les équations de liaison restent linéaires. Cependant, lorsqu'on considère un trièdre trirectangle de référence pour un diélectrique anisotrope, les relations deviennent plus complexes, car le champ électrique et le déplacement ne sont en général pas parallèles.

$$\overrightarrow{D(r,t)} = \varepsilon(r,T) \cdot \overrightarrow{E(r,t)} \quad (\text{I}).2)$$

- $\varepsilon(r,T)$:Le tenseur permittivité diélectrique qui ne dépend que de la position et la température, Mais pour un milieu homogène $\varepsilon(r,T)=\varepsilon(T)$

diélectrique ne dépend que de la température.
en notation tensorielle l'équation(1.2) s'écrit :

$$D_i = \sum_j \varepsilon_{i,j} \cdot E_i \quad (\text{I}.3)$$

S'il existe une direction particulière (x) du milieu pour la quelle les vecteurs D et E sont parallèles, on peut écrire la relation vectorielle :

$$D_x = \varepsilon_x \cdot E_x \quad (\text{I}.4)$$

- $E_x = (E_{1x}, E_{2x}, E_{3x})$:Le champ électrique dans la direction (x)
- ε_x :la permittivité diélectrique dans la même direction

Avec les deux autres direction (y,z) on trouvait de même les deux autres racines suivants

$$D_y = \varepsilon_y \cdot E_y \quad (\text{I}.5)$$

$$D_z = \varepsilon_z \cdot E_z \quad (\text{I}.6)$$

On peut donc dire qu'il existe, dans un milieu diélectrique anisotrope, un système d'axes de référence particulier, par rapport auquel les relations entre les composantes du champ électrique et du déplacement électrique peuvent être exprimées de manière simplifiée.

$$D_{1x} = \varepsilon_x \cdot E_{1x} \quad (\text{I}.7)$$

$$D_{2y} = \varepsilon_y \cdot E_{2y} \quad (\text{I}.8)$$

$$D_{3z} = \varepsilon_z \cdot E_{3z} \quad (\text{I}.9)$$

- ces trois axes x,y,z s'appellent les axes de symétrie électrique du milieu
- les trois coefficient $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)$ sont les permittivités diélectrique principales du milieu

3) Polarisation d'un milieu linéaire homogène anisotrope

Le vecteur excitation électrique peut encore s'écrire

$$\overrightarrow{D(r,t)} = \varepsilon_0 \cdot \overrightarrow{E(r,t)} + \overrightarrow{P(r,t)} \quad (\text{I}.10)$$

Alors

$$\overrightarrow{P(r,t)} = \overrightarrow{D(r,t)} - \varepsilon_0 \cdot \overrightarrow{E(r,t)} \quad (\text{I}.11)$$

Si en considère les axes de symétrie électrique Les vecteurs polarisation électrique ont aussi la même forme donné par :

$$P_{1x} = (\varepsilon_x - \varepsilon_0).E_{1x} \quad (I).12)$$

$$P_{2y} = (\varepsilon_y - \varepsilon_0).E_{2y} \quad (I).13)$$

$$P_{3z} = (\varepsilon_z - \varepsilon_0).E_{3z} \quad (I).14)$$

Pour la direction z on écrit :

$$P_{3z} = \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_0} - 1\right).\varepsilon_0 E_{3z} \quad (I).15)$$

Ou bien

$$\frac{P_{3z}}{\varepsilon_0 E_{3z}} = \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_0} - 1\right) \quad (I).16)$$

Le rapport entre la densité de charge liée et la densité de charge libre définie alors la susceptibilité électrique relative suivant la direction z, ce nombre nous donne une idée sur la quantité des charges libres et liées dans un diélectrique et on peut donc écrire :

$$P_{3z} = \chi_{rz} \cdot \varepsilon_0 E_{3z} \quad (I).17)$$

Cela implique que χ_{rz} est toujours positif, puisque le couple créé par le champ électrique extérieur oriente toujours les dipôles dans la direction du champ. .

4) Transition de phase solide solide

Dans les transitions de phase structurales le mécanisme est lié à un changement de la structure cristalline(symétrie), c'est à dire à un changement des positions atomiques dans le cristal et On distingue deux catégories des Transitions :

- l'une dit de type ordre-désordre
- l'autre est dit de displacifs

a) Transition de phase de type ordre-désordre

Les cellules élémentaires ont toujours un moment dipolaire non nul, quelle que soit la température. La polarisation ferroélectrique résulte de la transition structurelle, passant d'une phase para-électrique à haute température ($T > T_c$), où la symétrie est élevée, à une phase ferroélectrique à basse température ($T < T_c$), où la symétrie est faible. Cette transition de phase s'effectue de manière discontinue, sans coexistence des deux phases,

et est du second ordre. De plus, ces matériaux se comportent comme d'excellents isolants avec une forte constante diélectrique. Leur permittivité relative varie en fonction de la température selon la relation de Curie-Weiss.

$$\varepsilon_r = \frac{C}{T - T_c} \quad (\text{I}).18)$$

avec

C :la constante de Curie

T_c :la température de Curie

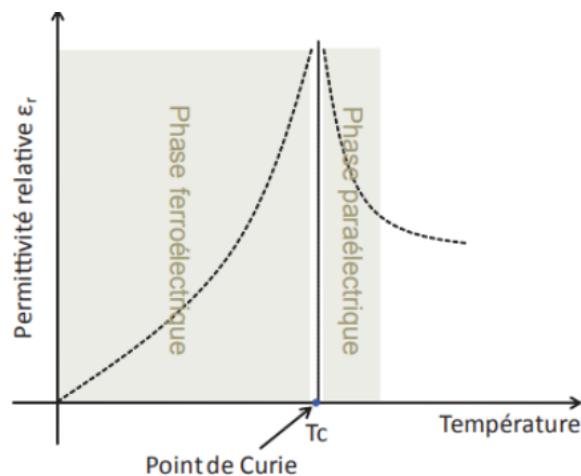


FIGURE I).2 – Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la température

Dans la phase para-électrique, si aucune contrainte n'est appliquée, les domaines sont orientés aléatoirement et la polarisation globale est nulle, au contraire Si on applique une contrainte (Champ électrique), les domaines tendent à s'orienter dans le sens de celle-ci

si la contrainte est trop faible pour faire basculer les domaines, seule la polarisation électronique participe à la variation de polarisation qui croît linéairement [2] (I).3 AB) selon la relation :

$$\vec{p} = \varepsilon_0 \cdot \chi_r \cdot \vec{E} \quad (\text{I}.19)$$

χ est la susceptibilité relative du matériau ferroélectrique

$\varepsilon_0 = 8,854188 * 10^{-12} F * m^{-1}$ est la permittivité du vide

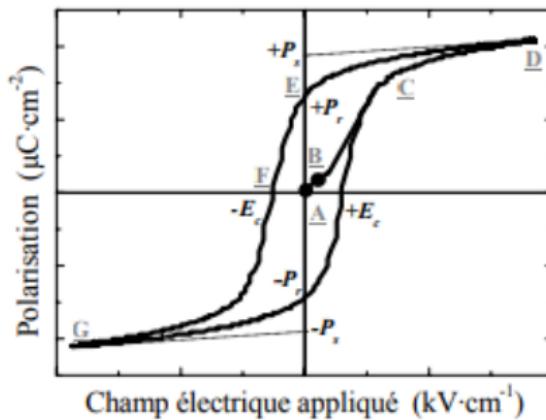


FIGURE I).3 – Représentation d'un cycle d'hystérésiste d'une couche mince de $\text{PbZr}_{0,57}\text{Ti}_{0,43}\text{O}_3$ [1]

Le matériau se comporte alors comme un diélectrique classique [2]. En augmentant la contrainte, le basculement de la polarisation spontanée devient possible. La polarisation globale croît fortement et de manière non linéaire (voir Figure I).3, segment BC) [1]. Lorsque tous les domaines sont alignés, le matériau ferroélectrique revient à un comportement linéaire, et la polarisation atteint alors sa saturation à $+P_s$ (voir Figure I).3, point D). En réduisant la contrainte à zéro, les domaines restent orientés, et le matériau conserve une polarisation appelée polarisation rémanente $+P_r$ (voir Figure I).3, point E).

Dans la phase ferroélectrique, le processus commence par la nucléation des domaines (voir Figure I).4a). Ils croissent ensuite dans la direction de la contrainte appliquée (voir Figure I).4b) [2]. Lorsque les domaines atteignent les deux surfaces du matériau, les parois des domaines se déplacent (voir Figure I).4) jusqu'à obtenir une polarisation totale nulle pour une contrainte appelée contrainte coercitive (voir Figure I).3, point F). Les parois des domaines continuent à se déplacer jusqu'à ce que les domaines se rejoignent et forment un unique domaine (voir Figure I).4), où la polarisation a complètement basculé (coalescence des domaines). Lorsque toute la polarisation spontanée de tous les domaines a basculé à

l'intérieur du matériau, la polarisation totale retourne à sa saturation à P_s (voir Figure I).3, point G). La polarisation décrit ainsi un cycle d'hystérésis.

En appliquant une contrainte opposée, de nouveaux domaines se forment à la surface du matériau.

- (a) nucléation de nouveaux domaines
- (b) croissance à travers l'épaisseur du matériau
- (c) expansion latérale des domaines et nucléation de nouveaux domaines
- (d) coalescence des domaines

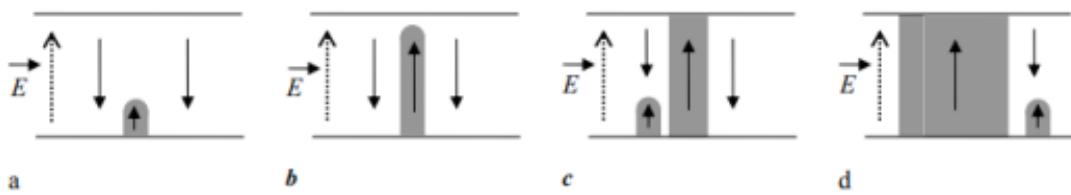


FIGURE I).4 – Illustration de la croissance des domaines au sein d'un monocristal ferroélectrique. [2]

b) Transition de phase de type displacifs

L'intensité du moment dipolaire porté par les domaines diminue lorsque la température augmente pour devenir nulle lorsque $T \geq T_{C0}$. Dans ce cas, le placement des ions dans la maille cristallographique est à l'origine de l'existence ou non d'un moment dipolaire. En effet, aux hautes températures, la cellule élémentaire est centrosymétrique, et aucun moment dipolaire ne peut exister. Lorsque l'on diminue la température, un mode mou pour les vibrations optiques transverses apparaît, comme mentionné dans [3], ce qui déstabilise l'édifice cristallin en annulant les forces de cohésion. Pour stabiliser le cristal, celui-ci doit changer de phase cristallographique, ce qui se traduit par la perte de la centrosymétrie et l'apparition d'un moment dipolaire. La transition est donc du premier ordre, car les deux phases peuvent coexister simultanément. Ces cristaux sont également qualifiés de pyroélectriques. En général, ils présentent une température (notée T_{C0}) au-dessus de laquelle la polarisation est nulle, et leur phase est souvent qualifiée de phase para-électrique.

Expérimentalement Il est possible de distinguer les deux types ferroélectriques en reportant l'inverse de la permittivité statique du matériau en fonction de la température T .

- I).5 a : cas d'un ferroélectrique présentant une transition ferro – para-électrique du premier ordre.

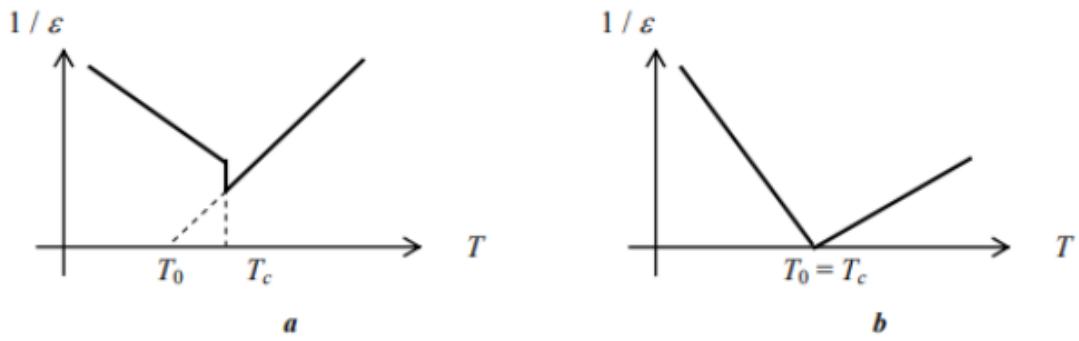


FIGURE I).5 – Variation de l'inverse de la permittivité (ϵ) en relation avec la température (T).

— I).5 b : cas d'une transition du second ordre.

5) Approche de Landau

Un matériau polaire ferroélectrique est à la fois piézoélectrique et pyroélectrique. Pour le décrire d'un point de vue thermodynamique, il faut inclure des variables de contraintes électriques, mécaniques, et éventuellement magnétiques. Le système est ainsi trivalent, et les couples de variables d'état conjuguées sont : $[(T, S), (E, D), (\sigma, \epsilon), (H, M)]$.

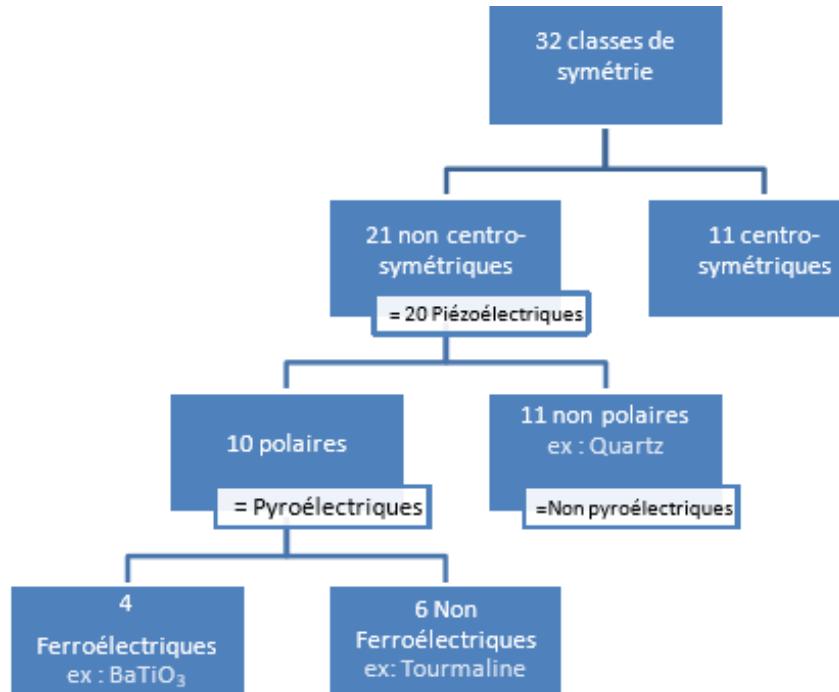


FIGURE I).6 – Différentes classes cristallines [3].

a) Hypothèse de landau

Lorsqu'il s'agit de décrire les propriétés dynamiques des matériaux ferroélectriques, il n'existe pas vraiment de théorie. Il est par exemple assez compliqué de décrire un cycle en tenant compte des propriétés des cellules élémentaires, des parois de domaines, des défauts, du caractère mono ou polycristallin ... ect On tente alors de trouver une fonction empirique qui rende au mieux compte des propriétés observées. Là encore, les effets microscopiques à l'origine des phénomènes observés ne sont pas mis en évidence.

Hypothèse

- Pour tous transition de phase solide-solide existe un paramètre dit d'ordre
- l'énergie libre(et tout variables d'états) est une fonction de paramètre d'ordre
- au voisinage de T_c (pour les transitions ordre désordre) et T_{C0} (pour les transitions displacifs) $F = F_{reg} + F_{sigulie} = F_{reg} + Cte$ et développable en série de paramètre d'ordre P

$$F_{reg}(T, P) = F(T, 0) + \sum_{n=1}^N \frac{1}{2n} \cdot a_{2n} \cdot P^{2n} \quad (\text{I}.20)$$

b) Approche thermodynamique

À partir du premier principe, l'énergie interne du système s'écrit :

$$dU = T.dS + \sigma^{kl}.de_{kl} + E_i.dP^i + H_i.dM^i \quad (\text{I}.21)$$

On peut aussi exprimer son enthalpie libre (énergie de Gibbs) qui joue le rôle de potentiel thermodynamique , introduit par la somme implicite sur les indices répétés en utilisant la convention d'Einstein.

$$dG = S.dT + P_i.dE + e^{kl}d\sigma_{kl} + M_i.dH^i \quad (\text{I}.22)$$

les différentielles des variables extensives peuvent être exprimer à l'aide des variations des variables intensives. On a :

$$dS = \frac{C}{T}.dT + P_i.dE + \alpha^{kl}d\sigma_{kl} + m_i.dH^i \quad (\text{I}.23)$$

$$dP = p_m.dT + \varepsilon_{kl}.dE + d_{kl}d\sigma_{kl} + M\beta_{mi}.dH^i \quad (\text{I}.24)$$

$$dM = mdT + \beta_{mi} \cdot dE^i + \mu^{kl} d\sigma_{kl} + \chi_i \cdot dH^i \quad (\text{I}).25$$

$$de = \alpha_{mn} \cdot dT + d_{mn} \cdot dE + s^{kl} d\sigma_{kl} + \mu_i \cdot dH^i \quad (\text{I}).26$$

avec

C : Capacité thermique p_m : Vecteur pyroélectrique.

m_i : Vecteur pyromagnétique. α^{kl} : Tenseur thermomécanique.

ε : Tenseur de permittivité β : Tenseur magnéto-diélectrique.

d : Tenseur piézoélectrique. μ : Tenseur piézomagnétique.

s : Tenseur élastique.

C) État de l'art sur la récupération d'énergie

L'énergie inutilisable existe sous plusieurs formes telles que l'activité humaine, dans les véhicules, dans les machines industrielles, les rayonnements solaires...etc,dans le cadre de l'autonomie des appareils électronique de faible puissance , Plusieurs sources d'énergie ambiante sont en profit afin d'être récupérées et converties en électricité comme l'énergie thermique ([4],[5], [6]), l'énergie lumineuse ([7], [8]), l'énergie mécanique ([9], [10]) et l'énergie magnétique ([11], [25]). le concept général de la récupération d'énergie se base sur la conversion d'énergie de l'environnement qui est sous une forme inutilisable ou gaspillée en une forme plus utile.de même la forme électrique de l'énergie est la plus utile dans les applications modernes alors La récupération d'énergie vise à se servir de l'énergie ambiante pour alimenter les systèmes électriques et stocker éventuellement l'énergie quand elle n'est pas nécessaire.

1) Techniques de conversion des ressources énergétiques

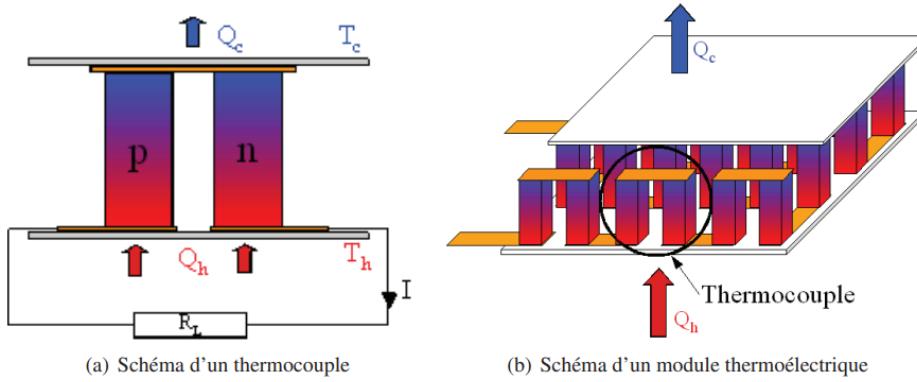
Dans cette section, nous allons essayer de présenter les différentes techniques de conversion d'énergie ambiante, ainsi que des exemples de leurs applications.

a) Conversion thermique-électrique

L'énergie thermique est une forme d'énergie presque universellement disponible, et en particulier, elle est souvent présente sous forme d'énergie gaspillée, car tous les dispositifs de conversion d'énergie perdent un pourcentage de cette dernière. La récupération de l'énergie thermique, d'une part, assure l'autonomie de certains composants et, d'autre part, modifie le rendement de ces dispositifs. Les techniques les plus universelles de récupération d'énergie thermique sont la thermoélectricité et la pyroélectricité.

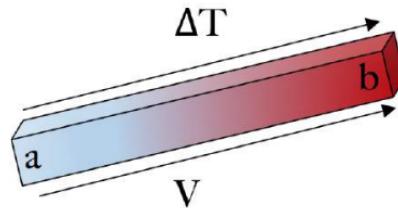
1) l'effet thermoélectrique :

La thermoélectricité est la capacité de conversion du flux de chaleur thermique en un courant électrique, ce type de générateurs connaît un grand intérêt ces dernières années, en raison de leur avantage tels que l'absence de bruit, la haute fiabilité, ainsi que la capacité d'utiliser la chaleur perdue.



les phénomènes thermoélectriques ont globalement deux effets : l'effet Seebeck et l'effet Peltier [13], qui sont deux effets thermodynamiquement réversibles.

- l'effet Seebeck : Lorsqu'il existe un gradient spatial de température entre deux métaux notés a et b, on remarque l'apparition d'une différence de potentiel entre les armatures des deux matériaux. Ceci est dû au fait que les deux métaux réagissent différemment au gradient de température, créant ainsi une boucle de courant et un champ magnétique.
- Ce champ est proportionnel au gradient de température, avec une constante de proportionnalité notée le coefficient Seebeck des deux métaux, que l'on note S_{ab} :



$$V = S_{ab} \cdot \Delta T \quad (\text{I}.27)$$

D'après cette équation, pour un même gradient de température, il faut avoir un coefficient S_{ab} important afin d'obtenir une tension électrique importante.

— L'effet Peltier : Il s'agit de l'effet inverse de l'effet Seebeck, où la circulation d'une intensité de courant crée une différence de température entre les extrémités des métaux a et b. Cela signifie que les jonctions sont chauffées ou refroidies en fonction de la direction dans laquelle un courant électrique passe à travers elles. Le flux de chaleur peut être exprimé en fonction de l'intensité de courant comme suit :

$$Q = (P_a - P_b).l \quad (\text{I}).28)$$

Avec P_a et P_b sont les coefficients peltier des matériaux a et b

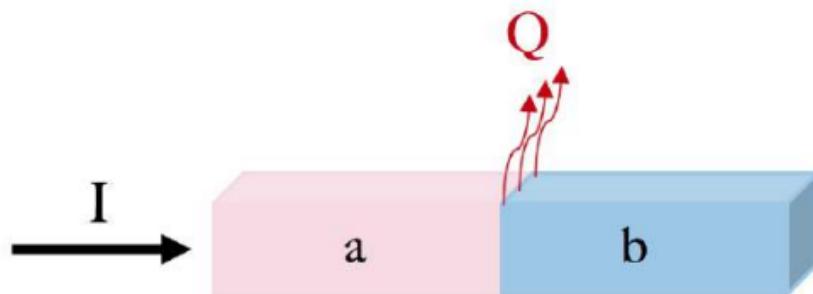


FIGURE I).9 – Illustration de l'effet Peltier.

2) Conversion pyroélectrique :

Parmi les solutions nouvelles et directes de récupération d'énergie thermique, on trouve la pyroélectricité, qui se manifeste lorsque des variations temporelles de la température modifient la polarisation électrique spontanée présente dans certains cristaux.

3) Applications :

L'une des applications développée par le laboratoire IMEC est celle de l'alimentation d'un électroencéphalographie (EEG)[14] Le générateur thermoélectrique, placé sur le front

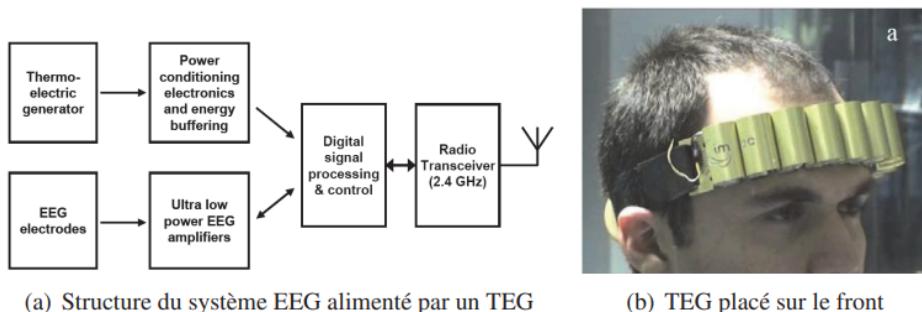


FIGURE I).10 – Générateur récupérant la chaleur du corps humain alimentant un électroencéphalographie [14].

de la personne (Figure I).10 (b)), produit, à 23 °C, une puissance d'environ 2mW, soit 30 μ W.cm², le système à alimenter consommant 0.8mW.

b) Conversion de la lumière en électricité.

La Terre reçoit annuellement une quantité d'énergie dépassant 1 PWh($10^{15} Wh$), ce qui est supérieur à la consommation énergétique mondiale totale. Cette énergie peut être exploitée pour produire de l'électricité, soit directement grâce à des technologies telles que les panneaux solaires, soit indirectement par le biais de moyens tels que les éoliennes.

1) l'effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique désigne l'émission d'électrons par un métal lorsqu'il est exposé à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée. Expérimentalement, l'augmentation de la fréquence de la lumière augmente la vitesse des photo-électrons, et l'augmentation de l'intensité de la lumière accroît l'intensité du courant.

Selon Einstein, la lumière se comporte comme un flux de particules (quanta) d'énergie $E = h \cdot \nu$.

Le bilan d'énergie photon-électron s'exprime comme suit :

$$E_{ph} = E_c + W_s \quad (\text{I}).29$$

Avec W_s : est le travail d'extraction qui représente la valeur en énergie à fournir pour arracher un électron du métal

2) Conversion photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont l'une des technologies permettant de capter la lumière pour produire directement de l'électricité. Cette technique repose sur le passage des porteurs de charges à travers le contact entre deux semi-conducteurs dopés différemment, l'un étant riche en électrons et l'autre riche en trous.

Ces jonctions PN ont des épaisseurs variables. Si l'énergie des rayons solaires est supérieure au « gap » énergétique, les photons reçus par la couche N excitent un électron lié, le faisant ainsi passer de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi une différence de potentiel aux bornes de la cellule lorsque la jonction est en circuit ouvert.

Lorsque le circuit est fermé, on observe une circulation de courant proportionnelle à l'éclairement.

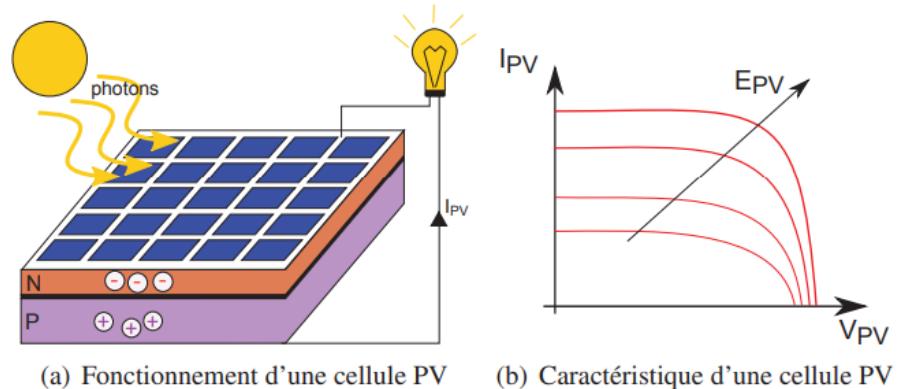


FIGURE I).11 – Principe d'une cellule photovoltaïque et son réseau de caractéristiques électriques

3) Applications :

Caméras vidéo, systèmes de sécurité, appareils de vision nocturne, par exemple, utilisent des cellules photoélectriques.

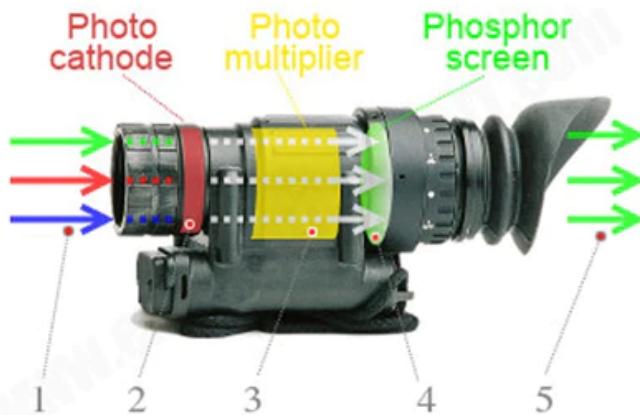
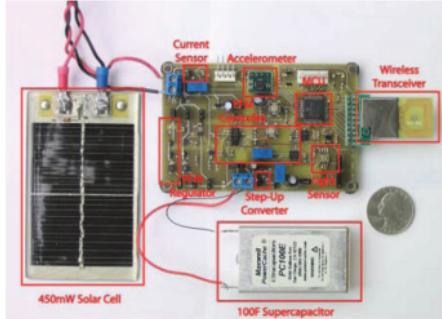
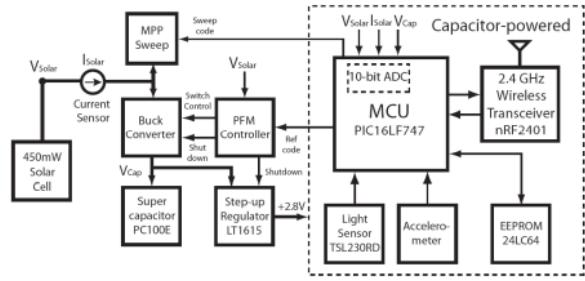


FIGURE I).12 – Vision nocturne

Aujourd'hui, une application très répandue est celle de l'alimentation d'un noeud de réseau de capteurs sans fil. Les systèmes Héliomote [15], Prometheus [16], Everlast [17] et AmbiMax [18] sont tous des récupérateurs d'énergie pour noeud de capteurs, alimentés par une cellule photovoltaïque et utilisant une supercapacité comme élément de stockage



(a) Photo du système Everlast



(b) Structure du système Everlast

FIGURE I).13 – Photo et structure du système Everlast [17]

c) Conversion mécanique-électrique

Les dispositifs de conversion électromécanique ont de nombreuses applications dans le monde, car l'énergie mécanique est considérée comme la source ambiante la plus importante.

1) Conversion piézoélectrique :

L'effet piézoélectrique a été découvert par Jacques et Pierre Curie en 1880. Les frères Curie ont observé que certains matériaux, soumis à une contrainte mécanique, subissent une polarisation électrique proportionnelle à la contrainte appliquée. En d'autres termes, une déformation d'un matériau entraîne l'apparition d'une charge électrique à sa surface (effet direct), et inversement, l'application d'un champ électrique provoque une déformation mécanique (effet inverse) [19].

L'outil utilisé pour évaluer l'efficacité des générateurs piézoélectriques est le coefficient de couplage du matériau. [20]

— Pour l'effet direct le relation lie ce dernier en énergie :

$$K^2 = \frac{E_s}{E_{mec}} \quad (I).30)$$

— pour l'effet inverse le coefficient de couplage électromécanique est exprimé en fonction des énergies comme

$$K^2 = \frac{E_s}{E_{ele}} \quad (I).31)$$

— Aussi le coefficient de couplage peut-être exprimé en fonction des constantes propre du matériau piézoélectrique sous la forme

$$K_{xx} = \frac{d_{xx}}{\varepsilon_{xx} \cdot s_{xx}} \quad (I).32)$$

2) Conversion électrostatique :

Contrairement aux générateurs piézoélectriques, les générateurs électrostatiques nécessitent une précharge pour produire de l'électricité. Ce sont essentiellement des condensateurs préalablement chargés avec des électrodes mobiles. Le principe de fonctionnement des systèmes électrostatiques a été exposé par Mninger et al. [21], dont l'idée est de fournir de l'énergie à partir de micro-générateurs à condensateurs pour exploiter l'énergie vibratoire. Il existe deux cas distincts de déplacement des électrodes :

- À tension constant : dans ce cas des charges électriques sont générées
 - À charge constant : dans ce cas une tension électrique est générée

Mais dans les deux cas le travail mécanique fournie à l'écartement des électrodes est convertit en énergie électrique.

3) Applications :

Cependant, il existe quelques applications, telles que les chaussures développées par le MIT, qui exploitent l'énergie générée par la marche humaine à l'aide d'un générateur piézoélectrique [22]. Leur prototype se décline en deux versions : l'une utilise des polymères PVDF stratifiés placés sous la plante du pied, générant au maximum 1.1 mW (voir Figure 1.6 (a)), tandis que l'autre utilise un bimorphe réalisé avec des céramiques de PZT, générant jusqu'à 8.4 mW. Un autre exemple de système direct de conversion de l'énergie

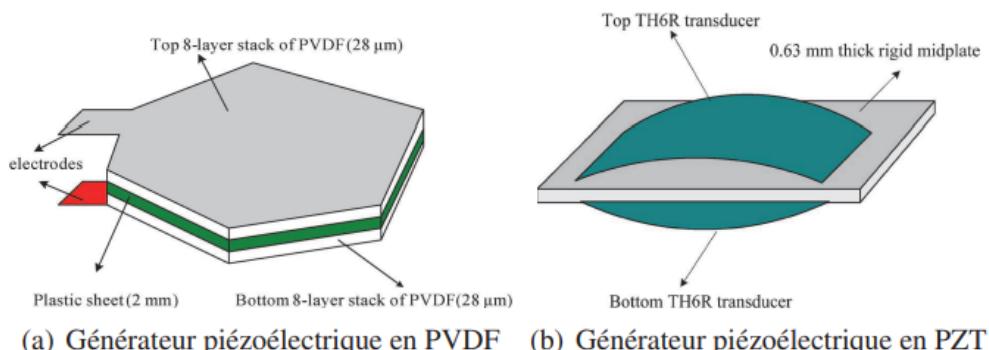


FIGURE I).14 -- Chaussures piézoélectriques développées par le MIT[22]

a été développé par des chercheurs en biomécanique de l'université de Simon Fraser à Vancouver (Canada) [23]. Ils ont mis au point une genouillère permettant de récupérer l'énergie produite pendant la marche. Quelques applications ont été comme même développées malgré que la plupart des micro générateurs électrostatiques génèrent une puissance assez faible. Parmi les applications développées, nous présentons la chaussure électrostatische [24], dont la capacité du générateur est à base d'un élastomère compressible. Quand l'utilisateur marche avec un rythme de deux pas par seconde, la chaussure fournit une puissance de 800 mW.

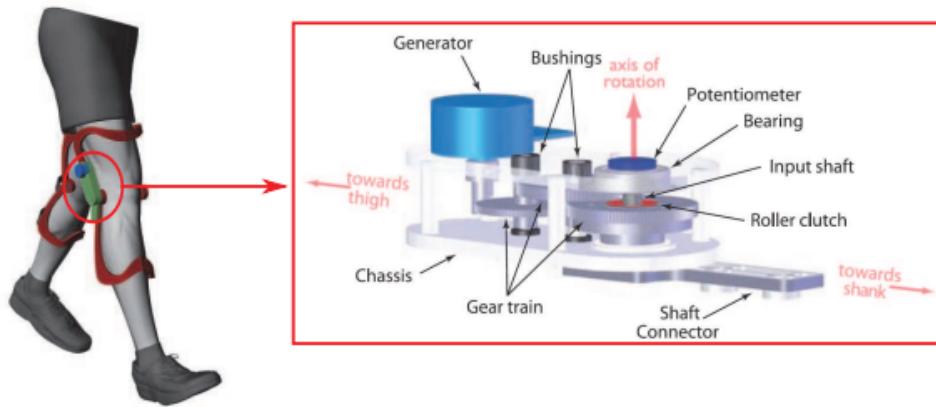


FIGURE I).15 – Genouillère récupérant l'énergie de la marche[23]

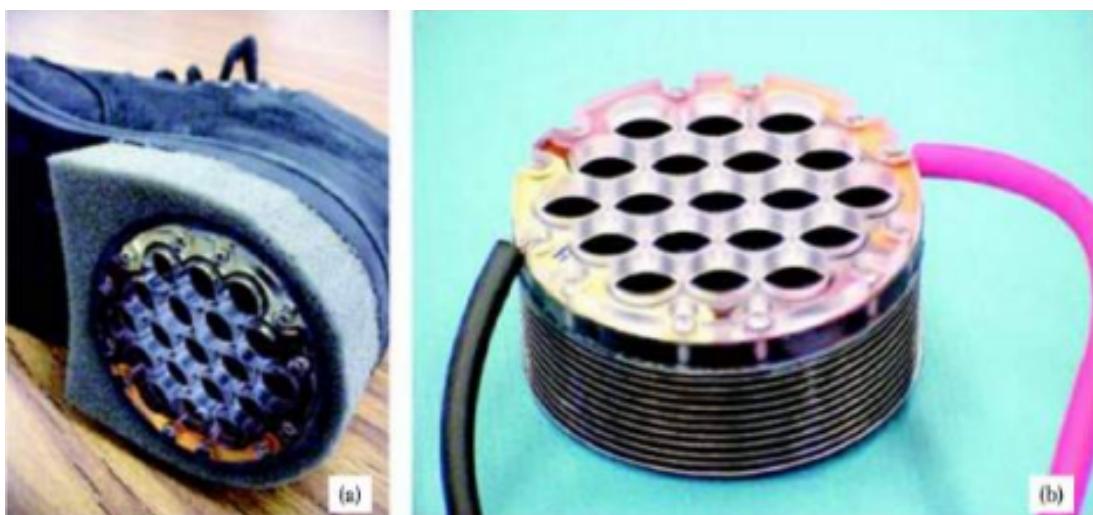


FIGURE I).16 – Chaussures avec générateur électrostatique : (a) prototype implémenté dans une chaussure, (b) détail du générateur [24]

2) Les ressources énergétiques ambiantes

Dans l'environnement humain, Les ressources énergétiques ambiantes sont induites soit par divers phénomènes de l'environnement, ou bien par le corps humain. les rayonnements électromagnétiques pourraient constituer également une ressource exploitables présents dans l'environnement

a) Ressources électromagnétiques

D'après le spectre représenté dans la figure suivante ,nous pouvons classer les sources électromagnétiques en deux parties :

- celle correspondant au rayonnement invisible (liées aux dispositifs de communication sans f)

— celle correspondant à la lumière visible

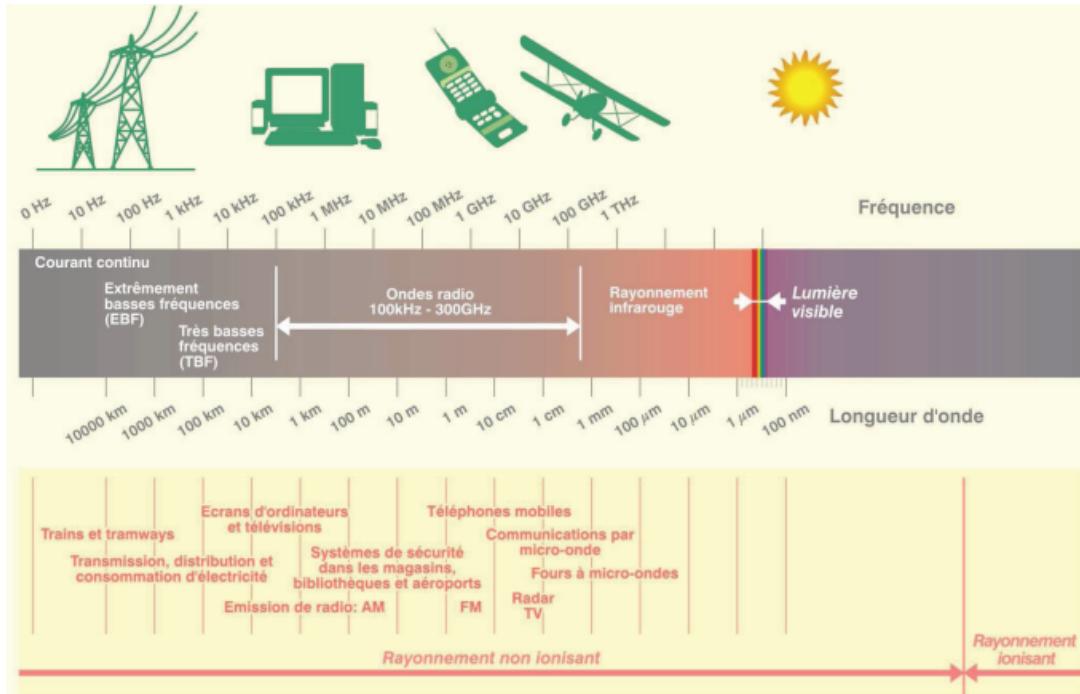


FIGURE I).17 – Spectre électromagnétique [25]

1) Les rayonnements de hauts fréquence :

Les dispositifs de communication sans fil peuvent être considérés comme source d'énergie ambiante possible puisqu'ils émettent des champs électromagnétiques hautes fréquences

mais pour la récupération de ce type d'énergie, il faut se placer proche de la source des champs électromagnétiques ce qui présente une inconvénient qui limite vraiment l'usage de cette source

2) La lumière :

Selon les conditions météorologiques (soleil voilé, ciel nuageux ...), La puissance maximale du rayonnement solaire reçu sur Terre vaut environ $1\text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. la quantité d'énergie reçue pour une heure peut fournir énergie pour satisfaire toute la demande énergétique de la population humaine [27].

les éclairages artificiels, varient entre 1 à $15\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, A titre d'exemple dans un bureau l'éclairage moyen est $3,5\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, et dans un bloc opératoire de $10\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ l'énergie solaire a un

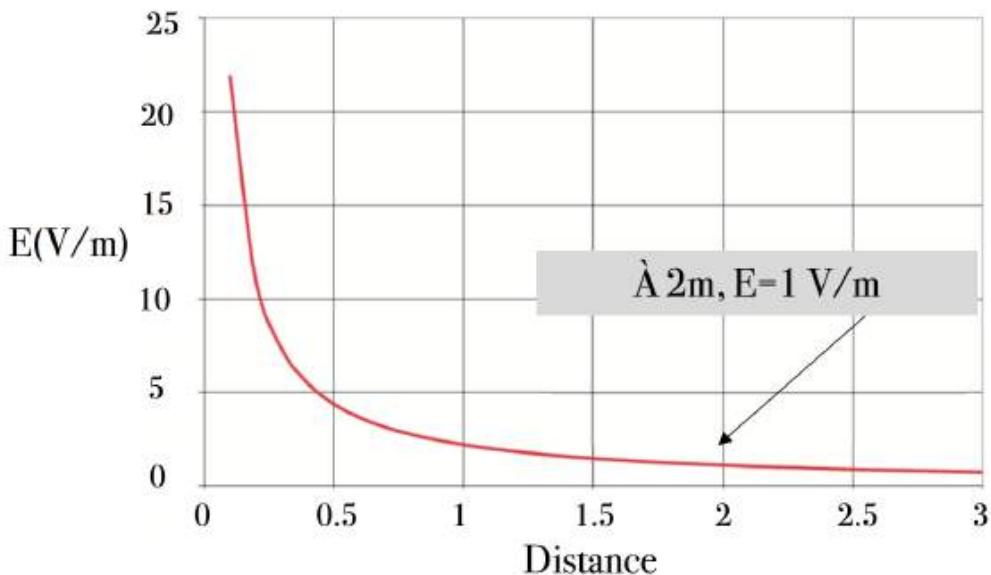


FIGURE I).18 – Évolution du champ électrique généré par une antenne WiFi en fonction de la distance (émetteur-récepteur)[26]

grand potentiel pour la production d'énergie mais nombreux défis limitent son utilisation. D'une part,, selon les conditions météorologiques, quand le soleil est voilé, le ciel est nuageux ..., la puissance devient plus faible,D'une autre part, L'énergie de sortie dépend du matériau qui doit avoir des caractéristiques adaptées au spectre de lumière disponible.

b) Les ressources thermiques

1) Les sources de chaleur ambiante :

De nombreux systèmes sont sujets à des pertes se traduisant par des émissions de chaleur, et peuvent donc être considérés comme des sources potentielles d'énergie ,de façon générale, la récupération sur ce type d'énergie est donc relativement facile effet de présence De nombreux systèmes qui sont sources de pertes thermiques A titre d'exemples, les machines thermodynamiques, comme les réfrigérateurs, rejettent de la chaleur pendant leur cycle de fonctionnement

2) La chaleur du corps humain :

Si on estime Le coefficient d'échange thermique à $8W.m^{-2}.C^1$ dans l'air, au repos,et La température du corps humain est régulée à environ $T_h = 37C$,Ainsi, si la température de l'air ambiant à $T_a = 20C$ par exemple,un densité surfacique de flux , se crée de la source chaude vers la source froide tel que :

$$\varphi = h(T_h - T_a) \quad (I).33)$$

on en déduit approximativement le flux dissipé qui environ 14 mW.cm^{-2}

c) Les ressources mécaniques

Les ressources mécaniques ambiants peuvent provenir des mouvements du machines environnantes ou aux bruits acoustiques.mais également des mouvements du corps humain par la suit Nous allons différencier ces deux types de ressources.

1) Les vibrations ambiantes :

Les vibrations parasites proviennent d'une gamme de sources autour du dispositif de récupération d'énergie, telles que le vent, les forces sismiques [28].La récupération d'énergie des vibrations parasites peuvent être converties en énergie électrique tout en utilisant des transducteurs piézoélectriques ou électromagnétiques. Ces ressources dépendent de la fréquence de vibration et de l'accélération (elle-même proportionnelle au carré de la fréquence).

Par ailleurs, une autre ressource est celle des vibrations acoustiques.tels que l'intensité acoustique $I(\text{W.m}^{-2})$,est liée à la pression acoustique P du bruit et à l'impédance acoustique Z du milieu (en $\text{P}_a \cdot \text{s.m}^1$) par la relation suivante : (en P_a)

$$I = \frac{P^2}{Z} \quad (\text{I}.34)$$

2) Les ressources du corps humain :

Starner, a répertorié la puissance calorifique consommée pour différentes activités[29] comme dormir, être debout, jouer du piano, nager. . . ,A titre d'exemple, la puissance calorifique consommée est d'environ 160W lorsque l'on conduit une voiture, et de 580W lorsque l'on nage

L'énergie humaine est donc définie comme l'utilisation du mouvement humain ou de la chaleur corporelle pour la production d'énergie dans le but d'alimenter un dispositif électronique.Le tableau suivent donne une vue d'ensemble de la puissance utilisée par le corps humain pendant diverses activités .

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

TABLE I).1 – Puissance utilisée par le corps humain pendant diverses activités [30].

D) Zirconate Titanate de Plomb (PZT)

Une large gamme des composés prends le nom de céramique, ces matériaux ont des propriétés dû essentiellement au liaison iono-covalentes [31] :

- Température de fusion élevé
- Grande dureté
- Absence de ductilité au basse température
- fragilité, faible ténacité

Les deux grand catégories des Céramiques sont :

- Les Céramiques traditionnelles : ce sont les céramique destinées au bâtiment (briques,...etc)
- Les Céramiques nouvelles : qui constituent une larges famille contient les céramique oxyde (Al_2O_3 , ZrO_3 ,...etc), et des composés non-oxyde (les carbures, nitrures,...etc), ainsi les composites de toute nature

Pour la suite de notre étude, on s'intéresse à l'un des Céramique électronique qui combine les propriétés piézoélectrique et pyroélectrique de forme chimique $PbZr_xTi_{(1-x)}O_3$ et connue sous le nom de zirconotitanate de Plomb [32]

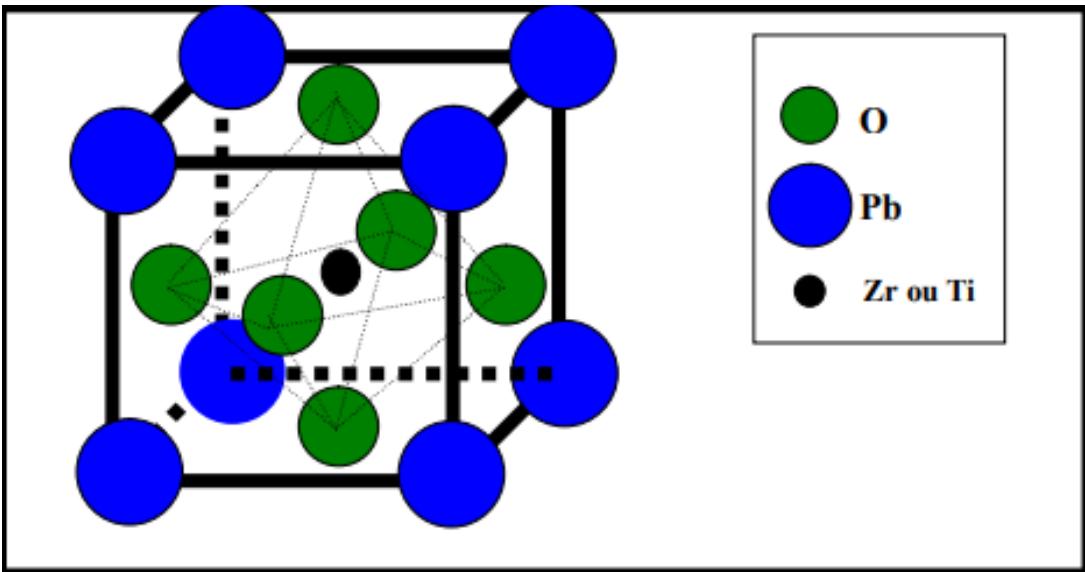


FIGURE I).19 – Structure perovskite cubique de PZT [32].

1) la structure perovskite de PZT

Le PZT ,présent avec une structure de forme ABO_3 ,et leur maille perovskite dépend de la température et le rapport $x(\frac{Zr}{Ti})$

- Cubique si $T > T_c$,se correspond à la phase para-électrique.
- quadratique lorsqu'il y' à dominance de Ti et $T < T_c$
- rhomboédrique lorsqu'il y' à dominance de Zr et $T < T_c$

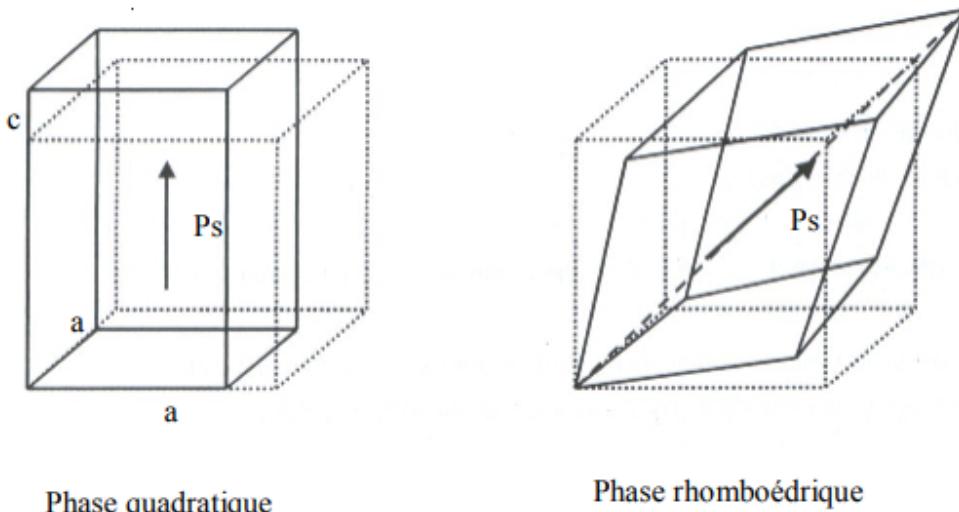


FIGURE I).20 – Phases quadratique et rhomboédrique de PZT, Les pointillés délimitent la phase cubique de base[33]

Mais lorsque $0.45 < x < 0.5$ environ, la phase obtenue est une mélange de quadratique et de rhomboédrique c'est la phase morphotropique,dans cette état le PZT présent

ses meilleures propriétés Ferroélectrique et piézoélectrique [34], par conséquence le rapport x permet d'ajuster les propriété de PZT suivent l'application visée [35] (piézoélectrique, ferroélectrique, diélectrique ou pyroélectrique).

2) Diagramme de phase de la solution solide PZT

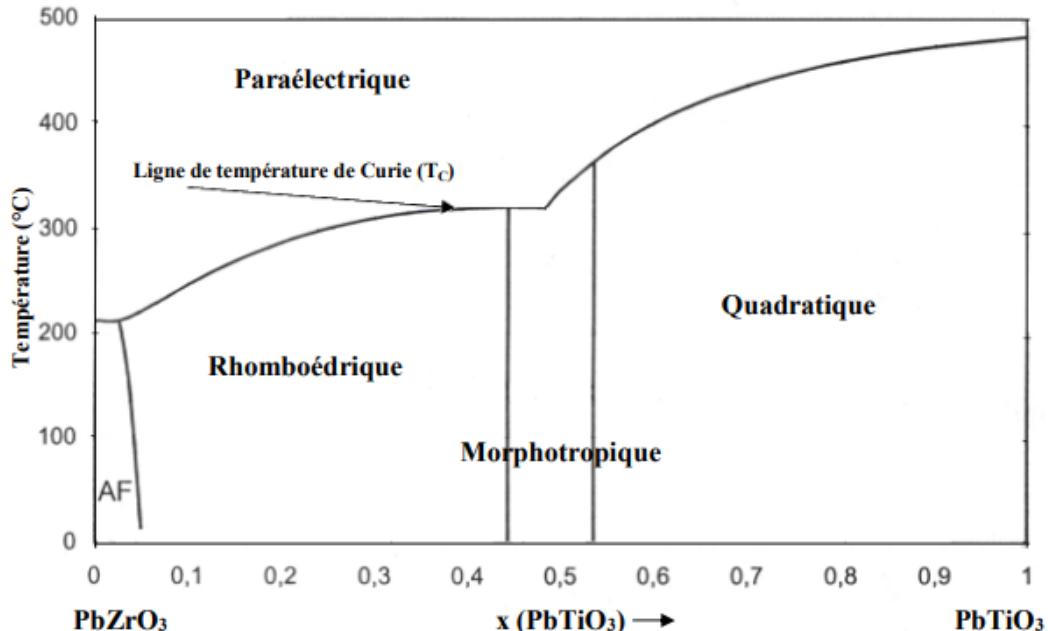


FIGURE I).21 – Diagramme de phase du PZT[36]

Dans la figure I).21 :

la déformation de la maille cubique para-électrique, donne lieu aux deux phases ferroélectriques, qui présentent alors un moment dipolaire permanent. Pour la phase quadratique, un côté du cube est allongé pour donner l'axe c alors que les deux autres côtés sont compressés pour donner les axes a quadratique. Pour la phase rhomboédrique, le cube est étiré suivant une diagonale qui traverse entièrement la maille [36].

Lorsque x est dans l'intervalle [0.45, 0.55], la phase obtenue est la Frontière Morphotropique de Phase (FMP) [36], dont la largeur de (FMP) dépend fortement du procédé de fabrication des céramiques [37].

E) Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné les différentes caractéristiques d'un milieu diélectrique et présenté diverses techniques de conversion des ressources énergétiques, ainsi que leurs applications dans le monde moderne. Ensuite, nous avons exploré les sources

d'énergie ambiante potentielles à récupérer, et enfin, nous avons pris en compte une bibliographie sur les zirconotitanates de plomb..

À partir de ce chapitre, nous avons constaté que l'énergie thermique présente une solution exploitable pour la production d'électricité. Cependant, ce type d'énergie n'est pas encore suffisamment étudié. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à l'exploitation de l'énergie thermique en régime transitoire, dont l'objectif est la production d'électricité en utilisant l'effet pyroélectrique.

L'effet pyroélectrique :modèle,simulation et Expérience

A) Introduction et Fenêtre historique

Dans le mot "pyroélectrique", le préfixe "pyro" provient du grec et signifie "feu". La pyroélectricité se réfère en réalité à la génération d'électricité résultant des variations temporelles de la température. Bien que des matériaux pyroélectriques artificiels aient été créés, l'effet a été initialement observé dans des matériaux naturels.

Cet effet est réversible : en appliquant un champ électrique à certains matériaux, on peut obtenir une élévation de température. Ce phénomène est connu sous le nom d'électrothermie ou électrocalorie [38]. L'effet pyroélectrique a été découvert pour la première fois dans la tourmaline, un matériau minéral naturel, en 314 avant Jésus-Christ par le philosophe grec Théophraste. Initialement, cet effet suscitait de l'intérêt en raison de ses propriétés médicinales, mais aussi de ses utilisations magiques.

Deux mille ans plus tard, au cœur de la révolution scientifique, l'intérêt de la communauté scientifique pour ces propriétés a soudainement augmenté. De nombreux travaux ont été réalisés dans le but de comprendre et d'exploiter les propriétés des cristaux pyroélectriques.

Tout d'abord, il est nécessaire de distinguer entre deux catégories de récupération d'énergie à partir de variations de température et de sa conversion en énergie électrique :

- La 1^{er} catégorie concerne la thermoélectricité, où un gradient thermique spatial conduit à la diffusion de la chaleur par conduction (contact) de la région chaude vers la zone froide grâce à la présence de charges libres à l'intérieur d'un solide.

- La 2^{ème} catégorie est liée aux fluctuations temporelles de la température, telles que le chauffage par une source infrarouge suivi d'un refroidissement par l'air humide, par exemple. Ces fluctuations provoquent une variation de la polarisation spontanée observée dans certains cristaux anisotropes. Cette variation entraîne une différence de potentiel temporaire ou un courant électrique appelé courant pyroélectrique, qui disparaît après un certain temps de relaxation diélectrique.

B) Interprétation thermodynamique des cristaux pyroélectriques et principe de la Pyroélectricité.

1) Interprétation thermodynamique des cristaux pyroélectriques

Par ailleurs, les conclusions énoncées par Jean-Mothe Gaugain au XIXe siècle concernant le comportement de la tourmaline lors d'un cycle de chauffage et de refroidissement continuent de servir de fondement à l'interprétation thermodynamique des cristaux pyroélectriques.

- La quantité totale d'électricité produite par le cristal de tourmaline dépend uniquement de la variation de température.
- Avec la même variation de température, la quantité d'électricité produite durant le cycle du chauffage est la même que celle produite dans la phase de refroidissement, mais avec une charge de signe opposée.
- La quantité de charge produite est proportionnelle à la surface de l'échantillon et indépendante de son épaisseur.

2) Principe de la Pyroélectricité

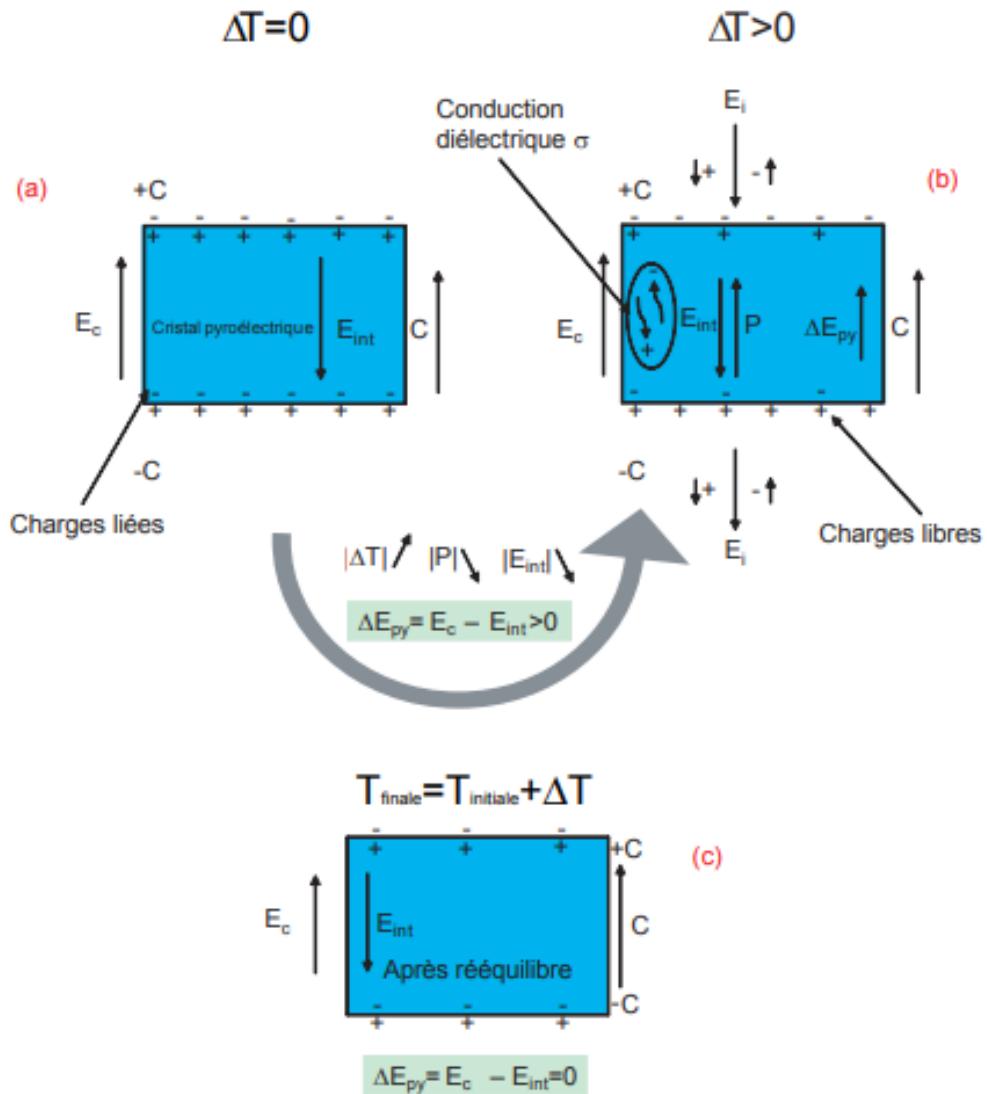


FIGURE II).1 – Comportement d'un cristal pyroélectrique, E_c :champ de compensation dû au charges libres, E_{int} :champ dû à la polarisation spontanée, E_{pyro} :champ pyroélectrique[38].

a) Cas de régime statique

À température ambiante, dans la phase ferroélectrique, un cristal pyroélectrique à l'état d'équilibre possède une polarisation spontanée de densité surfacique P_s , compensée par des charges extérieures positives sur la face (-C) et négatives sur la face (+C) (voir Figure II).1a). L'équation suivante traduit cet équilibre :

$$E_{int} - E_c = 0$$

b) Cas de régime dynamique

L'élévation de la température du matériau entraîne une diminution de la quantité de charges liées présentes sur les surfaces (+C) et (-C).

Ce déséquilibre de charges dans le cas d'un circuit ouvert (figure II).1b) génère un champ transitoire dit pyroélectrique

$$\Delta E_{pyro} = E_c - E_{int}$$

qui peut être compensée de deux manière différentes

- La première méthode consiste en la compensation par des charges libres pouvant être issues d'un courant interne. Dans ce scénario, le retour à l'équilibre se produit après quelques heures à quelques jours, en fonction de la conductivité électrique du matériau [39].
- Le deuxième mécanisme de compensation du champ interne au cristal consiste à revenir au champ extérieur, également appelé champ d'ionisation pyroélectrique, noté E_i dans la Figure II).1b. Si le champ E_i est élevé, il favorise un retour rapide à l'équilibre [40].

Le temps nécessaire aux charges libres présentes dans le milieu pour atteindre les surfaces et rétablir l'équilibre est appelé le temps de relaxation diélectrique, qui peut être exprimé de la manière suivante :

$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (\text{II}.1)$$

Avec :

- ε :la permittivité diélectrique.
- σ : la conductivité électrique .

3) Le coefficient pyroélectrique :expression et ordre de grandeur.

a) Expression du coefficient pyroélectrique

En l'absence de contraintes mécaniques (σ), électriques (E) ou magnétiques (H), le coefficient pyroélectrique est donné par l'équation (1.8).

$$p_m = \left(\frac{dP_s}{dT} \right)_{\sigma,E,H} \quad (\text{II}.2)$$

Et étant donné que la polarisation dépend de la distance entre les barycentres des cations et des anions dans le cristal.

La variation de P_s en fonction de T s'accompagne d'une déformation. En l'absence du champ magnétique :

$$p_m = \left(\frac{dP_s}{dT}\right)_{e,E} + \left(\frac{dP_s}{de}\right)_{E,T} * \left(\frac{de}{dT}\right)_{E,\sigma} \quad (\text{II}.3)$$

$$p_m = p_1 + p_2 \quad (\text{II}.4)$$

En défini alors :

p_1 :Le coefficient pyroélectrique primaire (ou réel) décrit le changement de polarisation en fonction de la température avec des dimensions constantes.

p_2 :Le coefficient pyroélectrique secondaire, qui reflète le changement de polarisation en fonction de la déformation à température constante, peut également être formulé comme suit :

$$p_2 = \left(\frac{dP_s}{d\sigma}\right)_{E,T} * \left(\frac{d\sigma}{de}\right)_{E,T} * \left(\frac{de}{dT}\right)_{E,\sigma} \quad (\text{II}.5)$$

dans l'équation (2.5)

- Le première terme correspond au coefficient piézoélectrique d .
- si en considérer que les petites déformation Le 2ème terme correspond à la constant d'élasticité E .
- le 3ème décrit la dilatation thermique que le note α .

donc le coefficient secondaire peut s'écrire

$$p_2 = d.E.\alpha \quad (\text{II}.6)$$

Cette composante s'annule si le cristal ne peut pas changer de dimension pour une variation de la température($\alpha = 0$).

b) Ordre de grandeur

Matériaux	$p (\mu C/m^2.K)$	ε_r	$T^c(L)$	$\sigma_d(\Omega.m)^{-1}$
Tourmaline	4	75	-	-
$PbTiO_3$	200	160	135	$1,6.10^{-8}$
$LiNbO_3$	85	30	1195	10^{-13}
$LiTaO_3$	190	44	618	10^{-13}
$KNbO_3$	41	700	420	10^{-12}
$NaNO_3$	120	8	163	-
$SBN : 50$	600	450	121	9.10^{-10}
		230-		
SPS	800	300	-	$5,4.10^{-8}$
KTN	10^5	3000	35	-
PZT	500	800	240	-

TABLE II).1 – Propriétés physiques pour différents matériaux pyroélectriques. ([41],[42],[43],[44],[45],[46],[47]).

C) Modélisation de l'effet pyroélectrique

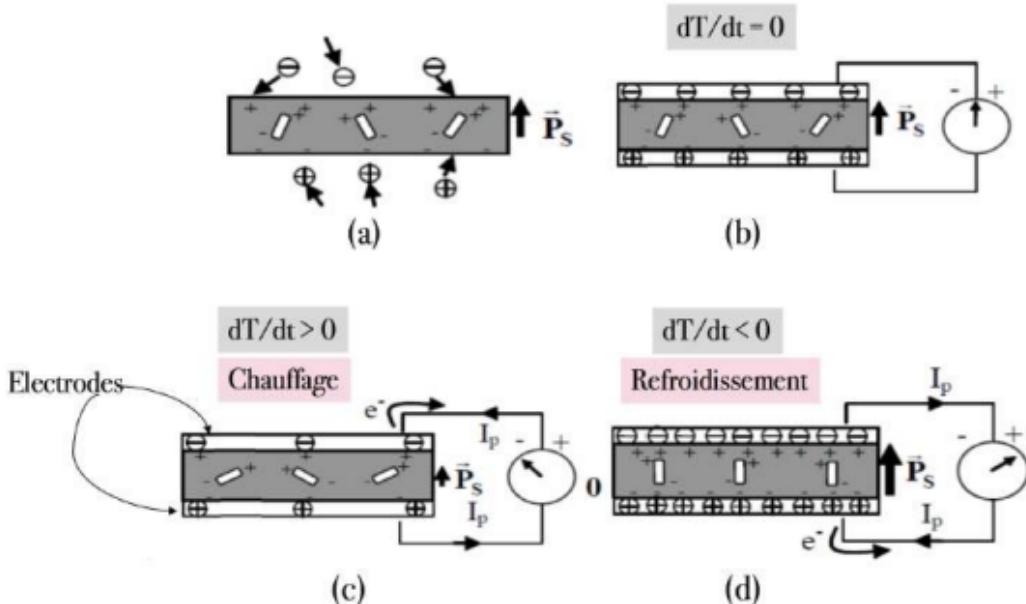


FIGURE II).2 – Principe de l'effet pyroélectrique [48] .

La modélisation du comportement d'un échantillon pyroélectrique par rapport à la variation de la température en régime variable s'effectue en utilisant une approche maxwellienne.

1) Potentiel pyroélectrique

La conservation de la charge électrique peut être formulée localement comme suit :

$$\operatorname{div}(\vec{j}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (\text{II}.7)$$

- Le premier terme représente la variation spatiale du vecteur densité de courant.
- Le second terme représente la variation temporelle de la densité volumique de charge électrique.

D'après la loi de Maxwell-Gausse et la loi d'hom locale :

$$\operatorname{div}(\sigma \vec{E}_{int} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) = 0 \quad (\text{II}.8)$$

$$\operatorname{div}(\sigma \vec{E}_{int} + \frac{\partial(\vec{P} + \varepsilon_i(\vec{E}))}{\partial t}) = 0 \quad (\text{II}.9)$$

suivant l'axe Z

$$\vec{P} = P_z \cdot \vec{e}_z + p_z \cdot dT \vec{e}_z \quad (\text{II}.10)$$

d'où :

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma E_z + \frac{\partial(P_z + p_z \cdot dT + \varepsilon_z(E_z))}{\partial t}) = 0 \quad (\text{II}.11)$$

P_z est une constante indépendante du temps. En intégrant, l'équation précédente devient :

$$\sigma E_z + \frac{\partial(\varepsilon_z(p_z \cdot dT + \varepsilon_z(E_z)))}{\partial t} = \sigma \cdot E_0 = cte \quad (\text{II}.12)$$

D'une par cette équation représente l'équilibre ,puisque les charges libres extérieur peuvent compensée le champ $E_{int,z}$ si $E_0 = 0$

D'autre part, on sait que

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\operatorname{grad}}(V)$$

et on suppose que le champ est uniforme le long de l'axe Z. À l'équilibre :

$$-\sigma \frac{V_{int,z}}{e} + \frac{\partial(\varepsilon_z E_{c,z} + p_z \cdot T)}{\partial t} = 0 \quad (\text{II}.13)$$

$$-\sigma \frac{V_{int,z}}{e} + \frac{\partial(\varepsilon_z E_{c,z})}{\partial t} + p_z \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{II}.14)$$

$$-\sigma \frac{V_{int,z}}{e} - \frac{\varepsilon_z}{e} \cdot \frac{\partial V_{c,z}}{\partial t} + p_z \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{II}.15)$$

$$p_z \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma \frac{V_p}{e} + \frac{\varepsilon_z}{e} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (\text{II}).16)$$

2) Courant pyroélectrique

En fait rappelle aux expressions de la capacité C d'un matériau et le temps de relaxation diélectrique $\tau = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r_i} \cdot \frac{A}{e}$ et $\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma}$ en remplace dans (2.26)

$$p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma \frac{V_p}{e} + \frac{C}{A} \cdot \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (\text{II}).17)$$

$$p \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \sigma \cdot A \cdot \frac{V_p}{e} + C \cdot \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (\text{II}).18)$$

$$p \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{V_p}{R_p} + C \cdot \frac{\partial V_p}{\partial t} \quad (\text{II}).19)$$

Avec :

- A : la surface du matériau.
- e : l'épaisseur du matériau .

Cette équation différentielle explique pourquoi les générateurs pyroélectriques sont équivalents à un générateur de courant I_p en parallèle avec une capacité C_p et une résistance R_p .

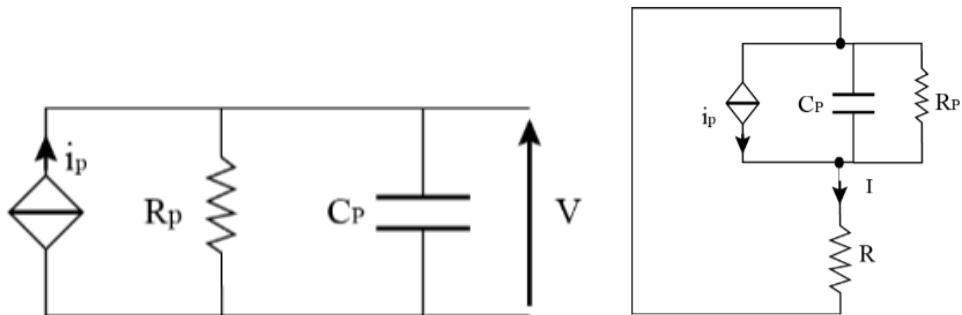


FIGURE II).3 – Modèle de la partie électrique et schéma du circuit

Si l'élément est connecté à une résistance R , la loi des nœuds donne :

$$i_p = \frac{V_p}{R_p} + C \cdot \frac{\partial V_p}{\partial t} + \frac{V_R}{R} \quad (\text{II}).20)$$

3) Puissance pyroélectrique

La puissance instantanée dissipée par effet joule peut être déterminée en utilisant la relation suivante :

$$P(t)_p = R \cdot I \cdot I^* \quad (\text{II}.21)$$

Avec I est l'intensité de courant récupéré et qui traverse la charge R

$$I = \frac{R_p}{(R + R_p) + j(C_p \cdot \omega \cdot R \cdot R_p)} \cdot i_p \quad (\text{II}.22)$$

alors

$$I \cdot I^* = \left(\frac{R_p^2}{(R + R_p)^2 + (C_p \cdot \omega \cdot R \cdot R_p)^2} \right) \cdot i_p^2 \quad (\text{II}.23)$$

$$P(t)_p = R \cdot \left(\frac{R_p^2}{(R + R_p)^2 + (C_p \cdot \omega \cdot R \cdot R_p)^2} \right) \cdot i_p^2 \quad (\text{II}.24)$$

dont le maximum est donné par l'équation différentielle

$$\frac{\partial P(t)_p}{\partial R} = 0 \quad (\text{II}.25)$$

Si on néglige 1 devant le terme $R_p \cdot C_p \omega$ dans l'équation (2.35) on trouve

$$[R_p^2 - (R \cdot R_p \cdot C_p \cdot \omega)^2] = 0 \quad (\text{II}.26)$$

dont la solution est :

$$R_{opt} = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \quad (\text{II}.27)$$

si on remplace cette valeur dans l'équation (2.34), la puissance pyroélectrique instantanée maximale est

$$P_{opt}(t) = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \cdot \left(\frac{1}{[(\frac{1}{R_p \cdot C_p \cdot \omega} + 1)^2 + 1]} \right) \cdot i_p^2 \quad (\text{II}.28)$$

dans ce cas on peut constater que $P_{opt}(t)$ est proportionnelle au carré des i_p donc

$$P_{opt}(t) = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \cdot \left(\frac{1}{[(\frac{1}{R_p \cdot C_p \cdot \omega} + 1)^2 + 1]} \right) \cdot (A \cdot p \cdot \frac{\partial T}{\partial t})^2 \quad (\text{II}.29)$$

de même la densité surfacique de puissance récupérée est :

$$P_{Sopt}(t) = \frac{1}{C_p \cdot \omega} \cdot \left(\frac{1}{[(\frac{1}{R_p \cdot C_p \cdot \omega} + 1)^2 + 1]} \cdot p \cdot (\frac{\partial T}{\partial t})^2 \right) \quad (\text{II}.30)$$

D'une part, l'équation (2.40) combine l'excitation $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$ et la réponse du matériau en fonction du coefficient pyroélectrique, de la capacité et de la résistance équivalents. D'autre part, cette expression montre que $P_{Sopt}(t) \approx \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)^2$ pour une résistance optimale et un coefficient pyroélectrique constant.

La figure montre l'évolution de la densité de puissance récupérée en fonction de la résistance de charge en faisant varier la température de $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ à $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$ pour le matériau céramique PZT.

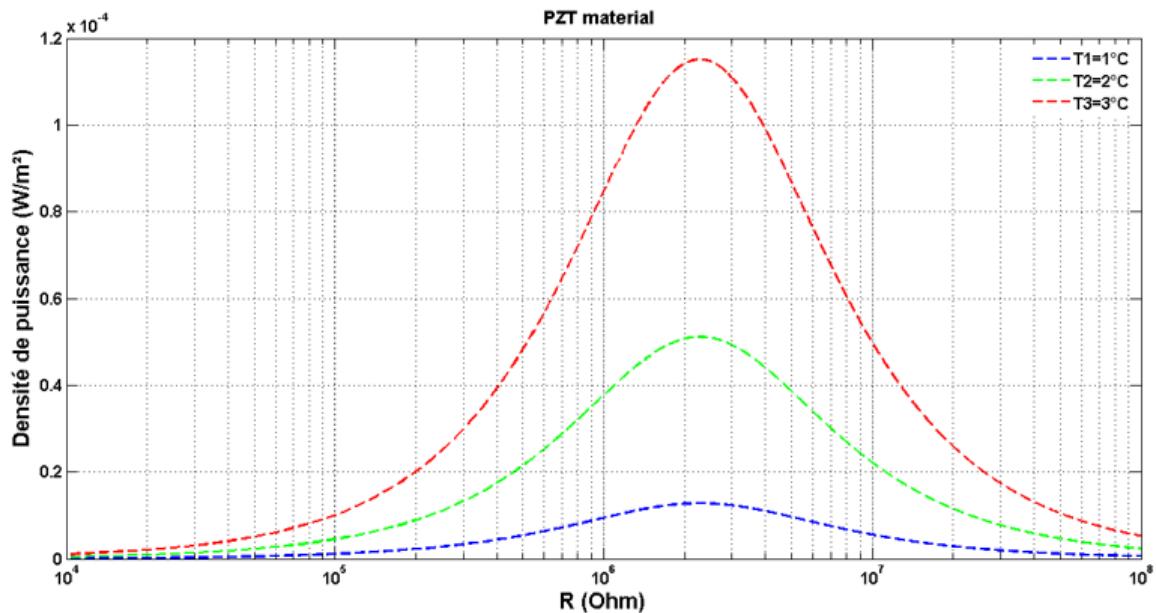


FIGURE II).4 – Densité de puissance récupérée en fonction de la résistance .

D) Simulation sous comsol de l'effet pyroélectrique

Dans cette section, nous tentons de simuler l'effet pyroélectrique dans le but de mieux comprendre les caractéristiques thermiques et électriques, ainsi que le rôle des paramètres intrinsèques (comme l'épaisseur, par exemple) et extrinsèques (comme la période, par exemple).

Dans ce qui suit, nous expliquerons la simulation et le système étudié. Ensuite, nous présenterons les différents résultats obtenus.

1) Description de la simulation

Cette simulation propose une méthode de conversion d'énergie. Nous chauffons un matériau pyroélectrique pour produire de l'électricité. L'outil de simulation utilisé est le logiciel COMSOL Multiphysics, qui sert à concevoir nos structures et à extraire les réponses pyroélectriques.

Notre choix de matériau s'est basé sur un coût faible, une grande durée de vie, et bien sûr un coefficient pyroélectrique important. La céramique PZT a été notre choix de matériau pyroélectrique pour effectuer nos études. En particulier, le type d'échantillon utilisé par la suite est un diaphragme commercialisé par la société Radiosper, connu sous le nom de Buzzer.

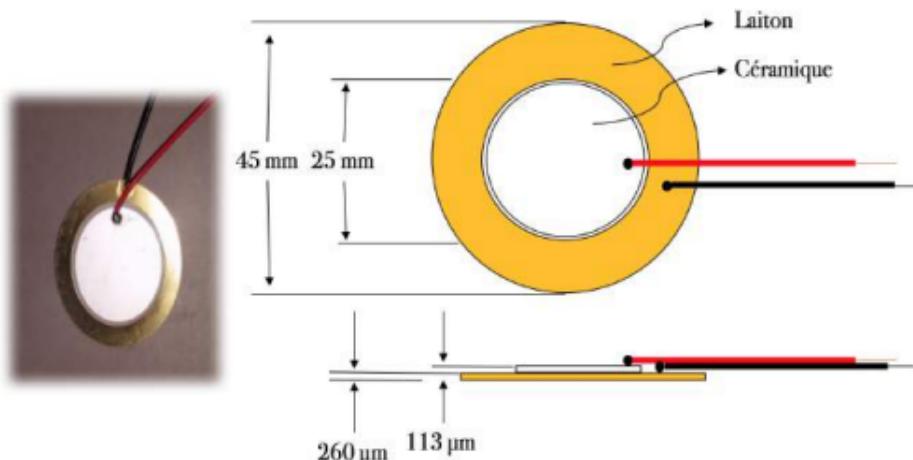


FIGURE II).5 – Dimensions et structure de Buzzer .

Le fonctionnement d'un détecteur pyroélectrique à base de PZT consiste à placer ce matériau entre deux électrodes et à le connecter à un circuit externe. Le dispositif est chauffé par un flux d'énergie qui varie en fonction de la position et du temps, et cette énergie est appliquée à la surface supérieure du disque.

Nécessite un modèle axi-symétrique en 2D et une étude temporelle pour démontrer la transformation thermique-électrique et la physique du circuit électrique.

Pour évaluer l'influence des paramètres, nous proposons les trois études suivantes :

- Étude 1 : impact de la période d'irradiation.
- Étude 2 : impact de l'épaisseur.

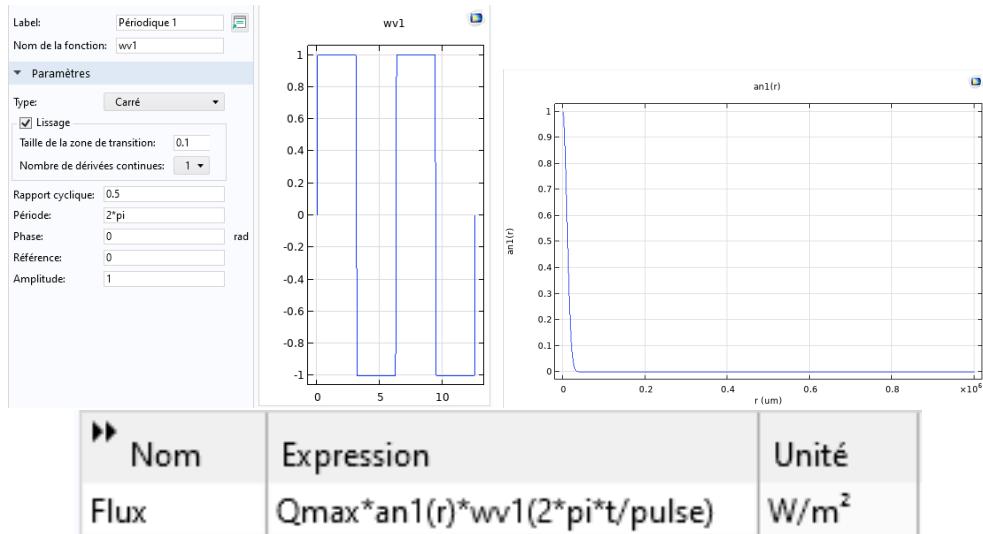


FIGURE II).6 – Définition de flux .

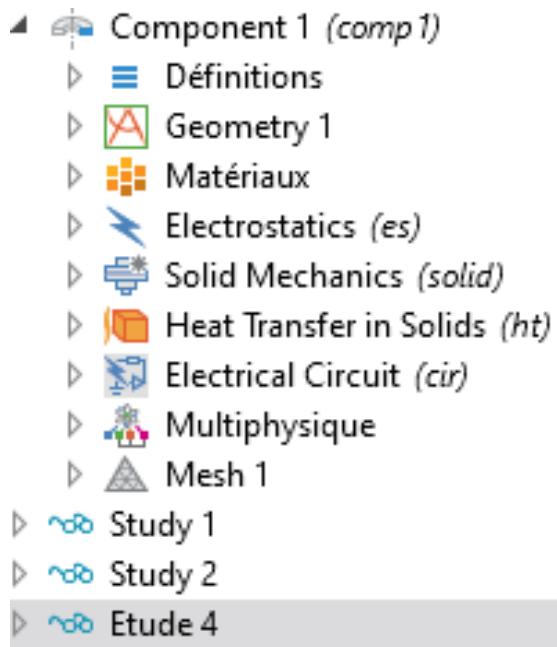


FIGURE II).7 – Modèle et types d'études utiliser.

— Étude 3 :impact de la convection.

Mais pour les trois étude,nous prenons en compte que l'effet pyroélectrique

Modifier la configuration du modèle pour l'étape de l'étude

▶ Interface physique	Résoudre pour	Forme des équations
<input checked="" type="checkbox"/> Electrostatics (es)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automatique (Temporel)
<input checked="" type="checkbox"/> Solid Mechanics (solid)	<input type="checkbox"/>	Automatique (Stationnaire)
<input checked="" type="checkbox"/> Heat Transfer in Solids (ht)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automatique (Temporel)
<input checked="" type="checkbox"/> Electrical Circuit (cir)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automatique (Temporel)

▶ Couplages multiphysiques	Résoudre pour	Forme des équations
<input checked="" type="checkbox"/> Piezoelectric Effect 1 (pze1)	<input type="checkbox"/>	Automatique (Stationnaire)
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal Expansion 1 (te1)	<input type="checkbox"/>	Automatique (Stationnaire)
<input checked="" type="checkbox"/> Pyroelectricity 1 (pye1)	<input checked="" type="checkbox"/>	Automatique (Temporel)

FIGURE II).8 – Sélection de la physique étudiée.

2) Résultats de la simulation

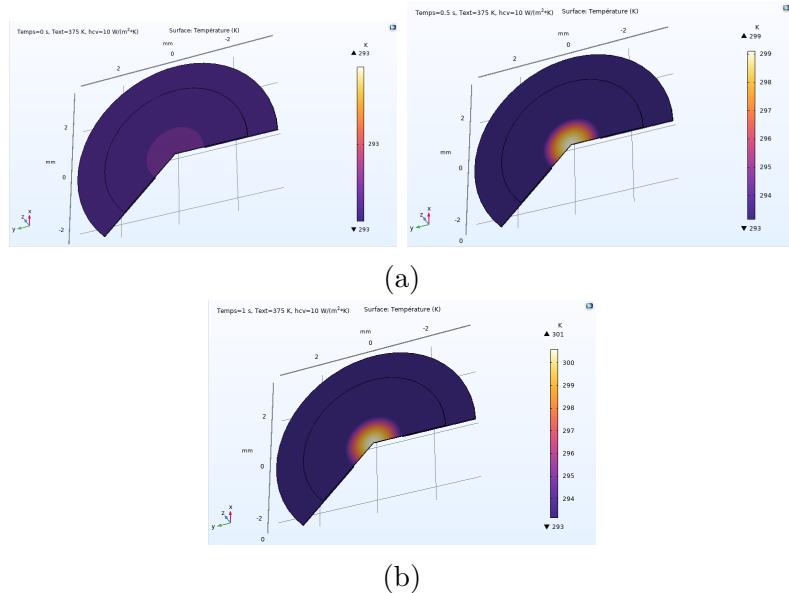


FIGURE II).9 – Distribution de la température dans le volume à différents instants.
0(s),0.5(s),1 (s).

a) Variation temporelle de la température au centre du PZT

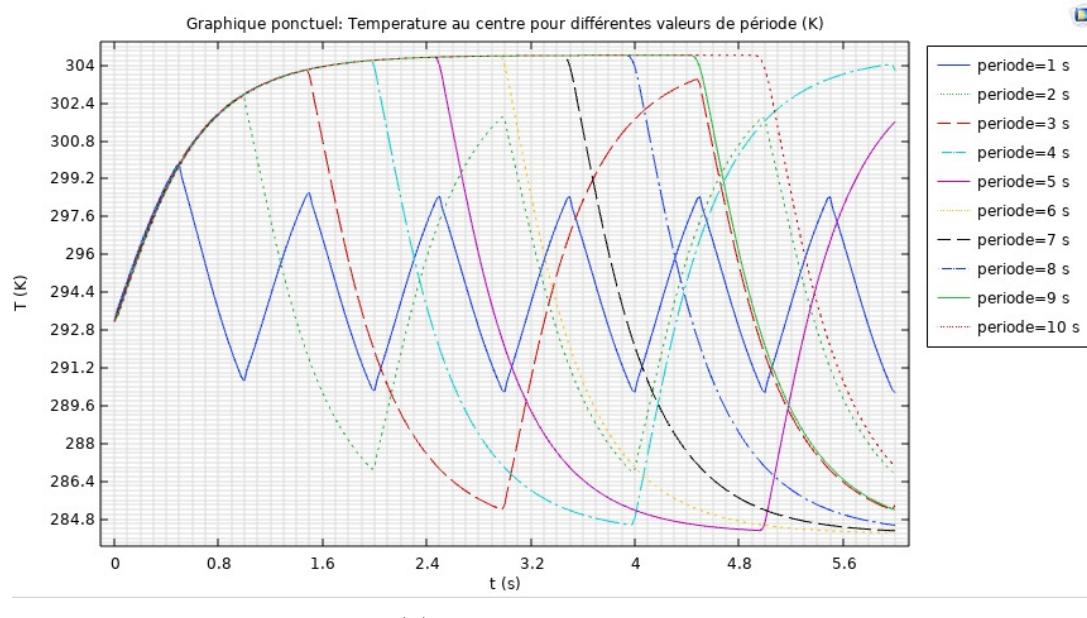
Les Figures II).10 et II).11 présentent la variation temporelle de la température à la surface de Buzzer.

Pour le graphique II).10a, la variation de la température en fonction du temps pour des périodes variant de 1 seconde à 10 secondes présente deux phases :

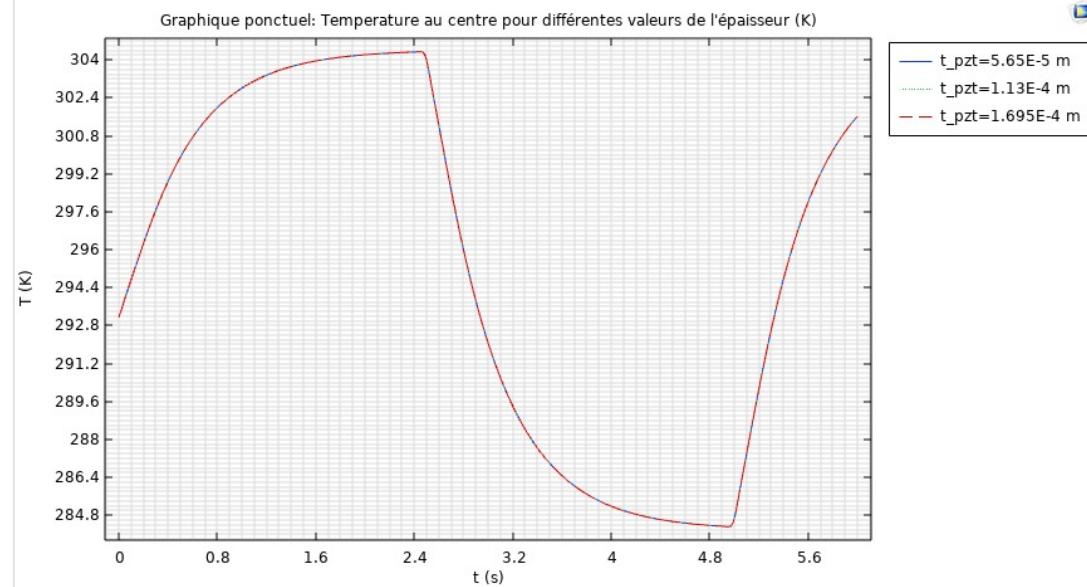
- La première phase est une phase transitoire, où la température maximale au centre augmente de 300 K pour une période de 1 seconde à 304 K pour une période de 5 secondes.

- La seconde phase se produit à une période de 5 secondes, où la température au centre reste d'environ 304 K, même si la période augmente, atteignant un état de saturation.

Sur la même figure, on remarque que le taux de variation de la température diminue avec l'augmentation de la période. La figure II).10b montre que la variation de l'épaisseur du PZT n'a pas d'effet sur la variation de la température au centre.



(a) impacte de la période



(b) impacte de l'épaisseur

FIGURE II).10 – Allures de la température en fonction de tempe .

La figure II).11 montre que la présence de la convection modifie légèrement les extrémités, par exemple $T_{max} = 304.8(K)$ pour $h_{cv} = 10(W/m^2.K)$ et $T_{max} = 307.4(K)$ pour $h_{cv} = 50(W/m^2.K)$. Cependant, le taux de variation reste constant même lorsque le coefficient de transfert thermique augmente.

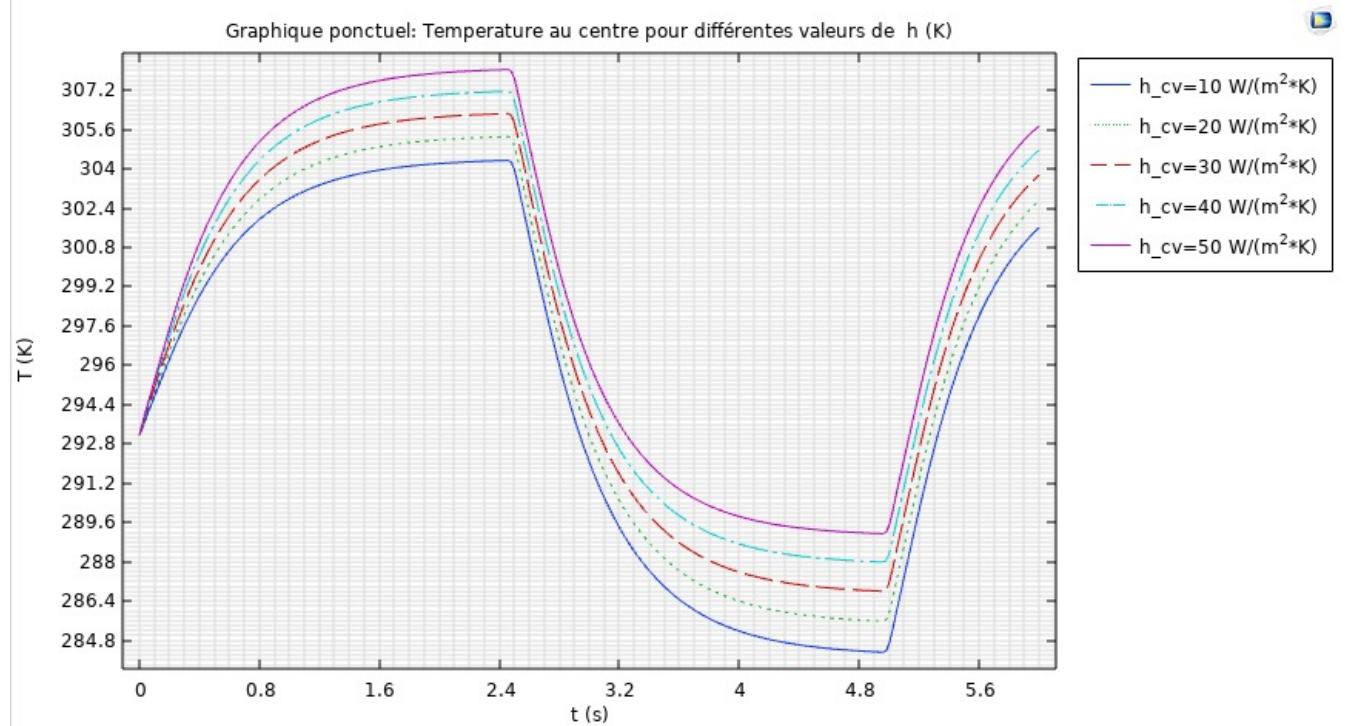


FIGURE II).11 – Allures de la température en fonction de tempe : impact h_{cv} .

b) Variation temporelle du potentiel et l'intensité de courant pyroélectrique

La Fig II).12 présente le courant (gauche) et le potentiel (droit) pyroélectrique produit par le Buzzer en fonction du temps,(a) pour différentes périodes,(b) pour différentes épaisseurs,(c) pour différentes valeurs de coefficient de transfert thermique h .

D'une part, l'intensité de courant récupérée se présente sous forme de pics, où les valeurs positives représentent l'état de chauffage et les valeurs négatives correspondent au refroidissement. Selon la figure II).12, ces valeurs sont égales en module, ce qui en accorde avec les conclusions de Jean-Mothe Gaugain sur la quantité d'électricité produite pendant le chauffage et le refroidissement.

D'autre part, nous fixons la valeur de la charge à une valeur spécifique, soit $R_{ext}=2 M\Omega$.

- Sur le graphe II).12a, l'intensité du courant pour une période de 1 seconde est de $1.2 \mu\text{A}$, cette valeur décroît avec l'augmentation de la période jusqu'à atteindre une valeur proche de $0.8 \mu\text{A}$ pour une impulsion de 10 secondes.
- Concernant le graphe (b) de la figure II).12, le courant qui traverse la charge pour une période de 5 secondes reste constant avec l'augmentation de l'épaisseur, ce qui explique la valeur fixe de $p = 700.10^{-6}(C/m^2.K)$ du coefficient pyroélectrique.
- Puisque le taux de variation est quasiment constant d'après la figure II).11, l'intensité de courant et le potentiel restent constants pour les cinq valeurs de h_{cv} .

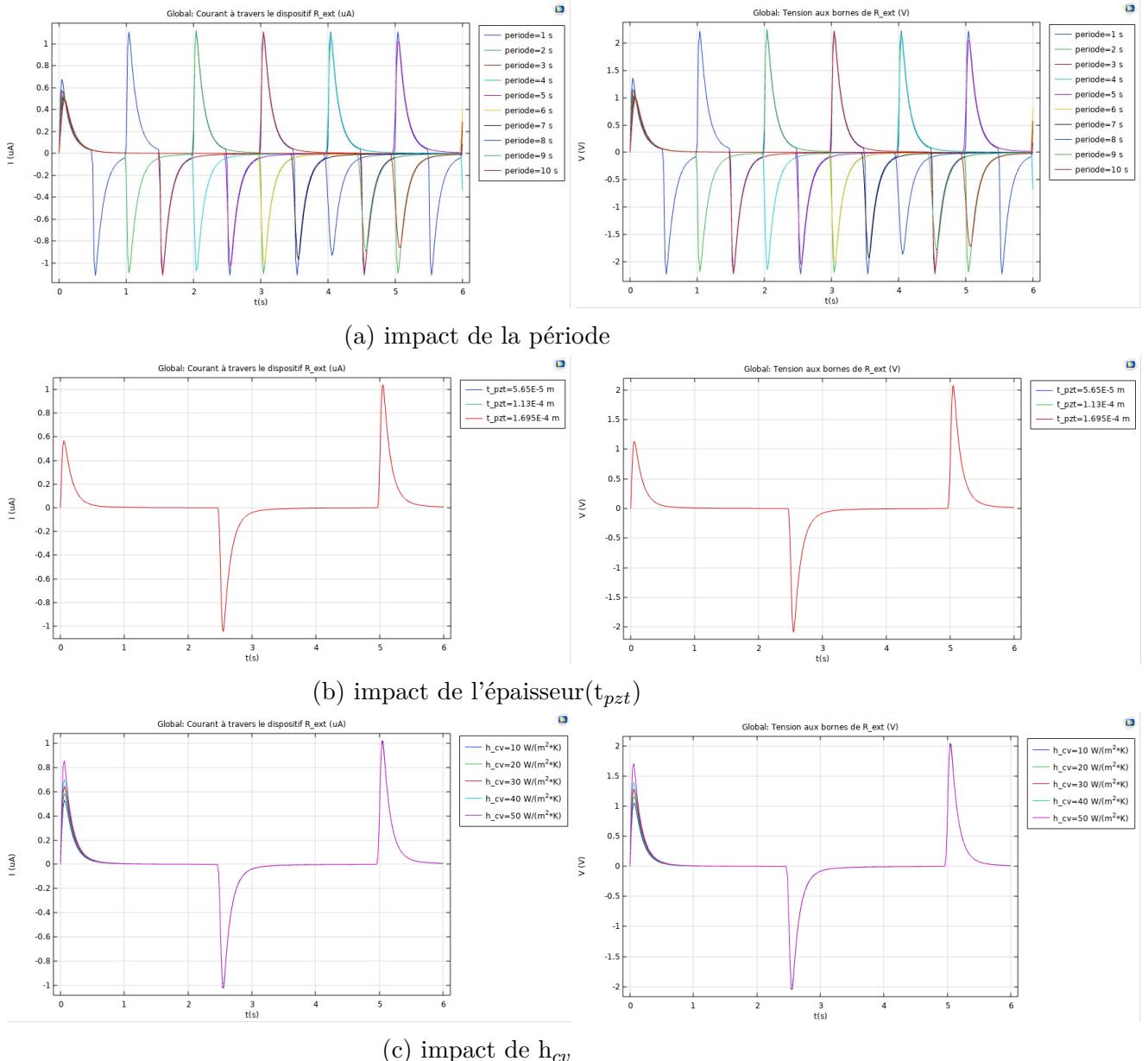


FIGURE II).12 – Allures de l'intensité de courrent et le potentiel électrique en fonction de temps.

c) Puissance pyroélectrique instantané

Les Figures II).14 et II).14 présentent la variation temporelle de La densité surfacique de la puissance récupérée par le Buzzer.

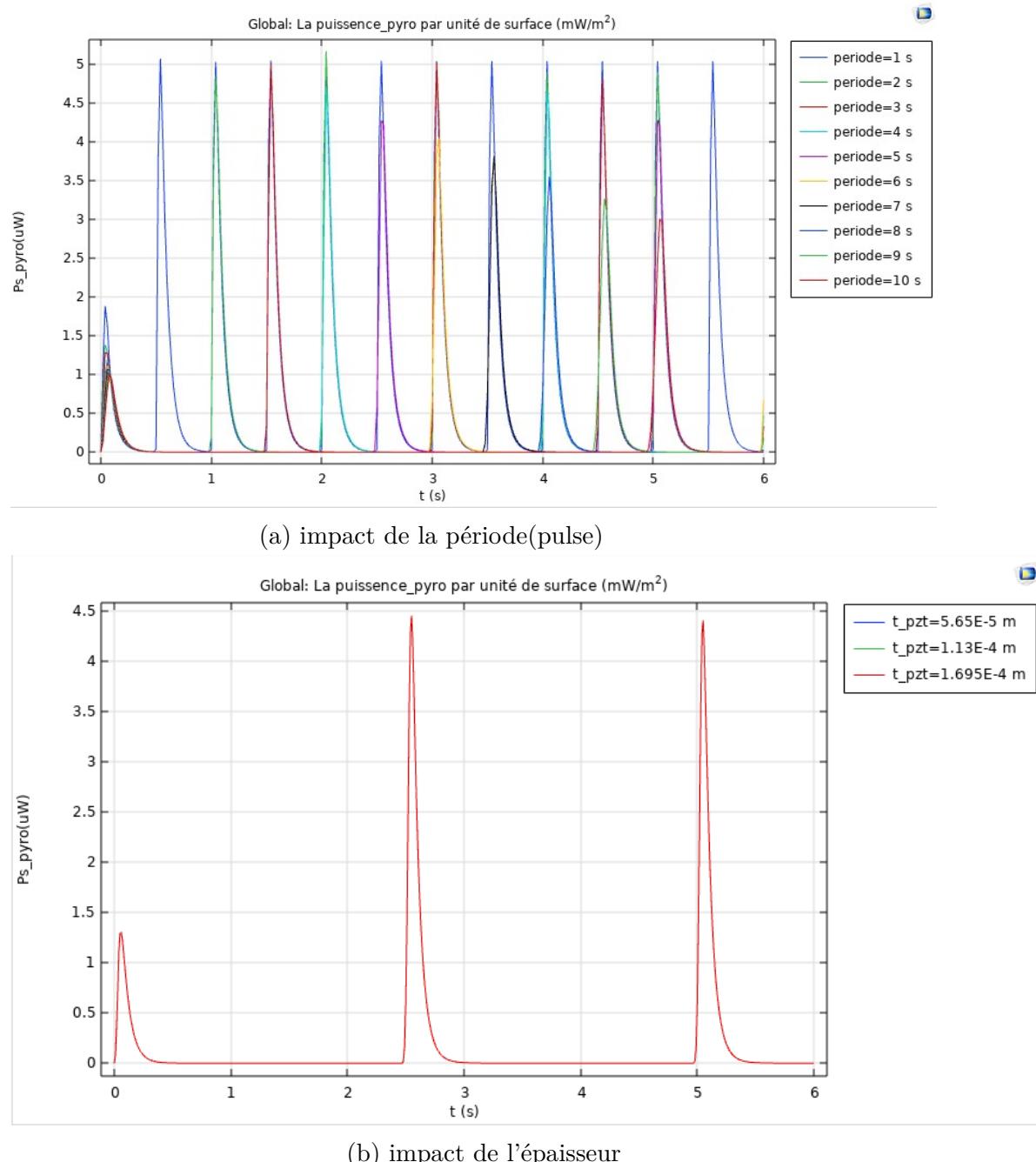


FIGURE II).13 – Variation de la puissance récupérée en fonction du temps .

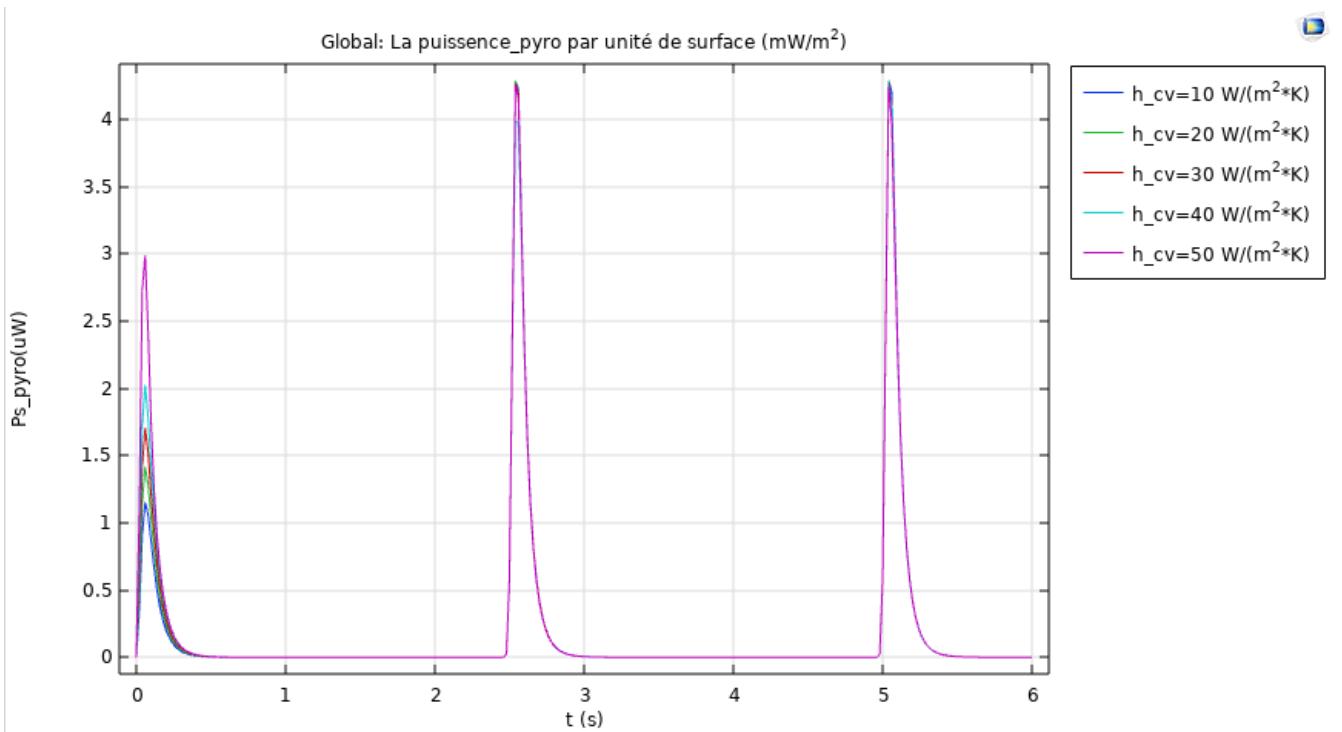


FIGURE II).14 – Variation de la puissance récupérée en fonction du temps : impact de h_{cv} .

La densité surfacique de la puissance récupérée décroît lorsque la période d'irradiation augmente (figure II).13a). Par exemple, $P_{s,pyro} \simeq 5(mW/m^2)$ pour une période de 1 seconde et $P_{s,pyro} \simeq 3(mW/m^2)$ pour une période de 10 secondes. En ce qui concerne l'épaisseur (figure II).13b), $P_{s,pyro}$ conserve une valeur constante pour chaque instant, même en augmentant l'épaisseur de PZT. Selon la figure II).14, on peut constater que la présence de la convection stationnaire n'a pas d'effet sur $P_{s,pyro}$.

E) Expérience de la récupération d'énergie par l'effet pyroélectrique

La Figure II).15 illustre le dispositif expérimental utilisé pour mesurer divers paramètres de sortie de l'échantillon. Ces paramètres incluent le courant pyroélectrique généré par le matériau, la tension électrique résultant de l'effet pyroélectrique, ainsi que la puissance électrique récupérée aux bornes de la résistance de charge R.

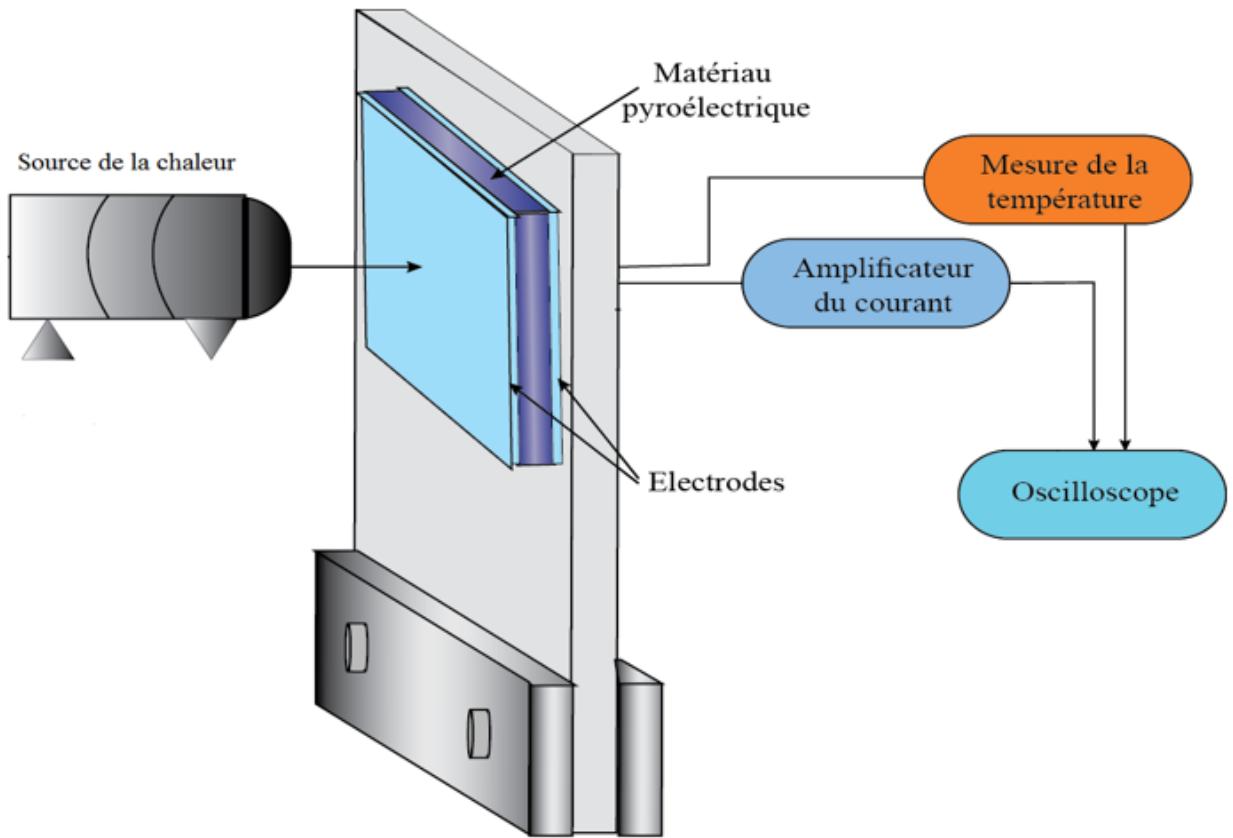


FIGURE II).15 – Schéma de mesure pour l'élément pyroélectrique.

1) Description des expériences

Le principe de mesure des différentes sorties dans cette expérience repose sur l'effet pyroélectrique. Notre matériau pyroélectrique est pris en sandwich entre deux électrodes en platine, la couche supérieure étant exposée à une variation temporelle de la température, générée par une source de chaleur contrôlée. Le courant pyroélectrique généré par le matériau en réponse à cette variation de température est mesuré à l'aide d'un amplificateur de courant (amplificateur de courant Keithley 428).

De même, la tension électrique est mesurée à l'aide d'un amplificateur de tension, tandis que la température de sortie de l'élément pyroélectrique est mesurée à l'aide d'un thermoélectrique. Toutes ces sorties sont ensuite visualisées à l'aide d'un oscilloscope.

Les expériences consistent à

- placer le matériau sur une source thermoélectrique à effet Peltier (contact direct).
- la thermoélectrique est alimentée par un générateur de tension continue de 6V.
- mesurée à l'aide d'un amplificateur de tension la tension de Buzzer.

Cette thermoélectrique comporte deux faces : la première agit comme une source chaude, tandis que la deuxième sert de source froide, et sa température initiale est maintenue à

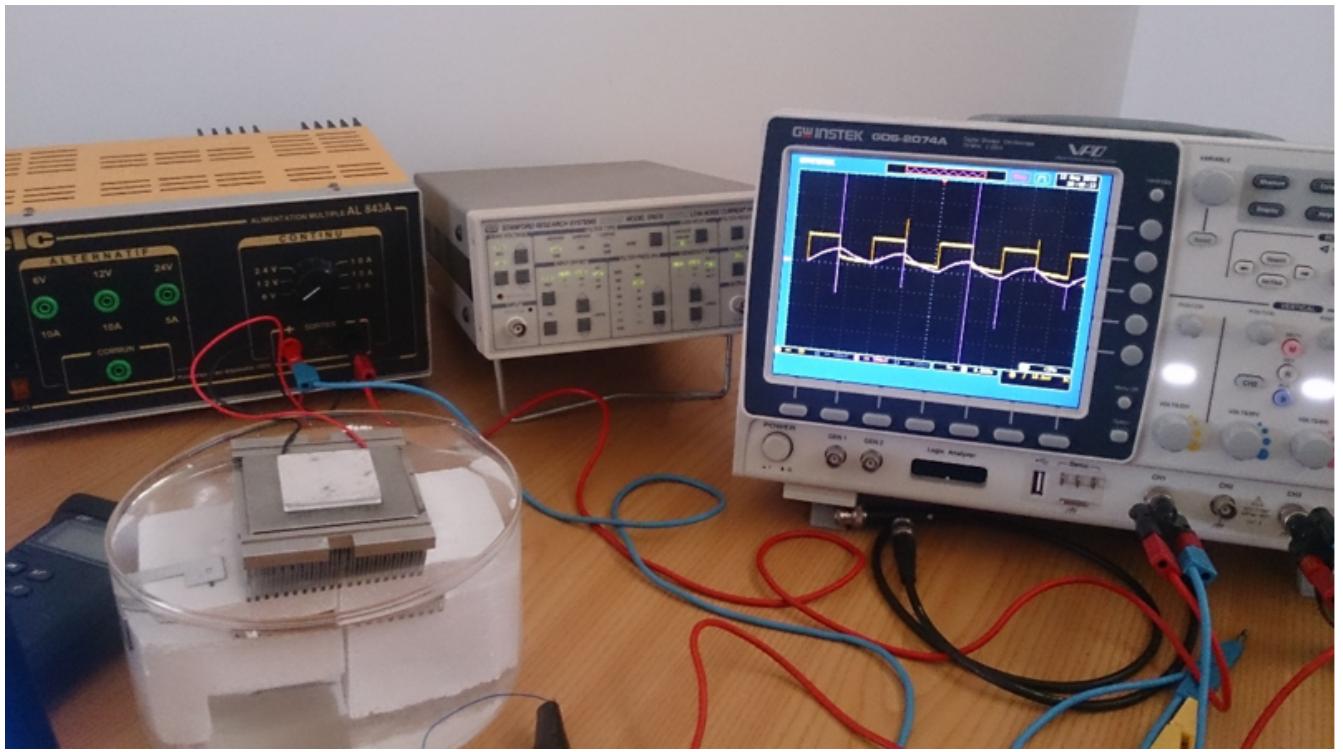


FIGURE II).16 – Éléments de l’expérience.

environ 27°C. Toutes les 5 secondes, la thermoélectrique est capable de provoquer une variation de température de 3°C.

- Lorsque la tension du générateur est maintenue à 0V, cela correspond à la consigne de désactivation de la thermoélectrique.
- Lorsque la tension du générateur est réglée à 6V, cela correspond à la consigne d’activation de la thermoélectrique.

a) Expérience 1

En utilisant la surface chaude de la thermoélectrique, la première expérience implique la réalisation de 2 cycles :

- Cycle 1 : La première 5 secondes on allume la thermoélectrique, la température s’enlève de 27 °C à 30 °C.
- Cycle 2 : La deuxième 5 seconde on éteint la thermoélectrique, la température revient à son état initial. On répète les deux cycles plusieurs fois.

b) Expérience 2

En utilisant la surface froide de la thermoélectrique dans un montage identique, la deuxième expérience implique la réalisation de 2 cycles :

- Cycle 1 : La première 5 secondes on allume la thermoélectrique, la température se diminue de 27 °C à 24 °C
- Cycle 2 : La deuxième 5 seconde on éteint la thermoélectrique, la température revient à son état initial. On répète les deux cycles plusieurs fois.

2) Résultats pratiques et discussion

La figure II).17 montre l'évolution de la tension du matériau utilisé en fonction du temps.

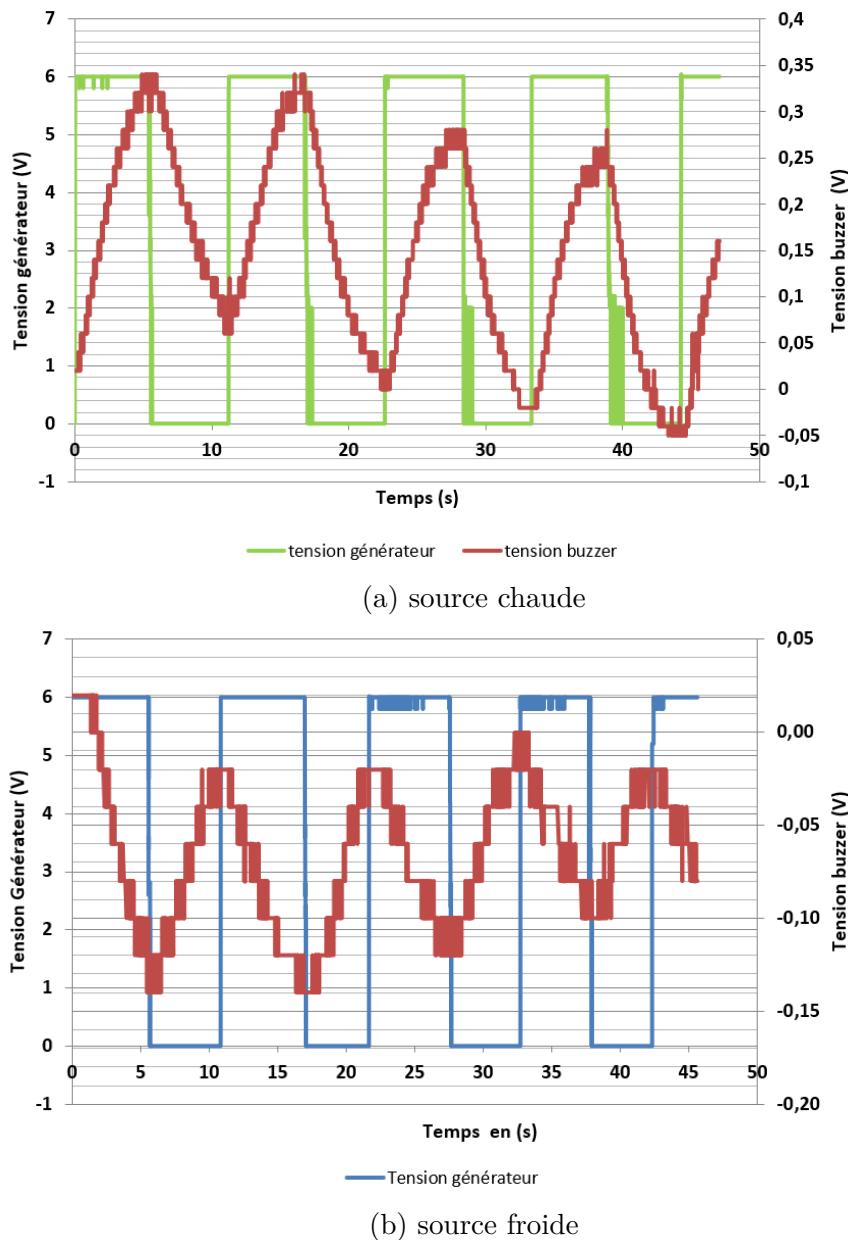


FIGURE II).17 – Tension générée par un Buzzer soumis à une source de chaleur en fonction du temps.

Lorsque le dispositif subit des cycles de chauffage et de refroidissement toutes les 5 secondes grâce au système Peltier, nous observons une tension de sortie induite. Pendant la phase d'augmentation de la température (voir figure II).17), les tensions de sortie efficaces (V) peuvent atteindre 340 mV et 320 mV pour la première expérience, et -140 mV et -90 mV pour la deuxième. Pendant la phase de diminution de la température, la tension de sortie reste relativement stable.

F) Conclusion

L'effet pyroélectrique qui apparaît dans un échantillon soumis à des fluctuations temporelles de température se manifeste par :

- Une variation des charges liées en surface dans le cas de chauffage ($\frac{\partial T}{\partial t} > 0$) ou de refroidissement ($\frac{\partial T}{\partial t} < 0$).
- Une compensation des charges liées par des charges libres présentes dans le matériau ou provenant de l'extérieur.

La simulation multiphysique permet d'approcher et de préciser l'impact des paramètres du système sur les comportements pyroélectriques. Elle montre que le taux de variation de la température et le facteur dominant pour obtenir une puissance pyroélectrique de l'ordre souhaité, en supposant que la charge électrique est fixée à $R_{opt} = 2(M\Omega)$ et le coefficient pyroélectrique à $p = 700(\mu.C/m^2.K)$. Cependant, la valeur fixe de ce dernier élimine l'influence de l'épaisseur.

Les premiers résultats expérimentaux de récupération d'énergie indiquent que le matériau peut générer une tension électrique significative, capable d'alimenter des systèmes miniatures, ce qui est en accord avec les prédictions théoriques et de simulation.

Application de l'effet pyroélectrique.

A) Introduction

La convection naturelle est le régime d'écoulement qui se produit lorsqu'on chauffe un fluide sans imposer un écoulement extérieur. Elle résulte de la légère dilatation du fluide induite par le chauffage à pression et volume constants, générant la force d'Archimède. Selon l'approximation de Boussinesq, le développement de la masse volumique autour de la température T_i s'exprime en fonction du coefficient de dilatation thermique α comme suit :

$$\rho = \rho_i(1 - \alpha(T - T_i))$$

Ce phénomène implique une forte interaction entre la thermique et la dynamique. Un exemple simple de convection naturelle est la convection de Rayleigh-Bénard, où une instabilité du fluide est induite par un gradient spatial de température, provoquant le mouvement du fluide et le transfert de chaleur vers une région plus froide. Dans ce système, trois paramètres de contrôle sont en jeu :

— Le nombre de prandl :qui caractérise les propriété thermique du fluide

$$P_r = \frac{\nu}{a}$$

— Le nombre de Rayleigh :qui caractérise le transfert de chaleur au sein d'un fluide,(plus R_a est grand ,plus la convection est intense) .

$$R_a = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot (H)^3}{\nu \cdot a}$$

— Rapport d'aspect A :qui à une influence sur le mouvement .

$$A = \frac{D}{H}$$

Dans ce chapitre, nous présentons une application de notre étude axée sur la convection naturelle de l'air. L'objectif est de récupérer l'énergie thermique transportée par l'air qui sépare un fluide chaud et un détecteur pyroélectrique à l'intérieur d'un réservoir. .

B) Application :détecteur autonome de niveau d'un fluide chaud.

Dans cette section, nous allons expliquer la conception de notre capteur, puis nous étudierons la hauteur d'air (niveau de fluide) et l'effet de la convection naturelle.

1) Conception du capteur.

Dans cette application de l'effet pyroélectrique, nous suggérons de profiter de la convection naturelle de l'air chauffé par un fluide à une température fixe (T_{fixe}) à l'intérieur d'un réservoir pour exciter un détecteur autonome en termes d'énergie situé à l'extrémité supérieure du réservoir.

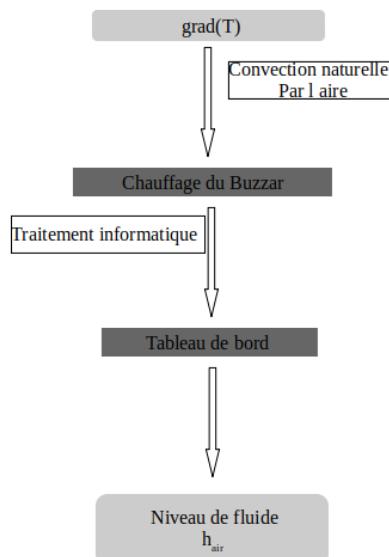


FIGURE III).1 – Concept du détecteur .

2) Simulation de détecteur de niveau.

Par la suite, nous avons étudié la réponse pyroélectrique en fonction des paramètres de convection naturelle de l'air pour une zone active sous forme cylindrique de diamètre

$D_{aire} = D_{PZT}$. Mais avant tout, nous supposons que :

- L'écoulement de l'air à l'intérieur du réservoir est laminaire.
- La température dans le fluide est homogène et égale à T_{fixe} .

Et puisque la convection se fait par l'air, le nombre de Prandtl est fixe à $\text{Pr} = 0,699$, tandis que les nombres Ra et le rapport A sont pris en considération.

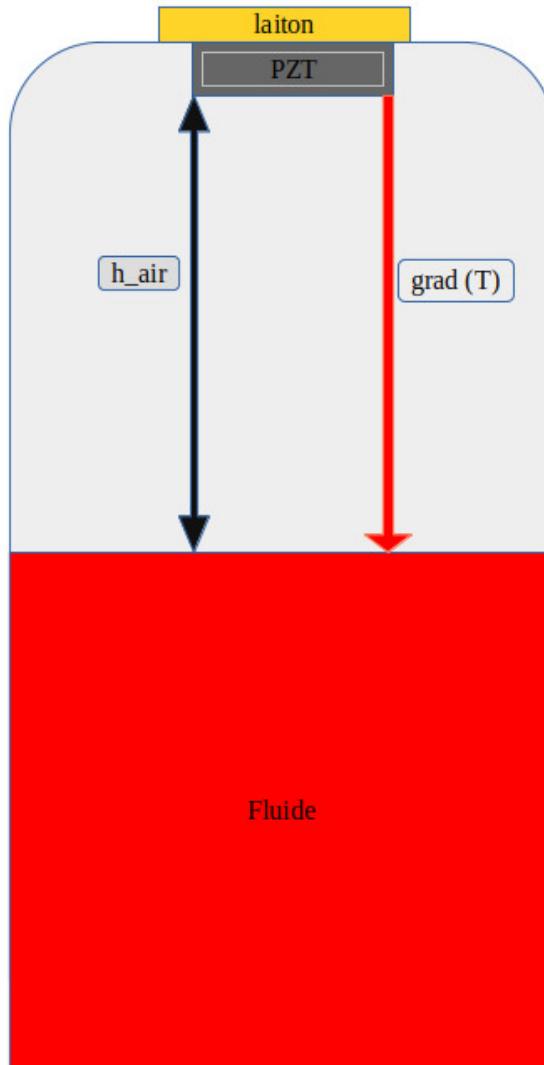


FIGURE III).2 – Configuration plane de système étudie.

a) Description de la simulation

La configuration consiste à étudier un gaz en échange thermique avec un solide capable de convertir les variations temporelles en électricité. Pour concevoir notre structure et extraire les données telles que la tension, l'intensité de courant et la puissance pyroélectrique, nous utilisons le logiciel Comsol Multiphysics.

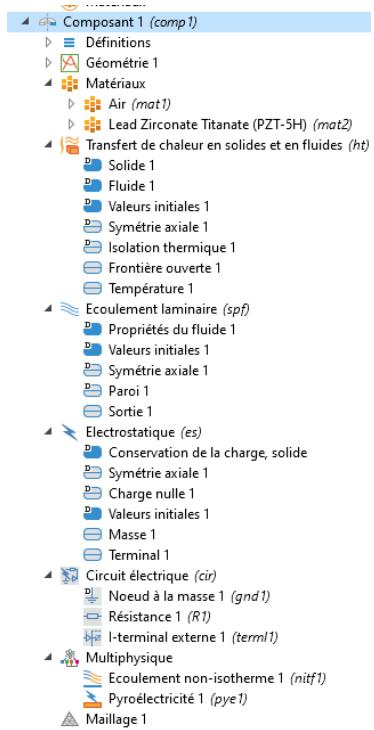


FIGURE III).3 – Composants de simulation.

Le matériau de conversion pyroélectrique que nous utilisons est le Buzzer, qui présente une symétrie basée sur un modèle 2D axysymétrique. L'échange convectif entre l'air chaud et le Buzzer est décrit par les principes de transfert de chaleur en solide et en fluide, avec un écoulement laminaire (ht). Nous précisons également la condition d'extrémité ouverte et la température fixe, qui représente la température du fluide.

En ce qui concerne la réponse pyroélectrique du PZT(5-H), nous avons ajouté un circuit électrique (cir) et utilisé la physique électrostatique (es) pour visualiser l'évolution des grandeurs électriques. En résumé, nous utilisons deux approches multiphysiques.

- La première :L'écoulement non-isothermique.
- La deuxième :La Pyroélectricité.

b) Résultats de la simulation

Dans cette étude, le diamètre du PZT est fixe, ce qui signifie que la variation du rapport d'aspect (A) dépend uniquement de H (hair dans notre simulation). Par conséquent, nous devons étudier l'impact de hair sur le système. Étant donné que la convection dépend du gradient spatial de la température et des dimensions du système, nous allons également examiner l'effet de l'augmentation de la température pour différentes hauteurs.

1) Impact de h_{air} :

Pour une température T_{fixe} de 400.15 K et des valeurs de $A=25;5;2.5;0.25;\frac{1}{6}$.

La Figure III).4c et II).11 présentent la variation temporelle de la température à la surface de Buzzer pour différent valeurs de h_{air} . Sur la figure III).4, on remarque que l'augmentation de la température au centre, passant de $T=293.15$ K à $T=400.15$ K, prend respectivement :

- 60 s pour $h_{air}=1$ mm.
- 500 s pour $h_{air}=10$ mm.
- 3000 s pour $h_{air}=100$ mm.

Alors, l'augmentation de h_{air} réduit le taux de variation de température.

2) Effet d'augmentation de la température pour différentes hauteurs .

L'impact de l'augmentation de la température à différentes hauteurs est illustré par les données thermiques et électriques de Buzzer à différentes hauteurs figures : III).5,III).6,III).7.

2).1 $h_{air}=1$ (mm) :

- Suivant l'augmentation du gradient spatial de la température de $T_{fixe}=325.15(K)$ à 500.15(K) par rapport à la température initiale $T_i=293.15(K)$, la figure III).5a montre que le taux de variation de la température au centre du Buzzer augmente également, et par conséquent, le temps de saturation diminue même si h_{air} reste fixe.
- Sur les figures (III).5b) et (III).5c), d'une part, les quantités i_p et v_p sont positives, ce qui correspond à un état de chauffage. Pour R_{ext} donné, l'intensité de courant et le potentiel récupérés varient avec ΔT , tels que :

$$i_p = 2.25(\mu A) \text{ et } v_p = 2250(mV) \text{ Pour } \Delta T = 107(K).$$

$$i_p = 4.75(\mu A) \text{ et } v_p = 4750(mV) \text{ Pour } \Delta T = 207(K).$$

D'autre part, le temps de réponse pyroélectrique ne dépasse pas 2(s).

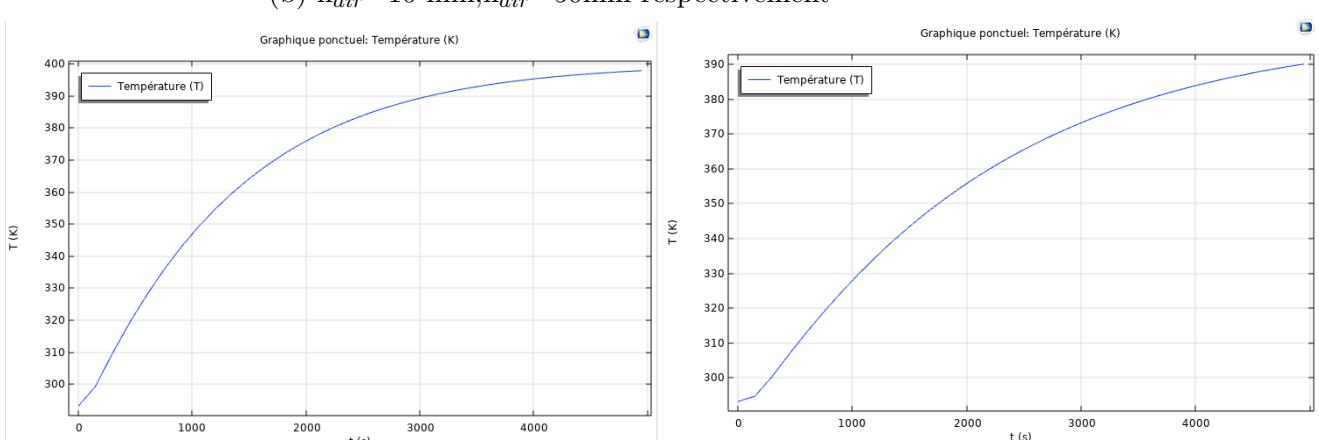
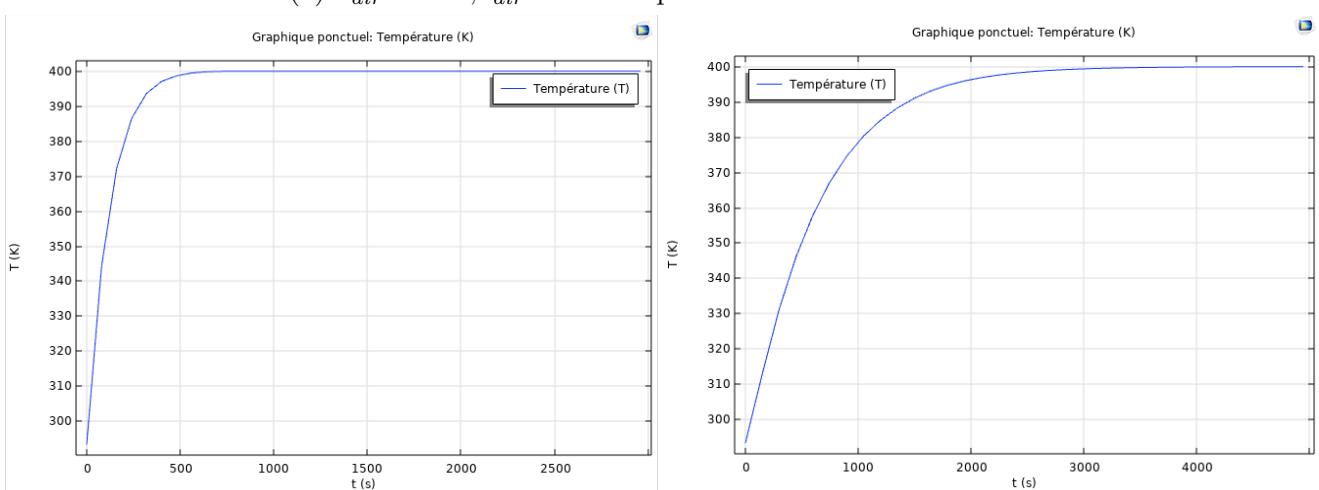
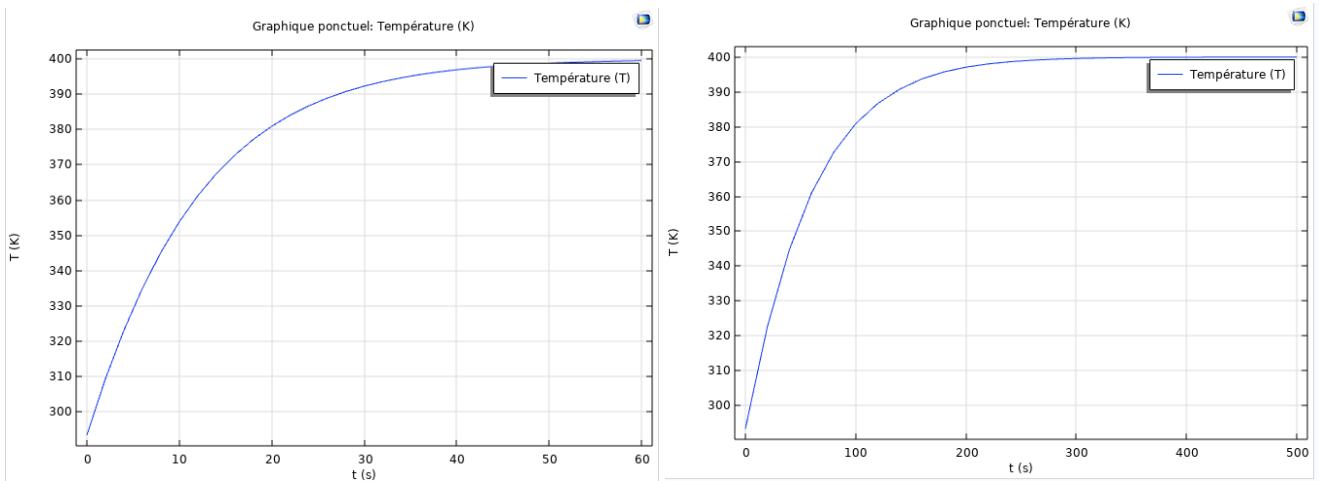
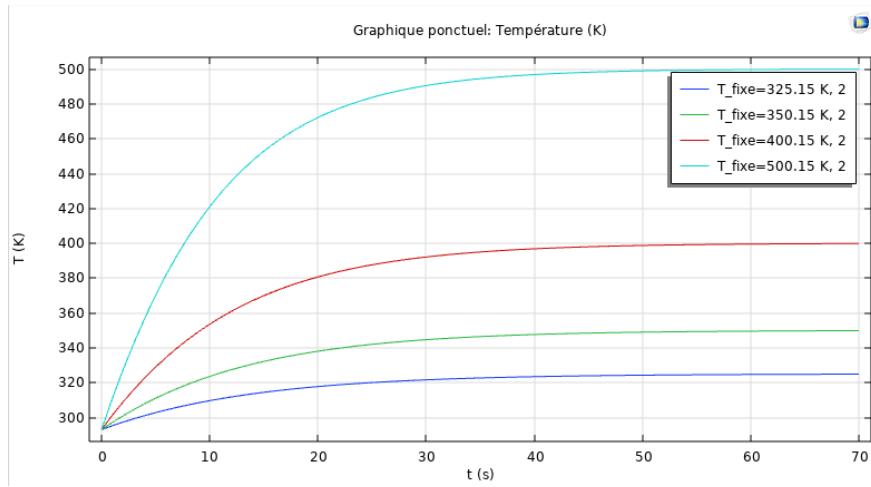
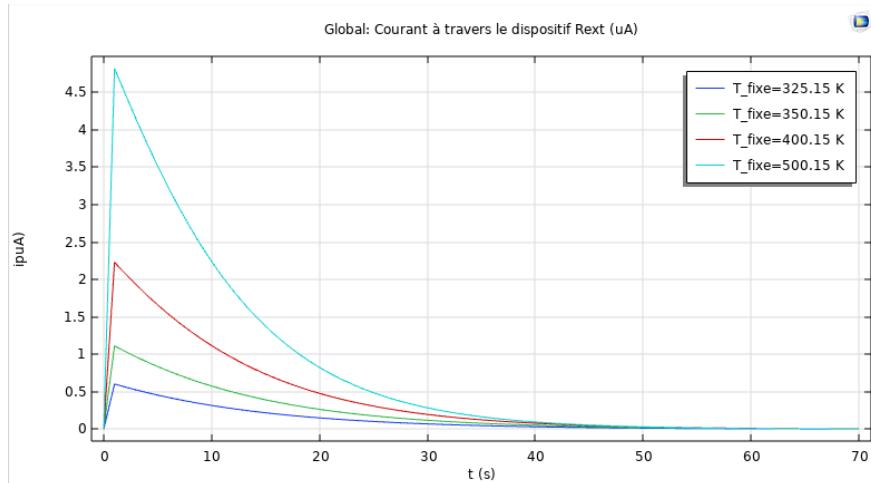


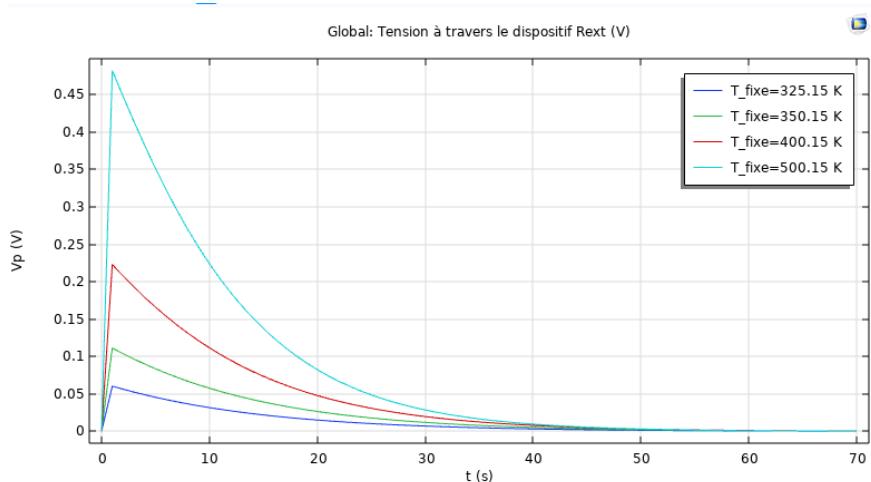
FIGURE III).4 – Variation de la température au centre de PZT en fonction du temps pour différent valeurs de h_{air} .



(a) variation temporelle de la température



(b) la lure de l'intensité de courant récupérer en(μA).

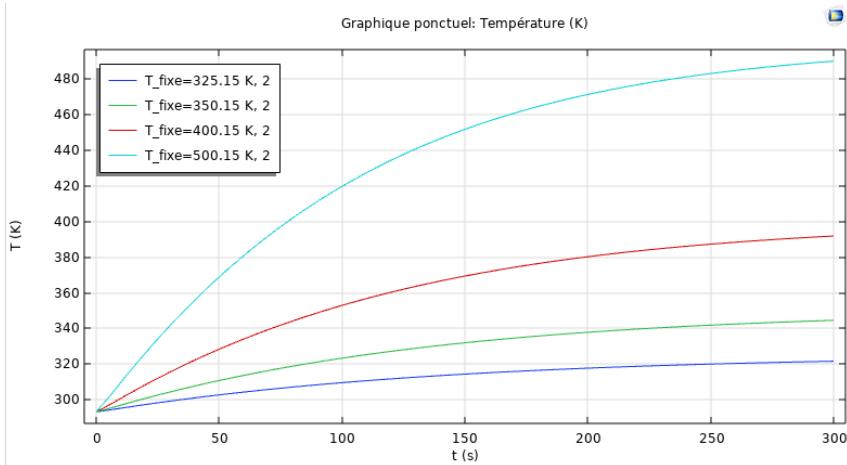


(c) la lure de potentiel récupérer en(V).

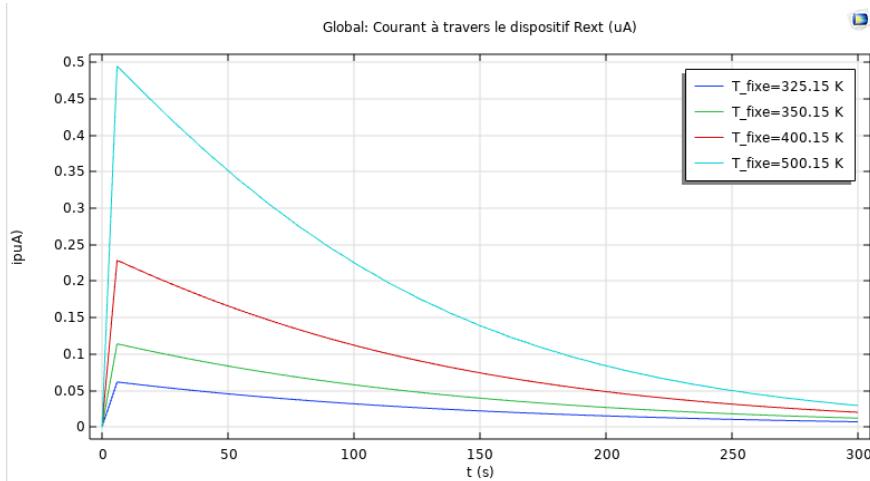
FIGURE III).5 – Résultats thermique et électrique de Buzzer pour $hair = 1\text{mm}$.

2).2 $h_{air}=10(\text{mm})$:

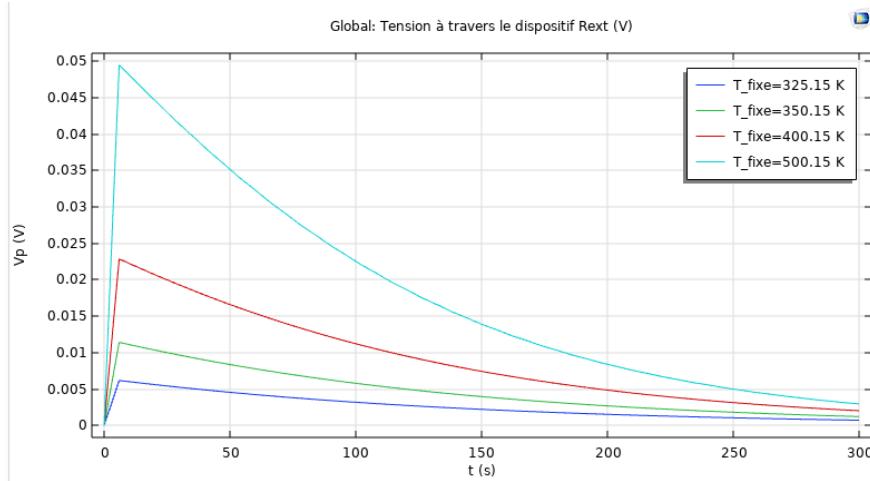
- Après avoir augmenté le gradient spatial de température de $Tfixe=325.15(\text{K})$ à



(a) variation temporelle de la température



(b) la lure de l'intensité de courant récupérer en(μA).



(c) la lure de potentiel récupérer en(V).

FIGURE III).6 – Résultats thermique et électrique de Buzzer pour $hair = 10\text{mm}$.

500.15(K) par rapport à la température initiale $T_i=293.15(\text{K})$, la figure III).6a illustre une augmentation du taux de variation de la température au centre du Buzzer. En conséquence, le temps de saturation diminue, même si la valeur de h_{air}

reste fixe.

- Sur les figures (III).6b) et (III).6c), d'une part, les quantités i_p et v_p sont positives, ce qui correspond à un état de chauffage. Pour R_{ext} donné, l'intensité de courant et le potentiel récupérés varient avec ΔT , tels que :

$$i_p = 0.23(\mu A) \text{ et } v_p \simeq 23(mV) \text{ Pour } \Delta T = 107(K).$$

$$i_p = 0.49(\mu A) \text{ et } v_p = 49(mV) \text{ Pour } \Delta T = 207(K).$$

D'autre part, le temps de réponse pyroélectrique prend environ 5(s).

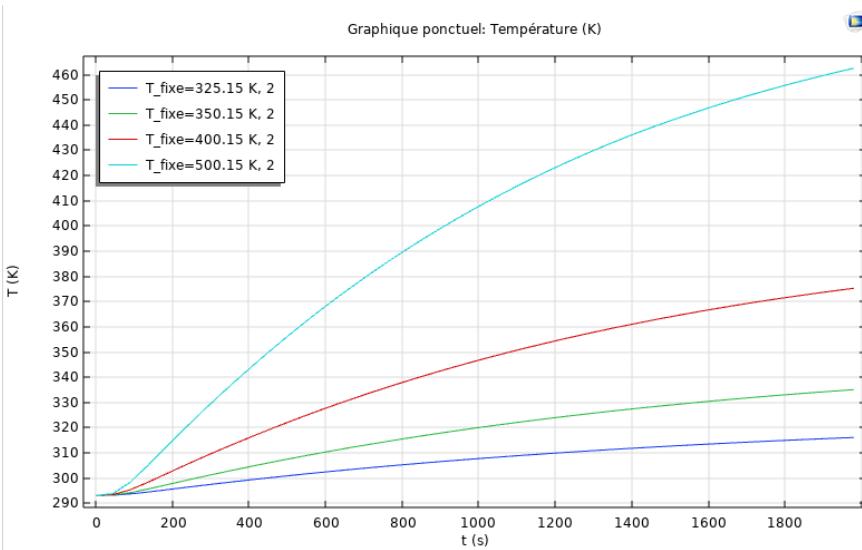
2).3 $h_{air}=100(\text{mm})$:

- Suivant l'augmentation du gradient spatial de la température de $T_{fixe}=325.15(\text{K})$ à $500.15(\text{K})$ par rapport à la température initiale $T_i=293.15(\text{K})$, la figure III).7a montre que le taux de variation de la température au centre du Buzzar augmente également, et par conséquent, le temps de saturation diminue même si h_{air} reste fixe.
- Sur les figures (III).7b) et (III).7c), d'une part, les quantités i_p et v_p sont positives, ce qui correspond à un état de chauffage. Pour R_{ext} donné, l'intensité de courant et le potentiel récupérés varient avec ΔT , tels que :

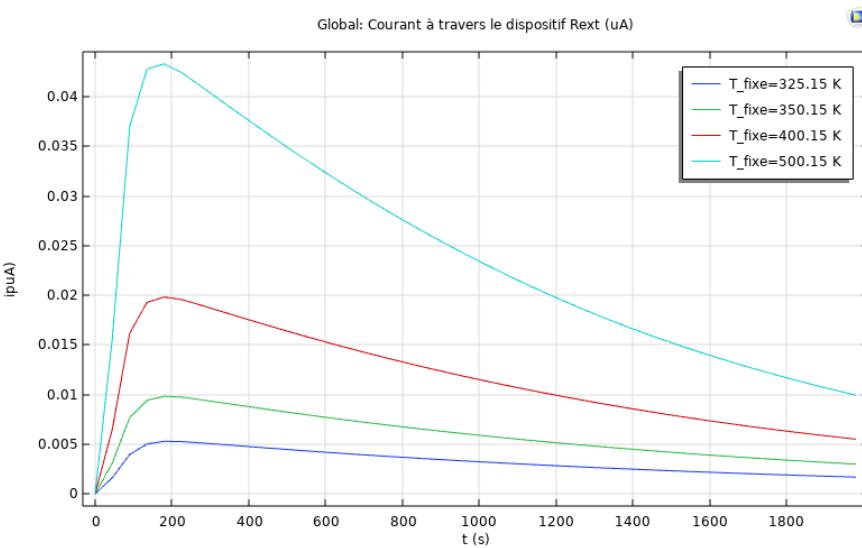
$$i_p = 0.02(\mu\text{A}) \text{ et } v_p = 2(\text{mV}) \text{ Pour } \Delta T = 107(\text{K}).$$

$$i_p = 0.044(\mu\text{A}) \text{ et } v_p = 4.4(\text{mV}) \text{ Pour } \Delta T = 207(\text{K}).$$

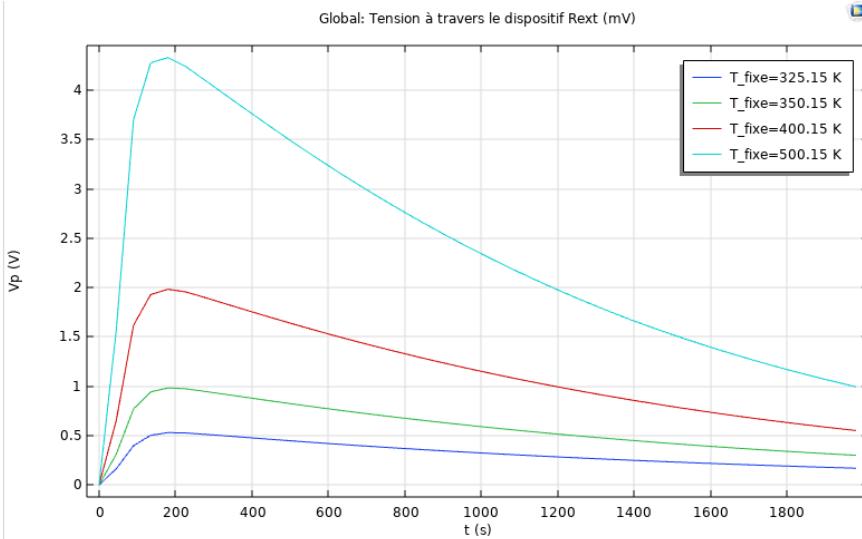
D'autre part, le temps de réponse pyroélectrique dépasse 150(s).



(a) variation temporelle de la température



(b) la lure de l'intensité de courant récupérer en(μA).



(c) la lure de potentiel récupérer en(V).

FIGURE III).7 – Résultats thermique et électrique de Buzzer pour hair =100mm .

3) Interprétations et conclusion :

Dans cette simulation, nous avons cherché à étudier le fonctionnement de notre application en fonction de la hauteur d'air ($hair = 1, 10, 100 \text{ mm}$) et en fonction du couplage entre la variation spatiale de la température ($T_{fixe} = 225.15, 350.15, 400.15, 500.15 \text{ K}$) et la variation de h_{air} . Nous avons constaté que :

- L'augmentation de la hauteur d'air augmente le temps de saturation du Buzzer, ce qui allonge le temps de réponse pyroélectrique pour une valeur donnée de T_{fixe} .
- L'augmentation du gradient spatial de la température pour chaque valeur de h_{air} réduit légèrement le temps de réponse pyroélectrique.

Ces données électriques nous aideront à développer le détecteur de niveau de fluide autonome, dont nous avons précédemment parlé et décrit le concept ainsi que la configuration, en traçant les intensités de courant ip_{max} (ou le potentiel Vp_{max}) en fonction de $hair$ pour $T_{fixe} = 400.15 \text{ K}$, par exemple.

$h_{air}(\text{mm})$	$ip_{max}(\mu\text{A})$	$Vp_{max}(\text{mV})$
0.1	11.5	1150
1	2.25	250
5	0.44	44
10	0.23	23
50	0.043	4.3
100	0.02	2

TABLE III).1 – Valeurs maximales des i_p et v_p pour différent hauteur.

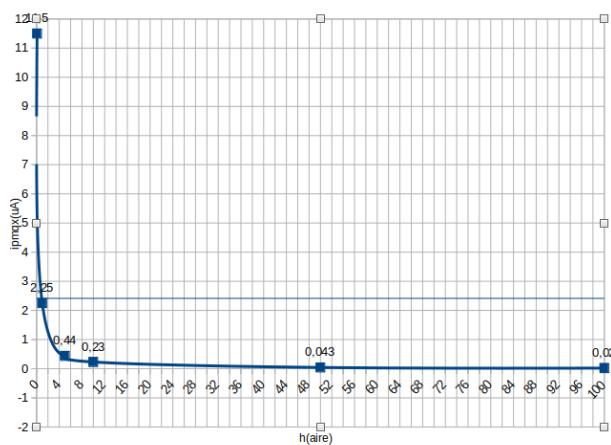


FIGURE III).8 – Intensité de courant maximale i_p en fonction de h_{air} .

C) Conclusion et perspectives.

Les simulations présentées dans ce chapitre sont dédiées à la conversion thermique-électrique, basée sur la convection naturelle, qui nous a permis de créer une variation temporelle de la température à partir d'une source fixe de cette dernière, nécessaire au fonctionnement de la céramique pyroélectrique.

L'écoulement laminaire de l'air chaud maintient le Buzzar dans un état de chauffage, par conséquent, une réponse pyroélectrique a été générée. Le traitement des résultats électriques permet de les utiliser pour développer un capteur autonome en termes d'énergie, capable de nous informer sur le niveau du fluide chaud.

Ce capteur peut être appliqué dans tout système convectif, c'est-à-dire même si le fluide a une température $T_{fixe} < T_i(\text{Buzzar})$, un gradient spatial de la température va exciter le détecteur, et de la même manière, le traitement des résultats électriques peut nous informer sur le niveau de fluide froid.

Ainsi, les perspectives de travail présentées dans ce rapport sont les suivantes :

- L'étude de l'impact de la viscosité du fluide.
- L'étude de l'impact du type d'écoulement de l'air.
- Prendre en compte la contribution de la dilatation thermique de PZT.
- étude de fiabilité d'autres matériaux son plomb.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était de contribuer au développement de la recherche dans le domaine de la récupération d'énergie thermique à l'aide d'un matériau possédant la propriété de la pyroélectricité.

Les notions fondamentales et l'aperçu bibliographique sur les techniques de conversion d'énergie, ainsi que les ressources énergétiques ambiantes, présentés dans le premier chapitre, nous ont permis de remarquer une opportunité de récupération de l'énergie thermique perdue et de sa conversion en électricité.

Le deuxième chapitre du manuscrit a été consacré à la formulation des équations décrivant les comportements pyroélectriques en réponse aux variations de température en régime dynamique, en utilisant une approche maxwellienne. Cette démarche a permis de modéliser les réponses pyroélectriques distinctes lors des phases de chauffage et de refroidissement du matériau Buzzer sous l'influence d'un flux thermique variable. Nous avons également réalisé une simulation afin d'approcher et de préciser l'impact des paramètres du système sur les comportements pyroélectriques. Enfin, une étude expérimentale a été menée pour valider nos résultats.

Le troisième chapitre se concentre sur l'application des propriétés pyroélectriques pour récupérer l'énergie résultante de la convection naturelle à l'intérieur d'un réservoir contenant un fluide chaud par l'air. L'objectif est d'utiliser les données électriques pour détecter le niveau de fluide et assurer l'autonomie du capteur.

Bibliographie

- [1] D. Damjanovic « Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics » *Reports on Progress in Physics* 61 (1998) 1267-1324
- [2] E. Fatuzzo « Theoretical considerations on the switching transient in ferroelectrics » *Physical Review* 127 (1962) 1999-2005
- [3] M. BRISSAUD.Matériaux piézoélectriques : caractérisation, modélisation et vibration.Collection des Sciences Appliquées de l'INSA de Lyon Presses polytechniques et universitaires normandes, (2007).
- [4] A. Cuadras, M. Gasulla, V. Ferrari, Thermal energy harvesting through pyroelectricity, *Sensors and Actuators A : Physical* 158 (1) (2010) 132–139.
- [5] G. Sebald, S. Pruvost, D. Guyomar, Energy harvesting based on ericsson pyroelectric cycles in a relaxor ferroelectric ceramic, *Smart Materials and Structures* 17 (1) (2007) 015012.
- [6] F. Y. Lee, A. Navid, L. Pilon, Pyroelectric waste heat energy harvesting using heat conduction, *Applied thermal engineering* 37 (2012) 30–37.
- [7] M. Grätzel, Solar energy conversion by dye-sensitized photovoltaic cells, *Inorganic chemistry* 44 (20) (2005) 6841–6851.
- [8] C. X. Guo, G. H. Guai, C. M. Li, Graphene based materials : enhancing solar energy harvesting, *Advanced Energy Materials* 1 (3) (2011) 448–452.
- [9] F. Belhora, P.-J. Cottinet, D. Guyomar, L. Petit, L. Lebrun, A. Hajjaji, M. Mazroui, Y. Boughaleb, Optimization of energy harvesting conversion using the hybridization of electrostrictive polymers and electrets, *Sensors and Actuators A : Physical* 189 (2013) 390–398.
- [10] C. Graf, J. Maas, D. Schapeler, Energy harvesting cycles based on electro active polymers, in : SPIE Smart Structures and Materials+ Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, International Society for Optics and Photonics, 2010, pp. 764217–764217.
- [11] C. Navau, J. Prat-Camps, A. Sanchez, Magnetic energy harvesting and concentration at a distance by transformation optics, *Physical review letters* 109 (26) (2012) 263903.

- [12] IBGE, Limiter les sources de pollution intérieure : pollution électromagnétique, Tech. Rep., Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, Novembre 2007. URL <http://app.bruxellesenvironnement.be/guidebatimentdurable/>
- [13] C. B. Favarel, Optimisation de générateurs thermoélectriques pour la production d'électricité, Thèse de doctorat, Université de Pau (2014)
- [14] VAN BAVEL M., LEONOV V., YAZICIOGLU R.F., TORFS T., VAN HOOF C., E.POSTHUMA N. VULLERS R.J.M., Wearable Battery-free Wireless 2-Channel EEG Systems Powered by Energy Scavengers, Sensors Transducers Journal, vol. 94, no. 7 pp. 103–115, 2008.
- [15] RAGHUNATHAN V. CHOU P.H., Design and power management of energy harvesting embedded systems, in Proc. of International Symposium on Low Power Electronics and Design, p. 369, ACM Press, New York, New York, USA, 2006.
- [16] JIANG X., POLASTRE J. CULLER D., Perpetual environmentally powered sensor networks, in Proc. of 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp. 463–468, 2005.
- [17] SIMJEE F. CHOU P., Everlast : long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node, in Proc. of International Symposium on Low Power Electronics and Design, p. 202, 2006.
- [18] PARK C. CHOU P., AmbiMax : Autonomous Energy Harvesting Platform for Multi-Supply Wireless Sensor Nodes, IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, pp. 168–177, 2006.
- [19] L. Solymar, D. Walsh, Lectures on the electrical properties of materials.
- [20] K. W. Kwok, H. L. W. Chan, C. L. Choy, Evaluation of the material parameters of piezoelectric materials by various methods, IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control 44 (4) (1997) 733–742.
- [21] S. Meninger, J. O. Mur-Miranda, R. Amirtharajah, A. Chandrakasan, J. H. Lang, Vibration-to-electric energy conversion, IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems 9 (1) (2001) 64–76.
- [22] KYMISSIS J., KENDALL C., PARADISO J. GERSHENFELD N., Parasitic power harvesting in shoes, in Proc. of IEEE International Conference on Wearable Computing, pp. 132–139, 1998.
- [23] DONELAN J., LI Q., NAING V., HOFFER J., WEBER D. KUO A., Biomechanical energy harvesting : generating electricity during walking with minimal user effort., Science, vol. 319, no. 5864 pp. 807–10, Février 2008.
- [24] J. A. Paradiso, T. Starner, Energy scavenging for mobile and wireless electronics, IEEE Pervasive computing 4 (1) (2005) 18–27.
- [25] H. Reinisch, S. Gruber, H. Unterassinger, M. Wiessflecker, G. Hofer, W. Pribyl, G. Holweg, An electromagnetic energy harvesting system with 190 nw idle mode power consump-

- tion for a baw based wireless sensor node, IEEE Journal of solid-state circuits 46 (7) (2011) 1728–1741.
- [26] GALLEE F., Micro-ondes et économie d'énergie, in Proc. of Journée TIC et développement durable, 2009.
- [27] T. Markvart, Solar electricity, Vol. 6, John Wiley Sons, 2000.
- [28] J. K. Ward, S. Behrens, Adaptive learning algorithms for vibration energy harvesting, Smart Materials and Structures 17 (3) (2008) 035025
- [29] STARNER T., Human-powered wearable computing, IBM systems Journal, vol. 35, no. 3 pp. 618–629, 1996.
- [30] J. A. Paradiso, T. E. Starner, Human-generated power for mobile electronics, in : Low-power electronics design, CRC Press, 2004, pp. 45–1.
- [31] P. Boch, Matériaux et processus céramiques, 25, 26, 141, Hermes science Europe LTD, (2001).
- [32] R. Perrin, J. P. Scharff, Chimie industrielle, 632, 639, 640, (1999).
- [33] Jean-Jacques Rousseau. Cristallographie géométrique et Radiocristallographie, 155, 205, Masson, Paris, (1995).
- [34] MITSUI, T. Landolt-Bornstein : Numerical data and functional relationships in science and technology. Berlin : Springer Verlag, 1969. Vol. 3, ferro and antiferroelectric substances, p. 308.
- [35] VIJAY, DP., DESU, S.B., PAN, W., Reactive ion etching of lead zirconate titanate (PZT) thin film capacitors, Journal of the Electrochemical Society, 1993, vol. 140, n°9, p.p. 2635-9.
- [36] E. DEFAY, Thèse de doctorat. Université de Lyon, (1999).
- [37] K. Kakogawa, J. Mohri, H. Takahashie et al. A compositional fluctuation and properties of Pb(Zrx, Ti1-x)O3. Solid State Commun, 1977.
- [38] J. Safiou, Nouvelle technique de photo-inscription dans linbo3 : autofocalisation contrôlée par effet pyroélectrique, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté
- [39] S. P. Gribkov, V. S. Zal'tsberg, V. I. Nosova, and V. E. Risin. ". Sov. Phys. Solid State, 33 :368, 1991.
- [40] M. Bourim, C. Moon, S. Lee, V. Sidorkin, and K. Yoo. "pyroelectric electron emission from z face polar surface of lithium niobate monodomain single crystal". J. Electroceram., 17 :479, 2006.
- [41] J. Han, A. von Jouanne, T. Le, K. Mayaram, T. Fiez, Novel power conditioning circuits for piezoelectric micropower generators, in : Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE, Vol. 3, IEEE, 2004, pp. 1541–1546.
- [42] G. Sebald, L. Lebrun, B. Guiffard, D. Guyomar, Morphotropic pmn–pt system investigated by comparison between ceramics and crystal, Journal of the european ceramic society 25 (12) (2005) 2509–2513.

- [43] S. Xu, K. D. Ngo, T. Nishida, G.-B. Chung, A. Sharma, Converter and controller for micro-power energy harvesting, in : Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, Vol. 1, IEEE, 2005, pp. 226–230.
- [44] M. Davis, D. Damjanovic, N. Setter, Pyroelectric properties of $(1-x) \text{ Pb(Mg1/3Nb2/3)}_3 \text{ O}_3$ - $x \text{ PbTiO}_3$ and $(1-x) \text{ Pb(Zn1/3Nb2/3)}_3 \text{ O}_3$ - $x \text{ PbTiO}_3$ single crystals measured using a dynamic method, *Journal of applied physics* 96 (5) (2004) 2811–2815.
- [45] W. Ng, B. Ploss, H. L. Chan, F. G. Shin, C. Choy, Pyroelectric properties of $\text{PZT}/\text{P(VDF-TrFE)}$ 0-3 composites, in : Applications of Ferroelectrics, 2000. ISAF 2000. Proceedings of the 2000 12th IEEE International Symposium on, Vol. 2, IEEE, 2000, pp. 767–770.
- [46] D.-S. Kang, M.-S. Han, S.-G. Lee, S.-H. Song, Dielectric and pyroelectric properties of barium strontium calcium titanate ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 23 (3) (2003) 515–518.
- [47] A. Peláiz Barranco, F. Calderón Piñar, O. Pérez Martínez, Plzt ferroelectric ceramics on the morphotropic boundary phase. study as possible pyroelectric sensors, *Physica status solidi (a)* 186 (3) (2001) 479–485.
- [48] S. B. Lang, Pyroelectricity : from ancient curiosity to modern imaging tool, *Physics today* 58 (8) (2005) 31–36.