



**Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Biomédical**

**RAPPORT DE PRESENTATION**

**DE PROJET DE FIN D'ETUDES**

**MASTER en GENIE BIOMEDICAL**

**Spécialité : Instrumentation Biomédicale**

**Présenté par : BELMOKHTAR Fatima Zohra et CHAMEKH Ikrame.**

---

**Récupération d'énergie à base d'un matériau  
piézoélectrique pour alimenter un dispositif médical**

---

**Présenté le 9 Novembre 2020, devant le Jury :**

Mr	KERAI Salim	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mme	BENDELHOM Touria	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr	BRIXI NIGASSA Mohamed El Amine	MCB	Université de Tlemcen	Co-encadrant
Mr	SOULIMANE Sofiane	MCA	Université de Tlemcen	Encadrant

**Année universitaire 2019-2020**

# Remerciement

En premier lieu nous remercions Dieu qui nous a donné le courage et la volonté pour atteindre notre objectif

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements et notre profonde gratitude à M. Soulimane Sofiane pour sa confiance que nous a accordé en acceptant de nous encadrer, pour sa disponibilité, tout au long de l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude, qui ont été pour nous un grand apport.

Nous remercions également M. Brixi Nigassa Mohamed El Amine pour leurs chaleureux accueil, leurs écoutes et conseils, et qui nous a soutenu dès le début ainsi que pour la confiance qu'ils nous ont faite.

Nos sincères remerciements à nos parents qu'on espère qu'ils seront toujours fiers de nous.

Nous remercions également le département de GBM de l'université Abou bakr Belkaid de Tlemcen. Nous adressons notre reconnaissance aux membres du jury Mr Kerai Salim et Mme Bendelhoum T.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près et de loin à réalisation de ce travail.

# Dédicace 1

C'est avec tout fierté, avec tout respect que je dédie ce modeste travail.

A mes chers parents

Qui ont allumé mon chemin du savoir et qui m'ont encouragé et soutenu depuis mon enfance jusqu'à mon soutenance. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et ma formation. C'est grâce à vous que je suis arrivée aujourd'hui à ce niveau d'étude.

A mes deux frères Houssam el dine Abde El rahmane et Saddak Mohamed el Amine et mes chères soeurs Meriem Nour El Houda et Syrine.

A ma chère copine et binome Ikrame « marokha » qui a partagé avec moi ce travail.

Je dédie également ce travail à tous la famille Belmokhtar et chaibeddra, ma grand-mère mes tantes spécialement Khadija, mes oncles, mes cousins et cousines et à tous les membres de ma famille petits et grands.

Mes remerciements les plus sincères à Abderrafiq qui m'a apporté leur aide et qui est contribué à l'élaboration de ce travail.

Je dédie aussi ce travail à mon chère Insaf pour tous sa assistance et presence dans ma vie

Je dédie ce travail aussi à tous mes amis : Fatiha, Amina, noure elhouda, Houda, Hanae, Imane

**Fatima Zohra**

# Dédicace 2

J'ai le plaisir de dédier ce mémoire : A mes chers parents la source d'amour et de tendresse, vous représentez pour moi le symbole de la bonté par excellence. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance jusqu'à aujourd'hui. Ce travail est le fruit de vos sacrifices que vous avez consenti pour mon éducation et ma formation.

A Mes chères soeurs Chaima, Aya et Malak et mon très chère frère Bilal Belkacem qui m'avez toujours encouragé.

Je dédie aussi ce travail à mon chère Insaf pour tous sa assistance et presence dans ma vie. Mes remerciements les plus sincères à Abde Almadjid qui a été une aide et un soutien pour moi à tout moment

A ma chere copine et binome Fatima Zahra qui a partagé avec moi ce travail

Je dédie aussi ce travail à tous mes amis Jihad,Houda,Toufik,Hanae,Abde alkader,Linda,

Nour el dine,Meryem,Imane,Mouna,Khadija,Marwa,SHAizia...

A tous ceux ou celles qui me sont chers et qui j'ai omis involontairement à citer.

**Ikrame**

## Table des matières

Remerciement.....	2
Dédicace 1.....	3
Dédicace 2.....	4
Listes des figures.....	7
Liste des tableaux.....	8
Listes des abréviations.....	9
Résumé.....	10
Introduction générale.....	11
Chapitre I : Etat de l'art.....	14
Introduction :.....	15
I.2 Les sources de récupération d'énergie.....	15
I.3 Energie dissipé par le corps humain.....	17
I.4 Technique de transduction.....	19
I.4.1 La transduction électromagnétique.....	19
I.4.2 La transduction électrostatique.....	20
I.4.3 La transduction piézoélectrique.....	20
I.4.3.1 La piézoélectricité.....	22
I.4.3.2 Les propriétés des matériaux piézoélectriques.....	23
I.5 Choix de matériau.....	27
I.5.1 L'oxyde de Zinc (ZnO).....	27
I.5.2 Nitrure d'aluminium (AlN).....	27
I.5.3 Zirconate Titanate de Plomb (PZT).....	28
I.5.3.1 Les types de PZT.....	29
I.5.3.2 Comparaison.....	30
I.6 Conclusion.....	31
Chapitre II : Circuit d'extraction d'énergie.....	32
II.1 Introduction.....	33
II.2 Circuit d'extraction d'énergie.....	33
II.2.1 Convertisseur AC/DC.....	35
II.2.2 Les techniques d'optimisation non linéaire.....	36
II.2.2.1 SSHI série.....	37

II.2.2.2 SSHI parallèle.....	37
II.2.3 Les convertisseurs DC/DC .....	38
II.2.3.1 Buck Boost.....	40
II.2.4 Stockage.....	40
II.3 Cahier des charges du circuit d'extraction d'énergie.....	41
II.4 Conclusion .....	42
Chapitre III : Modélisation sous COMSOL Multyphysics .....	44
III.1 Introduction .....	45
III.2 Modélisation par éléments finis (MEF ou FEM en anglais) .....	45
III.3 Modélisation du générateur piézoélectrique sous COMSOL MULTIPHYSICS.....	47
III.3.1 Description de notre modèle .....	51
III.3.2 Etude paramétrique .....	53
III.3.2.1 Les effets géométriques .....	54
III.4 Les applications médicales .....	63
III.5 Conclusion .....	64
Conclusion et perspectives .....	66
Références Bibliographiques.....	69

## Listes des figures

Figure I- 1:Les principales sources d'énergie ambiantes[2].	16
Figure I- 2:Les énergies provenant des activités humaines [3].	18
Figure I- 3:La récupération d'énergie électromagnétique[13].	19
Figure I- 4: La récupération d'énergie électrostatique [14].	20
Figure I- 5 :La récupération d'énergie piézoélectrique [15].	21
Figure I- 6:Principe de la piézoélectricité.	23
Figure I- 7:Répartition des classes cristallines en fonction des propriétés.	24
Figure I- 8 :Convention des directions des axes : la polarisation P parallèle à l'axe 3 [19].	25
Figure I- 9 :Les différentes modes de couplages d'un élément piézo-électrique [20].	26
Figure II- 1 :Schéma fonctionnel d'un générateur piézoélectrique.	34
Figure II- 2 :Energies mises en jeu lors du processus de récupération d'énergie.	35
Figure II- 3 :Circuit non linéaire SSHI en série [31].	37
Figure II- 4 :Circuit non linéaire SSHI en parallèle [31].	38
Figure II- 5 :Convertisseur DC/DC de type Buck Boost [1].	40
Figure III- 1 :Les principaux éléments de l'interface COMSOL Multiphysics.	46
Figure III- 2 Les étapes de modélisation sous COMSOL Multiphysics.	47
Figure III- 3 :Modèle principale d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique.	51
Figure III- 4:Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur la largeur de la masse sismique.	54
Figure III- 5 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur la hauteur de la masse sismique.	55
Figure III- 6 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur la largeur de la poutre.	56
Figure III- 7 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur l'épaisseur de la poutre.	57
Figure III- 8 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur W-plat.	58
Figure III- 9 :Courbe et diagramme de l'étude des déférentes matériaux piézoélectriques.	59
Figure III- 10 :Modèle d'un récupérateur d'énergie avec des électrodes en Platine.	60
Figure III- 11 :Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec électrode.	61
Figure III- 12 :la courbe de puissance générer de l'étude paramétrique des coefficients piézoélectrique.	63

## Liste des tableaux

Tableau I- 1 :Avantages et inconvénients des différents types de transduction pour la récupération d'énergie [16].	22
Tableau I- 2 :Les paramètres des équations fondamentales d'un matériau piézoélectrique.	25
Tableau I- 3 :Les avantages et les inconvénients des matériaux piézoélectriques [25].	28
Tableau I- 4 :Comparaison entre les céramiques PZT soft et hard [19].	30
Tableau II- 1: Les différents types d'un convertisseur AC/DC [27].	36
Tableau II- 2 :Comparaison des différents convertisseurs DC/DC [32].	39
Tableau II- 3 :Les meilleurs circuits d'extraction d'énergie choisis.	42
Tableau III- 1 :Les constantes de la simulation [34].	48
Tableau III- 2 :Les différents travaux de recherche et modèles des générateurs piézoélectriques proposés dans la littérature.	50
Tableau III- 3 :Les paramètres géométrique de la micro-poutre.	52
Tableau III- 4 :Les paramètres du matériau piézoélectrique PZT 5A (COMSOL Multiphysics).	53
Tableau III- 5 :Les coefficients piézoélectriques des différents matériaux piézoélectriques (bibliothèque Comsol Multiphysics).	59
Tableau III- 6 :Les dimensions des couches de la micro-poutre.	61
Tableau III- 7 :Coefficients piézoélectriques du PZT.	62
Tableau III- 8 :Consommation électrique des dispositifs médicaux implantées [14].	64



## **Listes des abréviations**

**MEMS** : Micro Electro Mechanical Systems.

**PZT** : Piézoélectrique.

**IRM** : Imagerie par Résonance Magnétique.

**ZnO** : Oxyde de Zinc.

**AlN** : Nitrure d'Aluminium.

**PVDF** : PolyVinyl-Dinedifluoride.

**UV** : Ultra-Violet.

**SSHI** : Synchronized Switch Harvesting on Inductor.

## Résumé

Les systèmes de récupération d'énergie vibratoire permettent de générer de l'électricité à partir des vibrations ambiantes. Ils sont une alternative à l'utilisation de piles pour l'alimentation de systèmes électroniques embarqués communicants basse consommation comme les MEMS. Ce type de configuration permettra de rendre ces réseaux de micro capteurs et micro actionneurs autonomes. Généralement, cette récupération met en œuvre un transducteur électromécanique qui est utilisé pour convertir l'énergie mécanique au sein de la structure oscillante en électricité et un circuit électronique dédiée à l'extraction et au stockage de l'énergie générée est branché au transducteur. La récupération de l'énergie mécanique ambiante est très attrayante pour les microsystèmes car leurs besoins énergétiques sont faibles, de l'ordre d'une centaine de  $\mu\text{W}$  à quelques  $\text{mW}$ , et l'énergie présente dans l'environnement peut alors suffire pour leur autonomie énergétique. Dans ce projet, nous viserons un micro transducteur électromécanique piézoélectrique pour convertir l'énergie mécanique pouvant être issue du corps humain. Ces énergies sont étudiées sous un modèle par éléments fini sous COMSOL Multiphysics afin de choisir le meilleur design de structure pour obtenir un maximum de puissance pouvons être utiliser pour alimenter un micro-dispositif médical.

**Mots clés :** Récupération d'énergie ; Piézoélectrique, MEMS ; PZT ; COMSOL Multiphysics.

## Abstract

Vibration energy harvesting systems are used to generate electricity from ambient vibrations. They are an alternative to the use of batteries to power low-power communicating embedded electronic systems such as MEMS. This type of configuration will make these networks of micro sensors and micro actuators autonomous. Typically, this recovery involves an electromechanical transducer that is used to convert mechanical energy within the oscillating structure into electricity and an electronic circuit dedicated to the extraction and storage of the generated energy is connected to the transducer. The recovery of the ambient mechanical energy is very attractive for microsystems because their needsenergy consumption is low, in the order of a hundred  $\mu\text{W}$  to a few  $\text{mW}$ , and the energy present in the environment can then be sufficient for their energy autonomy. In this project, we will aim at a piezoelectric electromechanical micro transducer to convert the mechanical energy that can come from the human body. These energies are studied in a finite element model under COMSOL Multiphysics in order to choose the best structural design to obtain the maximum power that can be used to power a medical micro device.

**Key words:** Energy harvesting ; Piezoelectric, MEMS ; PZT; Comsol Multiphysic.

## ملخص

تسمح لنا أنظمة استعادة الطاقة الاهتزازية بتوليد الكهرباء انطلاقاً من الاهتزازات المحيطة. فهي تعتبر بديلاً للبطاريات من أجل تشغيل أنظمة إلكترونية منخفضة الاستهلاك مثل MEMS هذا النوع من الالات سيجعل هذه المجموعة من أجهزة الاستشعار الدقيقة والمحرك الدقيقة مستقل تماماً. هذا النوع من استرجاع الطاقة يحتوي على محول كهروميكانيكي موضوع داخل هيكل متحرك يعمل على تحويل الطاقة الحركية الي كهرباء ويتضمن كذلك دائرة كهربائية لاستخراج الطاقة وتخزينها. الطاقة الكهربائية المستخرجة من المحيط هي الأكثر تناسبا مع الأجهزة المصغرة ذات الاستهلاك القليل للطاقة التي لا تتعدى المئات من الميكرواط الى المليواط وبذلك فهي كافية لجعل هذه الأجهزة ذاتية العمل. في هذا المشروع نقوم باستهداف محول طاقة كهروميكانيكية-كهروضغطية من أجل تحويل الطاقة الحركية لجسم الانسان. لدراسة هذه الطاقات نقوم بتمثيل مجسم على برنامج COMSOL Multiphysics لاسترجاع الطاقة حيث نقوم بمجموعة من الدراسات عليه من أجل اختيار الشكل المناسب لاسترجاع أكبر كمية من الطاقة التي يمكن استخدامها لتشغيل جهاز طبي مصغر.

**الكلمات الرئيسية:** استعادة الطاقة. كهروضغطية. محول كهروميكانيكي. الطاقة الحركية.

# **Introduction générale**

### Introduction générale

Depuis quelques années, il existe un intérêt croissant pour les systèmes autonomes qui sont conçus pour travailler de manière autonome. Ces systèmes ont l'avantage d'être placés partout et sans contrainte de câblage. Le micro-capteur est un exemple connu et développé aux cours des dernières années notamment pour la surveillance médicale et dans les études de la fiabilité des systèmes d'extraction de signaux physiologiques. Un système de récupération d'énergie ambiante est une solution à la problématique de l'autonomie énergétique des micro-dispositifs surtout dans le domaine de l'alimentation de systèmes implantés dans le corps humain. La récupération d'énergie, également connue sous le nom de « énergie parasite » ou « micro-générateurs » dans la littérature, est un processus exécuté par un mécanisme de conversion pour générer de l'énergie électrique à partir des sollicitations de milieu environnant représentant une énergie non-utilisée. Elle est très attrayante pour les microsystèmes car leurs besoins énergétiques sont faibles, de l'ordre d'une centaine de  $\mu\text{W}$  à quelques  $\text{mW}$ , et l'énergie présente dans l'environnement peut alors suffire pour leur autonomie énergétique. Toutefois, à chaque environnement peut correspondre une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables. La lumière incidente, les gradients thermiques, les vibrations des machines et les fonctions du corps humain sont les exemples bien connus de sources d'énergie ambiante qui retiennent l'attention de notre étude pour les convertir en énergie électrique. Cette conversion nécessite des différentes méthodes de transductions telles que la transduction électromagnétique, électrostatique et la transduction piézoélectrique. La Transduction piézoélectrique, avec son couplage électromécanique inhérent et une densité de puissance élevée par rapport aux transducteurs électromagnétiques et électrostatiques, ont été largement explorée pour produire de l'énergie à partir de sources d'énergie vibratoire.

L'objectif de notre projet est une conception d'un micro-transducteur électromécanique piézoélectrique pour convertir l'énergie mécanique pouvant être issue du corps humain et pour l'extraction et au stockage de l'énergie générée branché à l'alimentation d'un micro-dispositif. Pour la génération d'électricité, trois parties indissociables doivent être étudiées dont :

1. l'aspect mécanique dont il faut minimiser les pertes et l'étude de la linéarité et la non-linéarité pour optimiser la bande passante,
2. l'aspect micro-transducteur piézoélectrique dont le coefficient du couplage électromécanique doit être optimisé tout en minimisant les pertes électriques,
3. l'aspect circuit d'extraction et stockage de l'énergie produite tout en augmentant la puissance récupérée.

Ce mémoire est donc organisé en trois chapitres, Dans le premier chapitre nous allons décrire le principe de la récupération d'énergie à partir des énergies ambiantes par des différentes méthodes. Nous focalisons sur les ressources issues du corps humain pour les convertir en énergie électrique par une transduction piézoélectrique. Nous détaillerons par la suite la piézoélectricité.

Dans le deuxième chapitre nous nous focaliser sur l'aspect circuit d'extraction et stockage de l'énergie produite tout en augmentant la puissance récupérée et surtout d'être insensible à la charge électrique.

Le troisième chapitre intitulé une modélisation sous COMSOL Multiphysics, est consacré pour optimiser un design afin d'évaluer les différents paramètres et coefficients du matériau piézoélectrique ainsi que les dimensions du dispositif modélisé. Cette étude paramétrique d'optimiser les performances (puissance générée importante de l'ordre de mW) qui peuvent être utiliser pour alimenter un dispositif médical.

# **Chapitre I : Etat de l'art**

## Introduction :

La récupération d'énergie piézoélectrique est devenue un axe de recherche très attractif au cours des dernières années. Cette technologie permet de transformer une source d'énergie (mécanique, thermique, photonique, ...) en énergie électrique permettant d'alimenter certains dispositifs. Elle s'étale sur des dispositifs allant d'une échelle industrielle à une échelle miniature (microsystème MEMS). C'est justement cette partie MEMS qui nous intéresse dans ce travail car il sera question de modéliser et simuler un dispositif miniature permettant de générer des puissances importantes (de l'ordre du  $\mu\text{W}$ ). Avant de passer à la conception de ce type de dispositif, nous allons commencer dans ce chapitre par donner quelques notions sur la récupération d'énergie, nous présenterons ensuite quelques techniques de transduction permettant la récupération d'énergie. Nous donnerons ensuite des notions de la piézoélectricité car c'est cette technique de transduction qui sera retenue par la suite dans notre étude. Ce choix bien sur sera justifié à la fin de ce chapitre.

## I.2 Les sources de récupération d'énergie

La récupération d'énergie consiste à exploiter une source d'énergie disponible en la convertissant principalement en énergie électrique pour alimenter des dispositifs électriques et électroniques. Cette récupération d'énergie peut être utilisée à une échelle industrielle (dispositifs imposants) comme à une échelle miniature (MEMS), c'est cette partie qui nous intéresse ici. Ainsi, dans notre environnement, diverses sources d'énergie ambiante peuvent être exploitées leur conversion en énergie électrique est un défi majeur pour accroître l'autonomie de systèmes isolés ou abandonnés. Ces sources peuvent être classées en quatre catégories :

**Source de température :** Dans ce cas, la source d'énergie à convertir est la chaleur ou une variation de température. Les micros générateurs conçus à cet effet ont rendement faible qui ne dépasse pas le 10% [1].

**Source de rayonnement :** Il existe divers types de rayonnement pouvant être utilisé pour la conversion électrique. Les rayonnements solaires, nucléaires et les rayonnements radiofréquences sont des exemples les plus développés depuis quelques années.

**Source d'énergie cinétique :** Les exemples les plus connus sont l'énergie hydroélectrique et l'énergie éolienne, qui permettent de récupérer respectivement l'énergie de l'eau et l'énergie du vent. Dans le cas de grandes éoliennes par exemple, la puissance maximale générée peut être très importante, de l'ordre de 2MW. Cette énergie récupérée peut ensuite être réinjectée sur le réseau électrique [2].

**Source d'énergie mécanique :** nous pouvons citer trois types des ressources mécaniques comme les activités domestiques et industrielles, ainsi que les activités du corps humain qui pouvant être naturels comme la chaleur du corps, la respiration, les battements du cœur et autres volontaires (pédaler, tourner une manivelle, la marche...).

La figure I.1 qui suit donne un récapitulatif des différentes sources d'énergies tels qu'ils ont été présentés.

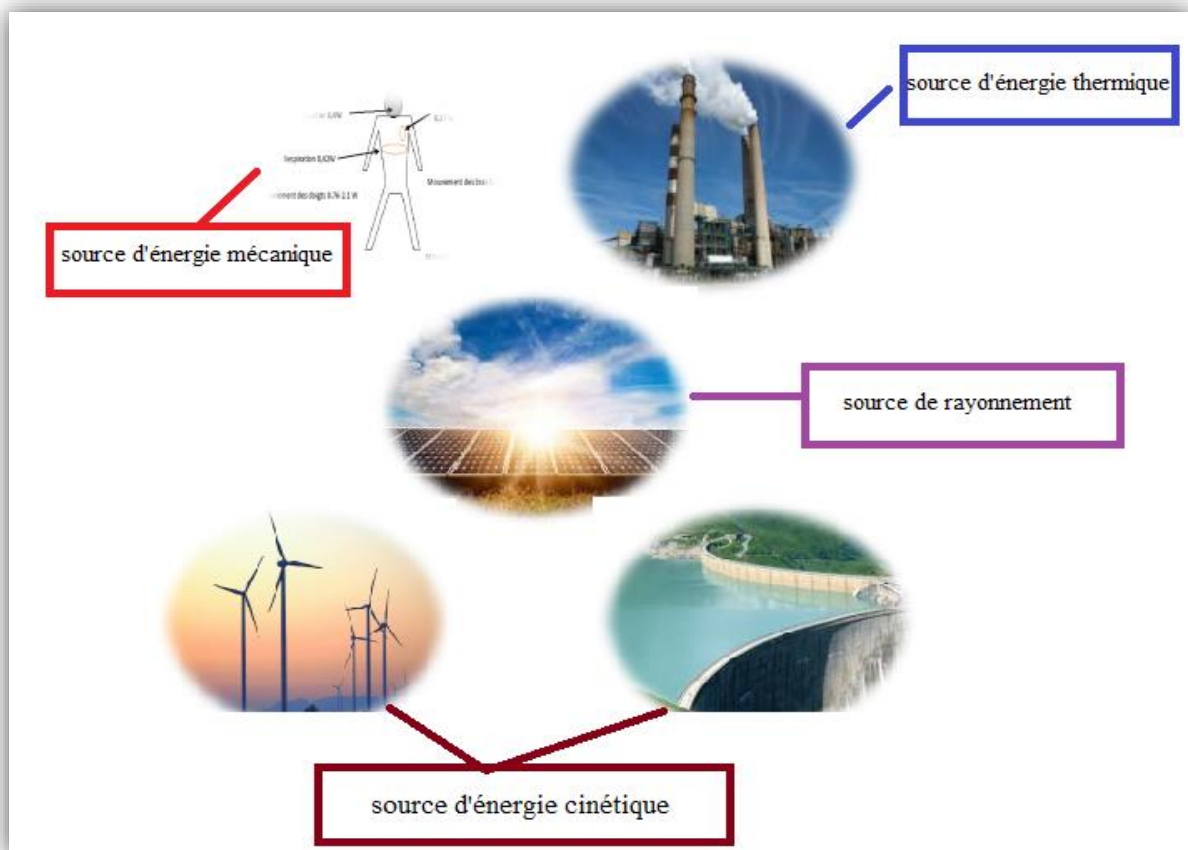


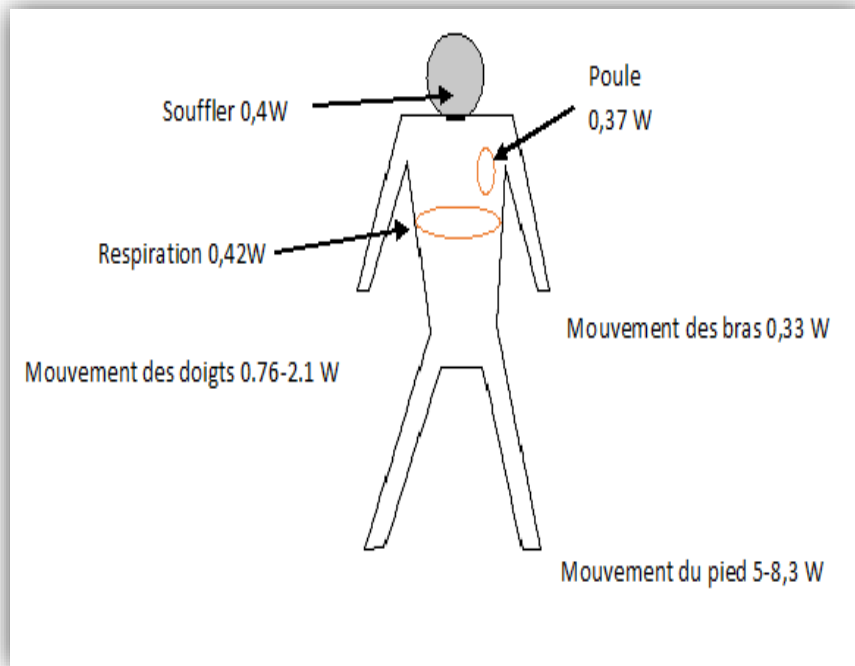
Figure I- 1:Les principales sources d'énergie ambiantes[2].



Dans ce qui suit, nous allons nous focaliser sur la récupération d'énergie dissipée par le corps humain.

### **I.3 Energie dissipé par le corps humain**

La sécurité, la fiabilité et les performances sont devenues des préoccupations majeures dans la récupération d'énergie pour des systèmes autonomes. Elle est très attrayante pour faire fonctionner des systèmes à faible besoins énergétiques, de l'ordre d'une centaine de  $\mu\text{W}$  à quelques  $\text{mW}$ , comme c'est le cas pour certains microsystemes. Ici, nous visons la conversion l'énergie pouvant être issue du corps humain qu'il est intéressant de récupérer de telle sorte à alimenter des dispositifs médicaux dans le but de les rendre autonomes. De nombreuses études ont estimé l'énergie dissipée par le corps humain qui pouvant être utiliser pour cette conversion, nous pouvons citez quelques exemple d'application dans le troisième chapitre. Cette énergie essentiellement thermique et mécanique peut être considérée comme source d'entrée pour un système récupérateur d'énergie. Plusieurs équipes ont développé des solutions pour exploiter cette énergie perdue. Sachant qu'il faut un grand gradient de température ( $60\text{-}100^\circ\text{C}$ ) pour récupérer une énergie suffisante pour faire fonctionner un système embarqué. Pour ces raisons, nous nous sommes focalisés sur l'énergie mécanique dissipée.



**Figure I- 2: Les énergies provenant des activités humaines [3].**

Sur cette conversion de l'énergie mécanique issue du corps humain en énergie électrique, nous pouvons citer les exemples des mouvements de la cheville et les vibrations au niveau du cœur. Pour les vibrations humaines, le spectre est plus riche à basses fréquence dans la zone [7-14] Hz [1] pour les vibrations au niveau du cœur. Par contre, sur les vibrations sur la cheville d'un homme, les pics de vibrations se trouvent à plus haute fréquence [100-200] Hz [4]. Nous verrons par la suite qu'il est nécessaire que le design du MEMS pour la récupération d'énergie peut être optimisé pour travailler sur des gammes de fréquence bien déterminées en fonction de l'application souhaitée.

Maintenant, pour pouvoir récupérer une énergie mécanique dissipée par le corps humain, il faut choisir quelle technique de transduction peut être utilisée. C'est ce qui va être détaillé dans ce qui suit.

## I.4 Technique de transduction

Plusieurs recherches dans le domaine de la récupération d'énergie ont permis de mettre en évidence la variété de techniques de transduction pouvant être utilisées à cet effet. Ainsi, pour la récupération d'une énergie mécanique, nous pouvons avoir des systèmes à base de transduction magnétique [5], [6], transduction électrostatique [7], [8], transduction thermique [9], [10] et transduction piézoélectrique [6], [11], [12]. Nous allons maintenant présenter une brève description sur la manière dont fonctionnent ces techniques ainsi que leurs avantages et inconvénients.

### I.4.1 La transduction électromagnétique

Les dispositifs utilisant l'induction électromagnétique pour produire de l'énergie électrique à partir de vibrations consistent en un aimant et une bobine, mobiles l'un par rapport à l'autre : l'un est fixe tandis que le mouvement de l'autre est induit par les vibrations. Le flux du champ magnétique généré par l'aimant dans la bobine varie et cela génère un courant variable à travers la bobine [5].

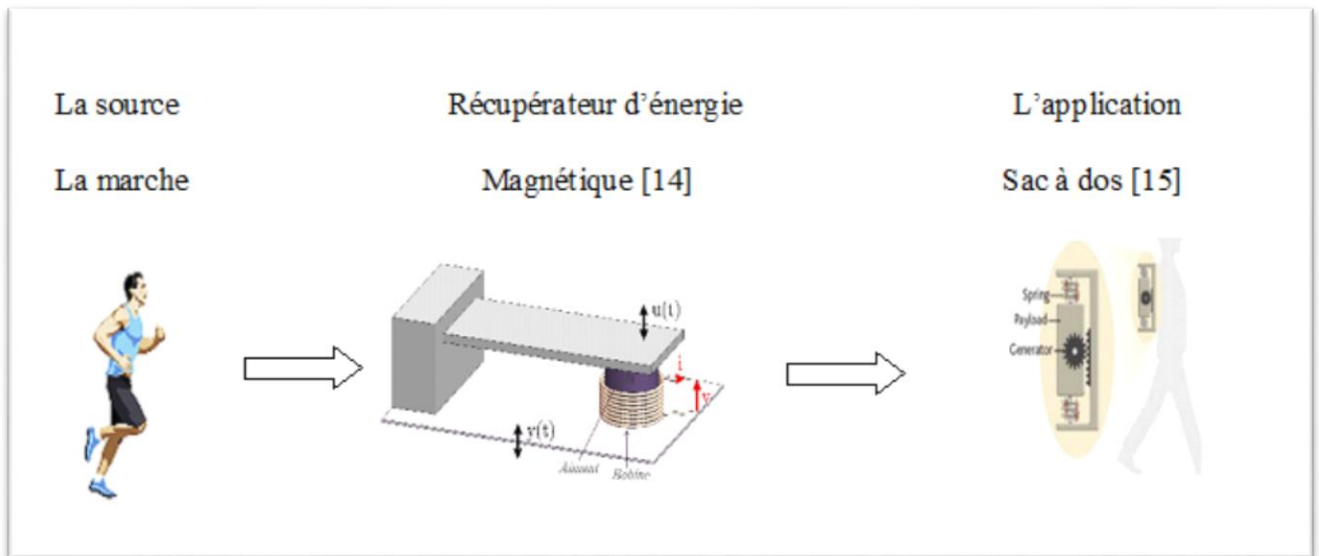


Figure I- 3:La récupération d'énergie électromagnétique[13].

### I.4.2 La transduction électrostatique

Les transducteurs électrostatiques sont des condensateurs plans dont une des plaques est fixe tandis que le mouvement de l'autre est induit par les vibrations. Deux modes de fonctionnement sont possibles : soit la charge des plaques est fixe (auquel cas la tension varie avec l'écartement entre les plaques), soit la tension entre les plaques est fixe [5].

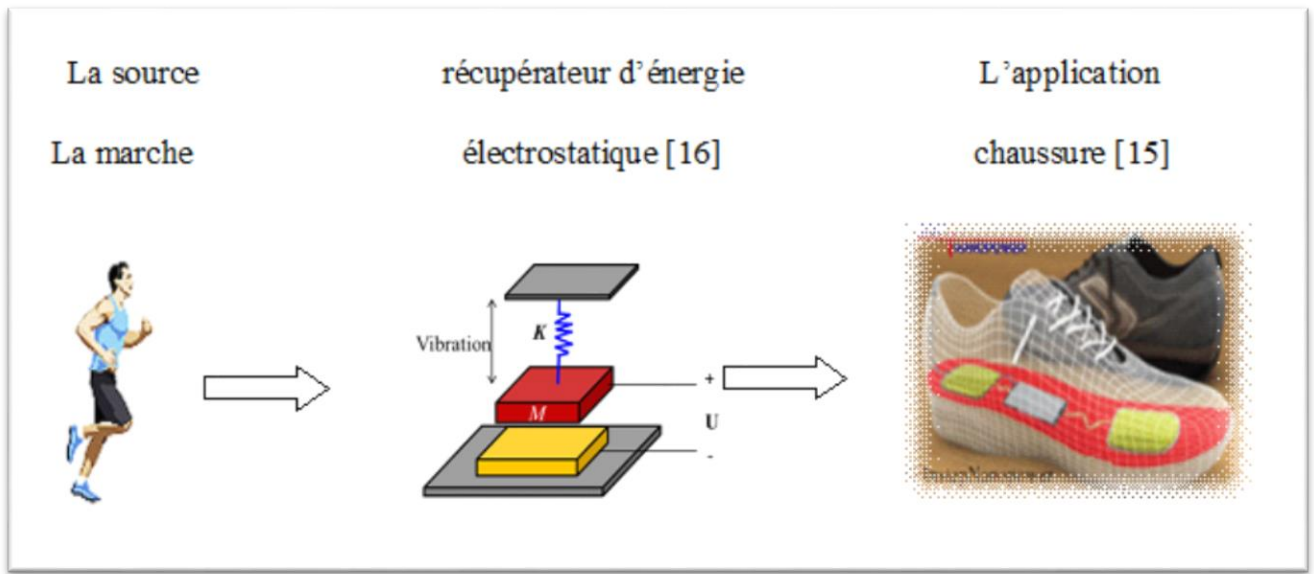


Figure I- 4: La récupération d'énergie électrostatique [14].

### I.4.3 La transduction piézoélectrique

Il est typiquement constitué d'une poutre encastree, dont une extrémité est liée à la structure vibrante. Les vibrations de la poutre induisent une déformation du matériau piézoélectrique créant ainsi sa polarisation [17].

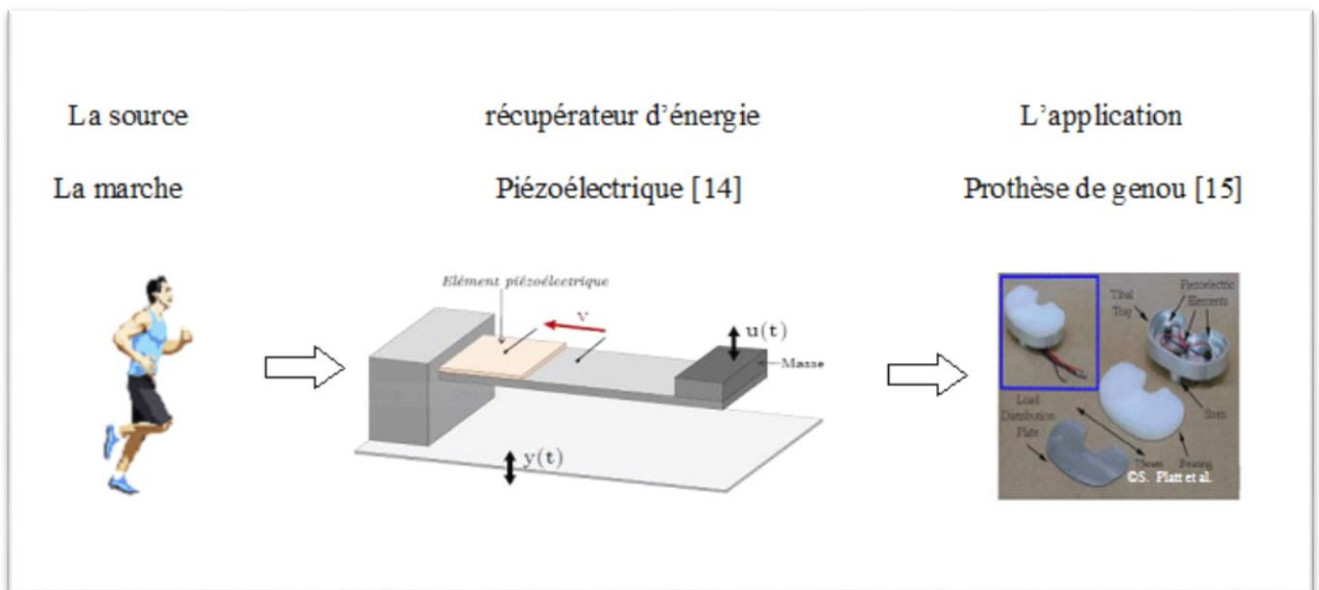


Figure I- 5 :La récupération d'énergie piézoélectrique [15].

Bien sûr, chacun de ces types de transductions présente des avantages et des inconvénients. Le tableau 1 qui suit résume les principales différences entre ces types de transductions.

<b>Transduction</b>	<b>Piézoélectrique</b>	<b>électromagnétique</b>	<b>Electrostatique</b>
<b>Avantage</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fortes tensions générées.</li> <li>- Compatible avec intégration MEMS.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forts couplages.</li> <li>- Absence de matériaux Intelligents.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Forte tension générée.</li> <li>- Compatible avec fabrications MEMS.</li> </ul>
<b>Inconvénient</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Fragilité des éléments PZT.</li> <li>-Fort couplage pour les Monocristaux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Intégration MEMS difficile.</li> <li>-Faibles tensions générées.</li> <li>- On ne peut pas faire un examen IRM.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Source de tension ou charge externe requise.</li> <li>-Contraintes mécaniques et capacitifs</li> </ul>

**Tableau I- 1 :Avantages et inconvénients des différents types de transduction pour la récupération d'énergie [16].**

Dans cette étude, nous cherchons à récupérer un maximum d'énergie biomécanique et générer ainsi un maximum de puissance en sortie. Pour ce faire, nous avons opté pour une transduction piézoélectrique. En choisissant ce type de transduction, on s'affranchit des contraintes de miniaturisation et d'intégration induites par la transduction électromagnétique, l'électrostatique qui nécessite une source primaire de tension qui fait vibrer le matériau et du temps de réponse généralement lent de la transduction thermique. Pour comprendre comment la transduction piézoélectrique marche, nous allons commencer par définir la piézoélectricité.

### **I.4.3.1 La piézoélectricité**

La première démonstration de l'effet piézoélectrique direct était en 1880 par les frères *Pierre* et *Jacques Curie*. Peu de temps après, les frères Curie ont confirmé et identifié expérimentalement l'effet inverse [17]. La piézoélectricité (du grec piézein presser, appuyer) est un couplage électromécanique réversible des matériaux piézoélectriques. Ces matériaux ont la capacité de générer une énergie

électrique sous l'action d'une contrainte mécanique (effet piézoélectrique direct) et de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet piézoélectrique inverse).

La figure suivante représente les deux effets de la piézoélectricité directe et inverse.

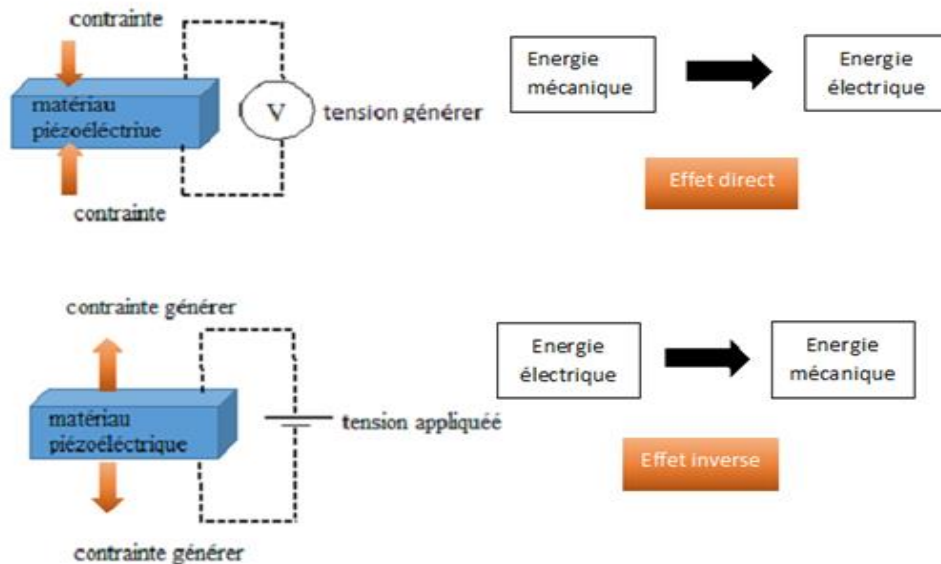


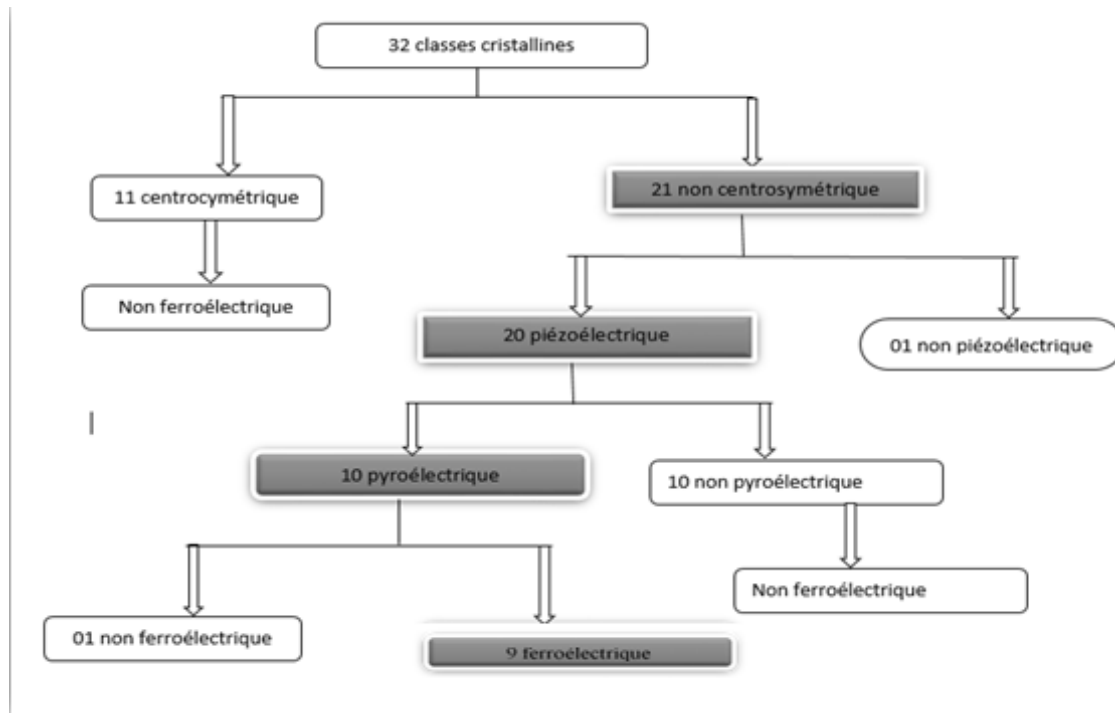
Figure I- 6:Principe de la piézoélectricité.

Dans notre étude, il sera question d'exploiter l'effet piézoélectrique direct (effet capteur) pour récupérer une énergie ambiante.

### I.4.3.2 Les propriétés des matériaux piézoélectriques

#### I.4.3.2.1 Les classes cristallines

La figure suivante représente la répartition des classes cristallines des matériaux piézoélectriques. Les 21 classes non Centro symétrique représente la propriété piézoélectrique. Lorsque le matériau est ferroélectrique, il est forcément pyroélectrique et donc piézoélectrique. Mais s'il est pyroélectrique, le matériau n'est pas forcément ferroélectrique.



**Figure I- 7: Répartition des classes cristallines en fonction des propriétés.**

### I.4.3.2.2 Les équations fondamentales

Afin d'étudier le comportement d'un matériau piézoélectrique sous contrainte mécanique, on fait appel au système d'équations suivant [18] :

$$S_{ij} = sE_{ijkl}T_{kl} + d_{kij}E_k \quad 1-1 \quad T_{ij} = cE_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k \quad 1-2$$

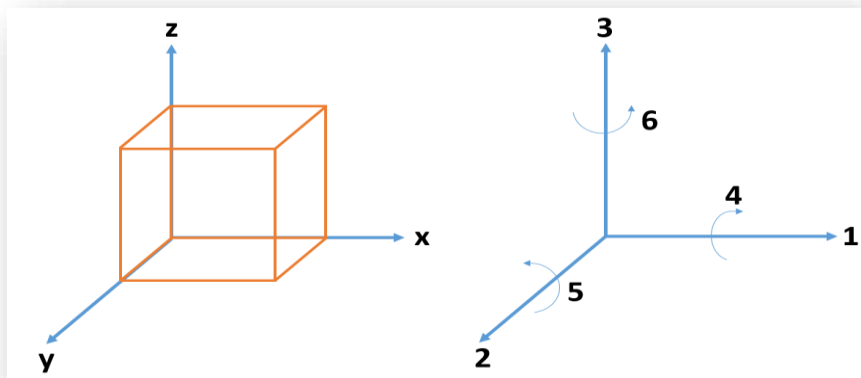
$$D_i = d_{ikl}T_{kl} + \epsilon T_{ik} \quad 1-3 \quad E_k D_i = e_{ikl}S_{kl} + \epsilon S_{ik} E_k \quad 1-4$$



Les paramètres des équations	Définition
$S_{ij}$	Représente les déformations
$SE_{ijkl}$	les modules d'élasticité du matériau
$T_{ij}$	les contraintes appliquées sur le matériau
$D_{kij}$	les coefficients piézoélectriques
$E_k$	le champ électrique appliqué sur le matériau
$D_i$	l'induction électrique.
$E_{ij}$	la permittivité diélectrique du matériau
$Ek_{ij}$	coefficients d'élasticité

**Tableau I- 2 :Les paramètres des équations fondamentales d'un matériau piézoélectrique.**

Les modes de couplage se présentent selon les trois axes où L'axe 3 pour la polarisation.



**Figure I- 8 :Convention des directions des axes : la polarisation P parallèle à l'axe 3 [19].**

Les indices 1, 2, 3 représentent respectivement les directions normales.

Aux plans YOZ, XOZ, XOY : Les directions 4, 5, 6 représentent les directions tangentielles. Le mode de couplage est un indice à Deux chiffres, le premier correspondant à la direction de polarisation alors que le deuxième correspond à la direction de déformation du matériau.

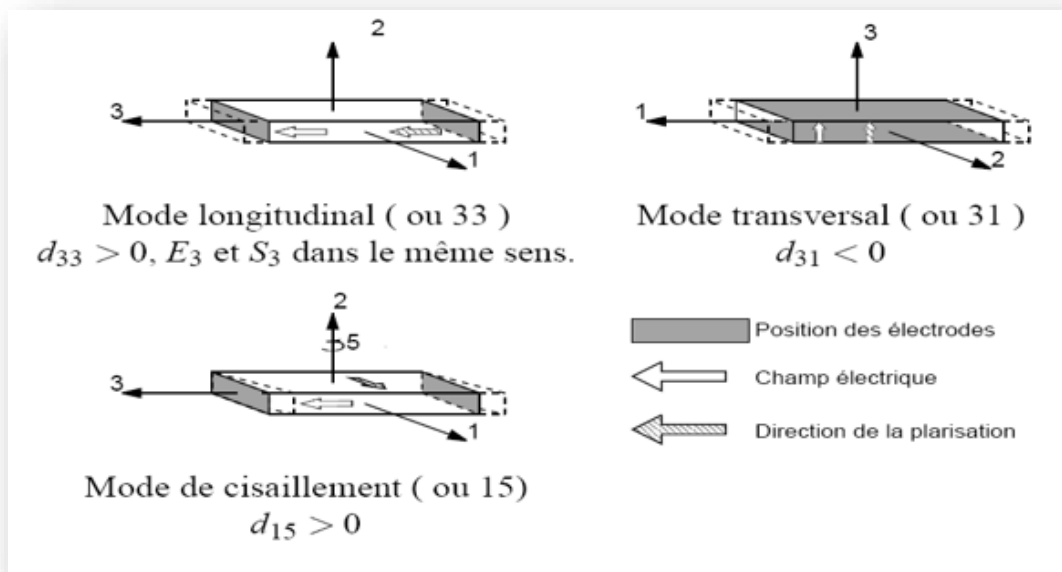


Figure I- 9 :Les différents modes de couplages d'un élément piézo-électrique [20].

Les modes de déformation d'un matériau piézoélectrique [19] sont :

- ✚ **Le mode longitudinal** : C'est le mode  $d_{33}$ , correspond au cas où la direction du champ appliqué et la déformation sont dans le même sens.
- ✚ **Le mode transversal** : C'est le mode  $d_{31}$ , correspond au cas où l'axe de polarisation est perpendiculaire à l'axe de déformation du matériau. Ce mode est le plus simple à réaliser, nécessitant une électrode inférieure et supérieure.
- ✚ **Le mode de cisaillement** : C'est le mode  $d_{15}$ , correspond au cas où le champ appliqué est Perpendiculaire à la polarisation du matériau.

Différents matériaux piézoélectriques peuvent être utilisés pour la transduction piézoélectrique. Les caractéristiques, propriétés, coefficients piézoélectriques, etc... conditionnent les performances de notre MEMS.

### I.4.3.2.3 Matériau piézoélectrique

Il existe plusieurs catégories de matériaux piézoélectriques [21] :

- Un monocristal : c'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz ou la tourmaline, et c'est également sous

cette forme qu'ils ont été utilisés dans les applications de première génération avant la mise au point des céramiques.

- Une céramique : C'est la forme la plus utilisée, principalement en raison de leur facilité de fabrication et des nombreuses propriétés qu'on peut obtenir en faisant varier la composition chimique et les paramètres de la fabrication.
- Un composite : ce sont des céramiques massives découpées et noyées dans des résines [12]
- Une couche mince : l'intégration des matériaux piézoélectriques en couches minces pour microsystèmes (MEMS) a ouvert la voie à de nombreuses applications de capteurs et actionneurs.

### I.5 Choix de matériau

Plusieurs types de matériaux piézoélectriques peuvent intervenir dans la conception des MEMS. Ces matériaux appartiennent pour la plupart à la famille des Wurtzite ou Pérovskite. Trois matériaux sont particulièrement répandus dans la conception de MEMS, l'Oxyde de Zinc (ZnO) et le Nitrure d'aluminium l'AlN qui sont de structure Wurtzite et le Zirconate Titanate de Plomb (PZT) qui lui appartient à la famille des pérovskites [19].

#### I.5.1 L'oxyde de Zinc (ZnO)





Le ZnO fait partie des matériaux piézoélectriques les plus appréciés du fait de son couplage électromécanique et piézoélectrique important. Il possède une structure cristalline hexagonale et une propriété bien particulière pour pouvoir présenter un effet piézoélectrique [22].

#### I.5.2 Nitrure d'aluminium (AlN)

Le nitrure d'aluminium (AlN) est le seul matériau céramique technique qui offre l'association très intéressante d'une conductivité thermique très élevée et de propriétés d'isolation électrique excellentes. Ce matériau présente des propriétés piézoélectriques intéressantes : un coefficient piézoélectrique  $d_{33}$  compris entre 3.4 et 5 pm.V<sup>-1</sup> et un coefficient de couplage électromécanique voisin de 7% [23].

### I.5.3 Zirconate Titanate de Plomb (PZT)

Les PZT sont parmi les céramiques piézoélectriques les plus couramment utilisées en raison de leur résistance mécanique, de leur inertie chimique, de leur facilité de mise en forme et de leurs coûts de production relativement bas. Leurs propriétés mécaniques, diélectriques, de couplage et de pertes sont modulables selon leur teneur en zirconium et en titane [24]. Voici un tableau récapitulatif des avantages et inconvénients des différents matériaux piézoélectriques :

Matériau	Puissance d'énergie récupérable	Avantages	Inconvénients
ZnO		<ul style="list-style-type: none"> <li>- La méthode de fabrication facile</li> <li>- Les propriétés de détection des ZnO nanostructures obtenues sont prometteuses pour la fabrication de dispositifs capteurs.</li> </ul>	-une mauvaise stabilité sur silicium
AlN		-AlN présente une bonne stabilité sur silicium contrairement au ZnO	-propriétés piézoélectriques restent moindres comparés à celles du ZnO
PVDF		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Plus souple</li> <li>-bon isolant thermique</li> <li>-basse densité</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-sensible à la température</li> <li>-matière première limitée</li> <li>-détérioration par UV</li> </ul>
PZT		<ul style="list-style-type: none"> <li>-excellentes propriétés piézo-électriques, diélectriques et ferroélectriques</li> <li>-puissance générée plus élevée</li> <li>-ses performances physiques (électriques et mécaniques)</li> </ul>	

**Tableau I- 3 :Les avantages et les inconvénients des matériaux piézoélectriques [25].**

Le PZT de par ses coefficients piézoélectriques, ses propriétés diélectriques et son fort coefficient de couplage électromécanique demeure la solution la plus adéquaté dans notre cas [11].

### I.5.3.1 Les types de PZT

Le PZT peut se présenter sous forme épaisse (bulk PZT ceramics) ou bien en film mince (thin film PZT).

#### ➤ PZT en couche mince

Une Faible consommation d'énergie, réduction de la taille et du coût, compatibilité et intégration sur silicium plus poussées se sont des avantages orienter l'industrie de baser sur les couches minces lors d'une fabrication des actionneurs. Ce sont des céramiques d'épaisseur compris entre quelques nanomètres et quelques micromètres [26].

#### ➤ PZT sous forme épaisse

Les PZT sous forme épaisse ont une épaisseur supérieure à 10 micromètre adaptée à la réalisation à faible coût, de petites et moyennes séries de circuits électroniques, Assurant une meilleure fixation au matériau de base et permet de réaliser des systèmes générant de grandes forces. Les céramiques massiques (sous forme épaisse) dites Soft (Soft ceramics) et les céramiques dites Hard (Hard ceramics) se sont les deux catégories qui viennent du fait que ces céramiques sont très souvent utilisées avec des dopants.

Dans les produits commercialisés, les PZT ne sont généralement pas inclus dans leur forme pure mais sous forme de semi-conducteur dopés avec soit des dopants captures , soit des dopants "actionneurs",) en facilitant dans les deux cas les mouvements électroniques dans le matériau [1].

- Le dopage en captures crée généralement un PZT dit *dur* (*hard*) ; Dans les PZT *durs*, le mouvement du mur de domaine (changement de phase) est diminué les pertes dans le matériau, mais avec comme conséquence d'une réduction de la constante piézo-électrique.
- Le dopage en actionneurs crée PZT dit *soft*. Un PZT *soft* a habituellement une constante piézoélectriques plus élevée qu'un PTZ dur, mais plus de pertes internes au matériau en raison du frottement interne plus important.

La plupart des PZT durs et mous diffèrent dans leurs constantes piézo-électriques. Ces constantes piézo-électriques sont proportionnelles à la polarisation ou au champ électrique produit par unité de contrainte mécanique, ou inversement à la déformation mécanique produite par unité de champ électrique appliqué au matériau. Ce qui implique que chaque type de matériau aura une orientation préférentielle. Voici un tableau représente une comparaison des propriétés des céramiques PZT soft et hard :

Propriétés	Céramique PZT soft	Céramique PZT hard
Coefficients piézoélectriques	Elevé	Faible
Constantes diélectriques	Élevées	Faible
Pertes diélectriques	Élevées	Faible
Champ coercitif	Faible	Elevé
Résistance électrique	Elevées	Faible
Linéarité	Faible	Meilleure
Facteur de qualité	Faible	Elevé

**Tableau I- 4 : Comparaison entre les céramiques PZT soft et hard [19].**

### I.5.3.2 Comparaison

Les caractéristiques piézoélectriques et mécaniques des couches minces ne permettent de générer que de faibles forces ou déplacements. Une augmentation sensible de ces derniers peut être obtenue avec des dépôts plus épais. On parle donc des couches épaisses qui sont obtenus des systèmes générant de grandes forces. Le choix du substrat est un point important pour la réalisation du micro-générateur piézoélectrique.

Dans notre étude, Nous avons décidé d'adapter les céramiques PZT sous forme épaisse de l'ordre de mm à la modélisation de notre micro générateur piézoélectrique. La technologie à base de couche

épaisse donne la possibilité d'augmenter le volume de matériau piézoélectrique pour capter efficacement des vibrations et obtenir des réponses électriques importantes.

### **I.6 Conclusion**

Ce chapitre est un état de l'art sur la récupération d'énergie vibratoire qui consiste de convertir des diverses sources d'énergie ambiante en énergie électrique. En insistant sur les ressources qui pourraient être exploitées au développement de systèmes de récupération d'énergie ambiante pour alimenter un dispositif médical. Dans lequel, nous avons présenté les différentes méthodes utilisées pour convertir cette énergie en énergie électrique. Dans cette étude, nous cherchons à récupérer un maximum d'énergie vibratoire ambiante et générer ainsi un maximum de puissance en sortie. Pour ce faire, nous avons opté pour une transduction piézoélectrique avec leur couplage électromécanique inhérent et une densité de puissance élevée par rapport aux transducteurs électromagnétiques et électrostatiques. De plus, le matériau piézoélectrique spécifiquement le PZT est le plus performant à l'utiliser. Il facilite la mise dans les dispositifs micro, manométrique, flexible et extensible. Dans le chapitre suivant, nous intéressons à la conception électronique du système d'extraction et stockage d'énergie récupérer par la transduction piézoélectrique

# **Chapitre II : Circuit d'extraction d'énergie**



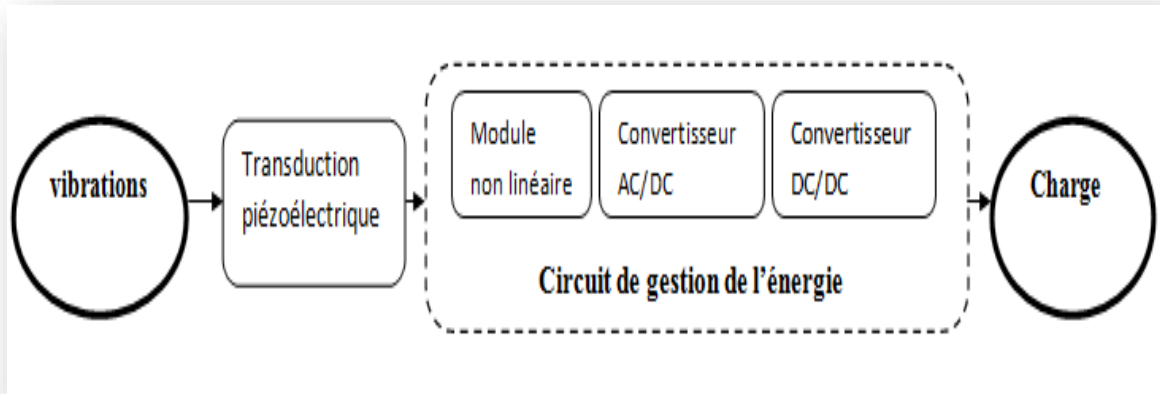
### II.1 Introduction

La récupération d'énergie vibratoire consiste à convertir l'énergie des vibrations du corps humain en énergie électrique par l'intermédiaire d'un transducteur piézoélectrique. Cette énergie électrique récupérée avec une faible puissance fournie n'est pas suffisante pour pouvoir alimenter directement la plupart des systèmes électroniques. Cela oblige à concevoir des interfaces électroniques pour maximiser la puissance pour un fonctionnement efficace. Ce que nous allons traiter dans ce chapitre consiste à un circuit d'extraction d'énergie ; la structure de ce circuit représente des différentes conceptions, méthodes non linéaires et techniques d'optimisation menant à une puissance de sortie élevée. Avant toute chose, rappelons que l'énergie issue du générateur piézoélectrique est une énergie alternative et les charges à alimenter, plus précisément les micros capteurs, nécessitent une énergie continue. Le premier étage de conversion est composé d'un redresseur permettant de convertir les tensions alternatives générées aux bornes d'un élément piézoélectrique en tensions continues. Ainsi que des différentes techniques d'optimisation non linéaires sont utilisées pour minimiser les pertes engendrées lors d'un transfert de l'énergie électrique. Ensuite, nous parlerons des convertisseurs DC/DC identifiés pour optimiser le rendement, Ces Convertisseurs peut avoir plusieurs rôles : Soit imposer une tension constante sur la charge (Régulation de tension), soit imposer un rapport V/I optimale de façon à optimiser la puissance fournie par le micro-générateur (maximiser la puissance)[1]. Finalement, l'extraction de l'énergie récupérée est stocker et accumuler dans un condensateur jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau suffisant pour pouvoir alimenter un dispositif médical et le rendre autonome.

### II.2 Circuit d'extraction d'énergie

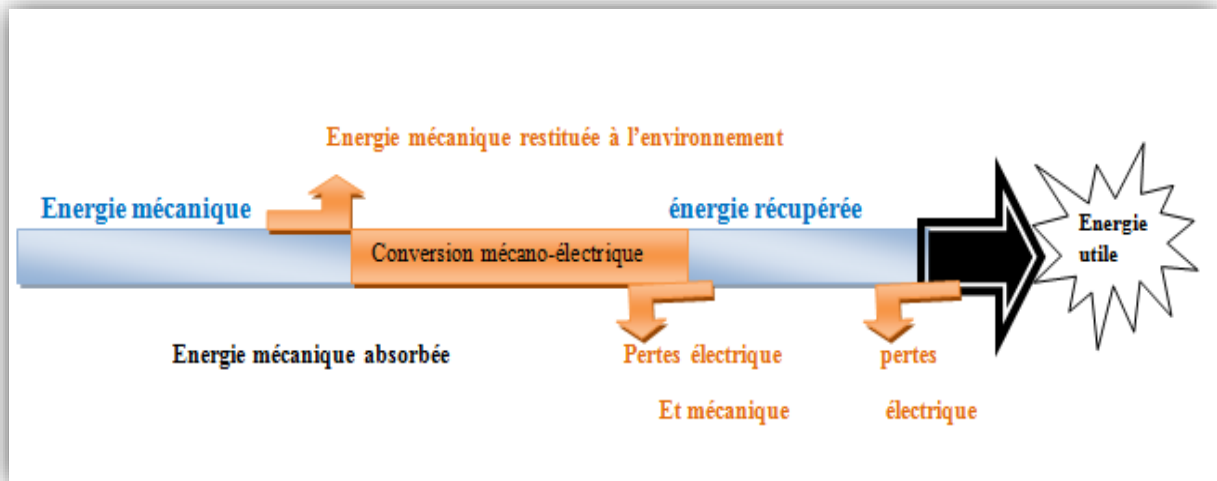
La tension alternative fournie par l'élément piézoélectrique ne permet pas une alimentation directe des circuits électriques en raison de la forte dépendance de la tension et de sa faible puissance de sortie (la centaine de  $\mu\text{W}$ )[27]. La mise en œuvre d'une gestion de l'énergie électrique est délicate pour avoir une optimisation sur la structure d'un récupérateur d'énergie. La structure classique d'extraction d'énergie récupérée est alors pour convertir les tensions alternatives générées en tensions continues, d'adapter leurs niveaux à ceux nécessités par le système de stockage utilisé, et de les réguler de manière à générer des tensions indépendantes de la source ou des variations de charge [28]

Le processus d'un récupérateur d'énergie est schématisé sur la Figure suivante.



**Figure II- 1 :Schéma fonctionnel d'un générateur piézoélectrique.**

L'énergie mécanique récupérée par ces générateurs ne peut pas être convertie totalement en une énergie électrique à cause des pertes énergétique. Il est important d'avoir l'énergie qui est réellement récupérable à partir des vibrations mécaniques. Tout d'abord, il y a des pertes entre les vibrations et le système de récupération d'énergie dans le cas où le couplage n'étant pas parfait. L'énergie mécanique récupérée est ensuite transformée en énergie électrique qui peut engendrer d'autres pertes sont introduites. Enfin, il existe des pertes diélectriques dans la couche piézoélectrique, comme des courants de fuite [29]. Nous pouvons citer ces différentes pertes dans la figure aux dessous.



**Figure II- 2 :Energies mises en jeu lors du processus de récupération d'énergie.**

Pour minimiser ses pertes et optimiser notre système de récupération d'énergie, des structures simples de convertisseur sont utilisées, composées d'un redresseur avec filtrage capacitif, auxquelles est généralement ajouté un dispositif non linéaire qui permet d'augmenter la puissance de sortie en optimisant la conversion électromécanique.

Dans un premier temps, nous parlerons des convertisseurs AC/DC qui est le premier étage de notre circuit d'extraction d'énergie.

### II.2.1 Convertisseur AC/DC

Les redresseurs AC/DC sont parmi les convertisseurs les plus couramment utilisés qui convertissent l'alimentation alternative AC en forme continue DC. En pratique, la structure la plus simple utilisé est un redresseur AC/DC non régulé (redresseur à diodes AC/DC). Aussi, un filtre capacitif - inductif ( $L_r$ ,  $C_r$ ) peut être utilisé pour améliorer l'effet de filtrage de la tension et du courant redressés. La puissance DC est préférable en raison de sa gestion à faible coût et de sa sécurité, pour cela la conversion de forme AC à la forme DC est nécessaire pour une solution moins coûteuse [30].

Le tableau suivant présente les types de redresseur à pont utilisé pour convertir la tension alternative issue d'une transduction piézoélectrique à une tension continue.

Type de redresseur	Redresseur pont Complet	Redresseur en Demi-Pont	Doubleur de courant
Circuit			
Etage de sortie			

**Tableau II- 1: Les différents types d'un convertisseur AC/DC [27].**

Dans notre cas, les tensions provenant aux bornes de notre transduction piézoélectrique sont données à l'entrée d'un redresseur à pont de diodes complet grâce à sa comptabilité avec l'élément piézoélectrique, sa meilleure performance et permettant la conversion de très basses tensions. C'est la structure la plus simple à utiliser d'après les différentes études qui sont faites.

L'ajoute d'une technique d'optimisation non linéaire est un point important pour faire un traitement non-linéaire de la tension piézoélectrique réalisé avant le redressée.

### II.2.2 Les techniques d'optimisation non linéaire

Les techniques non-linéaires d'extraction d'énergie ont été développées pour optimiser simplement le transfert d'énergie entre un générateur piézoélectrique et la charge à alimenter. Le point commun entre ces approches est un traitement non-linéaire de la tension piézoélectrique réalisé de manière synchrone avec la vibration. Le principe est basé sur l'ajout d'un interrupteur et d'une inductance L en parallèle ou en série avec l'élément piézoélectrique. Cela revient exactement à modifier les conditions électriques de façon à ce que l'énergie électrostatique sur les électrodes des

éléments piézoélectriques soit toujours croissante. Plus l'accumulation de charges électriques sur l'électrode se fait à tension élevée, plus la conversion électromécanique est efficace [30]. On distingue le SSHI (Synchronized Switch Harvesting on Inductor) en série et le SSHi en parallèle.

### II.2.2.1 SSHI série

C'est l'ajout d'un interrupteur et d'une inductance  $L$  en série avec l'élément piézoélectrique. L'inconvénient de cette technique est de ne transférer l'énergie que pendant un temps très court (temps de fermeture de  $K$ ) [27], ainsi que l'effet sur la puissance et la bande passante est quasiment identique à celui du circuit précédent (convertisseur AC/DC), mais l'impédance de la charge électrique optimale est plus petite que dans le cas du simple pont redresseur.

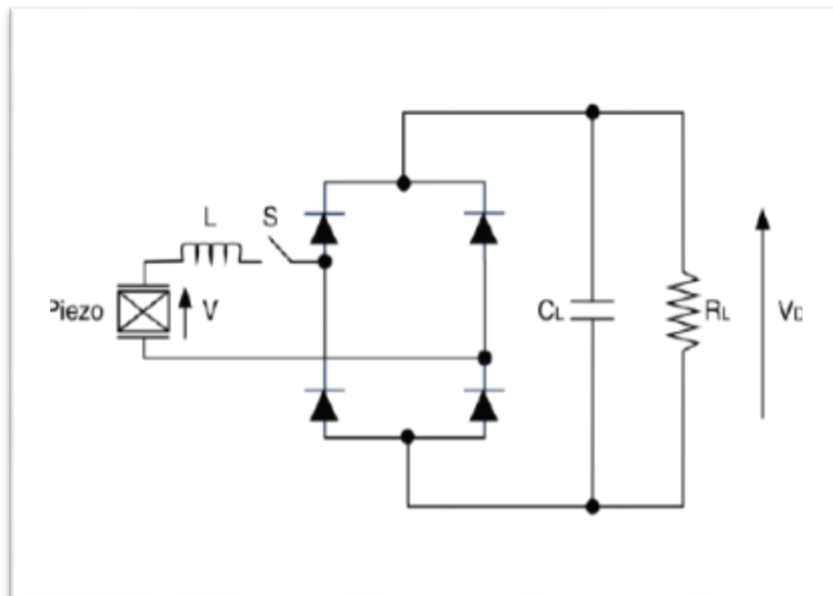


Figure II- 3 :Circuit non linéaire SSHI en série [31].

### II.2.2.2 SSHI parallèle

Le circuit SSHI parallèle consiste à connecter le circuit {interrupteur électronique  $S$ , bobine  $L$ } en parallèle avec un pont redresseur, ce qui permet d'augmenter la tension piézoélectrique. L'impédance de la charge électrique optimale est plus grande que dans le cas du simple pont redresseur, ce qui signifie que cette approche est bien adaptée pour des tensions *continues* [31].

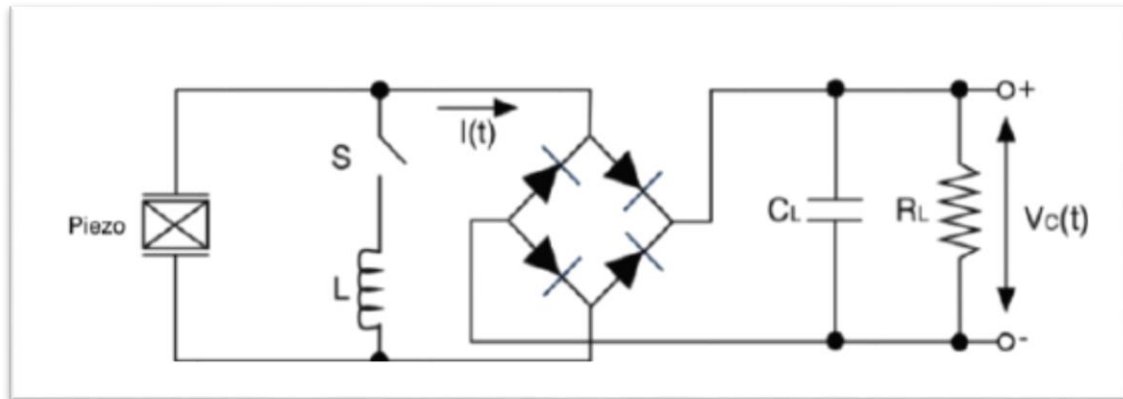


Figure II- 4 :Circuit non linéaire SSHI en parallèle [31].

Dans notre étude nous avons choisi la technique non linéaire SSHI parallèle qui est bien adapté pour une tension continue DC. Cette structure a l'avantage d'optimiser la conversion mécano-électrique.

Ensuite, Le pont de diode complet est suivi d'un convertisseur DC-DC pour avoir un maximum de puissance à la sortie.

### II.2.3 Les convertisseurs DC/DC

La tension de sortie du système de récupération d'énergie est alternative et peut atteindre quelques centaines de volts. Cependant, pour rendre cette tension compatible avec les besoins d'un circuit électronique d'un capteur autonome ; un convertisseur DC/DC place en sortie d'un pont de diode. Ces convertisseurs DC/DC peuvent être de type régulateur linéaire ou convertisseurs commutés. Les premiers ont de très bons rendements et permettent d'élever la tension, tandis que les seconds réduisent significativement les ondulations en tension et faire maximiser la puissance en sortie.

## Chapitre II : Circuit d'extraction d'énergie

---

Le tableau suivant identifié les deux groupes de convertisseurs.

Type	Régulateurs linéaires	Convertisseurs commutés
Fonction	Abaisseur	Abaisseur, éleveur
Rendement	Moyen à faible	Elevé
Pertes	Elevé (surtout si la différence entre tension d'entrée et de sortie est élevée)	Faible
Complexité	Faible	Moyenne à élevé
Taille	Faible à moyenne	Plus grande que les Régulateurs linéaires (à faible puissance)
Coût	Faible	Moyen à élevé (dû aux composants externes)
Ondulation/bruit	Faible (pas d'ondulation, faible bruit)	Moyen à élevé (dû à la commutation)

**Tableau II- 2 : Comparaison des différents convertisseurs DC/DC [32].**

Notre choix nécessite un convertisseur commuté afin de maximiser la puissance récupérée par les éléments PZT et adapter les tensions générées à un niveau élevé nécessaire pour charger le circuit de stockage. Buck Boost est l'interface électronique le plus utilisée pour maximiser les niveaux de puissance associés aux récupérateurs d'énergie de vibration.

### II.2.3.1 Buck Boost

Pour un fonctionnement efficace, le convertisseur DC/DC (hacheur abaisseur) a été rapporté pour sa performance de puissance selon la littérature. Un convertisseur hacheur abaisseur, est une structure Buck-Boost permet d'augmenter la puissance récupérer et présente l'avantage de permettre l'utilisation de toute l'énergie dans les condensateurs.

La topologie d'un convertisseur Buck Boost est représentée sur la figure suivante ;

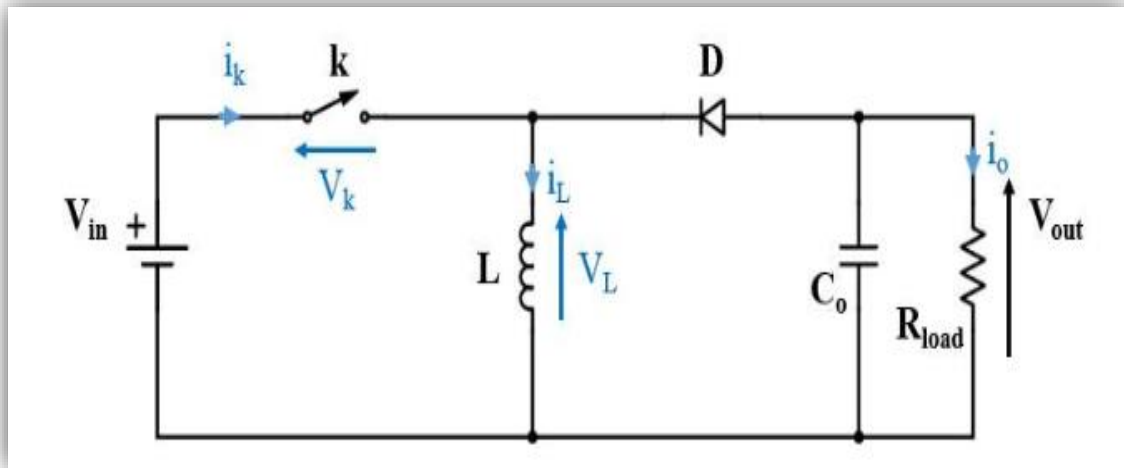


Figure II- 5 : Convertisseur DC/DC de type Buck Boost [1].

Dans notre cas, nous allons appuyer sur deux convertisseurs DC/DC dont le premier est de type convertisseur buck (hacheur série) pour l'utilisation dans l'alimentation des circuits électriques à basse tension où charger des batteries à faible puissance et le deuxième sera l'application d'un convertisseur boost (hacheur parallèle) afin de maximiser la puissance récupérée par les éléments PZT et adapter les tensions générées à un niveau élevé nécessaire pour charger le circuit de stockage proposé par la suite.

### II.2.4 Stockage

Un stockage doit être utilisé dans tout genre de circuit électronique en particulier les circuits de synchronisation électronique (radio, télévision), dans les circuits de transmission de signaux ou encore dans le système de récupération d'énergie piézoélectrique pour stocker l'énergie et de



l'accumuler jusqu'à ce qu'elle atteigne un niveau suffisant. Le stockage de l'énergie piézoélectrique est principalement assuré par des capacités ou des batteries, des piles ou des super condensateurs. Des différentes études montrent la possibilité de charger une batterie de 40 mAh-1,2 V avec un élément piézocéramique en uniquement 30 minutes à la fréquence de résonance du système [33]. Il existe d'autres dispositifs électroniques de stockage d'énergie comme les piles électrochimiques. Les plus performantes sont au lithium et ils peuvent emmagasinées jusqu'à 500 Wh/kg et de très faible autodécharge [2]. Ainsi que d'autres solutions importantes peuvent être obtenues aussi la nouvelle génération des super condensateurs, apparue dans les années 90. L'intégration de ces super condensateurs avec des récupérateurs d'énergie électrique d'origine piézoélectrique permettraient d'augmenter le degré d'autonomie énergétique de ce dernier mais ils sont généralement couplés à des batteries ou à d'autres sources d'énergie. Enfin, Plusieurs études discutent des avantages relatifs du stockage dans un condensateur, notamment pour le cas d'éléments piézoélectriques récupérant l'énergie du corps humain.

### II.3 Cahier des charges du circuit d'extraction d'énergie

Plusieurs systèmes de gestion de l'énergie ont été réalisés au cours des dernières années mais la plupart des systèmes de récupération d'énergie vibratoire commerciaux utilisent en fait un simple pont redresseur à pont complet pour mettre en forme la tension piézoélectrique. Un traitement non linéaire de la tension piézoélectrique est ajouté pour avoir un transfert d'énergie optimale. Par la suite, Un convertisseur DC/DC est généralement utilisé pour réguler la tension de sortie ou pour maximiser la puissance en sortie.

Dans notre cahier des charges, on a choisi le LTC3588 qui intègre un redresseur en pont de diode complet avec un convertisseur de type Buck-Boost [16]. C'est une solution complète et optimisée de la récupération d'énergie vibratoire. Cette solution autoalimentée est optimisée pour des sources de faibles puissances telles les éléments piézoélectriques.

Le tableau suivant présente les différents circuits choisis lors d'une conception d'un circuit d'extraction d'énergie récupérer par un micro générateur piézoélectrique.

## Chapitre II : Circuit d'extraction d'énergie

Type de circuit choisi	Caractéristiques/description	Le prix	La source
<b>LTC3588</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Pont redresseur à double alternance à faibles pertes intégré jusqu'à 100 mA de courant de sortie</li><li>-Tensions de sortie sélectionnables de 1.8V, 2.5V, 3.3V, 3.6V</li><li>-Buck DC / DC intégré hystérétique à haute efficacité</li><li>- il n'accepte que des tensions compris entre 2,7 Volts et 20 Volts.<ul style="list-style-type: none"><li>–plus adapte à des PZT piézocéramiques qui peuvent atteindre 20 Volts.</li></ul></li><li>-Fort rendement de convertisseur Buck-Boost.</li></ul>	<b>12,79 €</b> (environ <b>2000 Da</b> )	<a href="https://www.amazon.fr">Amazon.fr</a>
<b>SSHI parallèle</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Une simple inductance utiliser typiquement dans la régulation de fréquence.</li><li>-un interrupteur de structure simple, facile à installer et à utiliser et disponible.</li></ul> Les deux composants sont Placé en parallèle avec l'élément piézoélectrique.	<b>5,82 €</b> (environ <b>900 Da</b> )  <b>2,09 €</b> (environ <b>300 Da</b> )	<a href="https://www.amazon.fr">Amazon.fr</a>

**Tableau II- 3 :Les meilleurs circuits d'extraction d'énergie choisis.**

### II.4 Conclusion

Les caractéristiques électriques des générateurs piézoélectriques ne sont généralement pas très favorables : tension élevée et alternative, faible courant, impédance de sortie capacitive. L'énergie produite par ces générateurs piézoélectriques n'est ainsi généralement pas utilisable directement pour

## Chapitre II : Circuit d'extraction d'énergie

---

l'alimentation de dispositifs électroniques classiques qui nécessitent une alimentation basse tension continue. Un circuit d'extraction de l'énergie doit être utilisé avec ses performances optimisées pour convertir de manière optimale l'énergie récupérée. Son rôle principal est de convertir les tensions alternatives générées en tensions continues, d'adapter leurs niveaux à ceux nécessités par le système de stockage utilisé, et de les réguler de manière à générer des tensions indépendantes de la source ou des variations de charge. Enfin, les pertes engendrées doivent être minimisées et cette conversion doit être effectuée de manière autonome. On conclue que la meilleure gestion d'énergie compatible avec notre conception est un circuit qui contient du redresseur de type pont de diode complet suivi d'un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost. Ce circuit d'extraction permettra de rendre notre système autonome, pour une meilleure optimisation et pour maximiser la puissance en sortie.

# **Chapitre III : Modélisation sous COMSOL Multiphysics**

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de modéliser et simuler notre microsystème de récupération d'énergie en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Pour cela, une structure sous forme d'une poutre suspendue est étudiée. L'objectif ici est de mettre en évidence les différents paramètres influant sur la tension et donc la puissance en sortie, tels que la géométrie, les matériaux, le substrat, coefficients piézoélectriques, etc... Ceci nous permettra de sortir avec un design optimisé permettant de générer un maximum de puissance en sortie (de l'ordre du mW). Nous commencerons d'abord par donner une brève description sur l'outil COMSOL Multiphysics utilisé pour la modélisation. Ensuite, nous détaillerons les étapes de modélisations ainsi que les différents paramètres sur lesquels nous avons effectué des modifications et l'interprétation des résultats obtenus.

### III.2 Modélisation par éléments finis (MEF ou FEM en anglais)

Il existe plusieurs outils logiciels permettant la modélisation par éléments finis, on peut citer les deux plus connus et les plus utilisés dans différents domaines : COMSOL Multiphysics et Ansys. Ces deux logiciels sont parmi les outils les plus puissants du marché et permettent de simuler un nombre important de physiques. Dans notre étude nous avons choisi d'opter pour le logiciel COMSOL Multiphysics. Ce dernier présente une interface intuitive et bien pensée, une bibliothèque de matériaux et de physiques très riche, un accès avancé aux différentes propriétés des matériaux, physiques, études et prend en charge le couplage entre plusieurs physiques.

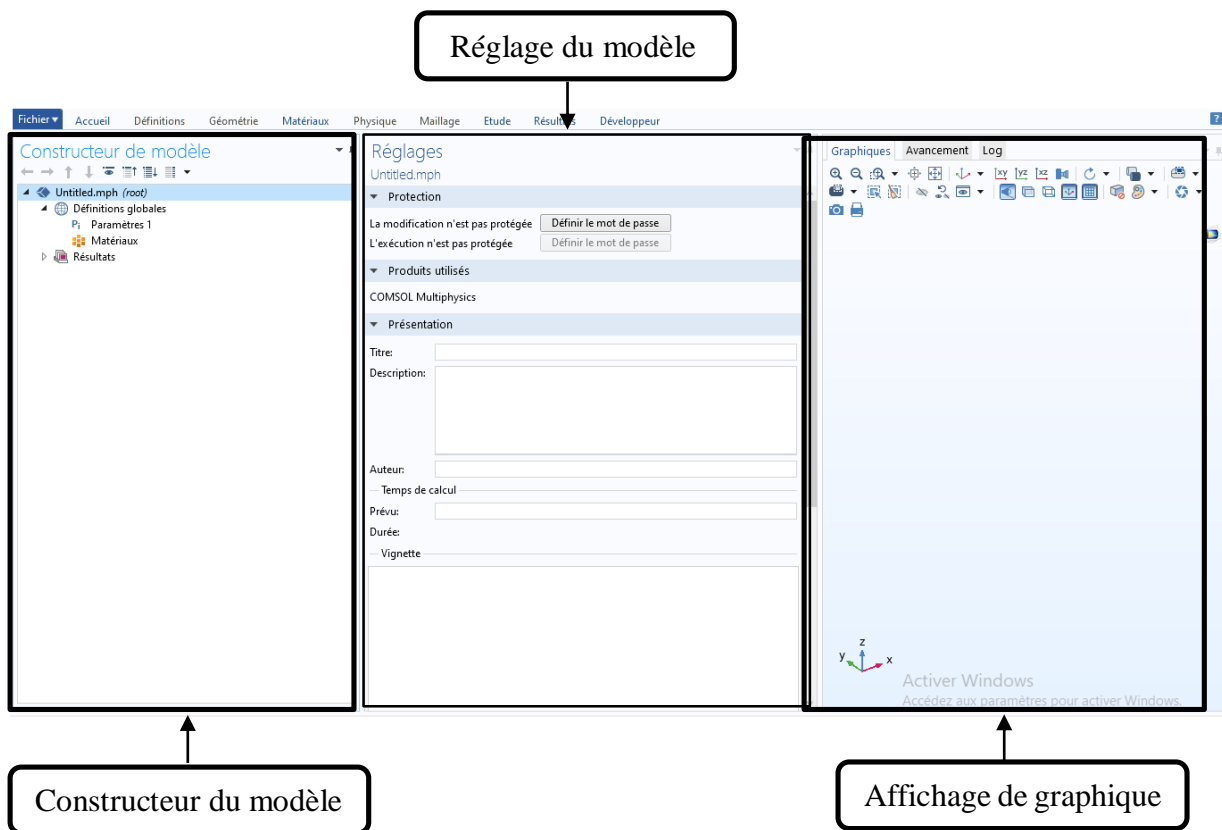


Figure III- 1 :Les principaux éléments de l'interface COMSOL Multiphysics.

La figure III-1 présente les principales fenêtres du logiciel COMSOL Multiphysics, tels que :

- ❖ Le « **Constructeur de modèle** » : Il permet d'afficher l'arborescence du modèle réalisé sous COMSOL Multiphysics. Ce volet comporte ainsi toutes les informations relatives à la géométrie, matériaux, physique, maillage, étude et résultats utilisées dans une modélisation sous COMSOL Multiphysics.

- ❖ La fenêtre « **Réglages** » : Permet d'éditer les différentes propriétés géométriques, matériaux, physiques, maillages, étude et résultats.
- ❖ La fenêtre « **Graphiques** » : nous permet de visualiser la géométrie, le maillage et les résultats de notre modélisation.

### III.3 Modélisation du générateur piézoélectrique sous COMSOL MULTIPHYSICS

N'importe quelle modélisation sous le logiciel COMSOL Multiphysics passe par des étapes qui sont décrites dans la figure III.2.

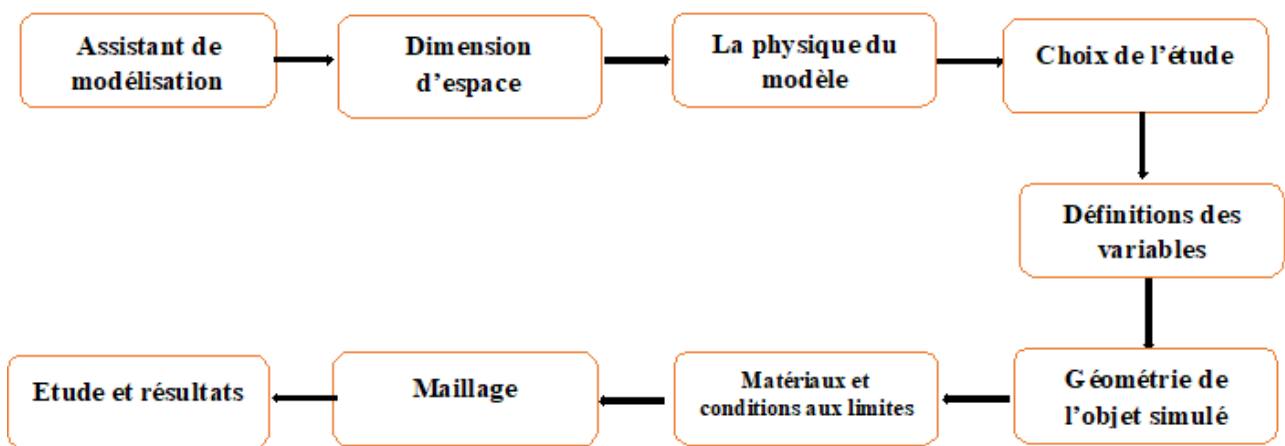


Figure III- 2 Les étapes de modélisation sous COMSOL Multiphysics.

Pour ce qui est de notre générateur piézoélectrique, les étapes détaillées de création de notre modèle sont :

- **Etape 01** : Tous d'abord nous choisirons l'assistant de modélisation pour créer notre modèle de récupération d'énergie. Ensuite nous sélectionnerons les choix suivants :
  - Le Choix de la dimension : 2D.
  - Le Choix de la physique du modèle : piézoélectrique, circuit électrique.
  - Le Choix de l'étude : stationnaire.
- **Etape 02** : Définition des variables. Dans cette étape, on introduit toutes les constantes nécessaires à la simulation du générateur piézoélectrique.

Name	Expression	Value	Description
Acc	1	1	Accélération (g)
R_load	12[kohm]	12000 $\Omega$	Résistance à la charge
w_plate	14[mm]	0.014 m	Hors de la dimension du plan

**Tableau III- 1 :Les constantes de la simulation [34].**

**Etape 03 :** Géométrie de l'objet simulé. Dans cette étape on va dessiner la géométrie bidimensionnelle de notre modèle étudié.

**Etape 04 :** Matériaux et conditions aux limites. Nous définirons les choix suivants :

- Les différents matériaux de notre micro-poutre.
- Les propriétés électromécaniques et électrostatiques des matériaux.
- Les conditions aux limites qui permettent de paramétrer notre physique et imposer les conditions de continuité sur les frontières sélectionnées.

**Etape 05 :** Maillage. Il consiste à la discrétisation du problème, par la méthode des éléments finis.

**Etape 06 :** Etude et résultats. La dernière étape de notre simulation est l'affichage des résultats de la simulation qui sont représenté par les courbes de variation de puissance générer et voltage en fonction de la fréquence.

Pour concevoir un générateur piézoélectrique pour la récupération d'énergie, nous avons choisi comme source de vibrations le corps humain, plus précisément les vibrations sur la cheville ce que nous avons mentionnée plus tôt dans le chapitre 1, nous allons modéliser les différentes parties du système piézoélectrique proposé. Pour récupérer un maximum d'énergie, les caractéristiques des matériaux piézoélectriques doivent être adaptées aux zones d'application, Le développement d'un design optimal avec des matériaux présentant de bonnes caractéristiques est considéré comme une clé vers récupération maximale d'énergie. Il existe un rapport direct entre l'énergie récupérée et la déformation du matériau piézoélectrique. Afin de trouver la géométrie optimale de conception de



## Chapitre III : Modélisation sous COMSOL Multiphysics.

notre générateur permettant de générer la puissance maximale dans les conditions de vibration d'entrée imposées par l'application.

Le tableau III.2 qui suit montre les différents travaux de recherche et modèles des générateurs piézoélectriques proposés dans la littérature.

Dispositif	Source d'énergie	Type de transducteur	Matériel de générateur	Excitation d'entrée	Puissance de sortie	Références
Semelle intérieure de chaussure	Démarche humaine	Bimorph	PZT-5H	Démarche normale d'un 68 kg, 180 cm mâle	0.41 mW cm-3	Xie et al [35]
Semelle intérieure de chaussure	Démarche humaine	Sandwich piézoélectrique	PVDF	Démarche normale d'un 68 kg mâle	25 V et 20 mA	Jung et al [36]
Semelle intérieure de chaussure	Démarche humaine	Film ondulé	PVDF	400 N at 1 Hz	1 mW	Zhao et al [37]
Back pack	Démarche humaine	Sangle piézoélectrique	PVDF	444 N charge de Back pack	45.6 mW	Granstorm et al [38]
Back pack	Démarche humaine	Pile piézoélectrique avec amplificateur	PZT stick	220 N charge de Back pack	0.4 mW	Feenstra et al [39]
Tissu avec coque intégrée	Motion commune	Coquille incurvée	PVDF	Mouvement du coude	25 V	Yang and Yun [40]
Tissu	Motion commune	À base de fibres hybrides Tissu	BaTiO3 Nano fils	Mouvement du coude	10.02 nW	Zhang et al [41]
Tissu	Motion commune	Textile en tissu	PVDF	1,23 rapport d'étirement à 6 Hz	125 $\mu$ W cm-2	Song and Yun [42]
Moissonneuse excitée par l'impulsion	Mouvement des membres	Bimorph	PZT 507	Rotation à 2 Hz	2.1 mW	Pillatsch et al [43]

Montre-bracelet	Mouvement des membres (bras)	Bimorph	M1100 piézocéramique	Rotation à 2 Hz	43 $\mu$ W	Pillatsch et al [44]
PENDEX	Mouvement des membres (taille)	Unimorph	PVDF	Marche normale à 2 Hz	290 $\mu$ W	Shukla and Bell [45]
Moissonneuse de genou	Mouvement articulaire (genou)	Bimorph	PZT-5H	Marche normale	2.06 mW	Pozzi et al [46]
Moissonneuse de genou	Mouvement articulaire (genou)	Générateur piézomagnétique (bimorphe)	PZT-5H	Marche normale	5.8 mW	Kuang et al [47]
Moissonneuse électromagnétique piézoélectrique hybride	Mouvement de mâchoire	Sangle piézoélectrique	Fibre piézoélectrique Composite	Rapport d'étirement de 1,2 pendant la mastication	7 $\mu$ W	Delnavaz and Voix [48]
Ceinture piézoélectrique	Mouvement abdominal (respiration)	Films en couches	PVDF	Respirer à 0,35 Hz	1.5 mW	Abdi et al [49]

**Tableau III- 2 :Les différents travaux de recherche et modèles des générateurs piézoélectriques proposés dans la littérature.**

A partir de là, nous avons décidé de proposer un dispositif de récupération d'énergie sous forme de poutre suspendue. Le design et le modèle sont décrits dans la partie qui suit.

### III.3.1 Description de notre modèle

Le design de récupérateur de puissance est une structure en poutre suspendue plus communément appelé bimorphe piézoélectrique. La forme générale de ce type de convertisseur est constituée de 3 parties comme représenté sur la figure. Partie ancrage ou encastrement à gauche de la poutre. Partie biomorphe piézoélectrique, qui consiste en la partie libre du récupérateur d'énergie. La dernière partie est la partie à droite de la poutre sur laquelle est rattachée une masse sismique. Les matériaux que nous avons choisi d'utiliser sont le silicium (Si) comme substrat et le matériau piézoélectrique (PZT) comme matériau actif.

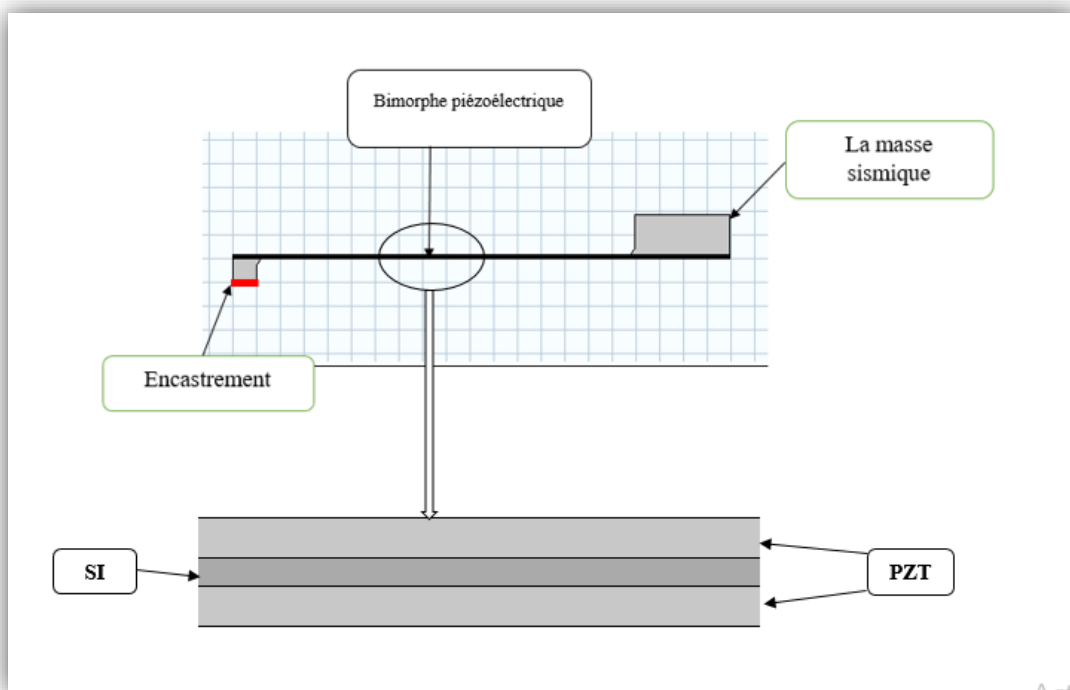


Figure III- 3 :Modèle principale d'un récupérateur d'énergie piézoélectrique.

Les paramètres géométriques de notre poutre utilisés dans un premier temps sont présentés dans le tableau 3-10.

Les paramètres		Définition	Démentions (mm)
La couche de PZT	Lpz	La largeur du couche PZT	21
	Epzt	L'épaisseur du couche PZT	0.06
La couche de SI	Lsi	La largeur de couche SI	21
	Esi	L'épaisseur du couche SI	0.04
La masse sismique	Hs	La hauteur du masse sismique	1.7
	Ls	La largeur du masse sismique	4
La masse fixe	Hf	La hauteur du masse fixe	1
	Lf	La largeur du masse fixe	1

**Tableau III- 3 :Les paramètres géométrique de la micro-poutre.**

- Le substrat

En général le substrat est utilisé pour augmenter le couplage mécano-mécanique, c'est-à-dire amplifier le déplacement relatif de la masse sismique par rapport à l'amplitude de déplacement de la source de vibration [1].

- La masse sismique

Plus la masse est grande plus la contrainte mécanique appliquée dans le matériau piézoélectrique grande et plus l'énergie en sortie est importante [1].

- Les couches piézoélectriques

C'est la partie active de la structure, utilisée pour convertir les vibrations mécaniques en énergie électrique, elles reçoivent le maximum de contrainte mécanique et donc convertissent un maximum d'énergie mécanique [1].

Les équations présentées utilisent les valeurs d'un PZT (voire chapitre 1) ayant les caractéristiques présentées au Tableau suivant et qui correspond aux PZT utilisés pour la validation expérimentale où notre choix du matériau de type PZT 5A.

<b>PZT-5A</b>			
Caractéristique	Symbole	Valeur	Unité
Constante piézoélectrique de charge	$d_{31}$	<b>-1.71e-010</b>	C/N
	$d_{33}$	<b>3.74e-010</b>	
Constante piézoélectrique de contrainte	$e_{31}$	<b>-5.35116</b>	C/m <sup>2</sup>
Permittivité électrique relative, contrainte constante	$\epsilon_{33\sigma}$ ,	<b>919.1</b>	
Permittivité électrique relative, déformation constante	$\epsilon_{33e}$ ,	<b>1730</b>	

**Tableau III- 4 :Les paramètres du matériau piézoélectrique PZT 5A (COMSOL Multiphysics).**

L'ensembles des expériences de la modélisation que nous faisons sur la forme initiale est afin de connaitre la puissance générer de chaque design de notre micro-générateur piézoélectrique.

### III.3.2 Etude paramétrique

Dans cette partie, nous avons établi une étude paramétrique pour :

- Les effets géométriques de la longueur, la largeur et l'épaisseur.
- L'effet de W-plat.
- Les effets de types de matériaux utilisés.
- Les effets des électrodes réel.
- Les effets des coefficients piézoélectriques.

### III.3.2.1 Les effets géométriques

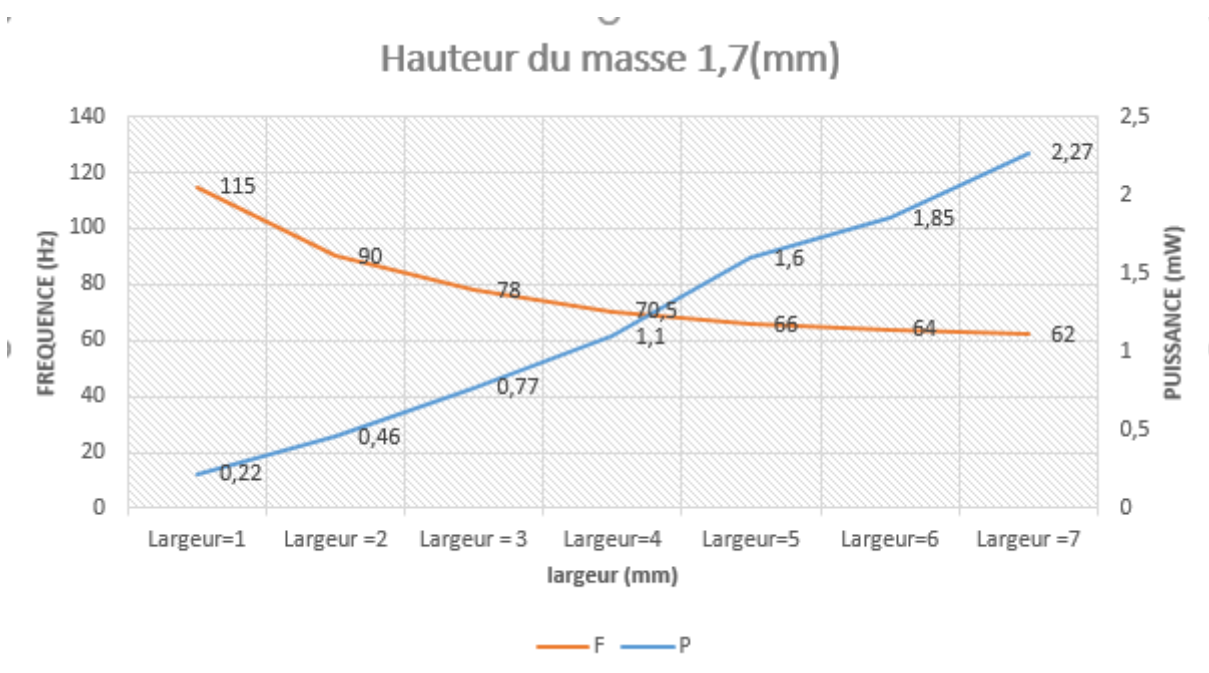
Ce que nous allons faire ici c'est fixer les dimensions de notre micro-générateur et faire varier un seul paramètre à la fois pour déterminer l'impact de chaque paramètre sur la poutre et la puissance générée en sortie.

#### III.3.2.1.1 La masse sismique

Dans un premier temps, une attention particulière sera donnée à la masse sismique. La géométrie de cette dernière sera modifiée et l'impact sur la puissance en sortie et la fréquence sera établi.

##### ➤ Effet de la largeur

Dans un premier temps, nous avons fixé la hauteur de la masse sismique à 1,7 mm et nous avons changé la largeur de la masse. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.4 qui suit.



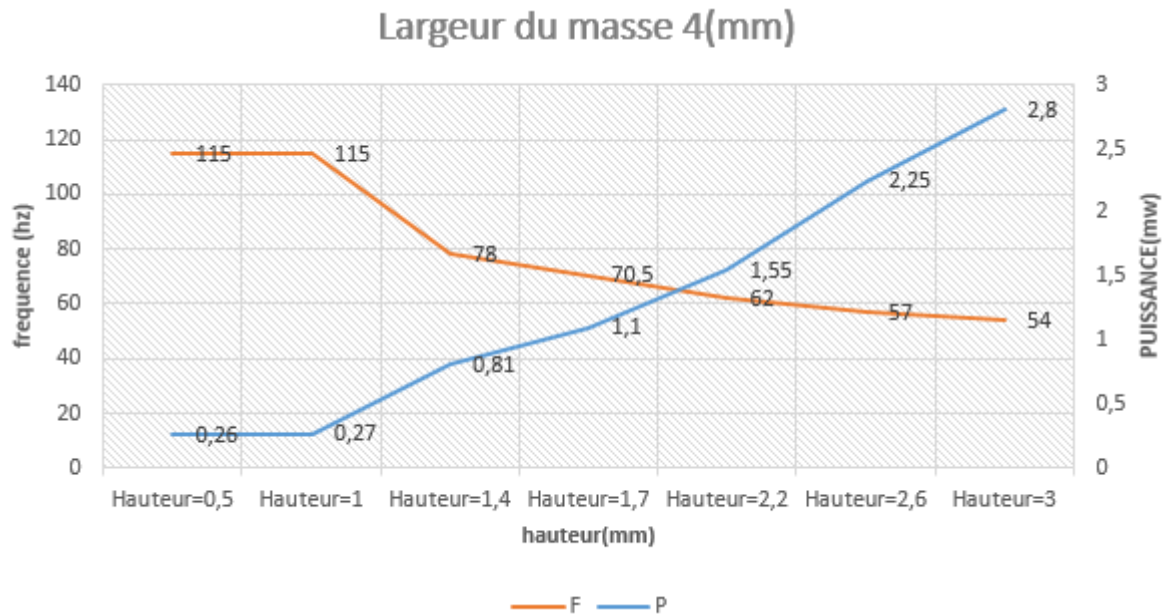
**Figure III- 4: Les deux courbes de puissance générée et fréquence de l'étude géométrique sur la largeur de la masse sismique.**

A partir de la figure III.4, nous pouvons constater que plus la largeur de la masse sismique augmente et plus la fréquence diminue et la puissance générée augmente. Ainsi, un maximum de puissance de 2,27 mW est obtenu pour une fréquence de 62 Hz. Nous avons aussi constaté une variation importante

de la puissance entre une largeur de 1mm et 7mm. La puissance générée pour une largeur de 7mm représente près de 10 fois celle générée par une largeur de 1mm ce qui montre l'impact important de la masse sismique.

### ➤ Effet de la hauteur

Ici, nous avons fixé la largeur de la masse sismique à 4 mm et nous avons varié la hauteur de la masse. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.5



**Figure III- 5 : Les deux courbes de puissance générée et fréquence de l'étude géométrique sur la hauteur de la masse sismique.**

Même constat ici que dans le cas de la largeur, nous pouvons ainsi constater que plus la hauteur augmente et plus la fréquence diminue et la puissance générée augmente. Un maximum de puissance de 2,8mW est relevé pour une fréquence de 54Hz.

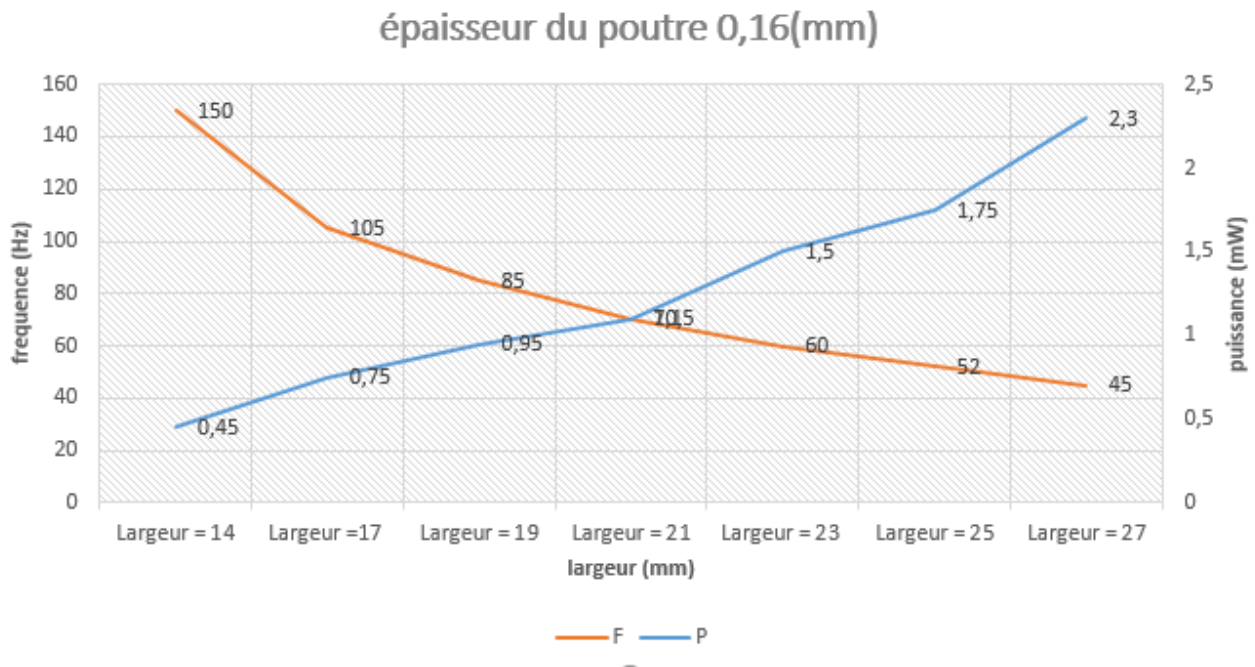
La variation de puissance ici aussi est conséquente entre une hauteur de 0.5mm et 3mm. La puissance générée pour une hauteur de 3mm représente près de 11 fois celle générée par une hauteur de 0.5mm ce qui montre l'impact important de la masse sismique.

De ces deux résultats, nous pouvons dire que la géométrie de la masse sismique présente un impact conséquent sur la puissance générée et la fréquence. En contrôlant la géométrie de la masse sismique, nous aurons un large éventail de fréquence et de puissance et nous pourrons ainsi cibler plusieurs applications.

### III.3.2.1.2 La poutre

#### ➤ Effet de la largeur

Ici, il s'agira de voir l'impact de la largeur de la poutre sur la puissance générée et la fréquence. A cet effet, nous avons fixé l'épaisseur de la poutre à 0.16 mm (Couche de PZT=0.12, Couche de SI=0.04) et nous avons fait varier la largeur. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.6.



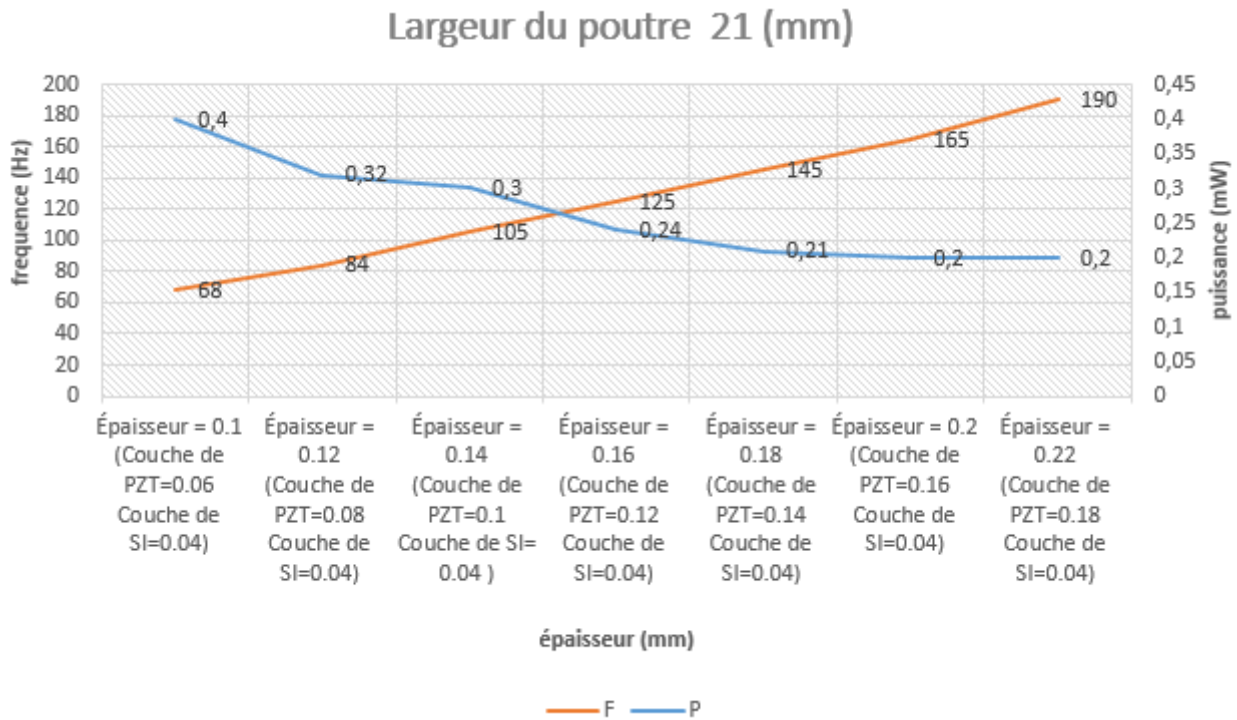
**Figure III- 6 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur la largeur de la poutre.**

Nous pouvons constater que la variation de largeur de la poutre a un impact considérable sur la fréquence et la puissance générée en sortie. Un maximum de puissance est généré de 2.3mW pour une fréquence de 45Hz. Cette variation de puissance est importante entre une largeur de 14mm et 27mm mais reste moins conséquent que dans de la masse sismique. La puissance générée pour une largeur de 27mm représente près de 5 fois la puissance générée pour une largeur de 14mm.



### ➤ Effet de l'épaisseur :

Nous allons maintenant étudier l'impact de l'épaisseur de la poutre sur la puissance générée et la fréquence. Nous avons fixé la largeur de la poutre à 21 mm et nous avons changé l'épaisseur. L'impact de ces changements est présenté dans la figure III.7.

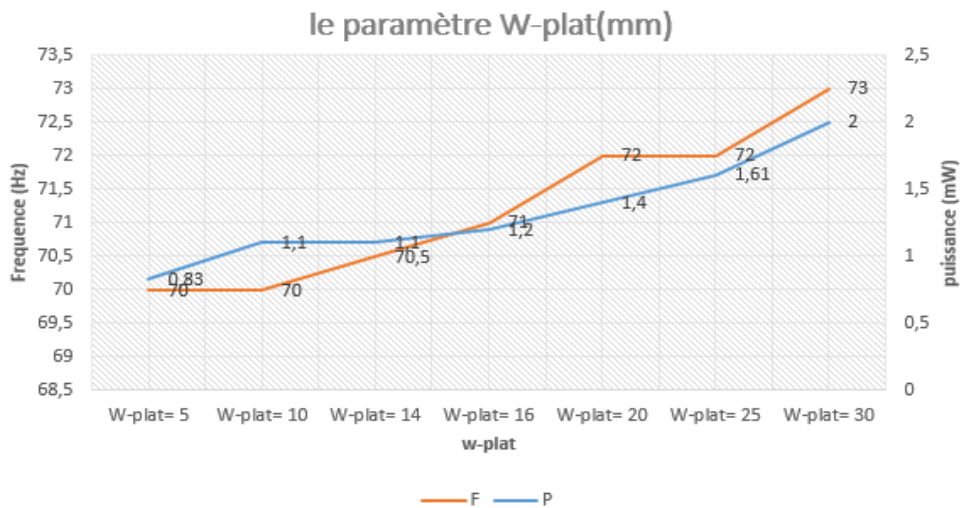


**Figure III- 7 : Les deux courbes de puissance générée et fréquence de l'étude géométrique sur l'épaisseur de la poutre.**

Avec une variation de l'épaisseur de la couche de PZT de 60µm à 220µm, nous avons une puissance qui est divisée par deux. Ceci est dû entre autre au fait que la largeur de la poutre a été fixée et que l'épaisseur du PZT a été variée, ce qui rajoute une certaine rigidité mécanique à la poutre d'autant plus que la masse sismique et la force appliquée n'ont pas été modifiées.

### III.3.2.1.3 L'effet de W-plat

Le paramètre W-plate représente la dimension hors plan intégré dans notre modèle 2D afin de donner une représentation 3D de notre modèle.



**Figure III- 8 :Les deux courbes de puissance générer et fréquence de l'étude géométrique sur W-plat.**

Le paramètre W-plate a une influence légère sur la fréquence et représente une variation de 2 fois entre un W-plate de 5mm et un de 30mm. Ainsi, la puissance maximale générée est de 2mW pour une fréquence de 73Hz.

#### III.3.2.1.4 Les effets de types de matériaux utilisés

Il existe divers matériaux piézoélectriques pouvant être utilisés pour la récupération d'énergie tel que le ZnO, PVDF, AlN, PZT-5A et le PZT-5H. Chaque'un de ces matériaux ont leurs propres propriétés et coefficients piézoélectriques. Le tableau III.6 présente les paramètres les plus importants.

coefficients piézoélectriques	d31 (pm/V)	d33 (pm/V)
PZT 5A	-1.71	3.74
AL Nitride	-0.019	0.049
ZnO	-0.0543	0.1167
PVDF	0.1358	-0.338
PZT 5H	-2.74	5.93

Tableau III- 5 :Les coefficients piézoélectriques des différents matériaux piézoélectriques (bibliothèque Comsol Multiphysics).

La figure 3-23 montre l'impact du changement du matériau piézoélectrique sur la puissance générée et sur la fréquence.

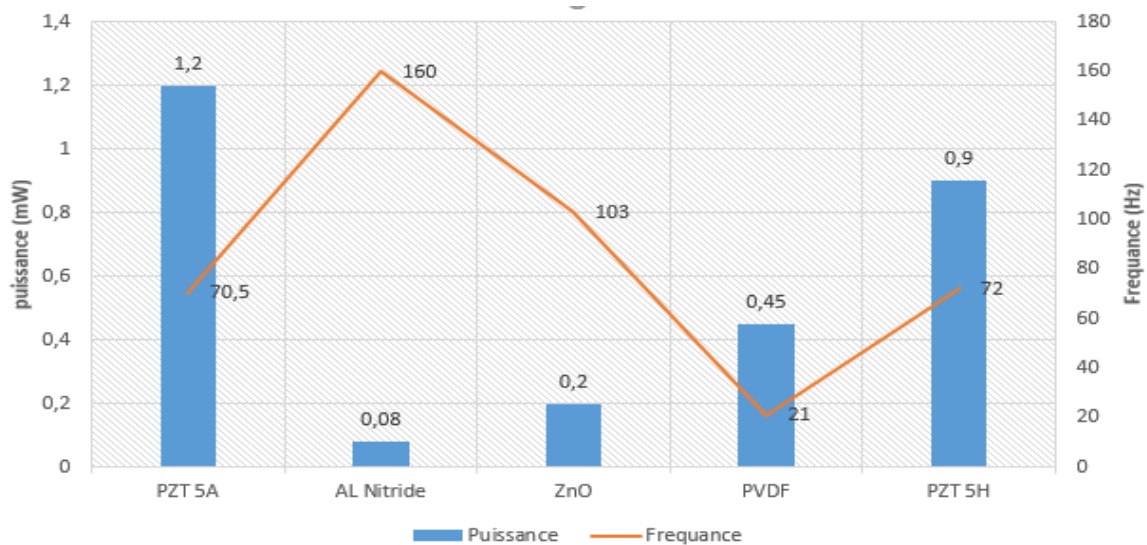


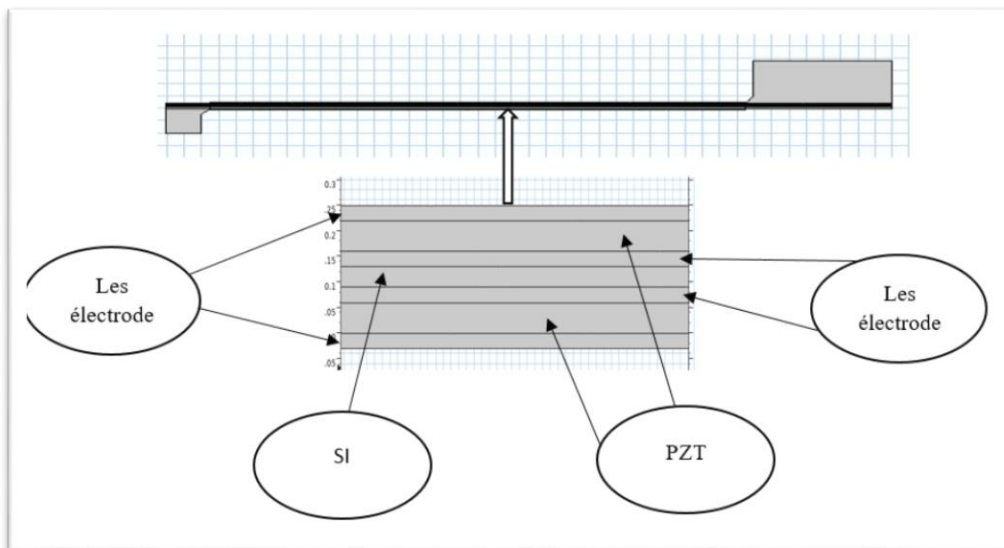
Figure III- 9 : Courbe et diagramme de l'étude des différents matériaux piézoélectriques.

A partir des résultats de la figure III.9 nous pouvons constater que :

- Le changement de matériaux va influencer considérablement sur la fréquence et sur la puissance générée en sortie.
- Le PZT 5A reste le meilleur matériau dans notre cas capable de récupérer un maximum de puissance.

### III.3.2.1.5 Les effets des électrodes réel

Jusqu'ici, dans nos modélisations, nous n'avons pas pris en compte l'introduction des électrodes pour la polarisation du PZT, chose que nous allons faire dans cette partie. La micro-poutre sera représenté sous forme : PT/PZT/PT/SI/PT/PZT/PT (voir figure III.10).



**Figure III- 10 :Modèle d'un récupérateur d'énergie avec des électrodes en Platine.**

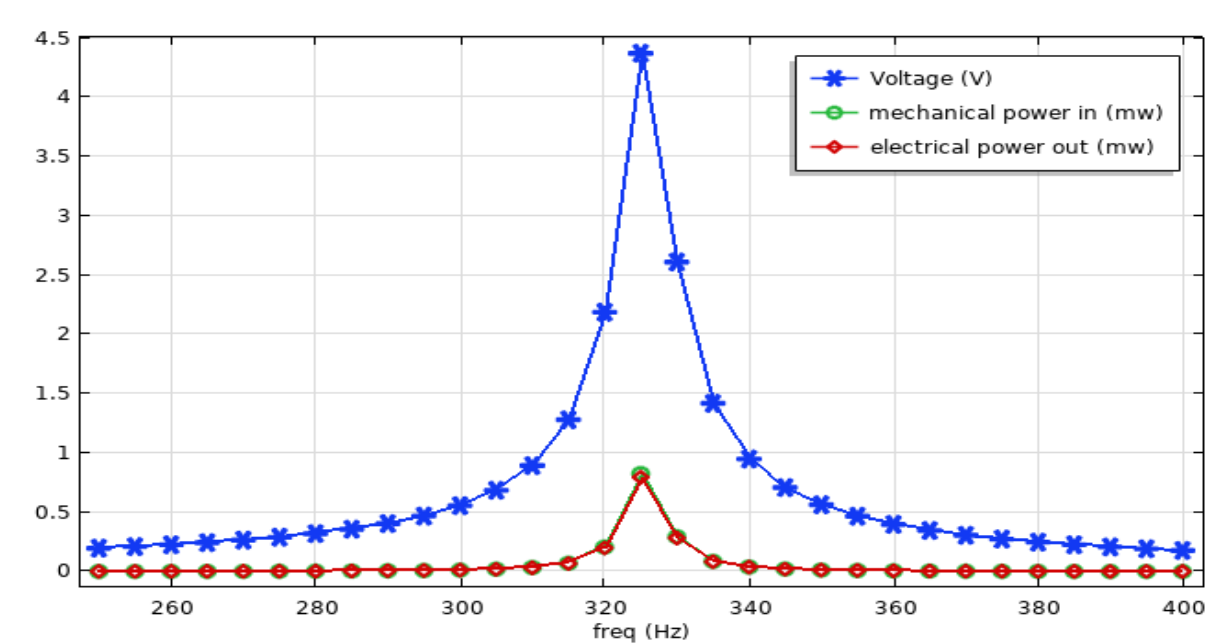
D'après l'étude bibliographique [28] on a déterminé que le platine (PT) est le matériau plus performant pour les électrodes grâce à sa compatibilité et stabilité avec le PZT.

Les dimensions des couches de la poutre :

Les couches	PT	SI	PZT
Largeur (mm)	15.5	21	21
Épaisseur (mm)	0.03	0.04	0.06

**Tableau III- 6 :Les dimensions des couches de la micro-poutre.**

A partir de là, l'impact des électrodes sur la puissance générée en sortie ainsi que la fréquence est représenté sur la figure III.11.



**Figure III- 11 :Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec électrode.**

Nous pouvons ici constater que l'introduction d'électrodes dans notre modèle afin d'obtenir une représentation réelle du système influe négativement sur la puissance générée en sortie. Ainsi, nous arrivons à obtenir un pic en sortie de 0.75mW sur une fréquence de 325Hz. Ceci est dû entre autre à l'épaisseur importante de la couche de platine que nous avons été contraint d'augmenter pour éliminer certains problèmes de simulations liées à la différence notable entre les couches de platine et les couches de Si et PZT.

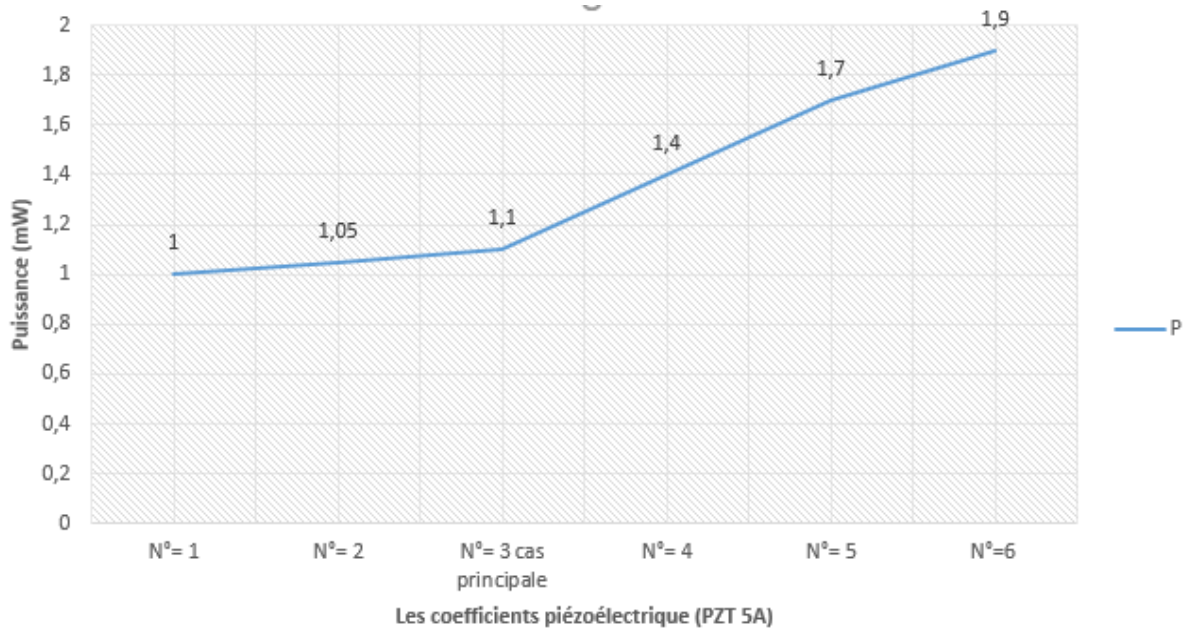
### III.3.2.1.6 Les effets des coefficients piézoélectriques

Nous savons que les coefficients piézoélectriques jouent un rôle important dans les performances du matériau piézoélectrique. Les paramètres les plus influants restent le  $d_{31}$  et  $d_{33}$ . Le tableau III.8 qui suit permet de donner quelques valeurs de ces coefficients piézoélectriques obtenus de la littérature PZT.

	Numérotation	D33 (10e-10 C/N)	D31 (10e-10 C/N)	Référence
PZT	N°1= PZT5A	0.374	-1.71	[31]
	N°2= PZT5A	3	-1.09	[5]
	N°3 :Cas principale	3.74	-1.71	COMSOL
	N°4=PZT soft	4	-1.9	[17]
	N°5= PZT5	6.2	-2.5	[50]
	N°6=PZT soft	2.6	-3.2	[2]

**Tableau III- 7 :Coefficients piézoélectriques du PZT.**

La figure III.12 qui suit montre les résultats obtenus pour les différents coefficients piézoélectriques tirés du tableau III.8 pour une fréquence fixe de 71Hz.



**Figure III- 12 :la courbe de puissance générer de l'étude paramétrique des coefficients piézoélectrique.**

Nous pouvons ici dire que le coefficient qui influe le plus sur les performances de notre récupérateur d'énergie est le paramètre  $d_{31}$ . Une puissance maximale est obtenue de 1.9mW pour un coefficient de  $d_{31}$  de  $-3.2C/N$  [2].

### III.4 Les applications médicales

Enfin, De nombreux dispositifs ne nécessitent que peu de puissance pour fonctionner, c'est par exemple le cas des implants médicaux qui peuvent être alimentés par quelques dizaines de  $\mu W$  [14].

Le tableau suivant présente quelques applications médicales que nous pouvons alimenter par la puissance récupérée de notre micro-générateur piézoélectrique.

Dispositif médicale implanté	Consommation moyenne
Pacemaker	8 $\mu$ W
Implant auditif	145 $\mu$ W-5.16Mw
Pompe à médicament	400 $\mu$ W
Neurostimulation	50 $\mu$ W
Stimulateur musculaire	1.3Mw

**Tableau III- 8 : Consommation électrique des dispositifs médicaux implantés [14].**

### III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé une micro-poutre piézoélectrique pour la récupération d'énergie du mouvement vibratoire du corps humain en utilisant un matériau piézoélectrique de type PZT-5A. Celle-ci dépend étroitement du comportement mécanique du dispositif ainsi que des paramètres géométriques, aux matériaux et aux coefficients piézoélectriques. La puissance maximale que nous avons pu obtenir à partir de nos modélisations est de 2.8mW et a été obtenue en faisant varier la géométrie de la masse sismique. Néanmoins, la variation de la géométrie de la poutre, des épaisseurs, des matériaux et des coefficients piézoélectriques a permis aussi de montrer que cette puissance dépendait de ces derniers mais que la fréquence pouvait varier de manière significative, ce qui est une bonne chose compte tenu de la plage de fréquence que nous avons pu obtenir (45Hz-325Hz). Ceci nous permet d'envisager plus tard un large éventail d'applications sur lesquels peut être utilisé notre modèle.





**Conclusion et  
perspectives**

## Conclusion et perspectives

---

### Conclusion et perspectives

La récupération d'énergie ambiante vibratoire représente un enjeu important dans le développement et l'intégration de microsystèmes toujours plus performant ayant de plus en plus d'autonomie.

Dans notre projet de fin d'étude, nous avons visé l'étude d'une micro-poutre permettant la récupération d'énergie vibratoire ambiante. Afin d'atteindre des puissances en sortie importantes (de l'ordre du mW). Dans un premier temps, nous identifions la source de vibration issue du corps humain, et une transduction piézoélectrique pour convertir cette énergie en énergie électrique. Ainsi, l'ajoute d'un circuit d'extraction d'énergie récupérer est un point très important pour avoir une meilleure gestion d'énergie utilisable pour alimenter un micro dispositif médicale.

Nous avons modélisé sous le logiciel COMSOL Multyphysics une micro poutre piézoélectrique. Cette dernière est basée sur un matériau piézoélectrique de type PZT. Nous avons choisi ce type de matériau après une simulation des différents types de matériaux piézoélectrique dans notre modèle de récupération d'énergie. Lors de cette modélisation, nous avons fait une étude paramétrique incluant la géométrie de notre micro poutre, les paramètres et les coefficients piézoélectriques afin d'obtenir une puissance maximale en sortie. Nous avons constaté que ces derniers ont une influence notable sur les performances du dispositif et donc sur la puissance générée en sortie. Ainsi, nous avons réussi à atteindre une puissance maximale en sortie d'une valeur de 2.8 mW. Cette puissance reste suffisante pour alimenter certains micro-dispositifs médicaux tels que les stimulateurs musculaires, pacemaker, etc...

Les perspectives qui peuvent compléter ce travail, c'est de valider ces modélisations par des tests pratiques sur des transducteurs piézoélectriques commerciaux. Plus tard, une réalisation pratique d'un générateur piézoélectrique peut être envisagée à partir des modélisations réalisées.

---

# Références Bibliographiques

---

## Références Bibliographiques

- [1] A. Einstein, « La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. », p. 235.
- [2] M. Defosseux, « Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », p. 224.
- [3] Sylvie TURRI (ATER), Bernard MULTON (PU), Hamid BEN AHMED (MC), et Dominique MILLER (PRAG)., « ANALYSE DES POSSIBILITES DE RECUPERATION DE L'ENERGIE SUR L'ETRE HUMAIN, NOTAMMENT SUR LES MOUVEMENTS ET CONCEPTION D'UN GENERATEUR ELECTROMAGNETIQUE LINEAIRE ALTERNATIF.pdf » .
- [4] M. Marzencki, « Conception de microgénérateurs intégrés pour systèmes sur puce autonomes », p. 234.
- [5] M.-G. Kang, W.-S. Jung, C.-Y. Kang, et S.-J. Yoon, « Recent Progress on PZT Based Piezoelectric Energy Harvesting Technologies », *Actuators*, vol. 5, n° 1, p. 5, févr. 2016, doi: 10.3390/act5010005.
- [6] B. Yang *et al.*, « Electromagnetic energy harvesting from vibrations of multiple frequencies », *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 19, n° 3, p. 035001, mars 2009, doi: 10.1088/0960-1317/19/3/035001.
- [7] S. Boisseau, G. Despesse, et B. Ahmed, « Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting », in *Small-Scale Energy Harvesting*, M. Lallart, Éd. InTech, 2012.
- [8] Emirates Aviation University, R. T. Aljadiri, L. Y. Taha, Windsor University, P. Ivey, et Birmingham City University, « Electrostatic Energy Harvesting Systems: A Better Understanding of Their Sustainability », *J. Clean Energy Technol.*, vol. 5, n° 5, p. 409-416, sept. 2017, doi: 10.18178/JOCET.2017.5.5.407.
- [9] D. Zabek et F. Morini, « Solid state generators and energy harvesters for waste heat recovery and thermal energy harvesting », *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 9, p. 235-247, mars 2019, doi: 10.1016/j.tsep.2018.11.011.
- [10] K. Thangaraj, « DEVELOPMENT OF EFFICIENT ENERGY STORAGE AND POWER MANAGEMENT FOR AUTONOMOUS AIRCRAFT STRUCTURAL HEALTH MONITORING SYSTEMS », p. 182.
- [11] G. Erdogan, « ENERGY HARVESTING FOR MICRO-ELECTROMECHANICAL-SYSTEMS (MEMS) », p. 21.
- [12] R. R. Knight, C. Mo, et W. W. Clark, « Development and testing of a MEMS piezoelectric energy harvester », San Diego, California, USA, mars 2009, p. 72880A, doi: 10.1117/12.815533.
- [13] R. Kiady, « RECUPERATION D'ENERGIE ELECTRIQUE PAR EFFET PIEZOELECTRIQUE », p. 71.
- [14] S. Boisseau *et al.*, « Récupération d'Énergie Biomécanique et Systèmes Autonomes », p. 9.
- [15] J. O. M. Miranda, « Electrostatic Vibration-to-Electric Energy Conversion », p. 197.
- [16] A. Mahir, « Rapport de projet de fin d'étude », p. 37.
- [17] B. Eloulid, « Contrôle vibratoire semi actif par éléments piézoélectriques et récupération d'énergie ambiante », p. 112.
- [18] I. Samia, « MASTER EN ELECTROTECHNIQUE », p. 62.
- [19] M. E. A. Brix Nigass, « Conception et réalisation d'un micro-actionneur à forte amplitude de déflexion » .
- [20] 1. TAIBI Soufiane, 2. HAOUARA Ilhem, 3. AGGOUNE Mohammed-Salah, et 4. RAHMOUN Tarek, « Application des matériaux électroactifs en génie électrique. Etude de cas : Actionneurs piézoélectriques. » .
- [21] Mr. BOUARROUDJ Emir, « Simulation COMSOL Multi physiques d'un Capteur de Gaz SAW ». mai 17, 2015.
- [22] « ZnO ». Consulté le: nov. 04, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/ZnO>.
- [23] « AIN ». Consulté le: nov. 04, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/AIN>.
- [24] « PZT ». Consulté le: nov. 04, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/PZT>.

- 
- [25] M. Cueff, « Micro-actionneurs piézoélectriques », p. 225.
- [26] G. Poulin-Vittrant, « Contribution au développement d'un générateur piézoélectrique pour applications nomades », p. 192.
- [27] C. Jean-Mistral, « Récupération d'énergie mécanique par polymères électroactifs pour microsystèmes autonomes communicants », p. 176.
- [28] Dejan Vasic, « Apports des matériaux piézoélectriques pour l'intégration hybride et monolithique des transformateurs.pdf », juin 2003.
- [29] S. Boisseau, « Récupération d'énergie vibratoire à électrets », p. 203.
- [30] V. Boitier et A. Belinger, « Récupération de l'énergie des vibrations d'une poutre piézoélectrique », p. 8.
- [31] D. Vasic et F. Costa, « Applications des éléments piézoélectriques en électronique de puissance », p. 27.
- [32] A. Badel, « De la conversion piézoélectrique à la récupération d'énergie », p. 132.
- [33] M. W. Shafer et E. Garcia, « The Power and Efficiency Limits of Piezoelectric Energy Harvesting », *J. Vib. Acoust.*, vol. 136, n° 2, p. 021007, avr. 2014, doi: 10.1115/1.4025996.
- [34] alman, « Piezoelectric Energy Harvester ». [En ligne]. Disponible sur: [www.comsol.com/trademarks](http://www.comsol.com/trademarks).
- [35] L. Xie et M. Cai, « Increased piezoelectric energy harvesting from human footstep motion by using an amplification mechanism », *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, n° 14, p. 143901, oct. 2014, doi: 10.1063/1.4897624.
- [36] W.-S. Jung *et al.*, « Powerful curved piezoelectric generator for wearable applications », *Nano Energy*, vol. 13, p. 174-181, avr. 2015, doi: 10.1016/j.nanoen.2015.01.051.
- [37] J. Zhao et Z. You, « A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors », *Sensors*, vol. 14, n° 7, p. 12497-12510, juill. 2014, doi: 10.3390/s140712497.
- [38] J. Granstrom, J. Feenstra, H. A. Sodano, et K. Farinholt, « Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps », *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, n° 5, p. 1810-1820, oct. 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/5/036.
- [39] D.-X. Cao, X.-J. Duan, X.-Y. Guo, et S.-K. Lai, « Design and performance enhancement of a force-amplified piezoelectric stack energy harvester under pressure fluctuations in hydraulic pipeline systems », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 309, p. 112031, juill. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112031.
- [40] C. Sun, G. Shang, et H. Wang, « On Piezoelectric Energy Harvesting from Human Motion », *J. Power Energy Eng.*, vol. 07, n° 01, p. 155-164, 2019, doi: 10.4236/jpee.2019.71008.
- [41] M. Zhang *et al.*, « A hybrid fibers based wearable fabric piezoelectric nanogenerator for energy harvesting application », *Nano Energy*, vol. 13, p. 298-305, avr. 2015, doi: 10.1016/j.nanoen.2015.02.034.
- [42] A. Talbourdet, F. Rault, G. Lemort, C. Cochrane, E. Devaux, et C. Campagne, « 3D interlock design 100% PVDF piezoelectric to improve energy harvesting », *Smart Mater. Struct.*, vol. 27, n° 7, p. 075010, juill. 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aab865.
- [43] P. Pillatsch, E. M. Yeatman, et A. S. Holmes, « A scalable piezoelectric impulse-excited energy harvester for human body excitation », *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, n° 11, p. 115018, nov. 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/11/115018.
- [44] J. Smilek, Z. Hadas, J. Vetiska, et S. Beeby, « Rolling mass energy harvester for very low frequency of input vibrations », *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 125, p. 215-228, juin 2019, doi: 10.1016/j.ymsp.2018.05.062.
- [45] R. Shukla et A. J. Bell, « PENDEXE: A novel energy harvesting concept for low frequency human waistline », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 222, p. 39-47, févr. 2015, doi: 10.1016/j.sna.2014.11.016.
- [46] M. Pozzi, M. S. H. Aung, M. Zhu, R. K. Jones, et J. Y. Goulermas, « The pizzicato knee-joint energy harvester: characterization with biomechanical data and the effect of backpack load », *Smart Mater. Struct.*, vol. 21, n° 7, p. 075023, juill. 2012, doi: 10.1088/0964-1726/21/7/075023.
- [47] Y. Kuang, Z. Yang, et M. Zhu, « Design and characterisation of a piezoelectric knee-joint energy harvester with frequency up-conversion through magnetic plucking », *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, n° 8, p. 085029, août 2016, doi: 10.1088/0964-1726/25/8/085029.
- [48] A. Delnavaz et J. Voix, « Flexible piezoelectric energy harvesting from jaw movements », *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, n° 10, p. 105020, oct. 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/10/105020.
-

- 
- [49]H. Abdi, N. Mohajer, et S. Nahavandi, « Human passive motions and a user-friendly energy harvesting system », *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, n° 8, p. 923-936, mai 2014, doi: 10.1177/1045389X13502854.
- [50]C. Pierre-Jean, « Actionnement et récupération d'énergie à l'aide de polymères électro-actifs », p. 321.





