

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la  
recherche scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان-



Université ABOU BEKR BELKAID

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique et Electronique

Mémoire Projet de Fin d'Etude

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electronique

Option : Instrumentation Electronique

*ETUDE ET CONCEPTION D'UNE MICRO POUTRE POUR GENERER DE  
L'ELECTRICITE*

Présenté par :

M<sup>r</sup>Yahia-Berrouiguet Ilyes

M<sup>r</sup>Djoubir Bachir

Soutenu le 28 juin 2017 devant un jury composé de :

M<sup>r</sup>Ghaffour K. Président Professeur

M<sup>r</sup>Bouazza B. Examineur Professeur

M<sup>r</sup>Soulimane S. Encadreur Maître de conférences

Année Universitaire 2016-2017

## *Remerciements*

*Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, ce mémoire n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.*

*Nous adressons nos remerciements à notre encadreur Monsieur soulimane.s, pour son aide consistante, ses conseils judicieux, et pour ses remarques objectives.*

*Nous remercions Les membres du jury, Mr Ghaffour.K et Mr Bouazza.B d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous tenons à remercier nos familles de nous avoir soutenus, nous ne serons jamais assez reconnaissants envers nos parents qui ont toujours tout mis en œuvre pour qu'on s'épanouisse dans tout ce qu'on entreprend.*

*Enfin, nous tenons à remercier toute personne nous ayons aidé de près ou de loin durant notre travail et en particulier tous nos collègues de la promotion instrumentation d'électronique*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçus à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mes sœurs Rim et Nesrine et Mon frère Mehdi qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité, mes tantes mes grandes parents pour leur soutien moral et à toi ma future femme Amel Et mes amis Abd rahmen Najib Habib et Zino et Samir et aussi moulay Mehdi Yassine et Ibrahim*

*Mon encadreur Mr soulimane.s Qui doit voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*Yahia berrouquet ilyes*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçus à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ;*

*Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Mon frère Boubakeur et sa femme et mes sœurs Leïla Naïma Fouzia qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité, mes tantes mes grandes parents pour leur soutien moral*

*Et à mes amis*

*Mon encadreur Mr Soulimane.s Qui doit voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

*Djoubir bachir*

## Table des matières

Liste des figures .....	7
Liste des tableaux .....	9
Introduction générale.....	10
<b>CHAPITRE I : Etat de l'art</b> .....	<b>13</b>
Résumé.....	14
I.1. Introduction.....	15
I.2. Les différentes sources d'énergie ambiante .....	15
I.2.1. La récupération d'énergie thermique.....	15
I.2.1.1. La récupération d'énergie thermoélectrique .....	15
I.2.1.2. La récupération d'énergie pyroélectrique .....	16
I.2.2. La récupération d'énergie électromagnétique.....	16
I.2.2.1. Sources lumineuses .....	16
I.2.2.2. Sources radiofréquences.....	16
I.2.3. La récupération d'énergie mécanique.....	16
I.3. Conversion de l'énergie mécanique.....	17
I.3.1. Transductions électromagnétique .....	18
I.3.2. Transductions électrostatiques .....	18
I.3.3. Transductions piézoélectriques .....	19
I.3.3.1. Définition de la piézoélectricité .....	19
I.3.3.2. Matériaux piézoélectrique .....	20
I.3.3.3. Les modes de couplage électromécanique .....	22
I.4. Comparaison des différents types de transducteurs .....	25
I.5. Conclusion.....	26
<b>CHAPITRE II : Modélisation d'une micro-poutre piézoélectrique pour la génération de l'électricité par la méthode des éléments finis</b> .....	<b>27</b>
Résumé.....	28

II.1. Introduction .....	29
II.2. Présentation du logiciel de modélisation .....	29
II.2.1. Introduction à l'interface utilisateur de Comsol multiphysiques 5.2.....	30
II.2.2. Géométrie de la micro-poutre étudiée .....	31
II.3. Conditions aux limites et variantes géométriques .....	32
II.3. Etude paramétrique.....	34
II.3.1. Effet de longueur de la poutre .....	34
II.3.2. Effet de largeur de la poutre .....	35
II.3.3. Effet de la masse sismique.....	35
II.3.5. Effet des électrodes.....	37
II.3.6. Géométrie trapèze.....	38
II.4. Conclusion.....	39
<b>CHAPITRE III : Analyse des vibrations d'une micro-poutre polymère à base de PVDF</b> .....	<b>40</b>
Résumé.....	41
III.1.Introduction .....	42
III.2. Modélisation sous le logiciel Comsol-multiphysique .....	42
III.2.1. Géométrie du polymère PVDF.....	42
III.2.2. Résultat de modélisation de la poutre commerciale.....	43
III.3. Analyse expérimentale .....	43
III.4. Conclusion.....	47
<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>48</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>51</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>54</b>
Annexe 1: Datasheet de la poutre MEAS.....	55
Annexe 2 : Datasheet Arduino MEGA 2560 .....	62
Annexe 3 : Programmation de la carte Arduino pour le balayage en fréquence du cerveau moteur.....	69
Annexe 4 : Datasheet cerveau moteur s90 .....	76

## Liste des figures

### Introduction générale

Figure. Echelle de puissance par récupération d'énergie en fonction des applications [1].

### CHAPITRE I : Etat de l'art

Figure I.1. Sources d'énergie disponibles sur terre.

Figure I.2. Schéma d'un récupérateur d'énergie mécanique.

Figure I.3. Les techniques de conversion électromécaniques.

Figure I.4. Schéma simple d'un générateur électromagnétique.

Figure I.5. Schéma général d'un générateur électrostatique avec une armature fixe en (jaune) et la seconde mobile (en rouge).

Figure I.6. Les modes de couplage électromécanique

Figure I.7. Dispositif de récupération d'énergie de vibrations d'une poutre.

### CHAPITRE II : Modélisation d'une micro-poutre piézoélectrique pour la génération de l'électricité par la méthode des éléments finis

Figure II.1. Logo du logiciel Comsol multi physiques.

Figure II.2. Liste des modules présents sur le logiciel Comsol Multiphysiques.

Figure II.3. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.2.

Figure II.4. La géométrie de l'empilement des couches de la micro-poutre. En gris la masse sismique en rouge le PZT et en bleu le Si.

Figure II.5. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence de plusieurs longueurs allant de 4 à 36 mm.

Figure II.6. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence de plusieurs largeurs allant de 500 à 3000  $\mu\text{m}$ .

Figure II.7. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence pour deux masses sismiques.

Figure II.8. Modélisation d'une poutre avec obstacle.

Figure II.9. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans obstacle.

Figure II.10. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans électrode.

Figure II.11. Modélisation d'une poutre au format d'un trapèze.

Figure II.12. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence : comparaison entre un format trapèze et rectangle.

### **CHAPITRE III : Analyse des vibrations d'une micro-poutre polymère à base de PVDF**

Figure III.1. Géométrie de la poutre piézoélectrique à base du polymère PVDF.

Figure III.2. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence : comparaison de la poutre piézoélectrique à base du polymère PVDF avec et sans masse.

Figure III.3. Courbe de l'angle de rotation du cerveau moteur en fonction de la fréquence de vibration.

Figure III.4. Photo du montage du cerveau moteur S90 et la carte Arduino MEGA2560.

Figure III.5. Photos de montage complet du banc de test.

Figure III.6. Les mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence.

Figure III.7. Photos de montage complet du banc de test avec une pince comme cureur d'ancrage.

Figure III.8. Comparaison des mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence avec et sans curseur.

### **Conclusions et perspectives**

Figure. Perspective d'un dispositif de récupération d'énergie d'une micro-poutre pour un large intervalle de fréquences en utilisant un curseur.

## **Liste des tableaux**

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

Tableau I.1. Différentes classes des matériaux piézoélectriques.

Tableau I.2. Caractéristiques de quelques matériaux piézoélectriques.

Tableau I.3. Comparatif qualitatif des différents transducteurs électromécanique.

Tableau I.4. Comparatif de performance entre les différents types de conversion.

### **CHAPITRE II :Modélisation d'une micro-poutre piézoélectrique pour la génération de l'électricité par la méthode des éléments finis**

Tableau II.1. Matériaux utilisés lors de nos modélisations avec quelques caractéristiques.

Tableau II.2. Les variantes géométriques des différentes couches de la microstructure.

### **CHAPITRE III : Analyse des vibrations d'une micro-poutre polymère à base de PVDF**

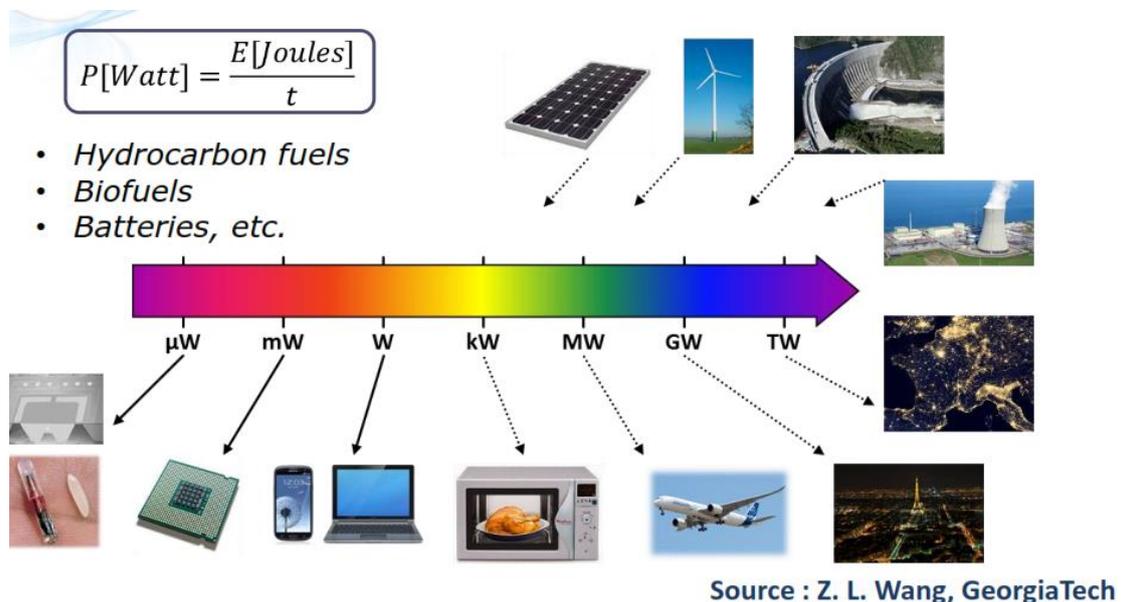
Tableau III.1. Composants utilisés pour tester la micro-poutre polymère.

---

## **Introduction générale**

---

La transition énergétique est une révolution liée au basculement vers les énergies renouvelables avec pour objectif des systèmes d'énergie décentralisés. Les systèmes de récupération d'énergie sont de plus en plus nombreux et adaptés aux usages de l'individu sans altérer la qualité du confort. Un monde en osmose avec l'environnement serait d'avoir recours à des énergies propres comme le solaire, thermique et l'éolien... Ces énergies nécessitent plusieurs types de mode de transduction thermoélectrique, pyroélectrique, électromagnétique, Ces transductions peuvent engendrer différents ordres de grandeur en terme de puissance. La figure ci-dessous montre leur classement en terme ordre de puissance en fonction des applications.



**Figure. Echelle de puissance par récupération d'énergie en fonction des applications [1].**

Dans ce projet, nous nous intéressons à la récupération d'énergie pour les faibles puissances. Ceci est justifié par le fait que des systèmes fonctionnant avec des piles ne parviennent pas à répondre aux exigences de nombreuses applications nécessitant une longue durée de vie et aucune intervention humaine récurrente. Des besoins pour les réseaux de capture autonomes, des microsystèmes dans le domaine du médical, la robotique, etc., peuvent par exemple être cités. Dans le cas des réseaux capteur, l'énergie est une question centrale, qui limite leur utilisation dans des applications diverses. Les réseaux de capteurs autonomes, constitués des microsystèmes sans fil, sont une forme d'intelligence ambiante qui suscitait un nombre

important de travaux [2-7]. Des réseaux autonomes complexes comportant des dispositifs potentiellement capables de récupérer leur énergie nécessaire à partir de sources ambiantes ont été récemment étudiés [3]. Ces types de réseaux constituent un besoin de nouvelles technologies de conversion d'énergie renouvelable croissant. La consommation électrique de ces microsystèmes ayant diminué ( $<1\text{mw}$ ) suite à leur réduction d'échelle, il devient alors possible de les alimenter en utilisant uniquement l'énergie ambiante.

Ce manuscrit sera organisé de la manière suivante :

- Un état de l'art présente les différents types de méthode de récupération d'énergie partir de sources d'énergie ambiante telles que la Lumière, la chaleur et les vibrations mécaniques. Nous focaliserons sur cette dernière pour exprimer les modes de transduction électromécanique. Nous détaillerons par la suite l'effet piézoélectrique.
- Le deuxième chapitre concernera la modélisation par élément fini d'une micro-poutre selon des dimensions et designs diverses. Nous présenterons une étude comparative entre ces différentes architectures pour ressortir les meilleurs tensions et puissances générés sur ces micro-poutres.
- Dans le troisième chapitre, nous aborderons la conversion électromécanique sur un échantillon commercial en les comparants aux résultats de simulation obtenus. L'objectif de ce chapitre présente le montage du banc test ainsi que les mesures de tensions générées par la micro-poutre.
- Nous terminerons par une conclusion et les perspectives en donnant quelques pistes de développement et d'optimisation de dispositif micro-poutre pour la récupération d l'électricité.

---

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

---

## **Résumé**

Le but de ce chapitre est de situer le travail présenté dans le contexte scientifique actuel. Une description de l'état de l'art en matière de récupération d'énergie est ainsi proposée. De plus, il sera également abordé les différentes sources d'énergie ambiante. De même l'autre objectif de cette partie est de présenter les principes de conversion électromécanique à savoir l'électromagnétisme, l'électrostatique, et la piézoélectricité. Nous étalerons sur ce dernier effet, lequel est choisi dans notre étude dans une forme de micro-poutre pour la génération de l'électricité.

### I.1. Introduction

La récupération d'énergie est un domaine en plein croissance, consistant à exploiter les sources d'énergie diffuses présentes dans notre environnement. Les énergies renouvelables comme le solaire, thermique et l'éolien ..., sont à l'inverse des sources très importantes de récupération d'énergie, mais à plus grandes échelle. Il existe sur terre de nombreuses sources d'énergie ambiante capables d'être transformées en énergie électrique (Figure I.1.).



Figure I.1. Sources d'énergie disponibles sur terre [8].

La conversion de l'énergie disponible sur terre est dépendante de la source d'énergie ambiante ainsi de la méthode de transformation de cette énergie en électricité. Dans ce qui suit, nous classons les différents types de récupération d'énergie.

### I.2. Les différentes sources d'énergie ambiante

De nombreuses sources d'énergie peuvent nous fournir des niveaux de puissance suffisants pour alimenter des systèmes autonomes :

#### I.2.1. La récupération d'énergie thermique

Elle est classée en deux catégories :

##### I.2.1.1. La récupération d'énergie thermoélectrique

Elle permet de transformer directement de la chaleur en électricité (Générateur d'électricité) ou de déplacer des calories par l'application d'un courant électrique (application de réfrigération). Un récupérateur thermoélectrique est basé sur l'effet Seebeck [9] les deux

conducteurs réagissent différemment à la différence de température, créant ainsi un flux de chaleur à travers le générateur thermoélectrique. Ceci produit ainsi une différence de tension qui est proportionnelle à la différence de température entre les plaques chaudes et froides.

### **I.2.1.2. La récupération d'énergie pyroélectrique**

Elle consiste en une fluctuation temporelle de la chaleur, qui ne considère donc qu'une portion limitée de l'espace. Citons à titre d'exemple l'étude menée par Sebald et al... [10] qui a montré que des fluctuations de température de plusieurs dizaines de degrés peuvent être dans l'activité quotidienne d'une personne.

### **I.2.2. La récupération d'énergie électromagnétique**

Nous pouvons classer les sources électromagnétiques en deux parties : celles correspondantes à la lumière lumineuse, et celles Liées aux radiofréquences.

#### **I.2.2.1. Sources lumineuses**

Elle est basée sur le processus de transfert de l'énergie Électrique entre deux bobines résonantes à la même fréquence.

#### **I.2.2.2. Sources radiofréquences**

C'est le processus de conversion des ondes électromagnétiques RF en électricité en utilisant une antenne de redressement. L'énergie peut être récupérée soit à partir de l'énergie RF provenant de sources telle que la radio, la télévision, les téléphones portables et les communications Wifi, ou à partir de signaux électromagnétiques générés à une longueur d'onde spécifique. Pour ce type de récupération d'énergie la puissance générée dépendra de la distance entre L'émetteur RF et le récupérateur.

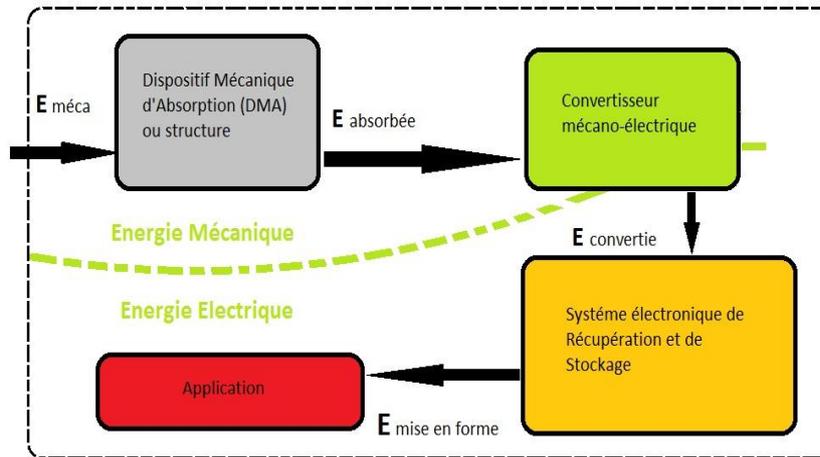
### **I.2.3. La récupération d'énergie mécanique**

En convertissant l'énergie des déplacements et des oscillations mécaniques d'un composant, en énergie électrique, on récupère ce qu'on appelle l'énergie mécanique dissipée. En utilisant par exemple des vibrations, corps humain, la déformation de la surface d'un capteur et à partir des vagues, etc. [11]. Cette récupération d'énergie mécanique est basée principalement sur trois principes de transduction piézoélectrique, électrostatique et électromagnétique.

La récupération d'énergie mécanique est l'une des approches les plus prometteuses pour pouvoir alimenter des microsystèmes électromécaniques sans fil ou les réseaux de capteurs autonomes, en utilisant les vibrations mécaniques très présentes autour de nous (être humain, machine à laver, voiture automobile, etc.).

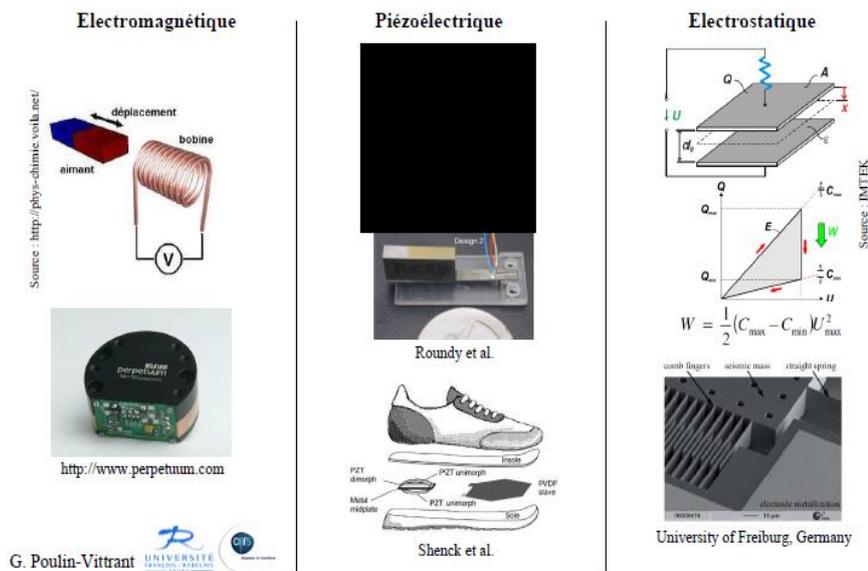
### I.3. Conversion de l'énergie mécanique

Dans la plupart des cas, cette énergie mécanique peut être convertie en électricité à l'aide de trois systèmes de transduction électromécanique. Tous les récupérateurs d'énergie mécanique, quel que soit le mode de conversion, ont une structure comme celle présentée sur la figure I.2.



**Figure I.2. Schéma d'un récupérateur d'énergie mécanique [12].**

Il existe trois principaux mécanismes de transduction de puissance mécanique en puissance électrique pour les systèmes résonants : l'effet piézoélectrique, la conversion électrostatique ou électromagnétique.



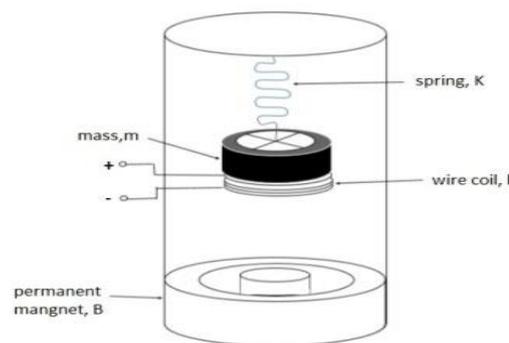
**Figure I.3. Les techniques de conversion électromécaniques [13].**

La figure I.3. Présente quelques exemples de chacune de ces trois types de conversion :

- Capteur MEMS capacitif pour l'électrostatique,
- Bobine capteur de déplacement pour l'électromagnétisme,
- Et chaussure de marche piézoélectrique.

### **I.3.1. Transductions électromagnétiques**

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 de ses dimensions géométriques (longueur  $l$ , diamètres interne et externe), de la perméabilité magnétique  $\mu$  du noyau et des dimensions géométriques du noyau (longueur  $l_n$  et diamètre  $\varphi$ ), l'un est fixe tandis que le mouvement d'autres 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.

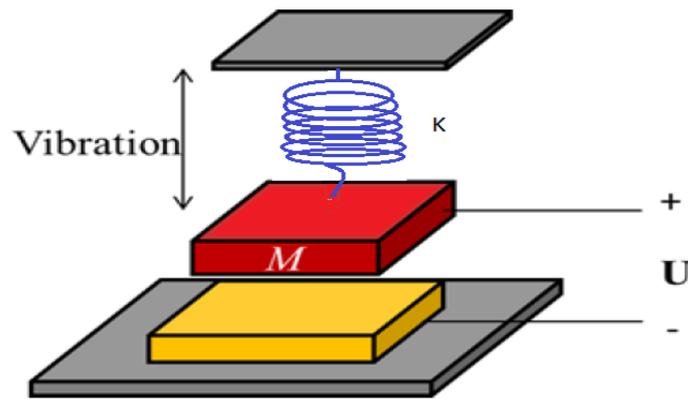


*Figure I.4. Schéma simple d'un générateur électromagnétique [15].*

Ce type de transduction permet d'obtenir de très bons rendements de transduction mécanique électrique [14]. La figure I.4. Montre un schéma simple d'un générateur électromagnétique [15].

### **I.3.2. Transductions électrostatiques**

La transduction électrostatique est classiquement mise en œuvre grâce à l'utilisation d'un condensateur à capacité variable dans sa version la plus simple, ce condensateur est constitué de deux électrodes planes. Une de ces électrodes est mobile et peut s'approcher ou s'éloigner de la seconde électrode qui elle reste fixe (figure I.5.).



*Figure I.5. Schéma général d'un générateur électrostatique avec une armature fixe en (jaune) et la seconde mobile (en rouge).*

Une fois ce condensateur inséré dans un circuit électrique, ses deux électrodes sont porteuses de charges électriques de signes opposés. Il en résulte, d'une part l'existence d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes et d'autre part l'existence d'une force électrostatique qui attire les deux électrodes l'une vers l'autre.

### **I.3.3. Transductions piézoélectriques**

La transduction piézoélectrique est le mécanisme le plus pertinent vis-à-vis de notre application puisqu'il n'y a pas de contrainte d'orientation (assiette, roulis) contrairement à la conversion électrostatique. La tension de sortie, bien que dépendante des vibrations incidentes, est d'une manière générale à un niveau confortable ( $\sim 1$  à  $10$  V) pour l'électronique de gestion qui doit traiter le signal généré. L'efficacité du générateur piézoélectrique étant essentiellement limitée par les performances des matériaux, le défi technologique se situe dans l'intégration de matériaux piézoélectriques ayant de bonnes caractéristiques. Pour cela, nous définirons cet effet avant d'aborder ce type de matériaux.

#### **I.3.3.1. Définition de la piézoélectricité**

La piézoélectricité (du grec piézein presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles : c'est une application de l'effet direct. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression etc.) tandis que l'effet inverse

permet de réaliser des actionneurs (Injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nano manipulateur...). Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct le second effet piézoélectrique inverse. Ce phénomène a été découvert au XIXème siècle par les frères Pierre et Jacques Curie.

L'effet direct : Un effort mécanique donne naissance à un potentiel électrique.



Certains cristaux, lorsqu'ils sont soumis à une pression, dans des directions particulières, voient apparaître des charges positives et négatives sur certaines portions de leur surface. Ces charges sont proportionnelles à la pression et disparaissent quand la pression cesse.

L'effet indirect : Un potentiel électrique donne naissance à un effort mécanique.

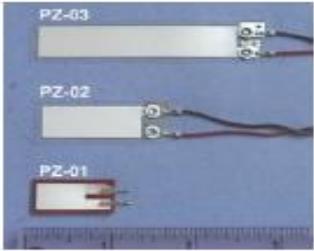
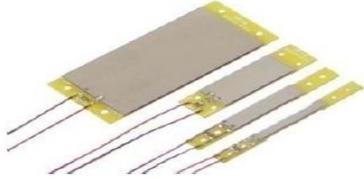


### I.3.3.2. Matériaux piézoélectriques

De nombreux cristaux naturels présentent des propriétés piézoélectriques. On peut citer le quartz, la topaze, la tourmaline, la berlinite (AlPO<sub>4</sub>). Dans la pratique, les matériaux utilisés pour la fabrication des différents dispositifs sont des matériaux de synthèse qu'on peut classer selon leur structure cristallographique ou leur composition chimique. Ces matériaux peuvent être regroupés en trois classes principales :

- Matériaux cristallins (comme le quartz),
- Matériaux céramiques (comme le PZT),
- Matériaux polymères (comme le PVDF).

Le tableau I.1 présente un exemple de chaque classe.

<p><b>Les Polymères</b></p>	<p>Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre .Il existe également des polymères qui présentent des propriétés Piézoélectriques.</p> <p>Les plus couramment utilisés sont des polymères de synthèse, notamment le polyvinyle -dinedifluoride (PVDF).</p>	 <p><b>polyvinyle-dinedifluoride(PVDF)</b></p>
<p><b>Les cristaux</b></p>	<p>Le plus connu est le quartz, se trouve à l'état naturelle, considéré comme cristallins, il est particulièrement sensible à leur coupe d'orientation, et présente des propriétés piézo-électriques en fonction de l'orientation cristalline.</p>	 <p><b>le quartz</b></p>
<p><b>Les Céramiques</b></p>	<p>Ces matériaux présentent des coefficients de couplage élevés, et sont très flexibles, de sorte qu'ils sont très adaptés aux applications personnalisées.</p>	 <p><b>Plomb Zirconium Titanate (PZT)</b></p>

**Tableau I.1. Différentes classes des matériaux piézoélectrique.[16]**

Le choix du matériau se base sur les paramètres suivants :

- Le couplage électromécanique k.
- La raideur des matériaux piézoélectriques ou le module d'Young.
- Un matériau piézoélectrique à faible raideur aide à obtenir de basses fréquences de résonances.

- Le facteur de qualité  $Q_m$  : Il est important de choisir le matériau avec le meilleur facteur de qualité pour minimiser les pertes mécaniques dans la structure.
- Les pertes diélectriques ( $\tan(\delta)$ ) : Ces pertes doivent bien entendu être minimisées.
- La plage de variation de température ( $-20 < T < 80^\circ\text{C}$ ) limitée par la température de Curie.

Matériau	$\epsilon^T$	$d_{33}$ ( $10^{-12}$ m/V)	$d_{31}$ ( $10^{-12}$ m/V)	$k_{33}$	$k_{31}$	Tan( $\delta$ ) (%)	$Q_m$	$\gamma_{33}$ (GPa)	$\gamma_{31}$ (GPa)	$\lambda^P$
Quartz	4.5	2.31	0.727	-	-	-	$10^4$ - $10^6$	-	-	-
Hard PZT	13 50	300	-109	0.68	0.33	0.35	1400	63	76	25
Soft PZT	41 00	620	-260	0.73	0.36	2.7	72	51	59	6.1
PVDF	13	9	1	0.18	0.2	-	20	-	-	-
AlN	10	6.8	2.625	0.31	-	0.1	-	-	-	6.9
ZnO	11	12.3	5.1	0.46	0.18	-	-	-	-	-

**Tableau I.2. Caractéristiques de quelques matériaux piézoélectriques [17].**

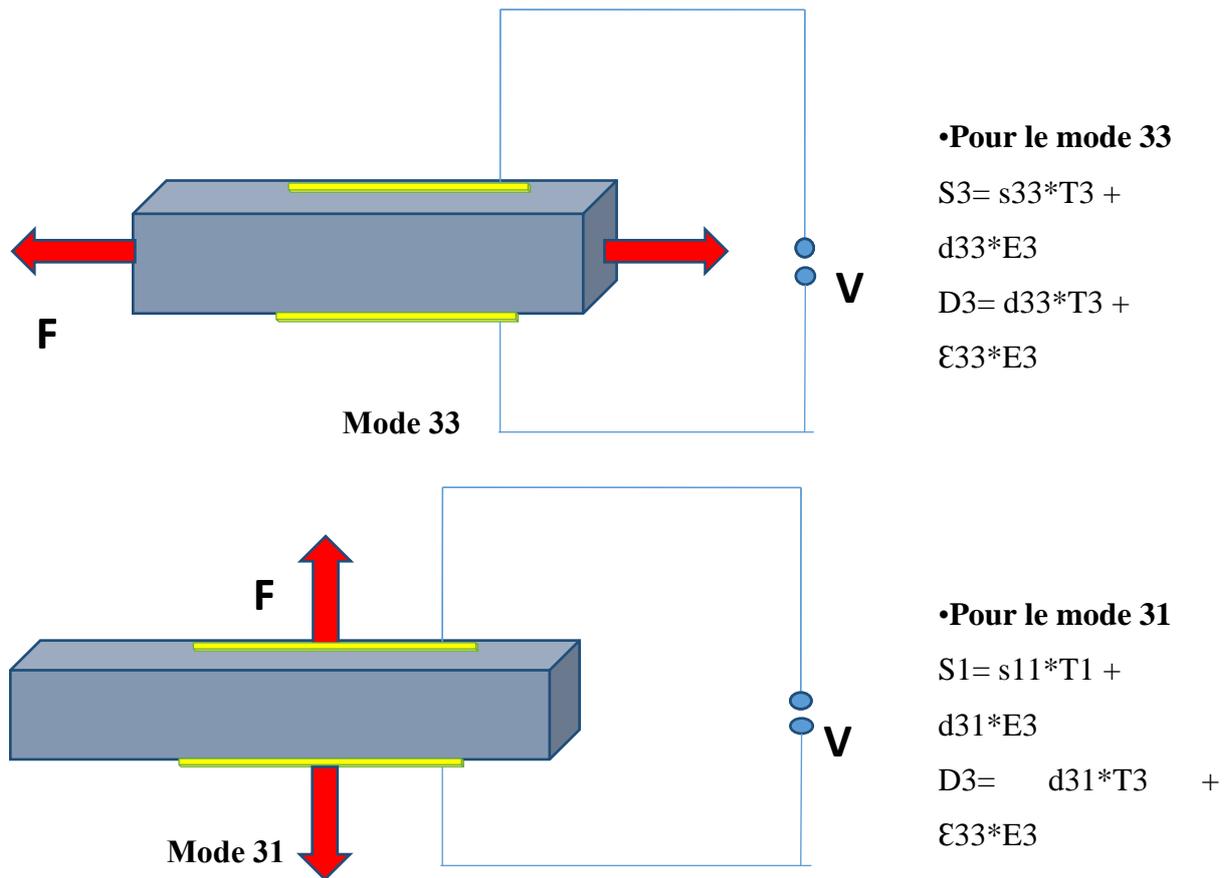
Le tableau I.2 présente *les caractéristiques de quelques matériaux piézoélectriques*.

### **I.3.3.3. Les modes de couplage électromécanique**

Le mode de couplage traduit la façon dont la mécanique et l'électrique interagissent entre eux. Deux modes de couplages sont classiquement exploités :

- Le mode 33 où la déformation est dans le même sens que la polarisation,
- Le mode 31 où la déformation est perpendiculaire à la polarisation.

Un système d'axe 1, 2, 3 est habituellement utilisé pour identifier les directions. L'axe 3 est l'axe de polarisation du matériau. Les systèmes d'équations suivants récapitulent les couplages au sein de matériaux piézoélectriques :



*Figure I.6 Les modes de couplage électromécanique*

Avec **S** la déformée

**S** : déformation relative

**T** : contraintes mécaniques (Pa)

**E** : champs électrique (V/m)

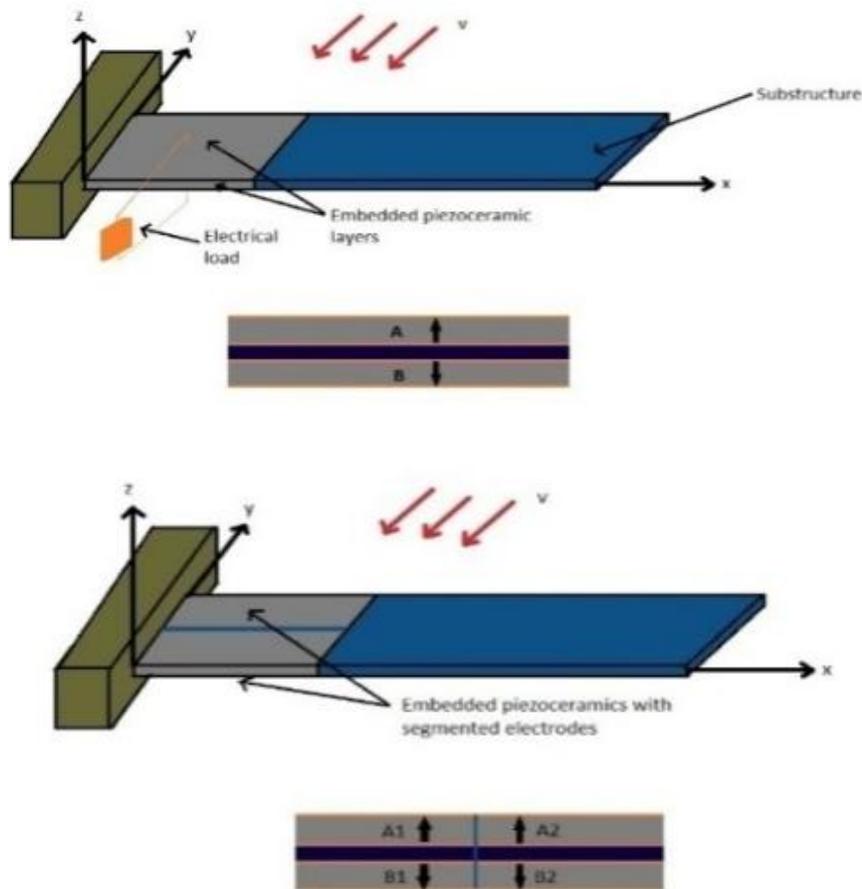
**D** : déplacement électrique (C/m<sup>2</sup>)

**s** : souplesse (m<sup>2</sup>/N)

**D** : constante piézoélectrique (C/N)

**ε** : Permittivité (F/m)

Depuis plus d'une dizaine d'années, de nombreux dispositifs miniatures piézoélectriques à structure vibrante ont été proposés pour récupérer l'énergie de vibrations. La transduction de l'énergie vibratoire en énergie électrique requiert la compression et l'extension alternée du matériau piézoélectrique, par exemple membrane ou ressort en S [18].



*Figure 1.7. Dispositif de récupération d'énergie de vibrations d'une poutre [19].*

Des nombreuses études concernent l'utilisation d'élément piézoélectrique pour la récupération d'énergie à petite échelle car ces matériaux présentent une densité d'énergie relativement élevée et un fort couplage électromécanique intrinsèque. Cependant, ces matériaux (céramiques piézoélectriques notamment) sont souvent rigides et peu déformables sous l'effet des vibrations. Pour nombreuses applications pour les quelles une basse fréquence et large gamme d'excitation mécanique sont nécessaires (mouvement humain par exemple), le couplage du matériau piézoélectrique a certaines de ce source d'excitation produit une énergie mécanique faible. Parmi les nombreux dispositifs développés au format poutre vibrante, les travaux de S.Roundy et al. [20] ont eu un impact particulier il a développé un générateur piézoélectrique bio morphe macroscopique ( $1 \text{ cm}^3$ ) ayant une fréquence de résonance de 60 Hz, capable de délivrer  $180 \mu\text{W}$  électriques.

#### **I.4.Comparaison des différents types de transducteurs**

Cette partie se veut une comparaison qualitative et quantitative entre les différents transducteurs. Le tableau I.2. Montre les avantages et inconvénients des trois transductions électromagnétiques, électrostatiques et piézoélectriques.

		<b><i>ELECTROSTATIQUE</i></b>	<b><i>ELECTROMAGNITIQUE</i></b>	<b><i>PIEZOELICTRIQUE</i></b>
<b><i>Densité d'énergie</i></b>	<b><i>Micro</i></b>	- Fort	- Faible (miniaturisation délicate)	- Moyenne (matériaux de moins bonne qualité)
	<b><i>Macro</i></b>	- Faible	- Très Forte	- Fort
<b><i>Miniaturisation/ Comptabilité silicium</i></b>		- Matériaux facile à intégrer	-Bobine et aimant difficile à intégrer en couches minces	- Matériaux piézoélectrique en couches minces - Moins performants, gravure difficile
<b><i>Problèmes spécifiques</i></b>		- Nécessité d'une polarisation - Tension de fonctionnement élevée - Besoin de plaques parallèles	-Tension de sortie très faible -Facteur de qualité élevé	- Rendement limité par les performances des matériaux - Matériaux sensibles à la température

**Tableau I.3. Comparatif qualitatif des différents transducteurs électromécanique [21].**

Le tableau 1.3.et 1.4. Montrent respectivement les différentes caractéristiques qualitatif et performances quantitatives ressorties lors des dernières études pour ces trois types de transductions.

<b><i>Transducteur</i></b>	<b><i>Performances</i></b>	<b><i>Références</i></b>
Electromagnétique	10 mW/(m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> , 1 mW/(cm <sup>3</sup> (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> ) ex : 3mW à 80 Hz dans 1,5 cm <sup>3</sup>	HSG-IMIIt, Allemagne, 2009
Piézoélectrique	100 μW/(m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> , 200 μW/(cm <sup>3</sup> (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> ) ex : 48mW à 50Hz, dans 80cm <sup>3</sup> , pour 10ms <sup>-2</sup>	ARVENI Inc., France, 2007
Electrostatique	10 μW/(m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> , 10 μW/(cm <sup>3</sup> (m/s <sup>2</sup> ) <sup>2</sup> ) ex : 460 μW à 50Hz, dans 18 cm <sup>3</sup>	CEA-LETI, France, 2010

**Tableau I.4.Comparatif de performance entre les différents types de conversion [13].**

Nous remarquons que les transductions électromagnétique et piézoélectrique montrent un fort couplage et des puissances générées élevées mais la première est recalée pour sa maniabilité et

sa difficulté d'intégration à l'échelle micrométrique. L'objectif de notre étude dans la partie suivante et de proposer une étude paramétrique d'une micro-poutre piézoélectrique.

### **1.5. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la problématique de la génération d'énergie l'aide de matériaux intelligents, dans le but d'alimenter des appareils électroniques portables. Depuis quelques années, de nombreux groupes de recherche s'intéressent à la récupération de l'énergie des mouvements dans l'environnement, car même si une faible proportion seulement peut être convertie en énergie électrique, celle-ci permettrait d'alimenter certains appareils portables. Cette étude bibliographique sur les différents types de générateurs nous a convaincu qu'une architecture de micro convertisseur d'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique représente un bon choix pour avoir des systèmes autonomes. Cependant, ces systèmes sont en pleine expansion depuis ces dernières années et suscitent un intérêt marqué dans la communauté scientifique. C'est pourtant dans la compréhension de ces mécanismes que nous pouvons trouver les clés de l'optimisation du convertisseur d'énergie mécanique en énergie électrique

---

**CHAPITRE II : Modélisation d'une micro-poutre piézoélectrique  
pour la génération de l'électricité par la méthode des éléments  
finis**

---

### **Résumé**

Ce chapitre sera consacré à la conception et la modélisation du dispositif de récupération des vibrations d'une micro poutre pour délivrer une faible puissance électrique. Il est construit en quatre parties. Dans la première partie, nous décrirons l'outil de modélisation par élément fini qui est Comsol multiphysiques. Dans la deuxième partie, nous présenterons les différentes étapes de conception de notre structure. Ici, nous avons choisi de concevoir un système basé sur la transduction piézoélectrique. La troisième partie permettra de donner les conditions aux limites ainsi que les matériaux utilisés dans cette étude. Enfin, la dernière partie sera consacrée aux résultats de modélisation.

## **II.1. Introduction**

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous utiliserons un logiciel de modélisation numérique par la méthode des éléments finis. Plusieurs logiciels, spécialisés dans le domaine des microsystèmes pouvant coupler plusieurs physiques, peuvent être utilisés. Parmi ces logiciels, nous pouvons citer :

- Coventorware,
- Ansys,
- Comsol multiphysiques.

C'est ce dernier qui a été choisi pour sa simplicité et facilité d'utilisation. Dans ce qui suit, nous allons décrire ce logiciel et les étapes nécessaires lors d'une modélisation.

## **II.2. Présentation du logiciel de modélisation**

Comsol Multiphysiques est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques . Historiquement, ce logiciel a été créé en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist (1925-2005) à la Royal Institute of Technologie à Stockholm.



*Figure II.1. Logo du logiciel Comsol multiphysiques.*

C'est un logiciel multiplate forme : Windows, Mac, Linux, il contient la plupart des équations aux dérivées partielles, soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires et des équations algèbres-différentiels sont également possibles. Et il utilise une interface graphique, avec une possibilité d'une programmation directe en incrémentant les équations aux dérivées partielles désirées. L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies.

Les différentes étapes du processus de modélisation :

- Définir la géométrie,
- Les propriétés matériaux,
- Le maillage,
- Choisir la ou les physiques,
- Résoudre et afficher les résultats.

Toutes ces étapes sont intégrées dans une seule interface, des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma. La liste des modules complémentaires pour COMSOL Multi-physiques est donnée dans la figure II.2.

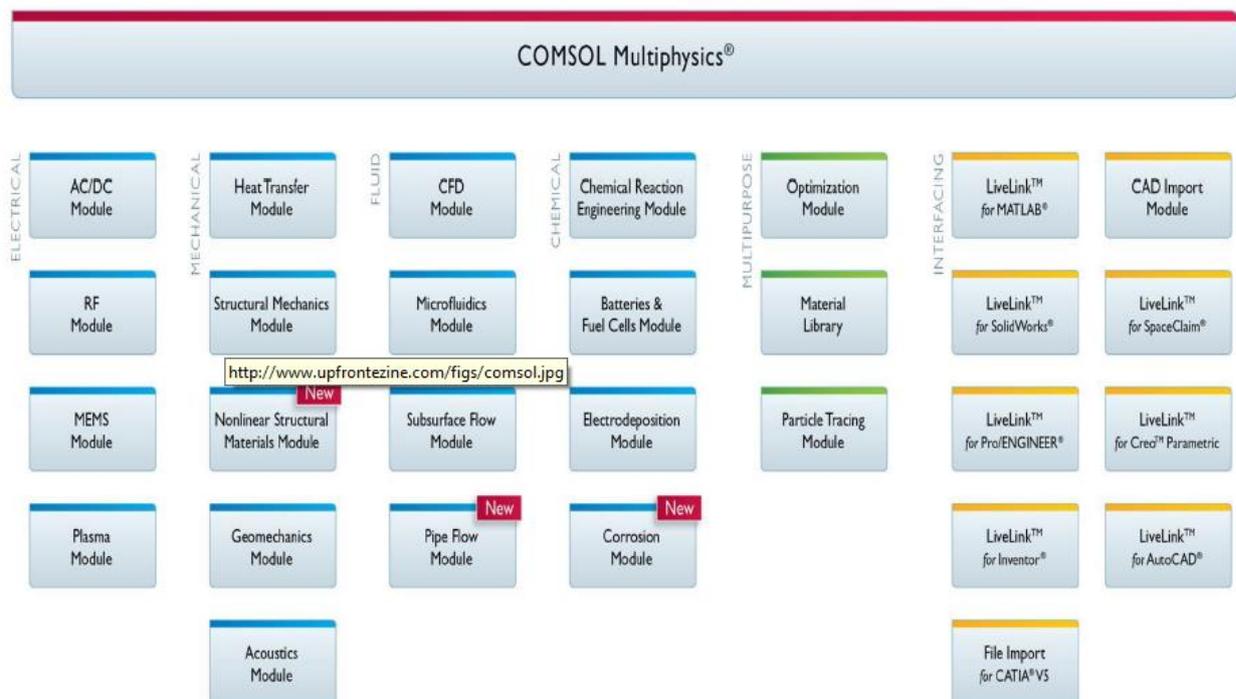


Figure II.2. Liste des modules présentes sur le logiciel ComsolMultiphysiques.[22]

### II.2.1. Introduction à l'interface utilisateur de Comsol multiphysiques 5.2

La figure II.3. présente une capture d'écran de l'interface du logiciel Comsol mutliphysique version 5.2.

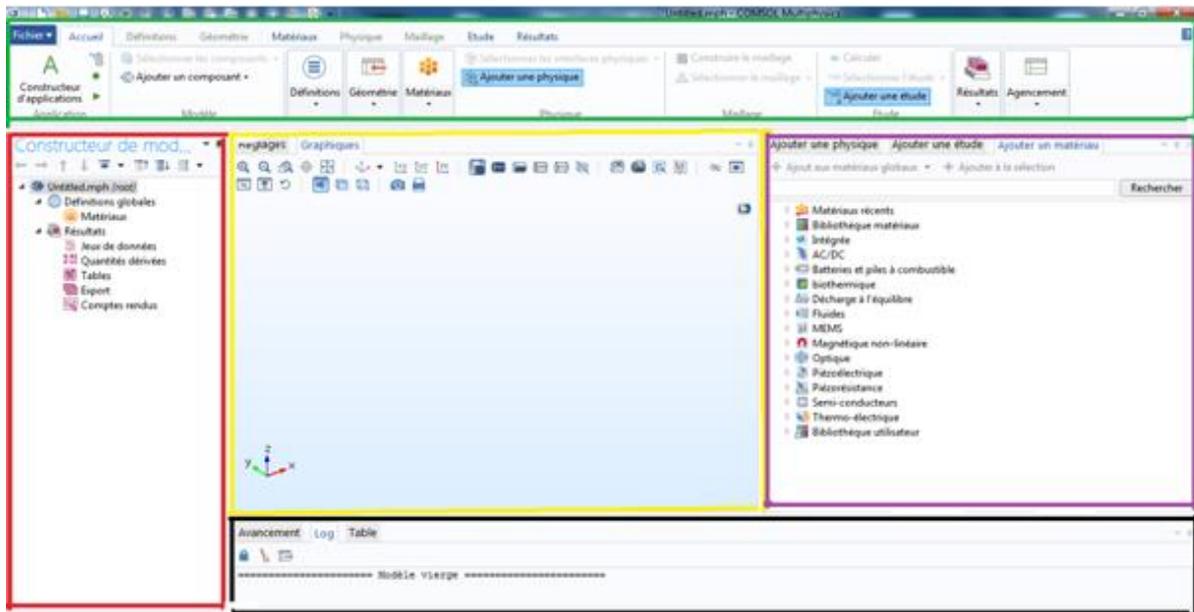


Figure II.3. Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL 5.2.

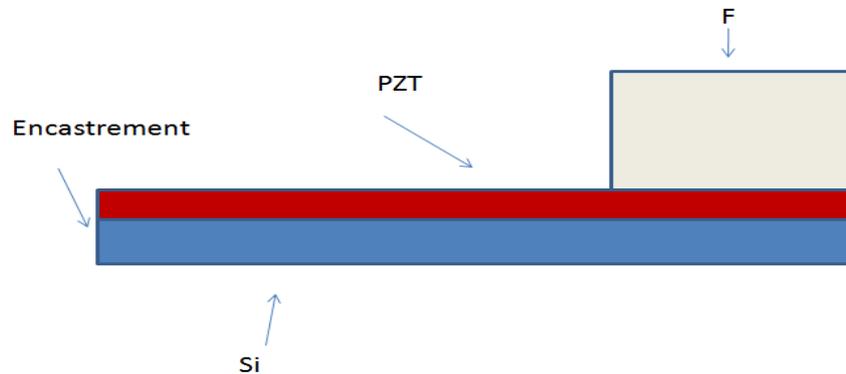
Cette interface est constituée de cinq grandes parties :

- La partie cadrée en vert représente les raccourcis nécessaires pour la physique, maillage et la géométrie,
- La partie cadrée en rouge représente le tableau de bord du ou des modèles choisis avec les caractéristiques de la géométrie, matériaux utilisés comporte des options relatives à ce qui est sélectionné dans la barre de menus.
- La partie cadrée en jaune est la fenêtre d'affichage de graphique qui permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats.
- La partie cadrée en violet est la fenêtre d'insertion de données une étude, que ça soit en matériau, géométrie...
- Finalement, La partie cadrée en Noir permettant de visualiser les messages d'erreurs et le progrès des simulations.

### II.2.2. Géométrie de la micro-poutre étudiée

La majorité des convertisseurs d'énergie vibratoires développés à ce jour est basée sur un système mécanique résonant de type masse-ressort qui optimise l'énergie mécanique ambiante qui peut être récupérée. Avec ce type de système mécanique, l'énergie mécanique ambiante récupérée n'est d'autant plus grande que le déplacement de la masse sismique l'est. Pour ces simulations, la micro poutre est constituée d'un matériau piézoélectrique. Pour augmenter la déformation sur la surface de la micro poutre et réduire sa fréquence de résonance, une masse sismique est placée à l'extrémité libre de la poutre. La fréquence de résonance de la micro poutre

est simulée à l'aide d'une analyse harmonique. Le module "Mécanique des solides" est utilisé pour résoudre la simulation mécanique. La microstructure est fixée à l'autre extrémité pour assurer la vibration de la microstructure hors plan.



**Figure II.4. La géométrie de l'empilement des couches de la micro-poutre. En gris la masse sismique en rouge le PZT et en bleu le Si.**

La forme générale de ce type de convertisseur est constituée de 3 parties comme représenté sur la figure II.4. La partie poutre suspendue est encadrée à l'extrémité gauche d'un côté et rattachée de l'autre côté par une masse sismique libre et comme matériaux on a choisi le silicium (Si) et le matériau piézoélectrique (PZT).

### II.3. Conditions aux limites et variantes géométriques

Ce type de microstructure génère une large déformation sur sa surface supérieure lorsqu'elle est soumise à des vibrations. La masse sismique ajoutée au bout de la micro-poutre permet d'autre part de minimiser et de contrôler la fréquence de résonance des microstructures, tout en augmentant leurs déformations à la résonance. Le tableau suivant présente les matériaux utilisés lors de nos modélisations avec quelques caractéristiques.

<i>Matériaux</i>	<i>module de d'Young [GPa]</i>	<i>coefficient de Poisson</i>	<i>Permittivité relative</i>	<i>Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]</i>
<i>Si</i>	160	0.22	4.5	2320
<i>PZT-5A</i>	-	-	{919.1, 919.1, 826.6}	7750
<i>PZT-5H</i>	-	-	{1730, 1730, 1700}	7750
<i>Au</i>	70	0.44	-	19300

**Tableau II.1. Matériaux utilisés lors de nos modélisations avec quelques caractéristiques.**

Ces caractéristiques sont tirées de la bibliothèque des matériaux des logiciels. Pour un même matériau, nous pouvons trouver plusieurs variantes comme c'est le cas pour le PZT, celles-ci dépendent de la composition chimique exacte du matériau.

<b>Paramètres de masse (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Design</b>	<b>Observation</b>	<b>Effet de l'électrode</b>
<b>Longueur =4000</b> <b>Largueur =500</b> <b>Epaisseur =5600</b>		<b>V max=1,8v</b> <b>F=125Hz</b>	<b>Electrode virtuels</b>
<b>Longueur =4000</b> <b>Largueur =500</b> <b>Epaisseur =2800</b>		<b>V max=1,2v</b> <b>F=125Hz</b>	<b>Electrode virtuels</b>
<b>Longueur =4000</b> <b>Largueur =500</b> <b>Epaisseur =5600</b> <b>Electrode de</b> <b>Longueur =200</b> <b>Epaisseur =5</b>		<b>V max=1v</b> <b>F=125Hz</b>	<b>Avec électrode</b>
<b>Longueur =4000</b> <b>Largueur =360</b> <b>Epaisseur =2800</b>		<b>V max=0,7v</b> <b>F=125Hz</b>	<b>Electrode virtuels</b>

**Tableau II.2. Les variantes géométriques des différentes couches de la microstructure.**

La géométrie en surface prend plusieurs variantes en fonction de l'énergie récupérée. Le tableau II.2. Donne les différents designs modélisés. Plusieurs micro-poutres de dimensions différentes ont été modélisées en fonction de la longueur, largeur, et épaisseur de la poutre. L'analyse de ces variantes permettra d'optimiser la géométrie de la micro-poutre en donnant les paramètres favorisant une récupération efficace de l'énergie ambiante.

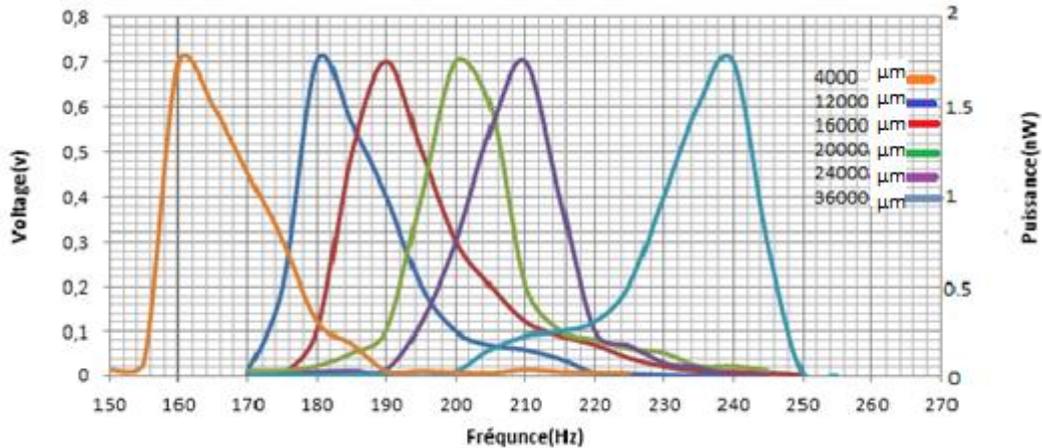
### II.3. Etude paramétrique

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

- Les effets géométrique la longueur, la largeur et l'épaisseur ....
- Les effets de types de matériaux utilisés.
- Les effets de la masse sismique (taille forme, poids...)
- ....

#### II.3.1. Effet de longueur de la poutre

La figure ci-dessous présente une courbe multimode de plusieurs longueurs montrant la bande de fréquence permettant de générer de la tension.



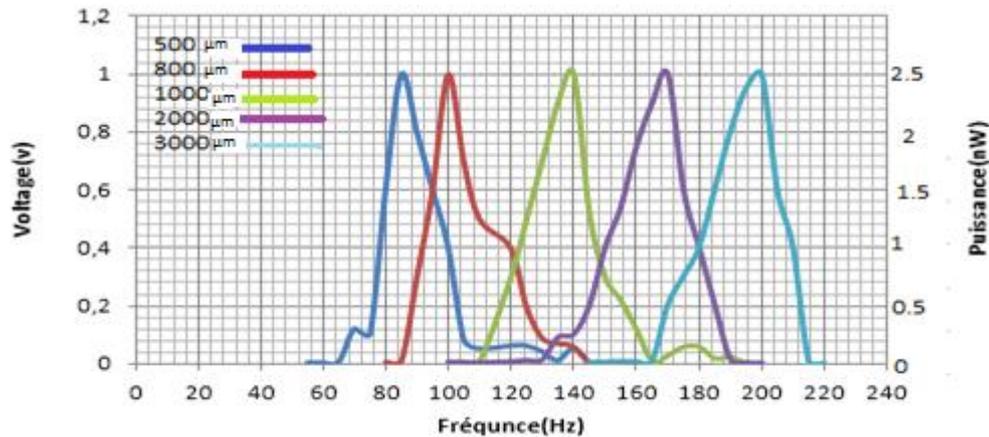
**Figure II.5. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence de plusieurs longueurs allant de 4 à 36 mm.**

Pour une poutre d'une largeur entre 4 et 36 mm la fréquence de génération de tension et de 150 à 250 Hz. Nous remarquons que plus la largeur de la poutre diminue plus la fréquence d'utilisation diminue en gardant le même niveau de tension générée. Il est à noter aussi que les puissances récupérées sont de l'ordre de quelques nano watts. Ces puissances peuvent être supérieures en utilisant des matériaux avec un plus fort couplage et des épaisseurs de

matériau piézoélectrique plus supérieures. Dans la suite de l'étude, nous fixons juste un des matériaux piézoélectriques pour en ressortir des lois de comportement.

### II.3.2. Effet de largeur de la poutre

La figure II.6. Présente une courbe multimode de plusieurs largeurs montrant la bande de fréquence permettant de générer de la tension.

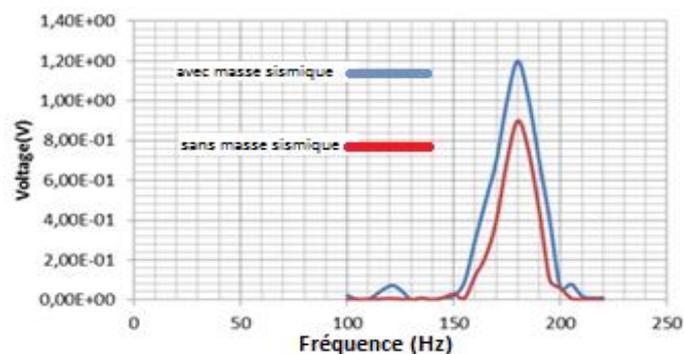


*Figure II.6. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence de plusieurs largeurs allant de 500 à 3000 µm.*

Pour une poutre d'une largeur entre 500 et 3000µm la fréquence de génération de tension et de 60 à 200 Hz. Nous remarquons que plus la largeur de la poutre diminue plus la fréquence d'utilisation diminue en gardant le même niveau de tension générée.

### II.3.3. Effet de la masse sismique

Nous avons modélisé deux masses sismiques différentes (présentés sur le tableau II.2.) Sur deux poutres avec les mêmes caractéristiques géométriques.

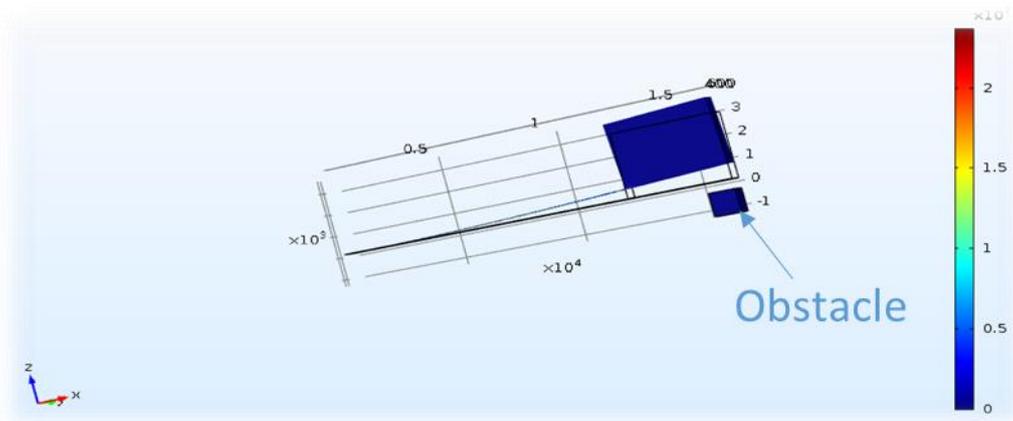


**Figure II.7. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence pour deux masses sismiques.**

La figure II.7. Montre que la poutre avec masse nous donne une tension plus élevée que celle sans masse. Aussi, de cette comparaison les mêmes fréquences d'utilisation sont obtenues.

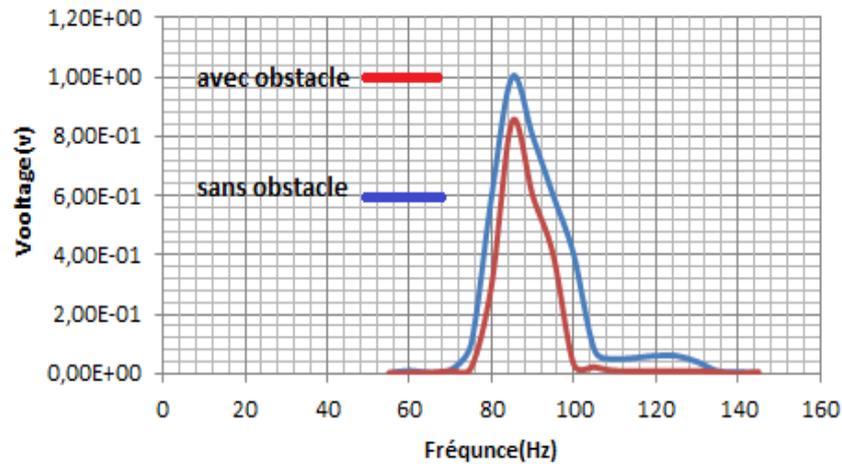
### **II.3.4. Effet d'obstacle de vibration**

Dans cette partie, nous voulons voir l'effet d'un obstacle empêchant la vibration. La figure II.8. Montre la position de l'obstacle situé parallèlement à la masse sismique au bout de la poutre.



**Figure II.8. Modélisation d'une poutre avec obstacle**

La figure II.9 montre la courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans obstacle.

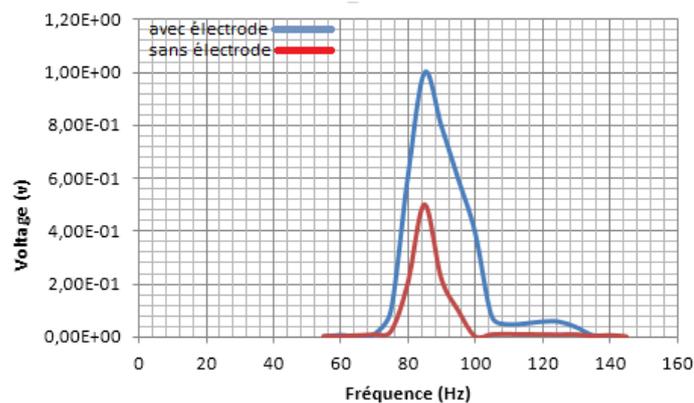


*Figure II.9. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans obstacle.*

Nous pouvons observer que la poutre génère moins de tension en utilisant un obstacle tout en gardant les mêmes fréquences d'utilisation.

### II.3.5. Effet des électrodes

Sur toutes les modélisations précédentes, nous avons considéré que le matériau piézoélectrique est entre deux électrodes virtuelles. Dans cette partie, nous étudions l'effet de ces électrodes en utilisant des électrodes en Haut d'une épaisseur de 100 nm. La figure II.10. Montre la courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans électrode.

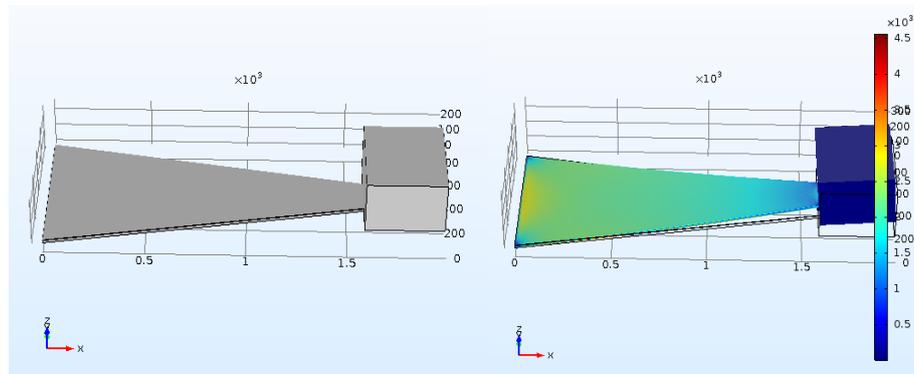


*Figure II.10. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence avec et sans électrode.*

Nous remarquons l'électrode baisse la tension générée tout en gardant les mêmes fréquences d'utilisation. Cet effet est sûrement à la diminution du couplage électromécanique due aux électrodes.

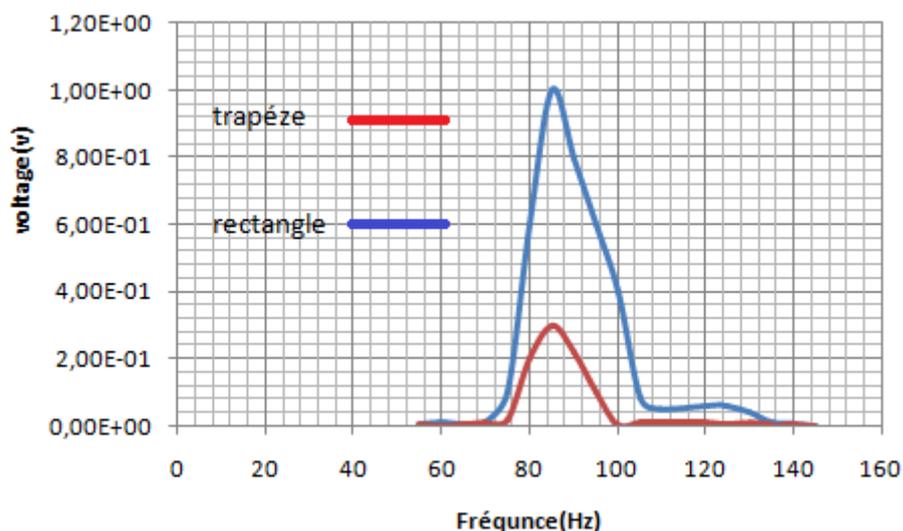
### II.3.6. Géométrie trapèze

Dans cette partie, nous voulons modéliser un autre format de géométrie. La figure II.11. Montre la géométrie trapèze étudiée.



*Figure II.11. Modélisation d'une poutre au format d'un trapèze.*

La figure II.12 montre la courbe de tension générée en fonction de la fréquence en comparant un format trapèze et un rectangle de même longueur et épaisseurs.



*Figure II.12. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence : comparaison entre un format trapèze et rectangle.*

Nous remarquons que la tension générée pour un trapèze est sensiblement plus basse que celle d'un rectangle. Aussi, de cette comparaison pratiquement les mêmes fréquences d'utilisation sont obtenues. Par ce résultat, nous remarquons que l'effet de surface a un rôle très important sur la tension générée.

#### **II.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons modélisé une micro-poutre piézoélectrique pour la récupération d'énergie du mouvement vibratoire en utilisant une céramique de type PZT. Celle-ci dépend étroitement du comportement mécanique du dispositif ainsi que des paramètres géométriques. Lors de toutes ces modélisations, nous avons appliqué une variation de vibration aux bouts de la poutre en variant plusieurs paramètres géométriques. Nous avons remarqué que plus la longueur et la largeur de la poutre diminuent, la fréquence d'utilisation devient petite tout en gardant le même niveau de tension générée. De cette étude, nous remarquons la tension générée baissera, en présence des électrodes, en présence d'obstacle de vibration, et de la diminution de la surface de la poutre comme c'est le cas en comparant un format trapèze et rectangle.

---

**CHAPITRE III : Analyse des vibrations d'une micro-poutre  
polymère à base de PVDF**

---

### **Résumé**

Dans notre projet, nous cherchons à récupérer de l'énergie ambiante pour faire fonctionner des systèmes nécessitant une faible consommation. La plupart des générateurs existant ont des structures rigides fabriquées à base de métaux comme les structures électrostatiques ou encore celles à base de céramiques piézoélectriques très fragile comme indiqué dans le paragraphe précédent. Ainsi, les polymères, matériaux souples possédant des propriétés physiques particulières, sont les meilleurs candidats pour développer des générateurs flexibles et souples. L'utilisation de ces polymères est en pleine expansion, ici nous utiliserons une structure récupératrice d'énergie commerciale à base de PVDF. Dans ce chapitre, nous essayons de modéliser ce type de microstructures pour les comparer aux mesures expérimentales afin d'en exploiter au maximum leurs potentiels.

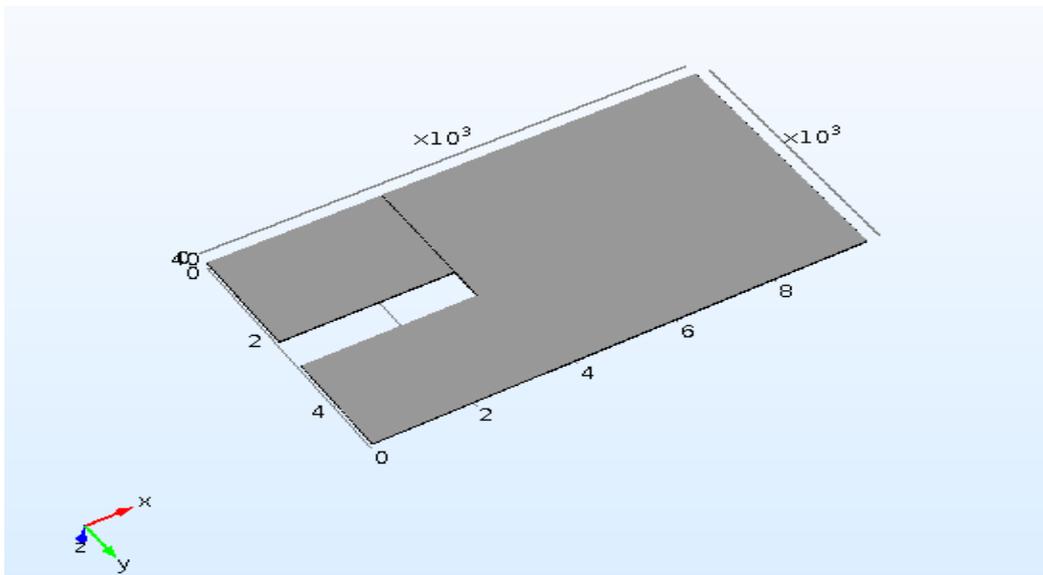
### III.1. Introduction

Les matériaux transducteurs convertissent une forme d'énergie en une autre sont largement utilisés dans les applications de détection. Aujourd'hui, les capteurs polymères piézoélectrique font partie de la croissance la plus rapide des technologies dans le marché mondial. Comme toute nouvelle technologie, il y a eu un nombre extraordinaire d'applications où "PIEZO FILM" a été considéré pour la solution du capteur. Ici, nous utilisons une microstructure polymère piézoélectrique à base de PVDF. Cette structure permettant de convertir l'énergie mécanique en une énergie électrique est un produit commercial de référence MEAS acheté chez Mesurment Spécialités (voir annexe)

### III.2. Modélisation sous le logiciel Comsol-multiphysique

#### III.2.1. Géométrie du polymère PVDF

Dans cette simulation, nous avons utilisé les caractéristiques du film piézoélectrique qui à base de polymère PVDF de 28  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, sur un substrat en polyester de 0,125 mm longueur 0.920 mm sa largeur 0.530 mm Comme le film piézoélectrique est déplacé de l'axe neutre mécanique la vibration crée une très forte déformation dans le polymère et, par conséquent, des tensions sont générées

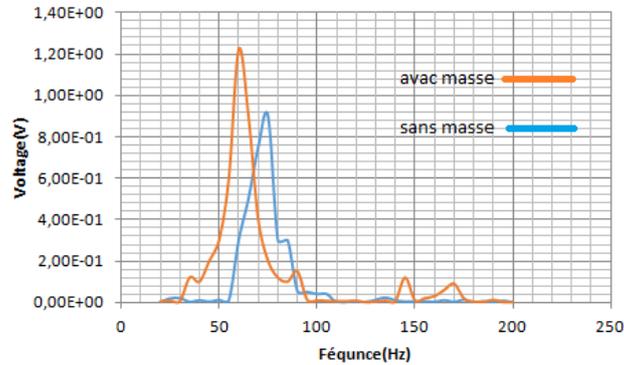


*Figure III.1. Géométrie de la poutre piézoélectrique à base du polymère PVDF.*

Lors de ces modélisations, une variante avec masse sismique a été ajoutée au bout la poutre commerciale.

### III.2.2. Résultat de modélisation de la poutre commerciale

La figure III. 2. Donne la courbe de tension générée en fonction de la fréquence : comparaison de la poutre piézoélectrique à base du polymère PVDF avec et sans masse sismique

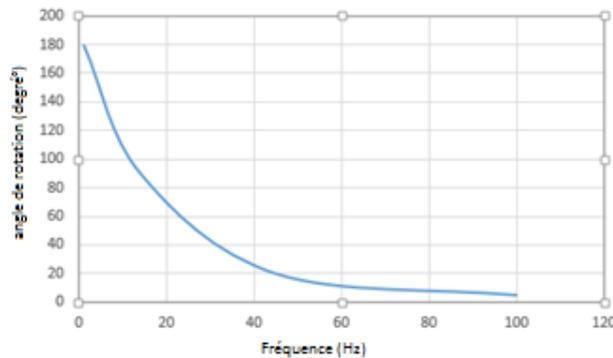


*Figure III.2. Courbe de tension générée en fonction de la fréquence : comparaison de la poutre piézoélectrique à base du polymère PVDF avec et sans masse.*

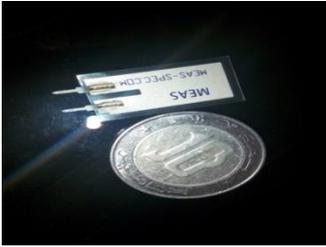
Nous remarquons que la poutre avec masse nous donne une tension plus élevée autour du pic comparée celle sans masse. Aussi, un petit décalage vers les basses fréquences est remarqué. Nous ne pouvons comparer ces résultats aux analyses expérimentales car la masse sismique n'est pas correctement dimensionnée vu les épaisseurs de silicium utilisés comme masse sismiques qui tourne autour de 500  $\mu\text{m}$ .

### III.3. Analyse expérimentale

Avant d'exposer les résultats, nous exposons sur le tableau III.1. Les composants utilisés pour tester la micro-poutre polymère



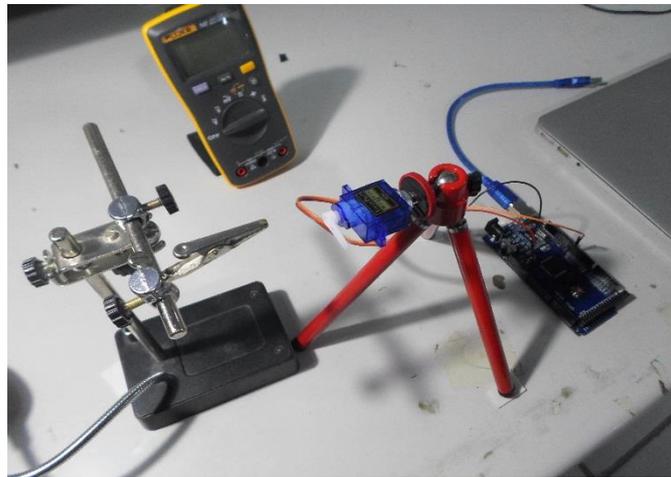
*Figure III.3. Courbe de l'angle de rotation du cerveau moteur en fonction de la fréquence de vibration.*

<i>Composant</i>	<i>Photo</i>	<i>Description</i>
Le film piézoélectrique de haute sensibilité LDT0-028K		L'utilisation du film piézoélectrique PVDF nous permet de récupérer de l'énergie électrique
Cerveau moteur (s90) Dimension : 22mmx11.5mmx22.5mm Poids net : 9 g Vitesse de fonctionnement : 0,12s/ 60° (4.8V à vide) Amplitude de rotation : 180°		Le cerveau moteur nous crée un mouvement vibratoire contrôlé « rotation de 0° à 180° »
Arduino Mēga 2560		MicroControler pour contrôler chaque fréquence de vibration du cerveau moteur
Alimentation de tension continue		Pour alimenter l'Arduino À 5v
Le multimètreFluke107		Pour mesurée la tension de sortie du film piézoélectrique

**Tableau III.1. Composants utilisés pour tester la micro-poutre polymère.**

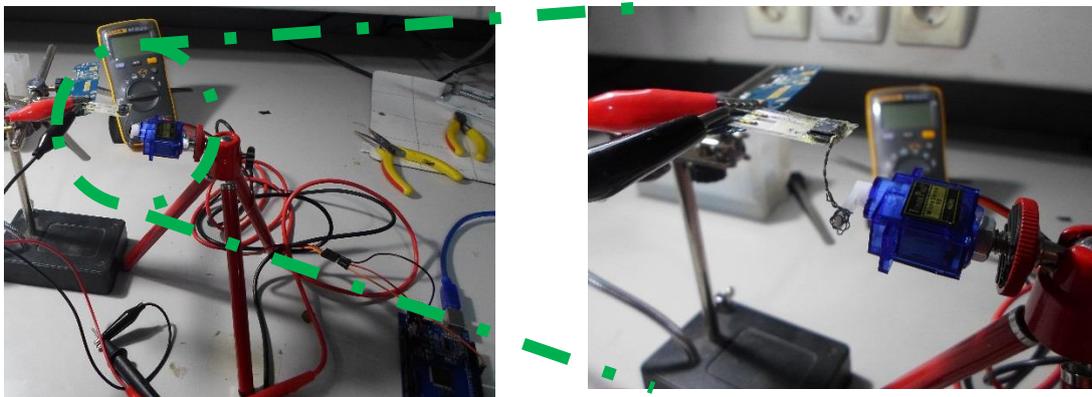
Pour tester la micro-poutre à base de polymère, nous avons établi un banc de test expérimental. Pour cela, il fallait créer des vibrations grâce à un cerveau moteur (s90) de chez Micro moteur. Ce type de moteur nous permet d'avoir plusieurs fréquences de vibration selon l'angle de rotation. La figure III.3. Donne la courbe de l'angle de rotation du cerveau moteur en fonction de la fréquence de vibration.

Ce type de moteur nous permet d'aller de quelques Hertz jusqu'à la centaine d'Hertz. Pour programmer ce moteur et balayer automatiquement en fréquence lors des tests de vibrations, nous avons utilisé une carte Arduino MEGA 2560 achetée chez Robot shop. La figure III.4 montre une photo du montage de ces deux composants.



*Figure III.4. Photo du montage du cerveau moteur S90 et la carte Arduino MEGA2560.*

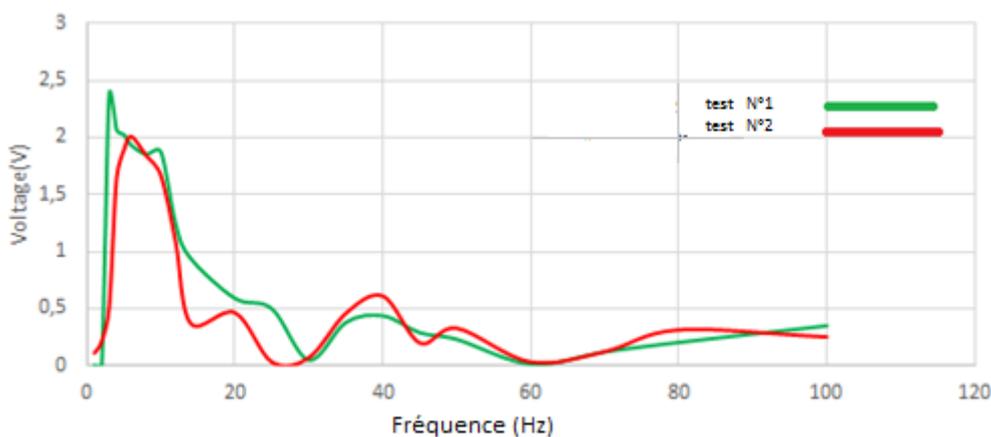
Pour relier ce moteur à la poutre, nous un fil métallique qui entoure le bout de la poutre. La figure III.5. montre une photo du montage complet. Pour mesurer la tension générée par la poutre à base du polymère PVDF (MEAS), nous avons utilisé un multimètre Fluke107.



*Figure III.5. Photos de montage complet du banc de test.*

Lors des premiers tests, les mesures de tensions fluctuaient à basse fréquence (0 à 10 Hz) avec des tensions de l'ordre du dixième de volt (0,1 à 0,3 V). Ces tensions sont considérées comme faibles pour faire ressortir un pic, nous avons ajouté une masse sismique coupée d'un wafer de Silicium de 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. L'inconvénient de cette démarche est que la découpe se fasse manuellement donc impossibilité d'avoir une précision sur la masse ajoutée et difficile de les comparer aux résultats de modélisation.

La figure III.6. Montre les mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence pour la poutre avec une masse sismique de Silicium. Nous remarquons que les tensions maximales sont autour de 5 à 10 Hertz pour les deux essais.



**Figure III.6. Les mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence.**

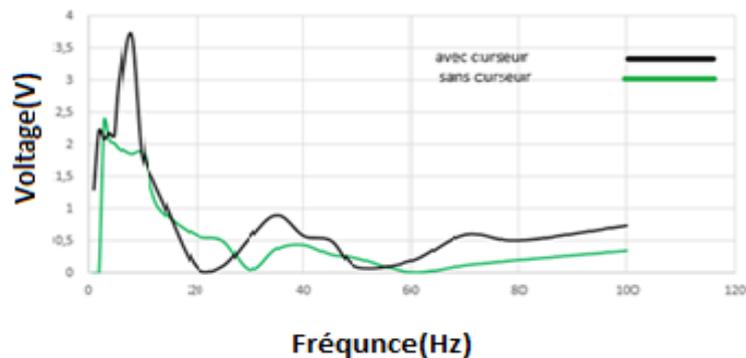
Ces résultats sont en décalage avec ceux de la modélisation. Pour expliquer ce décalage, les propriétés incluses du logiciel sont prises de sa bibliothèque et ne sont pas compatible avec ceux du dispositif commercial. Pour une meilleure comparaison, il faut caractériser les matériaux de cette poutre pour ressortir leur module d'Young, coefficient de poisson, facteur de couplage piézoélectrique...

D'autres tests ont été effectués en plaçant une pince à mi-longueur de la poutre comme curseur qui servira comme encastrement à cette longueur. La figure III.7 montre une photo de ce type de montage. La figure III.8. Montre une comparaison des mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence entre le premier test de toute la poutre et la poutre à mi-longueur.



*Figure III.7. Photos de montage complet du banc de test avec une pince comme cureur d'ancrage.*

Nous remarquons que les tensions maximales sont toujours autour de 5 à 10 Hertz pour les mesures avec curseur. Le pic de tension avec curseur est plus affiné que celui sans curseur.



*Figure III.8. Comparaison des mesures de voltage récupéré en fonction de la fréquence avec et sans curseur.*

Nous remarquons aussi que les tensions générées autour du pic est largement supérieure pour la poutre avec curseur. Ceci est sûrement du au non fléchissement de la poutre vu sa souplesse et largeur.

#### **III.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une structure récupératrice d'énergie commerciale à base de PVDF. Les résultats de modélisation ce type de microstructures sont en décalage avec l'expérimentation du aux données insuffisantes des matériaux de la poutre commerciale. Pour cette partie, un montage de banc de test a été établi pour créer des vibrations dans un intervalle de fréquence. Pour cela, nous avons utilisé un cerveau moteur commandé avec une carte Arduino pour balayer en fréquence ente 0 et 100Hz. Nous avons pu mesurer des pics de tensions entre 5 et 10 Hertz. Ce pic de voltage a été affiné et amélioré en plaçant une pince comme curseur.

---

## **Conclusions et perspectives**

---

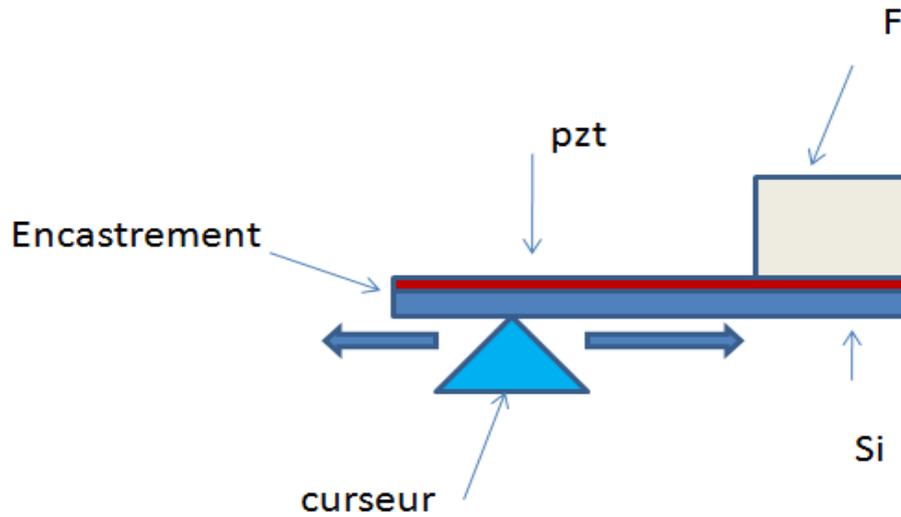
Le travail présenté dans ce mémoire concerne la récupération de l'énergie mécanique pour la génération de l'énergie électrique en vue d'alimenter l'électronique de faible puissance comme des microsystèmes embarqués. Grâce à ce type d'application ces systèmes de devenir autonome. Nous démontrons les points forts dans le domaine de la récupération d'énergie. Les modèles développés ont été confrontés aux mesures expérimentales. De nombreuses avancées technologiques sont encore à réaliser : de l'amélioration du matériau à son utilisation en générateur en passant par sa caractérisation fiable et sa modélisation. De plus en plus d'équipes scientifiques se positionnent dans ce domaine des polymères électro-actifs mais aucune étude comparative ne complète en mode générateur n'a été réalisé.

Dans ce projet, nous avons pu établir des lois de comportement de la conversion, de l'énergie électrique vibratoire en énergie électrique d'une micro-poutre grâce à une étude de modélisation aux éléments finis sous Comsol multiphysiques. Lors de toutes ces modélisations, nous avons appliqué une variation de vibrations aux bouts de la poutre en variant plusieurs paramètres géométriques. Nous avons remarqué que plus la longueur et la largeur de la poutre diminuent, la fréquence d'utilisation devient petite tout en gardant le même niveau de tension générée. De cette étude, nous remarquons la tension générée baissera, en présence des électrodes, en présence d'obstacle de vibration, et de la diminution de la surface de la poutre comme c'est le cas en comparant un format trapèze et rectangle.

Pour l'analyse des vibrations d'une micro-poutre polymère MEAS à base de matériau piézoélectrique PVDF, un montage de banc de test a été établi pour créer des vibrations dans un intervalle de fréquence. Pour cela, nous avons utilisé un cerveau moteur commandé avec une carte Arduino pour balayer en fréquence entre 0 et 100Hz. Nous avons pu mesurer des pics de tensions entre 5 et 10 Hertz. Ce pic de voltage a été affiné et amélioré en plaçant une pince comme curseur. Nous avons pu atteindre des tensions autour de 4 V pouvant dans l'avenir à l'aide d'un amplificateur de courant rendre un dispositif autonome.

De cette étude plusieurs perspectives sont à l'étude pour exploiter au maximum le potentiel de ce type de structure. Nous pouvons citer les points suivants :

- Pour générer une tension plus supérieure, nous pour créer un circuit plus spécifique et adapté à une application donnée en utilisant un amplificateur de tension et une capacité de stockage pour une utilisation optimale,



*Figure. Perspective d'un dispositif de récupération d'énergie d'une micro-poutre pour un large intervalle de fréquences en utilisant un curseur.*

- Pour une utilisation sur un intervalle large en fréquence, nous pouvons imaginer de curseurs dynamiques en longueur de la micro-poutre comme ancrage lors des vibrations (figure ci-dessus)
- Tester d'autres types de polymères avec des souplesses et dimensions différentes.

---

## **Références bibliographiques**

---

- [1] J.I. Sohn, S.N. Cha, B.G. Song, S. Lee, S.M. Kim, J.Y. Ku, H.J. Kim, Y. Jun Park, B.L. Choi, Z.L. Wang, J. M. Kim and K. Kim, Engineering of efficiency limiting free carriers and an interfacial energy barrier for an enhancing piezoelectric generation, *Energy Environ. Sci.*, 2013, 6, 97-104.
- [2] M. Gurgoze, G. Erdogan, S. Inceoglu, “Bending Vibrations of Beams Coupled by a Double Spring – Mass System”, *Journal of Sound and Vibration* (2001) 243(2), 361-369
- [3] C.B. Williams, R.B. Yates, “Analysis of a Micro-Electric Generator for Micro-Systems”, *Proceedings of the Transducers 95/Eurosensors IX* (1995) 341-344
- [4] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, “Analysis of the Transformation of Mechanical Impact Energy to electric Energy Using Piezoelectric Vibrator”, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers & Short Notes & Review Papers*, v 35, n 5B, May, 1996, p 3267-3273
- [5] M. Umeda, K. Nakamura, S. Ueha, “Energy storage characteristics of piezogenerator using impact induced vibration”, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers & Short Notes & Review Papers*, v 36, n 5B, May, 1997, p 3146-3151
- [6] T. Starner, “Human Powered Wearable Computing” *IBM Systems Journal* 35 (3) (1996) 618-629
- [7] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, N. Gershenfeld, “Parasitic Power Harvesting in Shoes”, *2nd IEEE International Conference on Wearable Computing* pp 132-7
- [8] <http://inf.ufrgs.br/~epfreitas/>.
- [9] <http://www.energieplanete.fr/conversion-energie-thermique-electrique-effet-seedeck.html>.
- [10] G. Sebald, PhD thesis, Récupération d'énergie piezoélectrique, 2009. Université de Savoie/INSA

- [11] <http://lamcos.insa-lyon.fr/files/poster/pdf/107.pdf>.
- [12] <http://www.academia.edu>. Sébastien Boisseau Système de récupération d'énergie mécanique de déformation basse fréquence.
- [13] G. Poulin-Vittrant (1/1/2012) Récupération d'énergie Etat de l'art, perspectives, Vibrations et contraintes mécaniques p14.
- [14] A. Boisseau, Techniques de l'Ingénieur RE160, oct. 2010.
- [15] [http://www.ssdsl.gatech.edu/wp-content/uploads/2012/11/JIMSS\\_2010b.pdf](http://www.ssdsl.gatech.edu/wp-content/uploads/2012/11/JIMSS_2010b.pdf).
- [16] Matériaux piézoélectriques, Michel Brissaud – 2007
- [17] R. Amirtharajah, A. C.-P.-. (1998). Self-Powered Signal Processing Using Vibration-Based Power Generation .
- [18] [http://www.ssdsl.gatech.edu/wp-content/uploads/2012/11/JIMSS\\_2010b.pdf](http://www.ssdsl.gatech.edu/wp-content/uploads/2012/11/JIMSS_2010b.pdf).
- [19] A. Mahir, PhD thesis, La récupération d'énergie vibratoire 2010.
- [20] S. Roundy, P.K. Wright, J. Rabaey, "A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes", Computer Communications, v 26, n 11, Jul 1, 2003, p 1131-1144.
- [21] H. Durou, PhD thesis, Vers l'autonomie énergétique des réseaux de capteurs embarqués : conception et intégration d'un générateur piézoélectrique et d'un micro dispositif de stockage capacitif en technologie silicium, 2010.
- [22] Mohamed Ouameur Modélisation, simulation et optimisation d'un moteur roue le 01/01/2014 .

---

## **Annexes**

---

Annexe 1: Datasheet de la poutre MEAS

# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

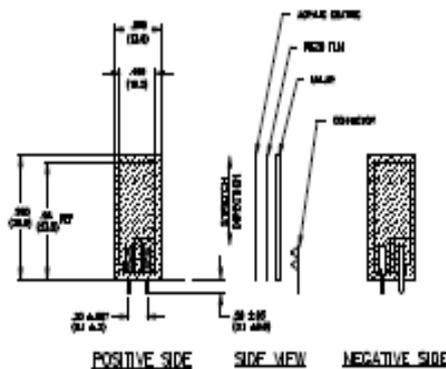


- Piezo Film Sensors
- High Sensativity
- AC Coupled
- Laminated
- Robust



The LDT0-028K is a flexible component comprising a 28 µm thick piezoelectric PVDF polymer film with screen-printed Ag-Ink electrodes, laminated to a 0.125 mm polyester substrate, and fitted with two crimped contacts. As the piezo film is displaced from the mechanical neutral axis, bending creates very high strain within the piezopolymer and therefore high voltages are generated. When the assembly is deflected by direct contact, the device acts as a flexible "switch", and the generated output is sufficient to trigger MOSFET or CMOS stages directly. If the assembly is supported by its contacts and left to vibrate "in free space" (with the inertia of the clamped/free beam creating bending stress), the device will behave as an accelerometer or vibration sensor. Adding mass, or altering the free length of the element by clamping, can change the resonant frequency and sensitivity of the sensor to suit specific applications. Multi-axis response can be achieved by positioning the mass off center. The LDTM-028K is a vibration sensor where the sensing element comprises a cantilever beam loaded by an additional mass to offer high sensitivity at low frequencies.

## dimensions

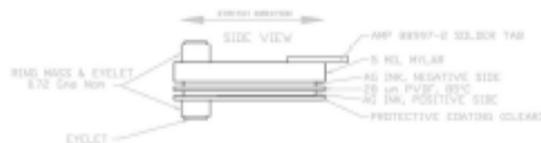
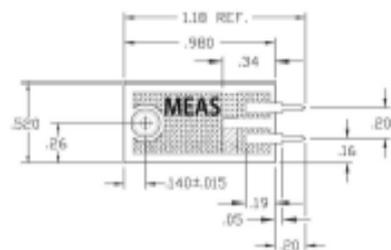


## FEATURES

- Solder Tab Connection
- Both No Mass & With Mass Version
- Withstands High Impact
- Operating Temperature: 0°C to 85°C
- Storage Temperature: -40°C to 85 °C
- Higher Temperature Version up to 125 °C available on a Custom Basis

## APPLICATIONS

- Vibration Sensing in Washing Machine
- Low Power Wakeup Switch
- Low Cost Vibration Sensing
- Car Alarms
- Body Movement
- Security Systems



## LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

### examples of properties

Four different experiments serve to illustrate the various properties of this simple but versatile component.

#### Experiment #1

**LDT0 as Vibration Sensor** - with the crimped contacts pushed through a printed-circuit board, the LDT0 was soldered carefully in place to anchor the sensor. A charge amplifier was used to detect the output signal as vibration from a shaker table was applied (using a charge amplifier allows a very long measurement time constant and thus allows the "open-circuit" voltage response to be calculated). Small masses (approximately 0.26g increments) were then added to the tip of the sensor, and the measurement repeated. Results are shown in Table 1 and the overlaid plots in Fig. 1. Without adding mass, the LDT0 shows a resonance around 180 Hz. Adding mass to the tip reduces the resonance frequency and increases "baseline" sensitivity.

LDT0 Sensitivity: Effect of Added Mass  
(Figure 1)

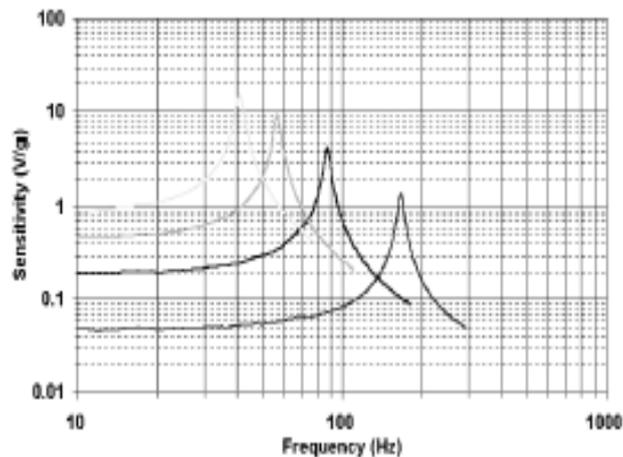


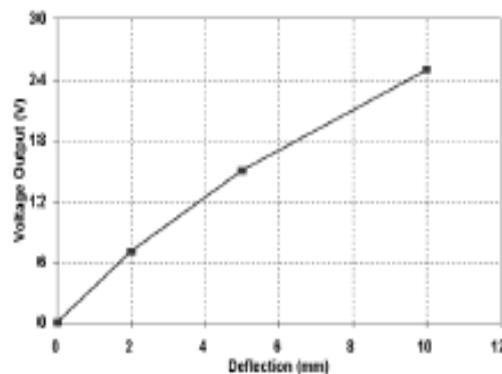
TABLE 1: LDT0 as Vibration Sensor (see Fig 1)

Added Mass	Baseline Sensitivity	Sensitivity at Resonance	Resonant Frequency	+3 Db Frequency
0	50 mV/g	1.4 V/g	180 Hz	90 Hz
1	200 mV/g	4 V/g	90 Hz	45 Hz
2	400 mV/g	8 V/g	60 Hz	30 Hz
3	800 mV/g	16 V/g	40 Hz	20 Hz

#### Experiment #2

**LDT0 as Flexible Switch** - using a charge amplifier to obtain "open-circuit" voltage sensitivity, the output was measured for controlled tip deflections applied to the sensor (supported by its crimped contacts as described above). 2 mm deflection was sufficient to generate about 7 V. Voltages above 70V could be generated by bending the tip of the sensor through 90° (see Table 2, Fig. 2).

LDT0: Voltage Output vs Tip deflection  
(Figure 2)



## LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

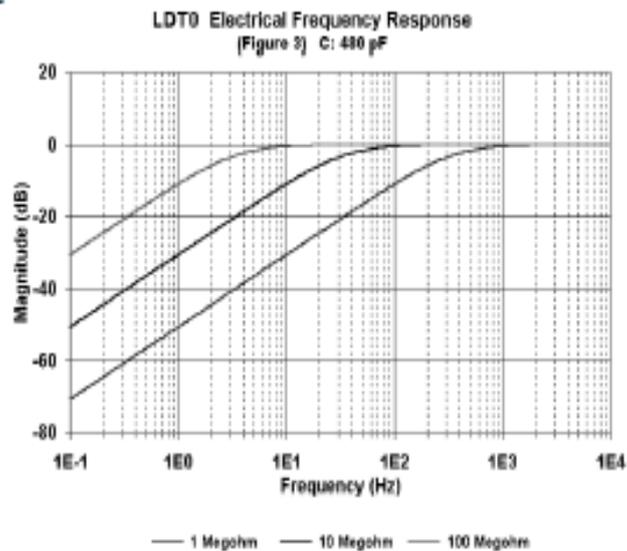
examples of Properties (continued)

**TABLE 2: LDT0 as Flexible Switch (see Fig 2)**

Tip Deflection	Charge Output	o/c Voltage Output
2 mm	3.4 nC	7 V
5 mm	7.2 nC	15 V
10 mm	10 - 12 nC	20 - 25 V
max (90E)	> 30 nC	> 70 V

### Experiment #3

**LDT0 Electrical Frequency Response -** when the source capacitance of around 480 pF is connected to a resistive input load, a high-pass filter characteristic results. Using an electronic noise source to generate broad-band signals, the effect of various load resistances was measured and the -3 dB point of the R-C filter determined (see Table 3, Fig. 3).



**TABLE 3: LDT0 Electrical Frequency Response**  
(see Fig 3)  
(480 pF source capacitance)

Load Resistance	-3 db Frequency
1 Megohm	330 Hz
10 Megohm	33 Hz
100 Megohm	3.3 Hz

# LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

## examples of properties

Four different experiments serve to illustrate the various properties of this simple but versatile component.

### Experiment #1

**LDT0 as Vibration Sensor** - with the crimped contacts pushed through a printed-circuit board, the LDT0 was soldered carefully in place to anchor the sensor. A charge amplifier was used to detect the output signal as vibration from a shaker table was applied (using a charge amplifier allows a very long measurement time constant and thus allows the "open-circuit" voltage response to be calculated). Small masses (approximately 0.26g increments) were then added to the tip of the sensor, and the measurement repeated. Results are shown in Table 1 and the overlaid plots in Fig. 1. Without adding mass, the LDT0 shows a resonance around 180 Hz. Adding mass to the tip reduces the resonance frequency and increases "baseline" sensitivity.

LDT0 Sensitivity: Effect of Added Mass  
(Figure 1)

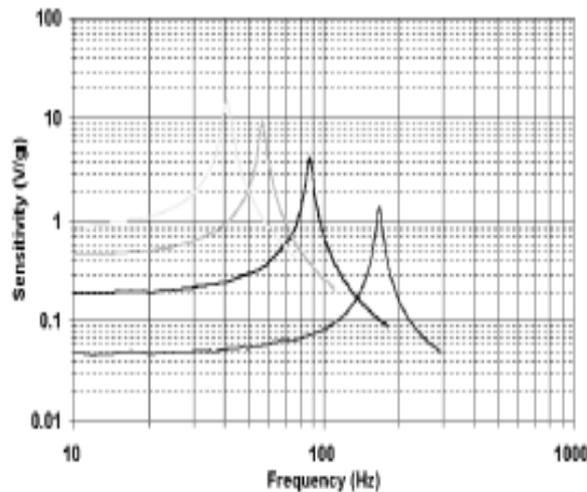


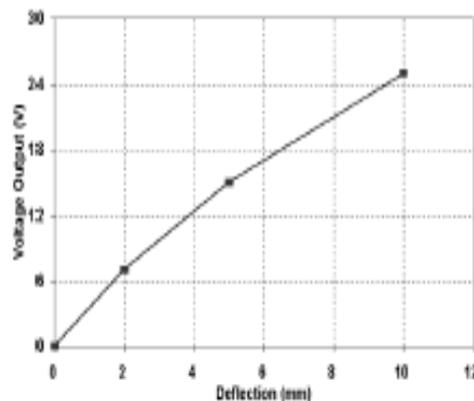
TABLE 1: LDT0 as Vibration Sensor (see Fig 1)

Added Mass	Baseline Sensitivity	Sensitivity at Resonance	Resonant Frequency	+3 Db Frequency
0	50 mV/g	1.4 V/g	180 Hz	90 Hz
1	200 mV/g	4 V/g	90 Hz	45 Hz
2	400 mV/g	8 V/g	60 Hz	30 Hz
3	800 mV/g	16 V/g	40 Hz	20 Hz

### Experiment #2

**LDT0 as Flexible Switch** - using a charge amplifier to obtain "open-circuit" voltage sensitivity, the output was measured for controlled tip deflections applied to the sensor (supported by its crimped contacts as described above). 2 mm deflection was sufficient to generate about 7 V. Voltages above 70V could be generated by bending the tip of the sensor through 90° (see Table 2, Fig. 2).

LDT0: Voltage Output vs Tip deflection  
(Figure 2)



## LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

### Experiment #4

**LDT0 Clamped at Different Lengths -** using simple clamping fixture, the vibration sensitivity was measured (as in (1) above) as the clamp was moved to allow different "free" lengths to vibrate. The sensor may be "tuned" to suit specific frequency response requirements (see Table 4, Fig. 4).

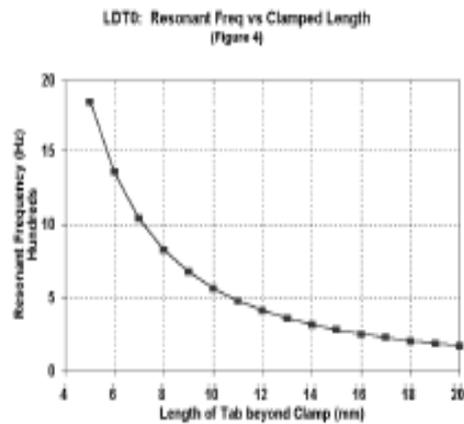


TABLE 4: LDT0 Clamped at Different Lengths (See Fig. 4)

Length Beyond Clamp	Resonant Frequency	Settling Time (5 cyc)
20 mm (no clamp)	180 Hz	28 msec
16 mm	250 Hz	20 msec
11 mm	500 Hz	10 msec
7 mm	1000 Hz	5 msec

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.

### ordering information

Description	Part Number
LDT0-028K	1002794-0
LDTM-028K	1005447-1

#### North America

Measurement Specialties, Inc.  
1000 Lucas Way  
Hampton, VA 23666  
Sales and Customer Service  
Tel: +1-800-745-8008 or  
+1-757-766-1500  
Fax: +1-757-766-4297  
Technical Support  
Email: piezo@meas-spec.com

#### Europe

MEAS Deutschland GmbH  
Hauerl 13  
44227 Dortmund  
Germany  
Sales and Customer Service  
Tel: +49 (0)231 9740 21  
Technical Support  
Tel: +49 (0)6074 862822  
Email: piezo@meas-spec.com

#### Asia

Measurement Specialties (China), Ltd.  
No. 26 Langshan Road  
Shenzhen High-Tech Park (North)  
Nanshan District  
Shenzhen, China 518107  
Sales and Customer Service  
Tel: +86 755 3330 5088  
Technical Support  
Email: piezo@meas-spec.com

## LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

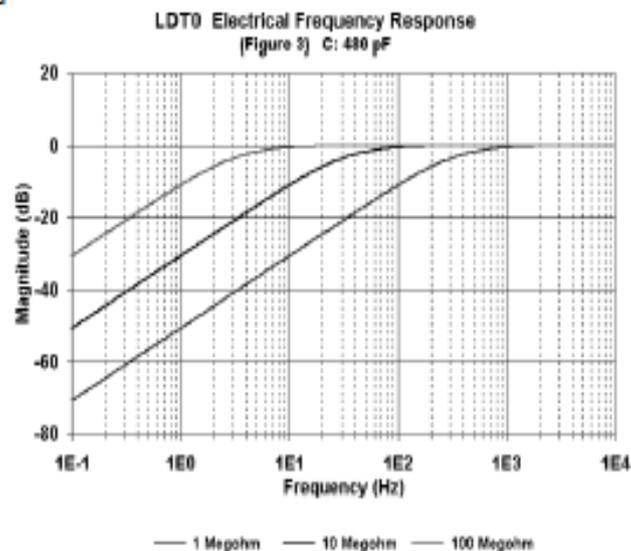
examples of Properties (continued)

**TABLE 2: LDT0 as Flexible Switch (see Fig 2)**

Tip Deflection	Charge Output	o/c Voltage Output
2 mm	3.4 nC	7 V
5 mm	7.2 nC	15 V
10 mm	10 - 12 nC	20 - 25 V
max (90E)	> 30 nC	> 70 V

### Experiment #3

**LDT0 Electrical Frequency Response -** when the source capacitance of around 480 pF is connected to a resistive input load, a high-pass filter characteristic results. Using an electronic noise source to generate broad-band signals, the effect of various load resistances was measured and the -3 dB point of the R-C filter determined (see Table 3, Fig. 3).



**TABLE 3: LDT0 Electrical Frequency Response**  
(see Fig 3)  
(480 pF source capacitance)

Load Resistance	-3 db Frequency
1 Megohm	330 Hz
10 Megohm	33 Hz
100 Megohm	3.3 Hz

## LDT with Crimps Vibration Sensor/Switch

### Experiment #4

**LDT0 Clamped at Different Lengths -** using simple clamping fixture, the vibration sensitivity was measured (as in (1) above) as the clamp was moved to allow different "free" lengths to vibrate. The sensor may be "tuned" to suit specific frequency response requirements (see Table 4, Fig. 4).

LDT0: Resonant Freq vs Clamped Length (Figure 4)

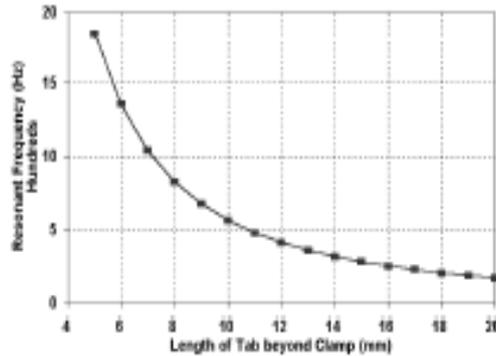


TABLE 4: LDT0 Clamped at Different Lengths (See Fig. 4)

Length Beyond Clamp	Resonant Frequency	Settling Time (5 cyc)
20 mm (no clamp)	180 Hz	28 msec
16 mm	250 Hz	20 msec
11 mm	500 Hz	10 msec
7 mm	1000 Hz	5 msec

The information in this sheet has been carefully reviewed and is believed to be accurate; however, no responsibility is assumed for inaccuracies. Furthermore, this information does not convey to the purchaser of such devices any license under the patent rights to the manufacturer. Measurement Specialties, Inc. reserves the right to make changes without further notice to any product herein. Measurement Specialties, Inc. makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its product for any particular purpose, nor does Measurement Specialties, Inc. assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. Typical parameters can and do vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by customer's technical experts. Measurement Specialties, Inc. does not convey any license under its patent rights nor the rights of others.

### ordering information

Description	Part Number
LDT0-028K	1002794-0
LDTM-028K	1005447-1

#### North America

Measurement Specialties, Inc.  
1000 Lucas Way  
Hampton, VA 23666  
Sales and Customer Service  
Tel: +1-800-745-8008 or  
+1-757-766-1500  
Fax: +1-757-766-4297  
Technical Support  
Email: plezo@meas-spec.com

#### Europe

MEAS Deutschland GmbH  
Hauert 13  
44227 Dortmund  
Germany  
Sales and Customer Service  
Tel: +49 (0)231 9740 21  
Technical Support  
Tel: +49 (0)6074 862822  
Email: piezoeurope@meas-spec.com

#### Asia

Measurement Specialties (China), Ltd.  
No. 26 Langshan Road  
Shenzhen High-Tech Park (North)  
Nanshan District  
Shenzhen, China 518107  
Sales and Customer Service  
Tel: +86 755 3330 5088  
Technical Support  
Email: plezo@meas-spec.com

Annexe 2 : Datasheet Arduino MEGA 2560



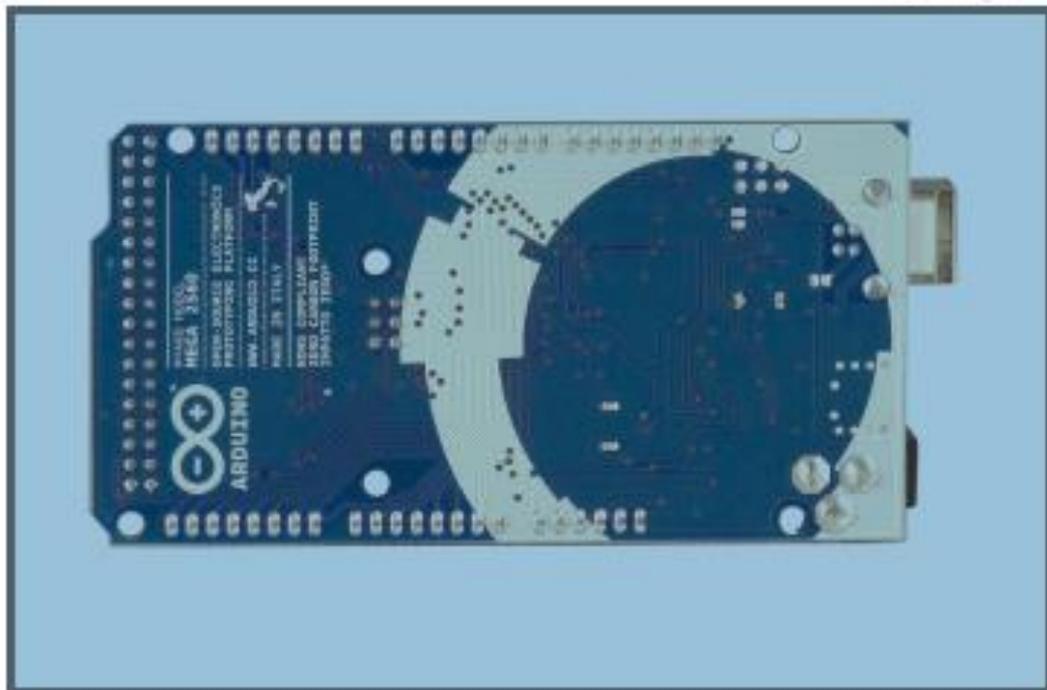
## Arduino Mega 2560 Datasheet



RobotShop

www.robotshop.com

La robotique à votre service! - Robotics at your service!

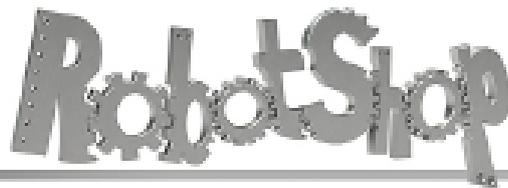


## Overview

The Arduino Mega 2560 is a microcontroller board based on the ATmega2560 ([datasheet](#)). It has 54 digital input/output pins (of which 14 can be used as PWM outputs), 16 analog inputs, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz crystal oscillator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started. The Mega is compatible with most shields designed for the Arduino Duemilanove or Diecimila.

## Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#)



www.robotshop.com

La robotique à votre service! - Robotics at your service!



Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

## Power

The Arduino Mega can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The Mega2560 differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega8U2 programmed as a USB-to-serial converter.



www.robotshop.com



La robotique à votre service! - Robotics at your service!

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** The regulated power supply used to power the microcontroller and other components on the board. This can come either from VIN via an on-board regulator, or be supplied by USB or another regulated 5V supply.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

## Memory

The ATmega2560 has 256 KB of flash memory for storing code (of which 8 KB is used for the bootloader), 8 KB of SRAM and 4 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 54 digital pins on the Mega can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) and 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) and 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) and 14 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. Pins 0 and 1 are also connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 (Interrupt 0), 3 (Interrupt 1), 18 (Interrupt 5), 19 (Interrupt 4), 20 (Interrupt 3), and 21 (Interrupt 2).** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 0 to 13.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.
- **SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#). The SPI pins are also broken out on the ICSP header, which is physically compatible with the Uno, Duemilanove and Diecimila.
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH

RobotShop

www.robotshop.com

La robotique à votre service! - Robotics at your service!



value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

- **I<sup>2</sup>C: 20 (SDA) and 21 (SCL).** Support I<sup>2</sup>C (TWI) communication using the [Wire library](#) (documentation on the Wiring website). Note that these pins are not in the same location as the I<sup>2</sup>C pins on the Duemilanove or Diecimila.

The Mega2560 has 16 analog inputs, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though it is possible to change the upper end of their range using the AREF pin and `analogReference()` function.

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with `analogReference()`.
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

## Communication

The Arduino Mega2560 has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega2560 provides four hardware UARTs for TTL (5V) serial communication. An ATmega8U2 on the board channels one of these over USB and provides a virtual com port to software on the computer (Windows machines will need a .inf file, but OSX and Linux machines will recognize the board as a COM port automatically). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the ATmega8U2 chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Mega2560's digital pins.

The ATmega2560 also supports I<sup>2</sup>C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a `Wire` library to simplify use of the I<sup>2</sup>C bus; see the [documentation on the Wiring website](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Mega can be programmed with the Arduino software ([download](#)). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega2560 on the Arduino Mega comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It



www.robotshop.com

La robotique à votre service! - Robotics at your service!



communicates using the original STK500 protocol ([reference](#), [C header files](#)). You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

## Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Mega2560 is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2 is connected to the reset line of the ATmega2560 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Mega2560 is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Mega2560. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Mega2560 contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

## USB Overcurrent Protection

The Arduino Mega2560 has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

## Physical Characteristics and Shield Compatibility

**RobotShop**

[www.robotshop.com](http://www.robotshop.com)

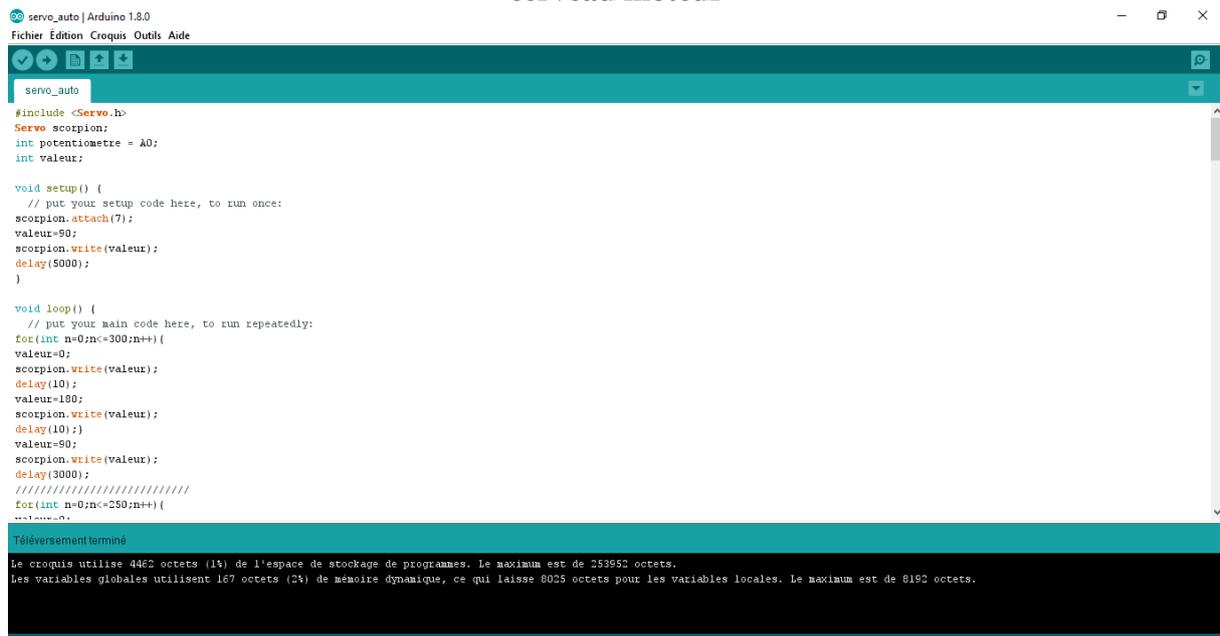


**La robotique à votre service! - Robotics at your service!**

The maximum length and width of the Mega2560 PCB are 4 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Three screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

The Mega2560 is designed to be compatible with most shields designed for the Uno, Diecimila or Duemilanove. Digital pins 0 to 13 (and the adjacent AREF and GND pins), analog inputs 0 to 5, the power header, and ICSP header are all in equivalent locations. Further the main UART (serial port) is located on the same pins (0 and 1), as are external interrupts 0 and 1 (pins 2 and 3 respectively). SPI is available through the ICSP header on both the Mega2560 and Duemilanove / Diecimila. *Please note that I2C is not located on the same pins on the Mega (20 and 21) as the Duemilanove / Diecimila (analog inputs 4 and 5).*

### Annexe 3 : Programmation de la carte Arduino pour le balayage en fréquence du cerveau moteur



```
servo_auto | Arduino 1.8.0
Fichier Edition Croquis Outils Aide

servo_auto
#include <Servo.h>
Servo scorpion;
int potentiometre = A0;
int valeur;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  scorpion.attach(7);
  valeur=90;
  scorpion.write(valeur);
  delay(5000);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  for(int n=0;n<=300;n++){
    valeur=0;
    scorpion.write(valeur);
    delay(10);
    valeur=180;
    scorpion.write(valeur);
    delay(10);
    valeur=90;
    scorpion.write(valeur);
    delay(3000);
    //////////////////////////////////////
    for(int n=0;n<=250;n++){
      valeur=0;
      scorpion.write(valeur);
      delay(10);
      valeur=180;
      scorpion.write(valeur);
      delay(10);
      valeur=90;
      scorpion.write(valeur);
      delay(3000);
    }
  }
}

Traversement terminé
Le croquis utilise 4462 octets (1%) de l'espace de stockage de programmes. Le maximum est de 253952 octets.
Les variables globales utilisent 167 octets (2%) de mémoire dynamique, ce qui laisse 8025 octets pour les variables locales. Le maximum est de 8192 octets.
```

```
#include<Servo.h>
```

```
Servo scorpion;
```

```
intpotentiometre = A0;
```

```
int valeur;
```

```
voidsetup() {
```

```
  // putyour setup code here, to run once:
```

```
scorpion.attach(7);
```

```
valeur=90;
```

```
scorpion.write(valeur);
```

```
delay(5000);
```

```
}
```

```
voidloop() {
```

```
  // putyour main code here, to runrepeatedly:
```

```
for(int n=0;n<=300;n++){
```

```
  valeur=0;
```

```
  scorpion.write(valeur);
```

```
  delay(10);
```

```
  valeur=180;
```

```
  scorpion.write(valeur);
```

```
  delay(10);}
```

```
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=250;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(12);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(12);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=214;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(14);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(14);}
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=187;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(16);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(16);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=150;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(20);
valeur=180;
```

```
scorpion.write(valeur);
delay(20);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=136;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(22);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(22);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=120;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(25);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(25);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=107;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(28);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(28);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=90;n++){
```

```
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(33);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(33);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=75;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(40);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(40);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=60;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(50);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(50);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=42;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(71);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(71);}
valeur=90;
```

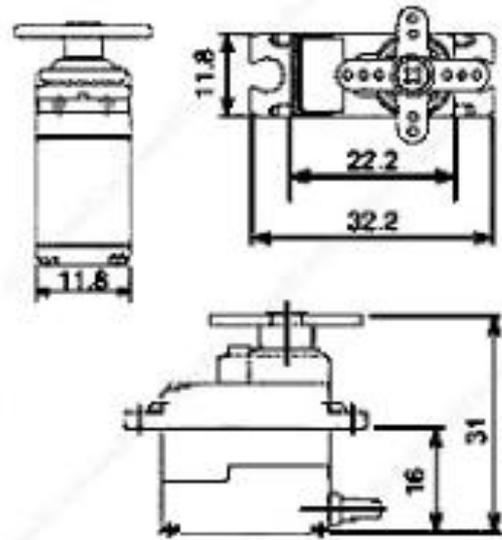
```
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=36;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(83);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(83);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=30;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(100);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(100);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=24;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(125);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(125);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=18;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(166);
```

```
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(166);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=15;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(200);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(200);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=12;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(250);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(250);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
for(int n=0;n<=9;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(333);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(333);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////
```

```
for(int n=0;n<=6;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(500);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(500);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////
for(int n=0;n<=3;n++){
valeur=0;
scorpion.write(valeur);
delay(1000);
valeur=180;
scorpion.write(valeur);
delay(1000);}
valeur=90;
scorpion.write(valeur);
delay(3000);
////////////////////////////////}
```

Annexe 4 : Datasheet cerveau moteur s90

## SG90 9 g Micro Servo

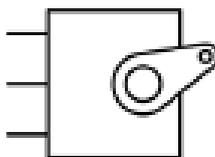
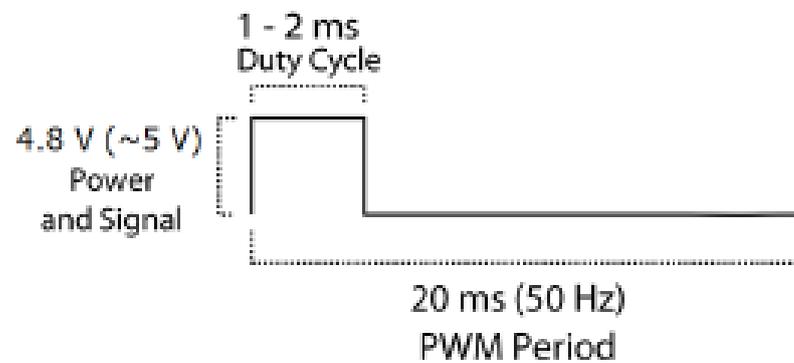


Tiny and lightweight with high output power. Servo can rotate approximately 180 degrees (90 in each direction), and works just like the standard kinds but *smaller*. You can use any servo code, hardware or library to control these servos. Good for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. It comes with a 3 horns (arms) and hardware.

### Specifications

- Weight: 9 g
- Dimension: 22.2 x 11.8 x 31 mm approx.
- Stall torque: 1.8 kgf-cm
- Operating speed: 0.1 s/60 degree
- Operating voltage: 4.8 V (~5V)
- Dead band width: 10  $\mu$ s
- Temperature range: 0  $^{\circ}$ C – 55  $^{\circ}$ C

PWM = Orange (  )  
Vcc = Red ( + )  
Ground = Brown ( - )

A schematic diagram of a micro-robot. It consists of a rectangular body with three horizontal lines extending from the left side, representing electrical connections. On the right side, there is a circular component with a small protrusion, likely representing a wheel or a sensor.

Position "0" (1.5 ms pulse) is middle, "90" (~2 ms pulse) is all the way to the right, "-90" (~1 ms pulse) is all the way to the left.

## Résumé

استعادة الفن من لحالة وصفا اقترح وهكذا . الحالي العلمي السياق في عرضت التي الأعمال وضع من هو الأول الجزء هذا من آخر هدف وبالمثل . المحيطة الطاقة من مختلفة مصادر مناقشته سيتم كما ذلك، إلى وبالإضافة . الصلة ذات الطاقة الأخير الأثر على نحن . والضغطية الساكنة، الكهرباء الكهرومغناطيسية، وهي الكهربائية التحويل مبادئ تقديم هو الجزء . الكهرباء لتوليد الصغيرة شعاع شكل في الدراسة من تحديده تم الذي منخفضة الكهربائية الطاقة لتقديم شعاع الجزئي الانتعاش جهاز من الاهتزازات ونمذجة تصميم إلى ننقل ثم . الطاقة استهلاك انخفاض تتطلب الطاقة لأنظمة المحيطة الطاقة من للتعافي نسعى ونحن مشروعنا، في مولدات لتطوير المرشحين أفضل هي الخاصة، الفيزيائية الخصائص مع المرنة والمواد للبوليمرات، اختارت قمنا لذلك النوع هذا نموذج نحاول PVDF أساس على التجارية الطاقة من متعافي هيكل نستخدم سوف وهنا نتوسع، البوليمرات هذه استخدام . وتنوعا مرونة . إمكاناتها من القصوى الاستفادة تحقيق أجل من التجريبية القياسات مع للمقارنة المجهرية من

La 1er partie est de situer le travail présenté dans le contexte scientifique actuel. Une description de l'état de l'art en matière de récupération d'énergie est ainsi proposée. De plus, il sera également abordé les différentes sources d'énergie ambiante. De même l'autre objectif de cette partie est de présenter les principes de conversion électromécanique à savoir l'électromagnétisme, l'électrostatique, et la piézoélectricité. Nous étalerons sur ce dernier effet, lequel est choisi dans notre étude dans une forme de micro-poutre pour la génération de l'électricité. Après on passera à la conception et la modélisation du dispositif de récupération des vibrations d'une micro poutre pour délivrer une faible puissance électrique Dans notre projet, nous cherchons à récupérer de l'énergie ambiante pour faire fonctionner des systèmes nécessitant une faible consommation. Ainsi, nous a avons optée aux polymères, matériaux souples possédant des propriétés physiques particulières, sont les meilleurs candidats pour développer des générateurs flexibles et souples. L'utilisation de ces polymères est en pleine expansion, ici nous utiliserons une structure récupératrice d'énergie commerciale à base de PVDF nous essayons de modéliser ce type de microstructures pour les comparer aux mesures expérimentales afin d'en exploiter au maximum leurs potentiels.

The first part is to situate the work presented in the current scientific context. A description of the state of the art in terms of energy recovery is thus proposed. In addition, the different sources of ambient energy will be discussed. Similarly, the other objective of this section is to present the principles of electromechanical conversion, namely electromagnetism, electrostatics, and piezoelectricity. We will show on this last effect, which is chosen in our study in a form of micro-beam for the generation of electricity. Afterwards we will go into the design and modeling of the vibration recovery device of a microbeam to deliver a low power In our project, we seek to recover ambient energy to operate systems requiring low consumption.

Thus, we have opted for polymers, flexible materials possessing particular physical properties, are the best candidates to develop flexible and flexible generators. The use of these polymers is in full expansion, here we will use a PVDF-based commercial energy recovery structure we try to model this type of microstructures to compare them with experimental measurements in order to exploit their potential to the maximum.