

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 سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique

Spécialité Microelectronique, Microsysteme et Conception de Circuits

présenté par

ABDELANI Athmane

Etude et simulation d'une structure Autonome piézoélectrique fournissant de l'énergie.

Proposé par : *A. Bounemri*

Année Universitaire 2016-2017

ملخص: قمنا بهذا العمل اعتمادا على طريقة التحليل بالعناصر النهائية, وتم اقتراح في هذا العمل مجسم نظري للأعمدة الكهربائية مستخدمين الضغط الكهربائي. هذا المجسم يقوم على اختيار المواد المستخدمة و بنية المجسم الخارجية . الأبحاث اعتمدت على الأعمدة الكهربائية و استخدام مادة السيليكون في قاعدة بنيته. النتائج النهائية تبين أن النظام المستخدم يولد ما يعرف بالذبذبات الضعيفة. العمودان الكهربائيان ليس لهما نفس الابعاد على مستوى المجسم و هذه التجربة تبين أنهما يعملان كمولد للذبذبات الضعيفة.

كلمات المفاتيح: تجديد الطاقة, الملتقطات, الضغط الكهربائي, مجسمات ميكرو, الذبذبات الميكانيكية

Résumé une simulation basée sur la méthode des éléments fini a été mené, et un model analytique de microcantilever, en utilisant l'excitation piézoélectrique, est proposé. Le model est basé sur la sélections des matériaux et la structure géométrique. Les recherches ont été menées avec des microcantilever et l'utilisation de silicon comme substrat. L'analyse des résultats montrent que le système proposé est capable de générer des signaux basse fréquence. Deux microcantilever de différentes dimensions ont été utilisés, les résultats de cette expérience montrent que les deux poutre microcantilever fonctionnent comme un générateur de basse fréquence.

Mots clés : récolte d'énergie, capteur sans fil, piézoélectrique, microstructure, vibrations mécanique.

Abstract finite element method (FEM) based simulation has been carried out and an analytic model of micro cantilever using piezoelectric excitations are proposed. The model is based on the type of the selected material and geometry of the structure. The investigations are carried out with rectangular micro cantilever using silicon as the substrate. The analysis of the results showed that the proposed system is capable of generating a low frequency signal. Two micro cantilevers with different dimensional aspects are used, and the results verified the application of micro cantilever array as a low frequency signal generator.

Keywords : Energy harvesting, wireless sensor network, piezoelectric, micro-device, mechanical vibrations.

Remerciements

D'abord , tout ce que j'ai comme bienfait provient d'Allah .

Deuxièmement je remercie mon promoteur Monsieur A .Bounemride m'avoir donné le privilège de travailler avec lui sur un sujet scientifique.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance aux responsables de la spécialité MMCC et à ceux qui ont, directement ou non, participé à ma carrière universitaire.

Enfin, mes PARENTS méritent plus qu'un merci.

Dédicace

À mes très chers parents

*Pour tous leurs sacrifices qu'ils ont consentis pour me
permettre de suivre mes études dans les meilleures
conditions possibles. J'espère qu'ils trouvent dans ce travail
toute ma reconnaissance et tout mon amour.*

*À mes frères, mes sœurs, je leurs souhaite une belle vie pleine
de joie et d'amour.*

*À mes chères amies Aboubakr, Amine , Medjdi , pour leurs
soutiens dans les moments difficiles et à tous mes autres
amis sans exception.*

Listes des acronymes et abréviations

m : La masse de la poutre.

c : constante d'amortissement.

k : La constante de raideur.

x : Le déplacement.

dx/dt : La vitesse.

d^2x/d^2t : L'accélération.

$f(t)$: La fonction de la force.

ρ : La densité de matériau.

L : La longueur de cantilever.

α_i : L'angle de déflexion.

w et t : La largeur et l'épaisseur d'un cantilever respectivement.

F : Est la force perpendiculaire appliquée sur le cantilever.

E : Module d'élasticité.

R : Rayon de courbure.

$\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$: Contrainte mécanique exercée sur les deux faces de micro cantiléver.

ε : Permittivité diélectrique à contrainte constante.

S^E : La rigidité élastique à champ constant

\mathbf{E}' : Le vecteur du champ électrique

η : Permittivité électrique

\mathbf{D} : Le vecteur de déplacement électrique

\mathbf{d}_t : L'effet piézoélectrique inverse

σ : Vecteur contrainte.

ν : Coefficient de poisson.

\mathbf{d} : Tenseur piézoélectrique.

η : Permittivité électrique.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 Etat de l'art

Introduction générale.....	1
1.1 Introduction.....	3
1.2 Les microsystemes.....	3
1.2.1 le marché MEMS.....	5
1.2.2 les microstructures.....	6
1.3 Les Capteurs	8
1.3.1 Les capteurs sans fil.....	9
1.4 La récolte d'énergie.....	10
1.4.1 Les types d'applications.....	10
1.4.2 Quand est-elle utile ?.....	11
1.5 Les vibrations.....	12
1.5.1 Les vibrations mécaniques.....	12
1.6 La Piézoélectricité.....	13
1.6.1 L'application de la piézoélectricité.....	14
1.6.2 Tableau d'application.....	14
1.6.3 Lead Zirconate Titanate.....	15
1.7 Les cantilévers.....	16
1.8 Conclusion.....	17
Chapitre2 Analyse mathématique.....	17
2.1 Introduction.....	18

2.2 La structure vibratoire.....	19
2.3 Analyse mathématique.....	20
2.4 Etape permettant l'élaboration de la structure.....	23
2.4.1 Le substrat.....	23
2.4.2 Le matériau piézoélectrique.....	24
2.4.3 Les micros cantilevers.....	25
2.5 Les méthodes de résolution de problème.....	26
2.5.1 Les équations de compatibilité.....	26
2.6 La piézoélectricité.....	27
2.7 Milieu isotrope.....	28
2.8 Milieu anisotrope.....	29
2.9 Conclusion.....	30
Chapitre 3 Résultat et discussion.....	31
3.1 Introduction.....	31
3.2 Etude de la structure vibratoire.....	31
3.2.1 Décomposition en élément finis.....	31
3.2.2 Simulation de la structure.....	33
a) Mode indésirable.....	33
b) Mode désirable.....	35
3.2.3 Phénomène électrique.....	38
3.3 Conclusion.....	39

Liste des figures

<i>Figure 1.1 : Visualisation de l'échelle d'un MEMS.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 1.2 : Champ d'application des MEMS.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1.3: micro capteur pour peser une cellule.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 1.4 : Capteur de pression.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 1.5 : le marché MEMS 2012-2018 selon Yole Development [Yole 2013]..</i>	<i>6</i>
<i>Figure 1.6 : batteries classique.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 1.7 : batterie à base microstructure.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 1.8 : principe de capteur.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 1.9 : domaine de capteur.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 1.10 : capteurs sans fil.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 1.11 : les sources de l'énergie.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 1.12 : Radio-isotope.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 1.13 : contrôle autonome.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 1.14 : l'effet piézoélectrique.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure 1.15 : Micro cantilever PZT.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1.16 : le fléchissement.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1.17 : la déformation.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 2.1 : structure vibratoire à deux micro-cantilevers.....</i>	<i>19</i>

<i>Figure2.2 : déflexion statique.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure2.3 : substrat.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure2.4 : matériaux piézoélectriques.....</i>	<i>24.</i>
<i>Figure2.5 : micro cantiléver.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure3.1 : maillage1.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure3.2 : maillage2.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure3.3 : mode1 indésirable.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure3.4 : mode2 indésirable.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure3.5 : mode3 indésirable.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure3.6 : mode1 désirable.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure3.7 : mode2 désirable.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure3.8 : mode3 désirable.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure3.9 : mode4 désirable.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure3.10 : comportement de la structure en mode réel.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure3.11: potentiel électrique.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure3.12 : représentation du flux et de la direction du courant dans la structure...39.</i>	

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Les applications de la piézoélectricité.....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 2.1 : Matériau et dimension de substrat.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 2.2 : Propriétés de matériau silicium.....</i>	<i>23.</i>
<i>Tableau 2.3 : dimension du matériau piézoélectrique.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau 2.4 : Propriétés de matériau piézoélectrique.....</i>	<i>24.</i>
<i>Tableau 2.5 : Matériau et dimension de micro cantilever.....</i>	<i>25.</i>
<i>Tableau 2.6 : Propriétés de matériau (aluminium).....</i>	<i>25.</i>
<i>Tableau3.1 : Mode des vibrations indésirables.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau3.2 : Mode des vibrations désirables.....</i>	<i>37</i>

Chapitre 1

Introduction générale

L'être humain cherche toujours d'améliorer sa vie dans tous les niveaux pour la rendre facile d'une part et d'autre part pour la sécuriser et garantir le futur des générations qui succéderont, certainement, cette idée est devenue un principe de vie après les grandes inventions des trois derniers siècles.

L'énergie est un domaine extrêmement important si on ne dit pas qu'il est devenu la plateforme de nos jours parce que ce qu'il occupe pratiquement toutes les filières (médecine, astronomie, électronique, sport...etc.) par conséquent l'énergie se trouve sous différentes formes (solaire, cinétique, statique, vibrations....etc.), en utilisant plusieurs techniques comme les panneaux solaires, les capteurs, l'effet piézoélectrique et ainsi de suite pour se bénéficier de ces sources le maximum possible.

En 1880 les deux jeunes frères Pierre et Jacques Curie à la faculté des sciences de Paris étaient derrière la découverte de la piézoélectricité, le phénomène qui a prouvé sa valeur et sa fiabilité avec le temps, comme en 1900 quand Pierre et Marie Curie l'utiliseront pour mesurer la radioactivité de sels d'uranium. Peu de temps après dans les années vingt avec le premier oscillateur à quartz grâce à Walter Cady, ouvrant ainsi la voie au contrôle de fréquence.

Ce travail consiste à faire une étude sur une structure autonome piézoélectrique fournissant de l'énergie.

L'étude présentée dans ce mémoire est répartie en trois chapitres

- Le premier chapitre est consacré aux notions fondamentales des microsystèmes et des généralités sur les capteurs et les vibrations mécaniques.

- Le deuxième chapitre présente l'analyse mathématique de la structure utilisée pour mener notre expérience.
- Le troisième chapitre présente les résultats de la simulation faite sous logiciel Comsol4.3

Chapitre1 : Etat de l'art

1.1 Introduction

On va approcher dans ce chapitre les différentes notions des microstructures et précisément les vibrations, en utilisant le phénomène piézoélectrique et donner une image sur le comportement d'une structure de ce genre (structure vibratoire).

1.2 Les Microsystèmes

Micro-électro-mécanique-systèmes ou MEMS c'est l'acronyme désignant la miniaturisation des éléments mécanique et électromécanique par la technique de la micro fabrication. Ils exploitent pour leur fonctionnement les effets physique. Ils sont dans notre quotidien, leur taille (figure1.1) est de l'ordre du millimètre carré [1].



Figure1.1 Visualisation de l'échelle d'un MEMS.

Les composants MEMS peuvent être des structures simples ou des structures extrêmement compliquer selon l'usage afin d'offrir :

- Une augmentation dans la capacité de l'information.
- Une amélioration de la fonctionnalité et l'autonomie des systèmes

Les MEMS possèdent un vaste champ d'application exposé selon la figure 1.2 dans un cadre général et selon la figure et la figure pour des cas spécifiques.

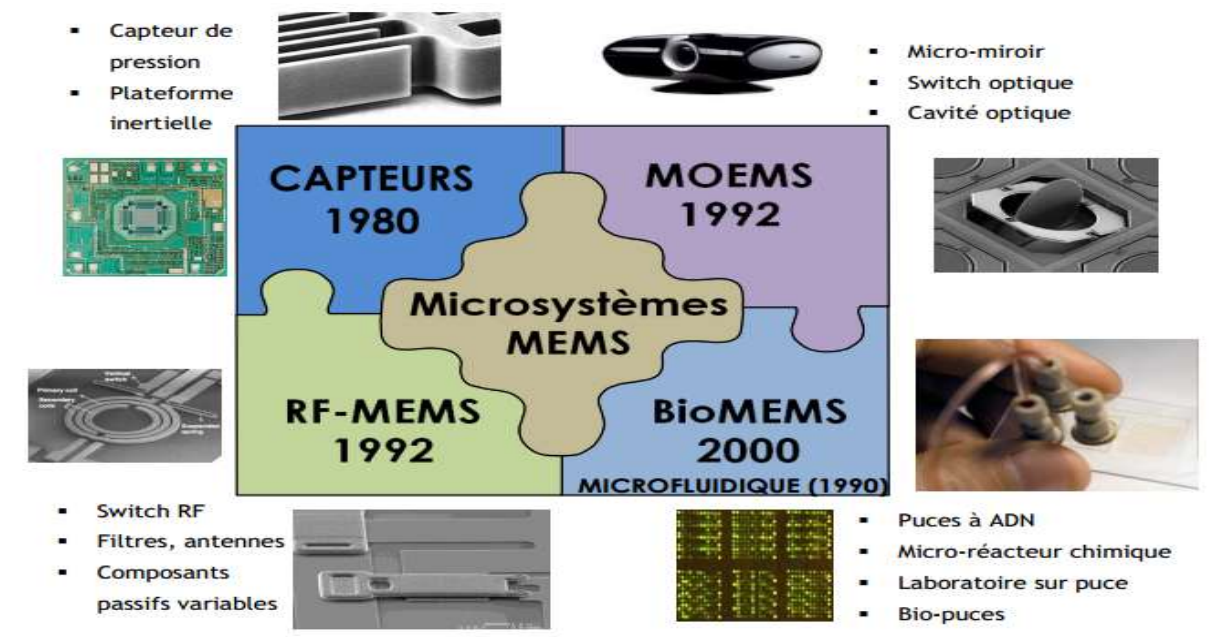


Figure 1.2 : Champ d'application des MEMS

Dans le cas spécifique de la figure 1.3 le fonctionnement de cette structure est basé sur la pression exercée par les cellules qui se déposent sur cette structure

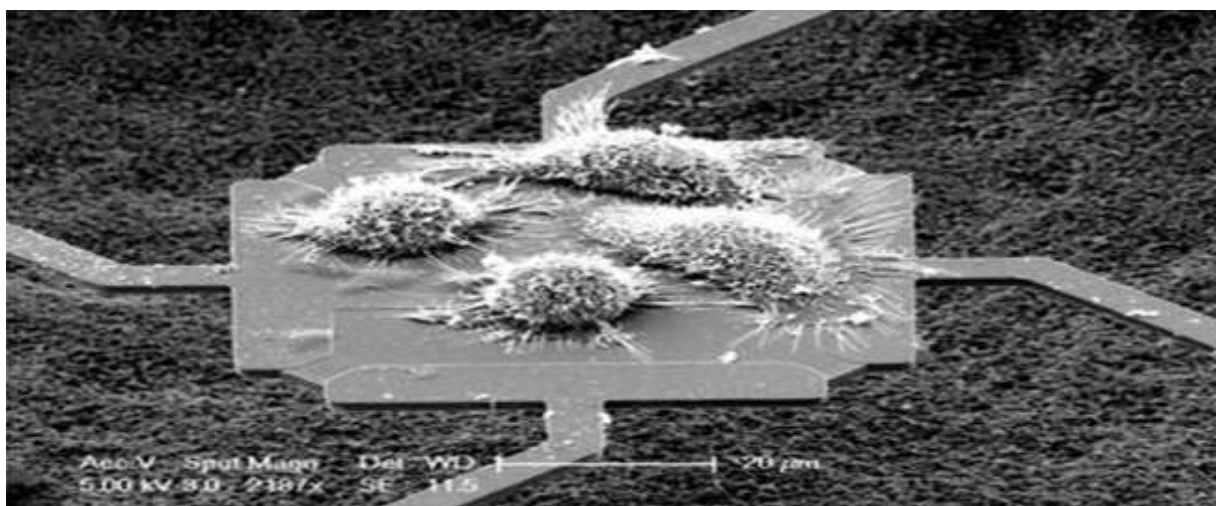


Figure 1.3: micro capteur pour peser une cellule [20]

Dans le cas spécifique de la figure1.4 le capteur de pression est basé sur l'effet capacitif .

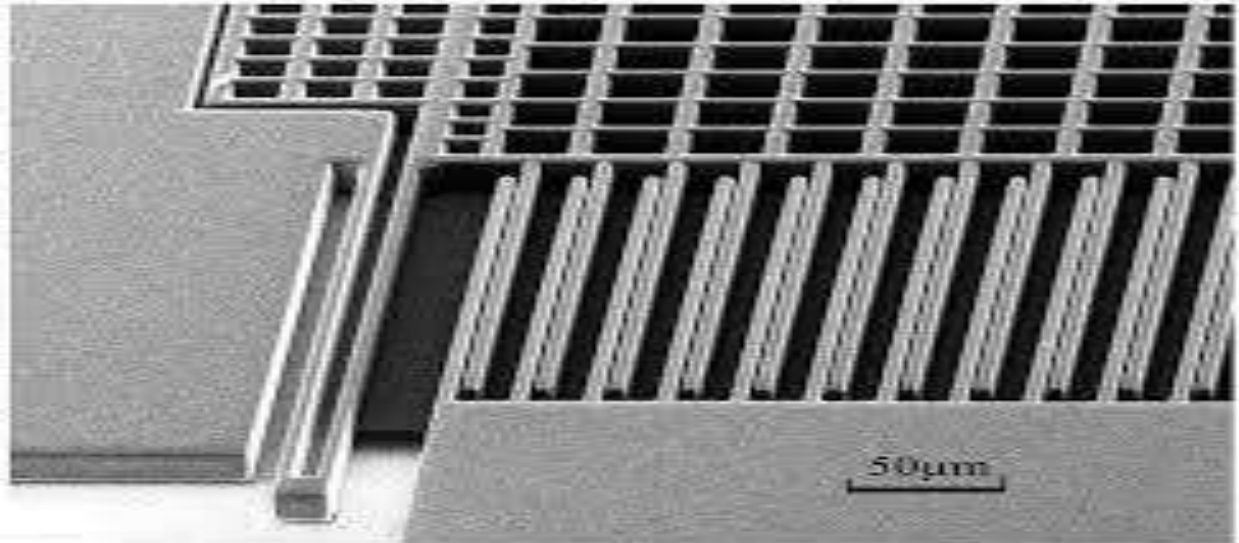


Figure1.4 : Capteur de pression.

1.2.1 Le marché MEMS

Selon Yole développement, le marché MEMS mondial représentait 7 milliards de dollars en 2007 [Yole 2008] et 11 milliards de dollars en 2012. A titre de comparaison, cette somme correspond au budget national de la recherche d'un pays comme la France. Cette croissance devrait encore s'accroître dans les années à venir, avec une hausse prévisionnelle de 100 % entre 2012 et 2018, comme présenté sur la figure4 [2].

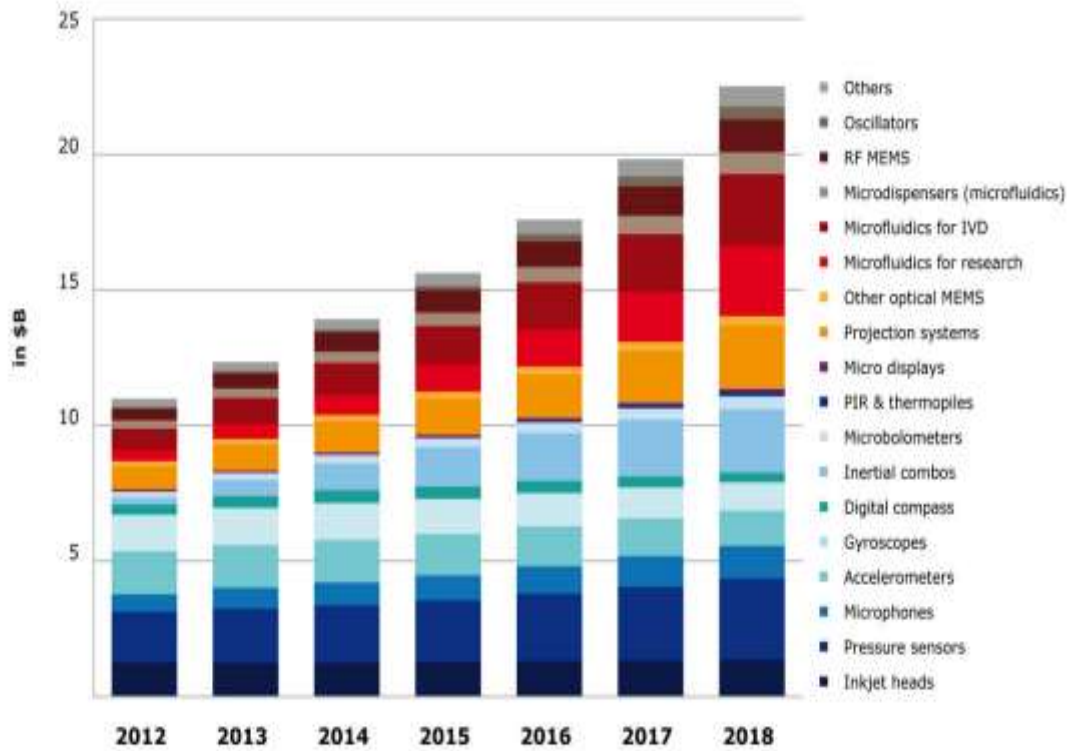


Figure 1.5 : le marché MEMS 2012-2018 selon Yole Development [Yole 2013] [2]

1.2.2 Microstructure

Certaines microstructures convertissent l'énergie ambiante (la récolte d'énergie) vers l'énergie électrique et c'est la raison pour laquelle la communauté académique [3] et industrielle sont intéressées par ce domaine; Avec cette nouvelle technologie de la récolte d'énergie on peut remarquablement réduire l'usage des batteries classique figure1.6 et figure1.7.



Figure1.6 : batteries classique.

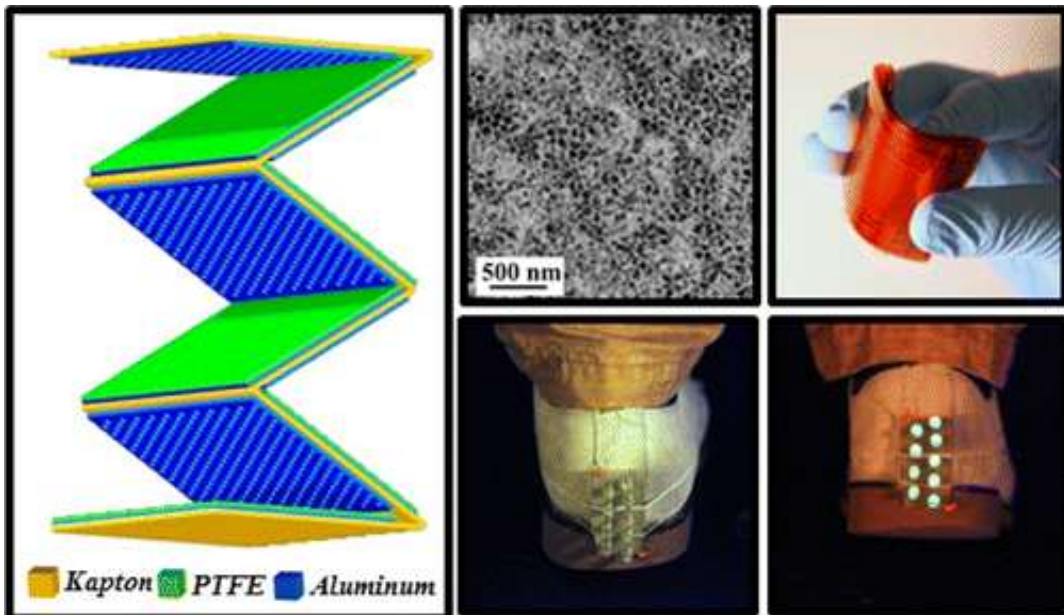


Figure 1.7 : batterie à base microstructure.

1.3 Les Capteurs

Le capteur peut détecter une grandeur physique comme le changement de température pression, vitesse etc. et la transformé en une grandeur normée, généralement électrique (figure1.8).

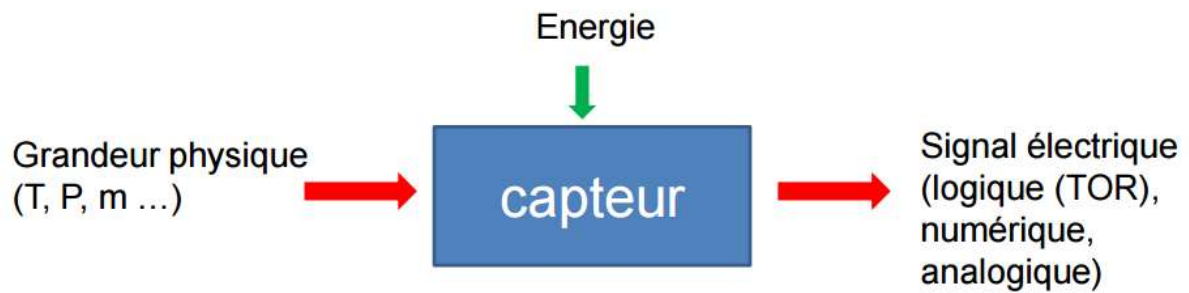


Figure1.8 : principe de capteur.

Le principe de fonctionnement des capteurs à base de micro cantilever est de convertir l'énergie mécanique qui se produit à cause de la déformation et la déflexion au niveau de composant en énergie voulu (figure1.9) [4].

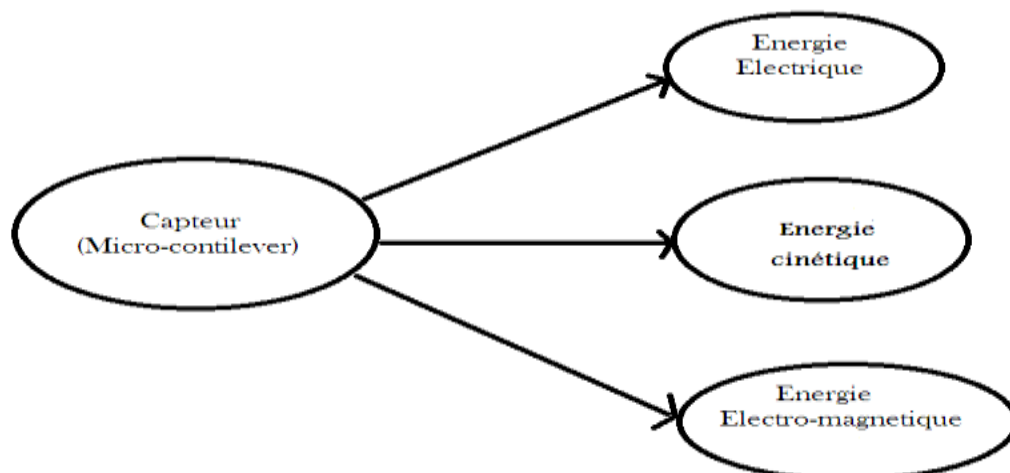


Figure1.9 : domaine de capteur.

1.3.1 Les capteurs sans fil

Les capteurs sans fil (figure 1.10) sont constitués de centaines et de milliers de nœuds localisés un peu partout, qui ont besoin de changement de batterie et de maintenance d'une façon permanente, et ce n'est pas très approprié pour les utilisateurs. Donc pour résoudre ce problème une grande importance est donnée au piézoélectrique car il peut produire une énergie suffisante pour les microstructures avec différents intervalles de fréquence, alors plusieurs chercheurs ingénieurs ont focalisé leur attention à améliorer et développer les paramètres et les microstructures qui nous permettent d'atteindre cet objectif. [3]

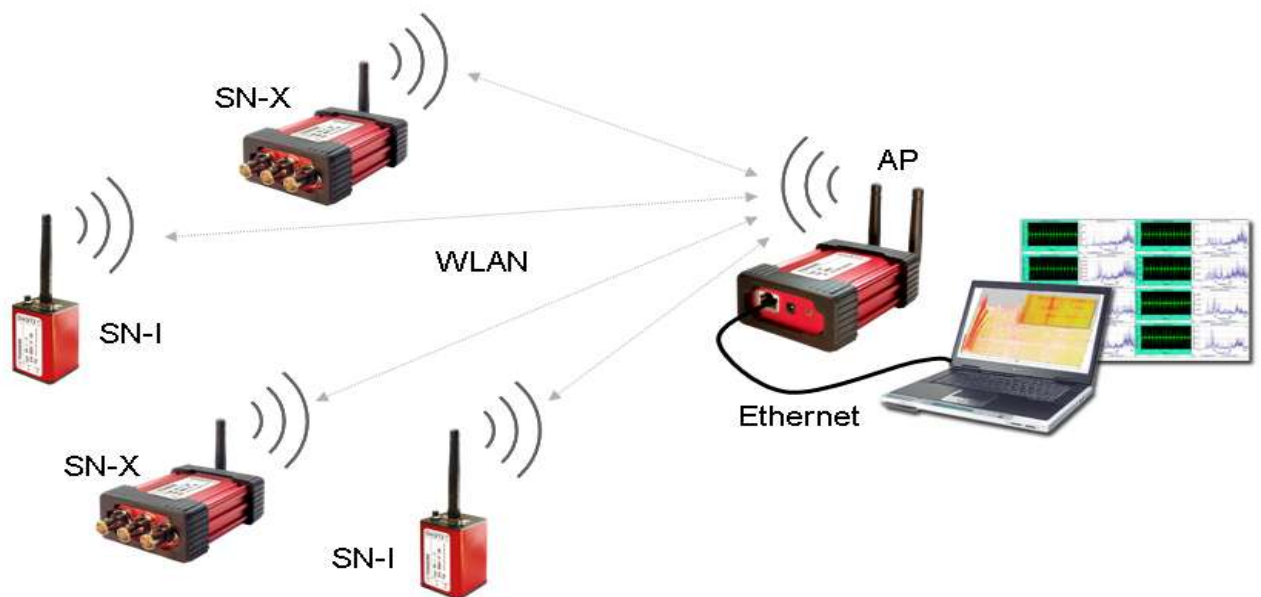


Figure 1.10 : capteurs sans fil

1.4 La récolte d'énergie

La récolte d'énergie est un processus (figure1.11) par lequel l'énergie ambiante est capturée et convertie en électricité pour les petits dispositifs autonomes, tels que les satellites, les ordinateurs portables et les nœuds des réseaux de capteurs afin de les rendre autosuffisants. Les sources telles que l'éclairage, les gradients de température, les vibrations et les ondes radio (énergie RF) peuvent être réutilisées sur des dispositifs électroniques à faible puissance [5].

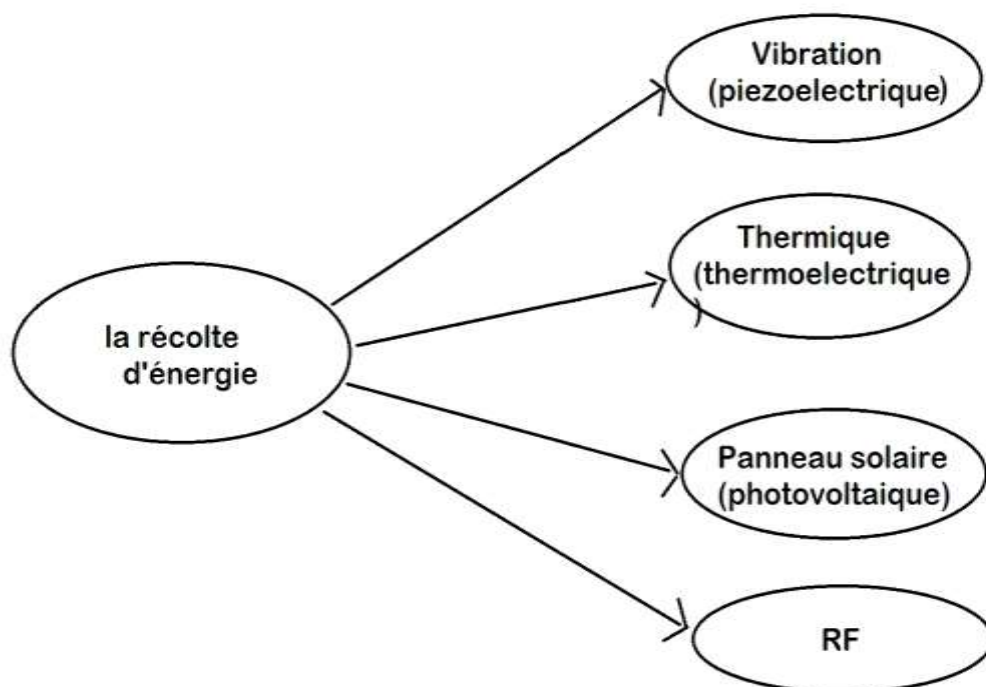


Figure1.11 : les sources de l'énergie

1.4.1 Types d'applications

- Capteur sans fil
- Ordinateur portable, livres électronique
- Militaire et aérospatiales excluant WSN
- Autres recherches, animaux, agriculture etc. [5]

1.4.2 Quand est-elle utile ?

- Lorsque l'alimentation secteur n'est pas disponible ou coûteuse
- Lorsque les batteries sont coûteuses ou difficiles à remplacer
- Lorsque l'énergie est nécessaire uniquement en présence d'énergie ambiante [5].

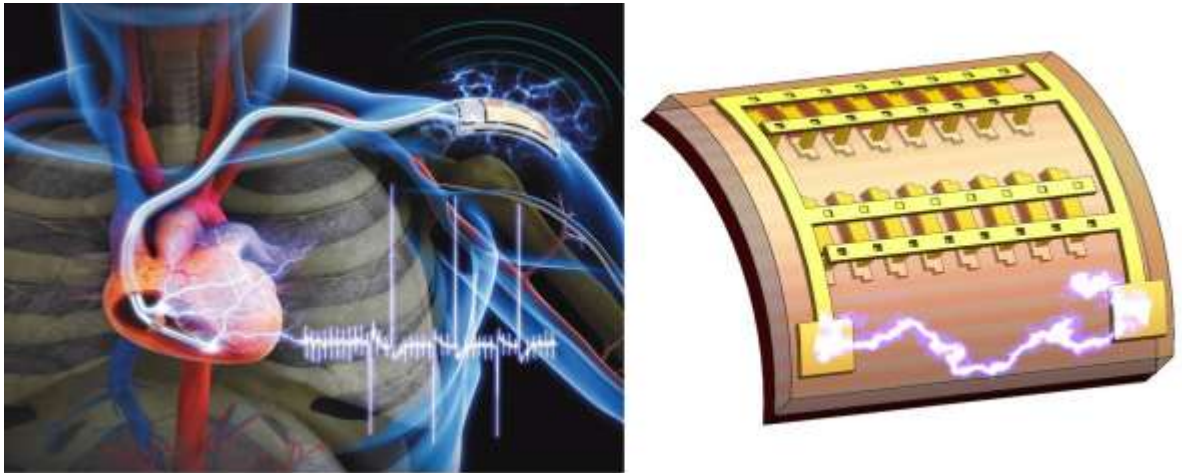


Figure 1.12 : Radio-isotope



Figure 1.13 : contrôle autonome

1.5 Les vibrations

Une vibration est le mouvement d'un système mécanique qui reste voisin d'un état de repos.

Un tel mouvement peut :

- soit être provoqué par une excitation : on parle alors de vibration forcée.
- soit être le résultat d'une action imposée à un instant donné telle que déplacer le système de sa position de repos, ou lui imposer une impulsion initiale : on parle alors d'oscillations libres. [8]

1.5.1 Les vibrations mécaniques

Les vibrations mécaniques peuvent être converties en énergie électrique par les mécanismes de transduction:

- électromagnétique.
- Electrostatique.
- l'effet piézo-électrique (notre étude).

Les vibrations à effet piézo-électrique ont gagné une très grande popularité grâce à l'application facile en utilisant sa simple structure électromécanique en comparissant avec d'autres mécanismes.

1.6 Piézo-électrique

La piézoélectricité est un phénomène de couplage électro-élastique linéaire qui conduit certains matériaux à produire une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique, dans ce cas on parle d'effet piézoélectrique direct. Cet effet est utilisé en générale dans les capteurs d'effort, de pression ou d'accélération. Inversement, si une différence de potentiel est appliquée entre deux faces opposées du matériau, le champ électrique ainsi créé engendre des contraintes mécaniques qui déforment le matériau ou génèrent une force selon que le matériau est encastré ou non, il s'agit de l'effet piézoélectrique dit inverse (figure 1.10).

Ce phénomène est dû à la structure cristalline du matériau. Lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée, un dipôle électrique apparaît dans chaque maille cristalline du matériau par déplacement des centres des charges positives et négatives. [9]

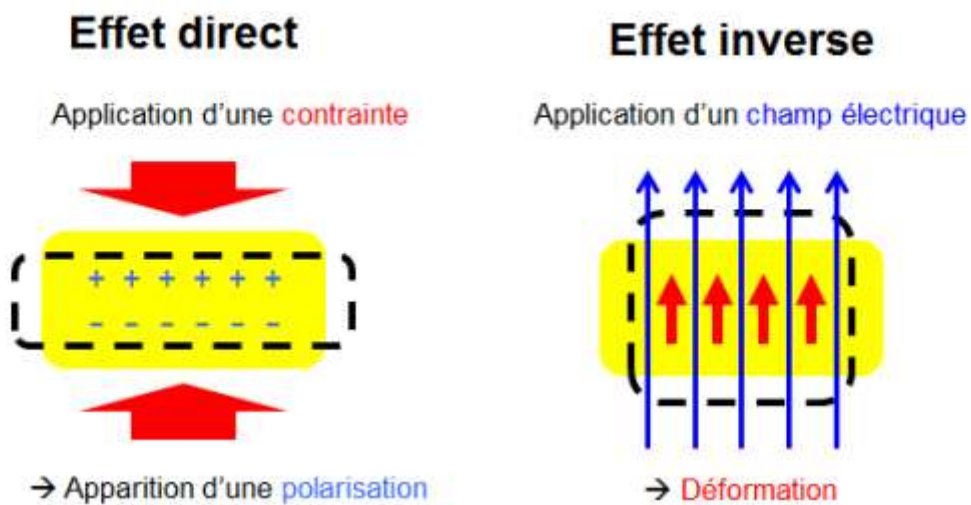


Figure 1.14 : l'effet piézoélectrique

1.6.1 Application de la piézoélectricité

Le phénomène piézoélectrique se manifeste sous deux effets, l'effet direct et l'effet inverse comme nous avons expliqué auparavant ainsi ces applications se différencient d'un cas à un autre selon le besoin.

- Le capteur de pression piézoélectrique est une application industrielle ils sont notamment utilisés pour l'automobile, l'aéronautique ainsi que pour les mesures de niveau.
- La piézoélectricité est également utilisée en acoustique pour transformer des ondes acoustiques en signal électrique : microphone, haut-parleur.
- Les moteurs et les actionneurs piézoélectriques utilisent l'effet inverse : transformation de la tension appliquée en déplacement. [10]

1.6.2 Tableau d'application

<i>Application de la piézoélectricité</i>		
Effet direct	Effet inverse	Deux Effet
<ul style="list-style-type: none">• Microphones• Accéléromètre• Hydrophones• Récupération d'énergie	<ul style="list-style-type: none">• Haut parleur• Sonar• Moteurs• Actionneurs	<ul style="list-style-type: none">• Horloges, Filtrage en électronique• Capteurs fonctionnalisés• Ultrasons Médecine, industrie

1.6.3 Lead zirconite titanate

Le PZT, qui est à l'heure actuelle le matériau piézoélectrique le plus utilisé pour l'actionnement, la concentration relative de titane et de zirconium joue un rôle très important sur les propriétés piézoélectriques du matériau.

Le PZT présente des coefficients piézoélectriques très élevés et il est utilisée dans la récolte d'énergie grâce à sa constante diélectrique et son large coefficient piézoélectrique et c'est pour cette raison les caractéristiques de la transduction sont considérablement améliorées. La figure 1.15 illustre un capteur basé sur un matériau PZT.

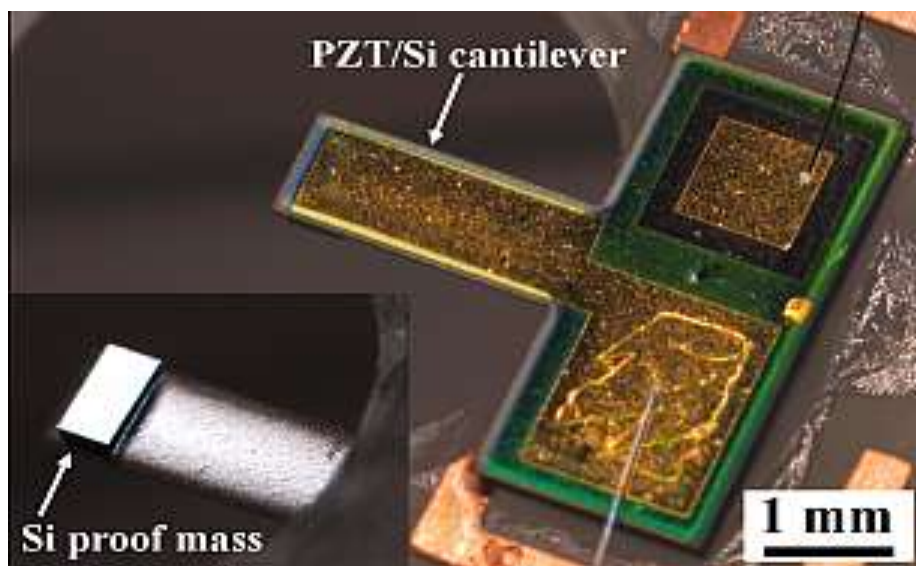


Figure 1.15 : Micro cantilever PZT

1.7 Les Cantilevers

Les cantilevers sont des dispositifs mécanique très sensible pour détecter un phénomène physique sur leur surfaces par la déformation ou le fléchissement (figure1.16 et figure1.17).

Pour un cantilever il est nécessaire d'identifier les caractéristiques de vibrations dans une structure parce ce que la flexion ou l'étirement d'un cantilever rendent la structure vibrante rigide il en résulte une variation dans le mode de cette structure. [11]

Les cantilevers peuvent être utilisées comme capteurs et étudiées en deux modes :

- Le mode statique pour l'étude de fléchissement.
- Le mode dynamique pour l'étude de la résonance. [12,13]

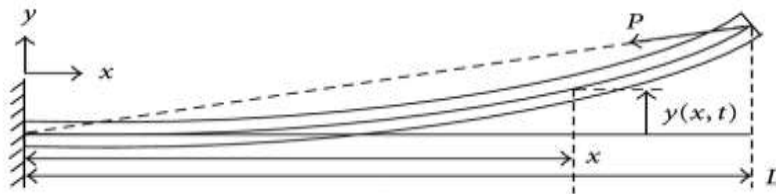


Figure1.16 : le fléchissement

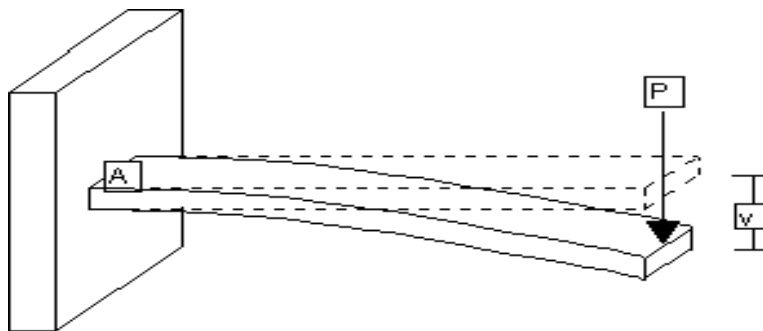


Figure 1.17 : la déformation

1.8 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons essayé de donner les informations de base à propos de notre sujet, en commençant par l'importance large de microsysteme par le biais des capteurs, en passant par la récolte d'énergie qui bénéficie du phénomène de vibration des corps et en finissant par la piézo-électricité qui a gagné une crédibilité énorme dans le monde de l'électronique

Chapitre 2

Chapitre2 : Analyse mathématique

2.1 Introduction

COMSOL Multi physiques[®] est une plate-forme logicielle générale qui autorise la modélisation et la simulation des phénomènes physiques à l'aide de méthodes numériques avancées. COMSOL Multi physiques permet de coupler des physiques "simples" ou d'étudier des phénomènes multi physiques.

Ce logiciel est un environnement graphique intégré, conçu pour développer efficacement des produits à partir des simulations, en utilisant une méthode de travail unifiée, quel que soit le domaine d'application.

Les modules complémentaires s'intègrent en toute transparence à COMSOL Multi physiques et ne modifient en rien l'utilisation du logiciel. L'arborescence du modèle, dans le Constructeur du modèle, offre un aperçu complet du modèle et permet d'accéder à toutes les fonctionnalités (géométrie, maillage, paramètres physiques, conditions aux limites, études, solveurs, post-traitement et visualisations). Avec COMSOL Multi physiques, il devient facile d'étendre les modèles classiques pour un type de physique en modèles multi physiques permettant de résoudre simultanément des phénomènes physiques couplés. Qui plus est, la mise en œuvre ne requiert pas de connaissances approfondies en mathématiques ou en analyse numérique. [16]

2.2 La Structure vibratoire

Avec le logiciel COMSOL multi-physique des éléments finit on réalise le model de la structure vibratoire utilisée dans notre expérience. Nous avons un substrat en polysilicon qui est la Plateforme de notre capteur ou en dessus repose trois cubes, deux ont les même dimensions, et un troisième différent, conçu en piézoélectrique (la figure2.1), sur les deux cubes similaires nous mettons un enchor. Sur chaque enchor (en mauve), on connecte deux micro-cantilevers, de différentes dimensions fabriquées en aluminium. Avec chaque enchor a une extrémité libre pour qu'ils aient l'habilité de vibrer. Les micro-cantilevers sont parallèles au substrat et au troisième cube.

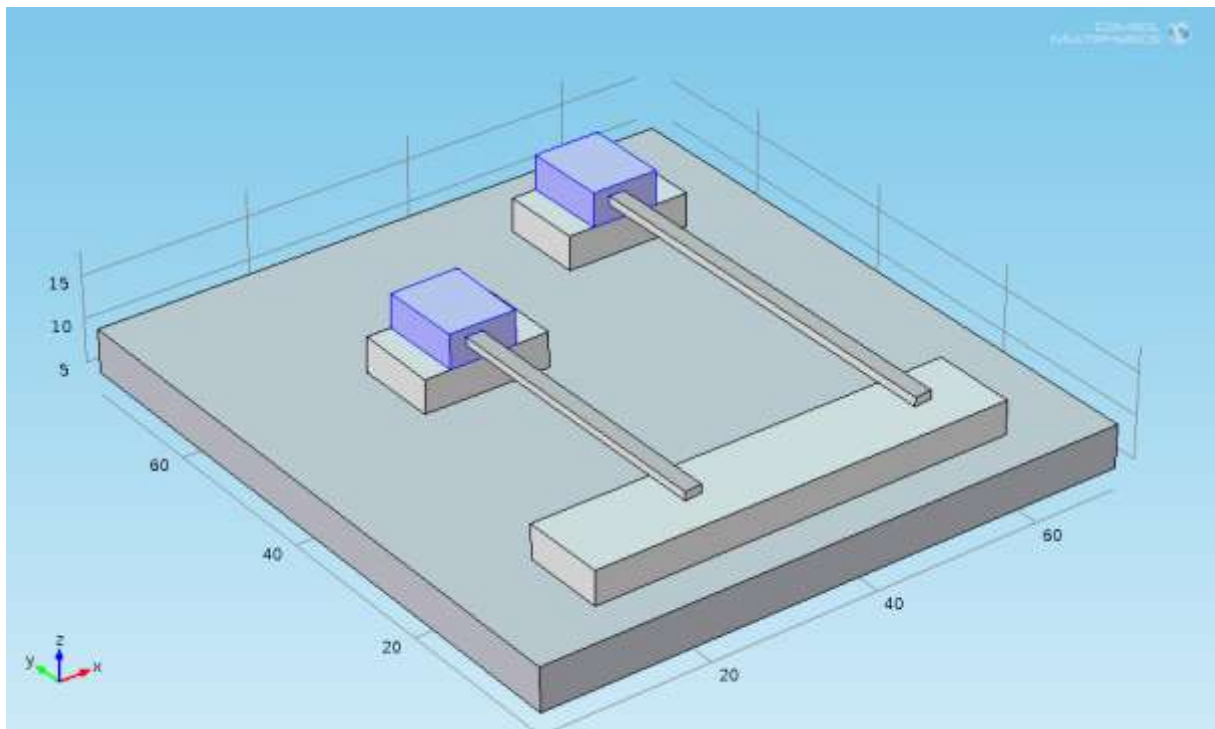


Figure2.1 : structure vibratoire à deux micro-cantilevers

2.3 Analyse mathématique

Le matériau piézoélectrique dépend de d'autres paramètres aussi importants pour le meilleur fonctionnement de design, nous donnons dans le suivant de travail les équations et l'analyse mathématique concernant notre étude.

Le cantilever montre des propriétés d'élasticité similaire de celle d'un ressort et supporte la même équation de mouvement donné par :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) \quad (2.1)$$

Ou :

m : La masse de la poutre.

c : Constante d'amortissement.

k : La constante de raideur.

x : Le déplacement

dx/dt : La vitesse.

d²x/d²t : L'accélération.

f(t) : La fonction de la force.

La fréquence propre d'un cantilever sans aucune charge soumise est :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

La pulsation propre est :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.3)$$

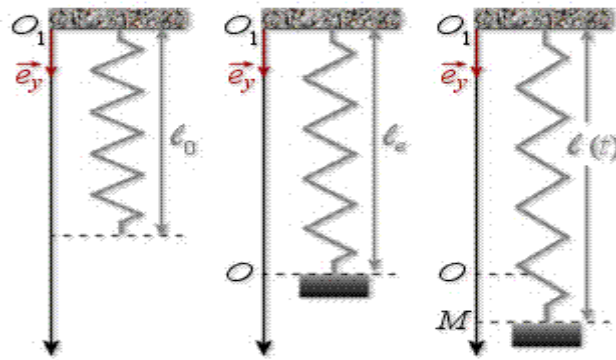
La période propre du cantilever est :

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2.4)$$

La solution générale de cette équation est de la forme :

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.5)$$

Les grandeurs A et φ sont des constantes déterminées à partir **des conditions initiales**.



Figure

En résumé, l'équation du mouvement étant de la forme :

$$m\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0 \quad (2.6)$$

Dont le discriminant réduit est donné par :

$$\Delta = \gamma^2 - \omega_0^2 \quad (2.7)$$

- $\Delta = 0$: régime critique

L'amortissement, caractérisé par :

$$\gamma = \omega_0 \quad (2.8)$$

La solution de l'équation du mouvement est de la forme :

$$x(t) = (At + B)e^{-\gamma t} \quad (2.9)$$

Où A et B dépend des **conditions initiales** et le retour vers la position d'équilibre dans ce cas est plus rapide

- $\Delta > 0$ régime aperiodique

L'amortissement, caractérisé par :

$$\gamma > \omega_0 \quad (2.10)$$

La solution de l'équation du mouvement est de la forme :

$$x(t) = B_1 e^{r_1 t} + B_2 e^{r_2 t} \quad (2.11)$$

Où B_1 et B_2 dépend des **conditions initiales**.

Et où les racines de l'équation caractéristique sont :

$$r_1 = -\gamma - \sqrt{\Delta} \quad r_2 = -\gamma + \sqrt{\Delta} \quad (2.12)$$

- $\Delta < 0$ régime pseudo-périodique

L'amortissement, caractérisé par :

$$\gamma < \omega_0 \quad (2.13)$$

Est qualifié d'amortissement faible.

La solution de l'équation du mouvement est de la forme :

$$x(t) = C e^{-\gamma t} \cos(\omega_a t + \varphi) \quad (2.14)$$

Où C et φ dépend des **conditions initiales**.

Et où la **pseudo-pulsation** ω_a est définie :

$$\omega_a = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \quad (2.15)$$

2.4 Etapes permettant l'élaboration de la structure

Les structures utilisées dans le contexte de notre travail Possèdent des propriétés matérielles et structurelles

2.4.1 Le substrat

Représente la plateforme de base figure2.3 ces propriétés sont figurées dans le tableau2.1/2.2

Matériau et dimensions

Paramètre	Matériau	Longueur	Largeur	Epaisseur
Substrat	Silicon	75	70	5

Tableau2.1

Propriétés de matériau

Matériau	Coefficients		
	Densité	Module de Young	Coefficient de Poisson
Silicon	2330	$170 \cdot 10^9$	0,28

Tableau2.2

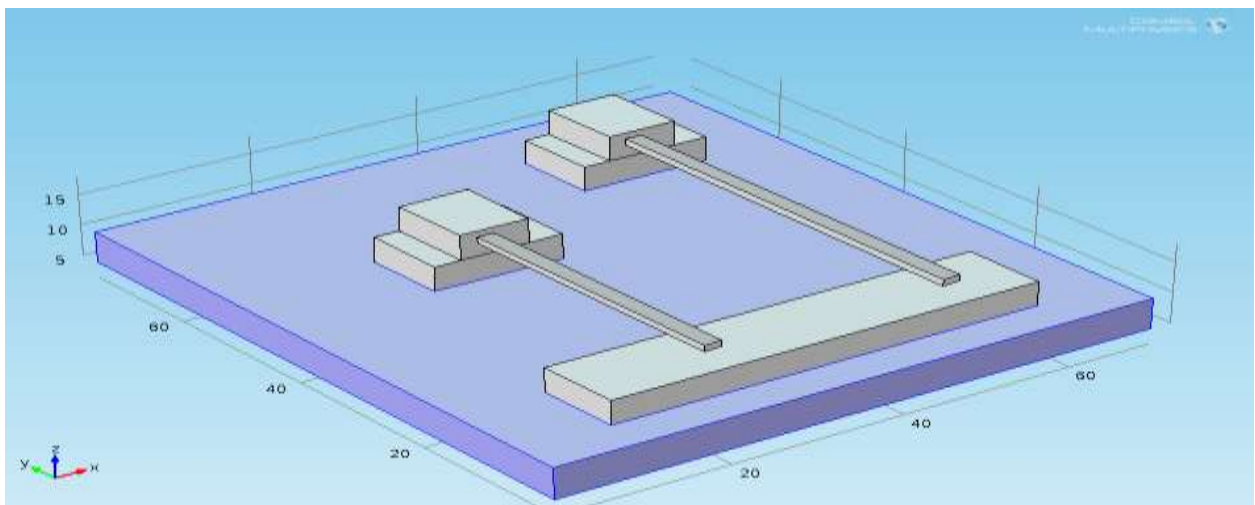


Figure2.3 : Substrat

2.4.2 Le matériau piézoélectrique

Les tableaux 2.3/2.4 représentent les propriétés du matériau piézoélectrique illustrés en figure 2.4

Matériaux et dimensions

Paramètre	Matériau	Longueur	Largeur	Epaisseur
Matériau Piézo-électrique	Lead Zirconate titanate (PZT-5H)	10	15	4

Tableau 2.3

Propriétés de matériau

Matériau	Coefficients		
	Densité	Module de Young	Coefficient de Poisson
Piézo-électrique	7600	$65 \cdot 10^9$	0,35

Tableau 2.4

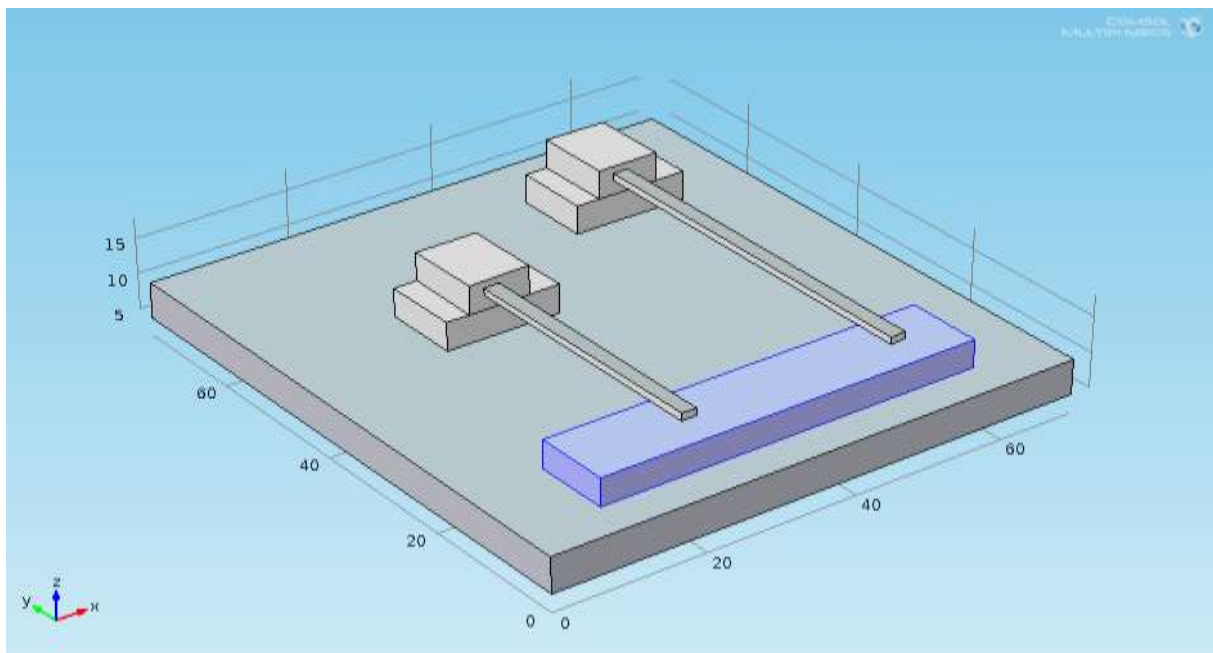


Figure 2.4 : matériaux piézoélectriques

2.4.3 Les micro cantilevers

Les micro cantilevers (figure2.5) sont dimensionnés et matérialisés selon les données en tableau2.5/2.6

Matériaux et dimensions

Paramètre	Matériau	Longueur	Largeur	Epaisseur
Cantilever 1	Aluminium	35	2	1
Cantilever 2	Aluminium	49	2	1

Tableau2.5

Propriétés de matériau

Matériau	Coefficients		
	Densité	Module de Young	Coefficient de Poisson
Aluminium	2700	$70 \cdot 10^9$	0,33

Tableau2.6

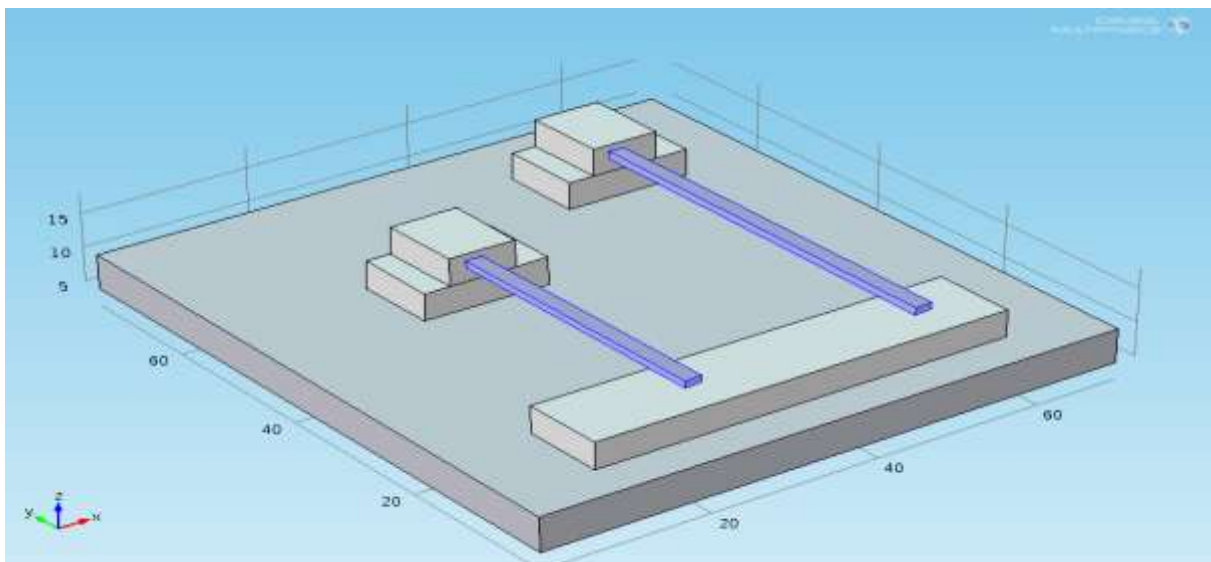


Figure2.5 : micro cantiléver

2.5 Les méthodes de résolution de problème

Nous avons déjà dit que résoudre un problème d'élasticité revient à trouver une fonction qui satisfait aux différentes équations de mécanique et d'équilibre. Pour trouver une solution analytique à un problème, il existe plusieurs méthodes, détaillées dans des ouvrages plus conséquents. Nous allons simplement illustrer le principe en présentant deux méthodes différentes :

- La première méthode est plus plutôt simple, car à partir des déplacements, on calcule directement les déformations par dérivation et les contraintes sont ensuite directement évaluées.
- La deuxième méthode est un peu plus compliquée, puisque il faudra intégrer pour passer des déformations aux déplacements, donnant ainsi une série de conditions d'intégrations appelées : équations de compatibilité. [15]

2.5.1 Les équations de compatibilité

L'équation de compatibilité se base sur le principe suivant :

"Si un corps est incessant avant la déformation , il devrait demeurer incessant après la déformation" , de ce fait il vas falloir qu'il n'y a aucune fracture ou rupture lors de la déformation de corps étudiée , et au même temps il est préférable d'éviter les chevauchements. [17]

Pour une structure de trois dimensions il y a six équations à suivre :

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xy}}{\partial x \partial y}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{yz}}{\partial y \partial z}$$

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xz}}{\partial x \partial z}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{xx}}{\partial y \partial z}$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{yy}}{\partial z \partial x} \quad (2.16)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} \left(-\frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{zz}}{\partial x \partial y}$$

2.6 La piézoélectricité

La piézoélectricité est l'interaction entre l'équation de l'élasticité linéaire et l'équation de charge électrostatique par le biais des constantes électrique. [18,19]

Dans cette section l'équation des éléments finit est présenté pour la théorie de la piézoélectricité, on considère un cantilever de longueur L , l'équation est donné par :

$$\varepsilon = S^E \sigma + d_t E' \quad (2.16)$$

$$D = d \sigma + \eta E' \quad (2.17)$$

ε : Permittivité diélectrique à contrainte constante.

S^E : La rigidité élastique à champ constant

E' : Le vecteur du champ électrique

η : Permittivité électrique

D : Le vecteur de déplacement électrique

d_t : L'effet piézoélectrique inverse

σ : Vecteur contrainte

L'équation de la contrainte est très importante pour l'analyse des éléments finit car elle rentre dans la conversion de la force en énergie électrique.

2.7 Milieu isotrope

Un milieu isotrope est un milieu dont les propriétés sont identiques quelle que soit la direction d'observation, homogène si à une certaine échelle ses propriétés sont identiques d'un point à un autre [14], et sa matrice d'élasticité est :

$$S^E = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \times \begin{pmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 - 2\nu \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

E: Module de Young.

ν: Coefficient de poisson.

D'où :

$$S^E = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & -S_{14} & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ S_{14} & -S_{14} & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{14} & \frac{S_{11} - S_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

Le model piézoélectrique dépend aussi de d'autres facteurs qui sont nécessaire pour la réussite de la structure du micro-cantilever ainsi que la matrice d'élasticité et l'équation de la permittivité électrique.

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & -d_{22} \\ -d_{22} & d_{22} & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

$$\eta = \begin{pmatrix} \eta_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{33} \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

d = Tenseur piézoélectrique

η = Permittivité électrique

Les coefficients qui apparaissent dans les deux matrices sont les constants de matériau utilisé

Le tenseur des rigidités à neuf composantes indépendantes est représenté par une matrice carrée (6x6)

2.8 Milieu anisotrope

Un milieu anisotrope est un milieu dont les propriétés ne sont pas identiques lors de la direction d'observation, ses propriétés sont variable d'un point à un autre, et sa matrice d'élasticité est :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$C_{11} = \frac{1}{E_{11}}, \quad C_{12} = -\frac{\nu_{21}}{E_{22}}, \quad C_{13} = -\frac{\nu_{31}}{E_{32}}.$$

$$C_{22} = \frac{1}{E_{22}}, \quad C_{23} = -\frac{\nu_{32}}{E_{33}}, \quad C_{33} = \frac{1}{E_{33}}.$$

$$C_{44} = \frac{1}{G_{23}}, \quad C_{55} = \frac{1}{G_{13}}, \quad C_{66} = \frac{1}{G_{12}}.$$

Avec :

$\nu_{21}\nu_{31}$ et ν_{32} : Coefficients de poisson.

$E_{11}E_{22}$ et E_{33} : Module de Young dans les trois dimensions.

$G_{12}G_{23}$ et G_{13} : Module de rigidité.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre on a exposé la partie mathématique et la structure physique de l'élément qui nous permet d'effectuer notre expérience d'une manière bien précise et professionnel grâce a logiciel COMSOL multi-physique et pour aboutir aux résultats voulu ou bien aux résultats d'analyse.

Chapitre 3

Chapitre3 : Résultat et discussion

3.1 Introduction

Ce chapitre consiste à présenter et à examiner les résultats de notre étude sur la structure vibratoire pour déterminer son comportement lors des contraintes et pour l'ajuster afin d'arriver au meilleur rendement possible de ce capteur.

3.2 étude de la structure vibratoire

Les figures : montrent les différentes déformations de la poutre au moment où elle est soumise à une contrainte dont des déformations désirées et d'autres non.

La figure 3.1 : représente le fléchissement idéal d'une poutre quand une force extérieure est appliquée sur la structure.

3.2.1 Décomposition en éléments finis

La précision de la solution analytique dépend de la décomposition de la structure vibratoire en petites éléments ou éléments finis (figure 3.1). Cette décomposition permet de faciliter la simulation numérique du corps, et focalisée l'étude dans des parties bien précises sur la structure. On remarque (figure 3.2) que le maillage se concentre entre l'encastrement et la limite de la poutre pour avoir plus de détails sur l'évolution de l'expérience.

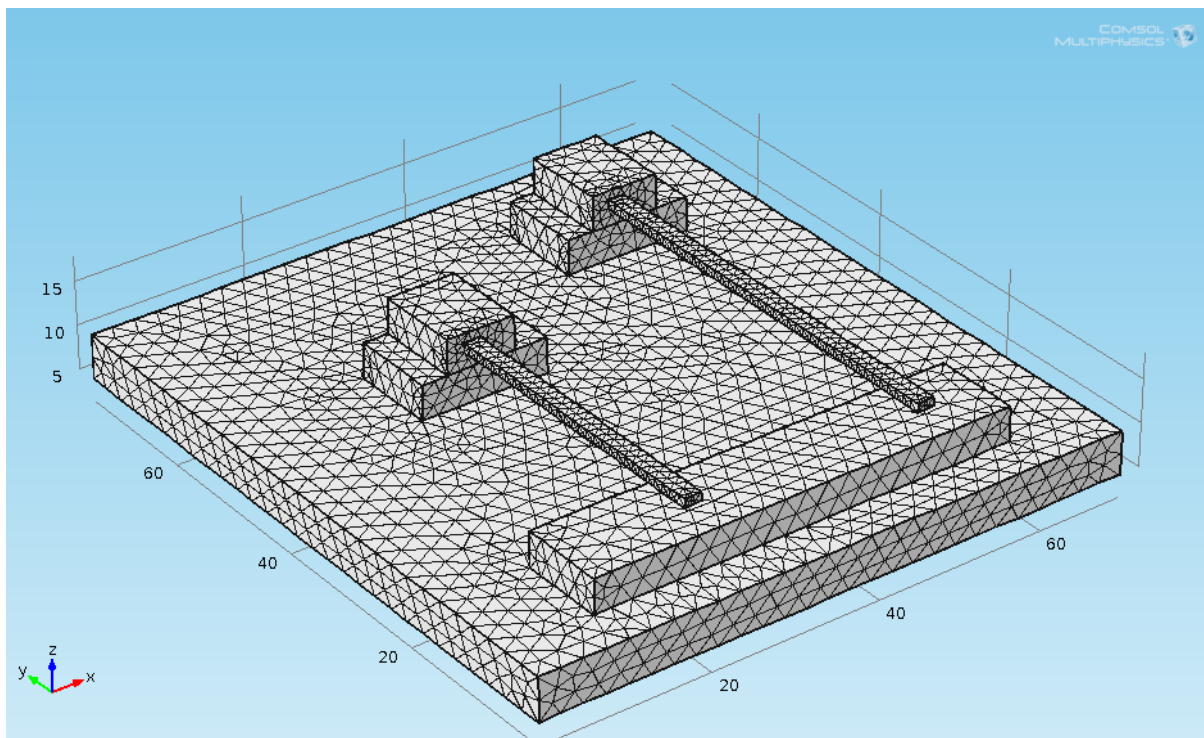


Figure3.1 : maillage1

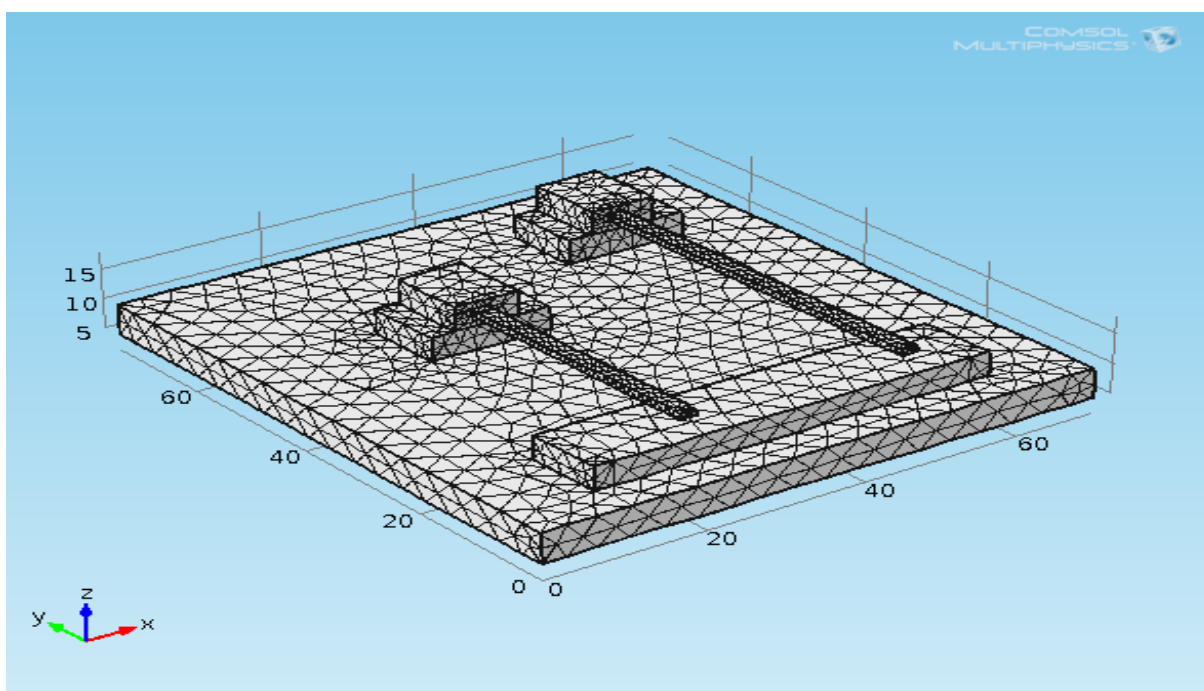


Figure3.2 : maillage2

3.2.2 Simulation de la structure

Dans le cadre de cette simulation nous allons présenter le comportement de la structure en fonction des modes de vibrations

a) Modes indésirables

Le comportement de la structure est illustré en (figure 3.3 à 3.5). On remarque que pour les fréquences notées dans le tableau3.1, la structure risque de se briser et de détériorer le capteur

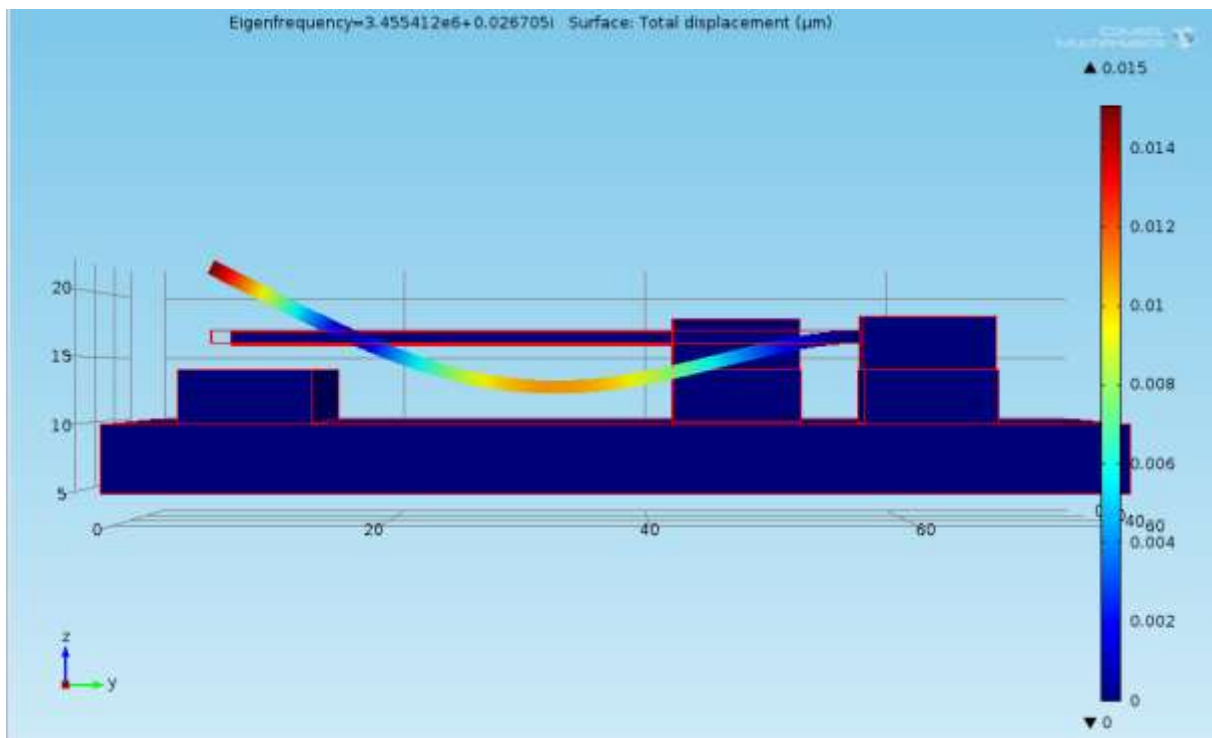


Figure3.3 : mode1 indésirable

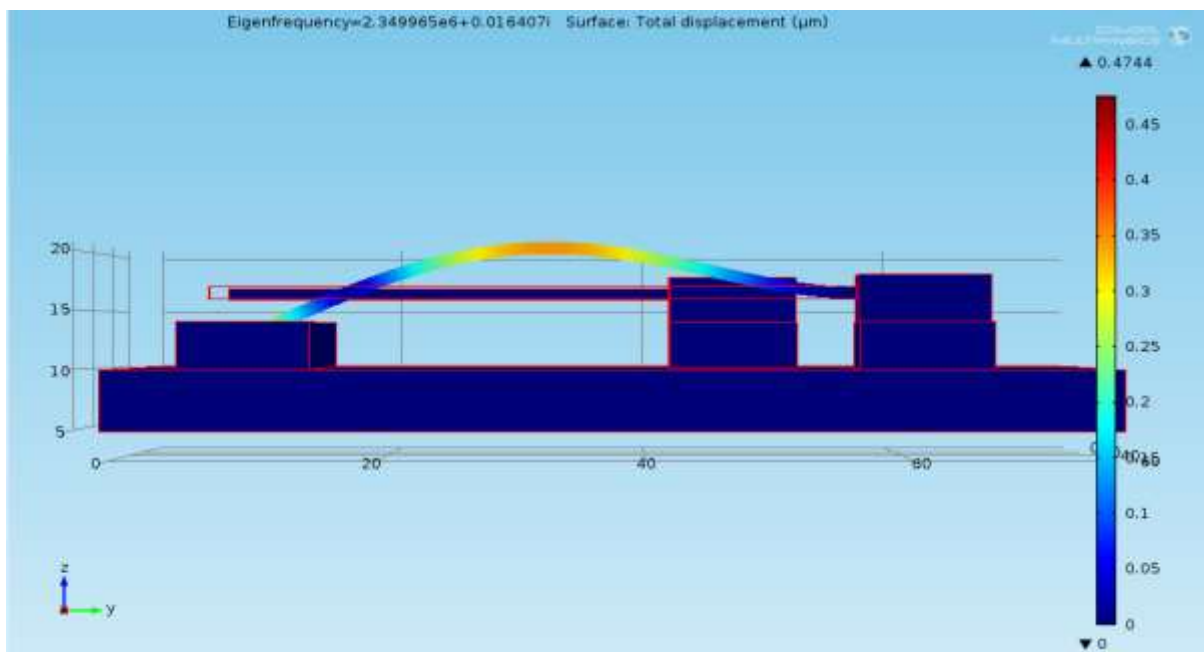


Figure 3.4 : mode2 indésirable

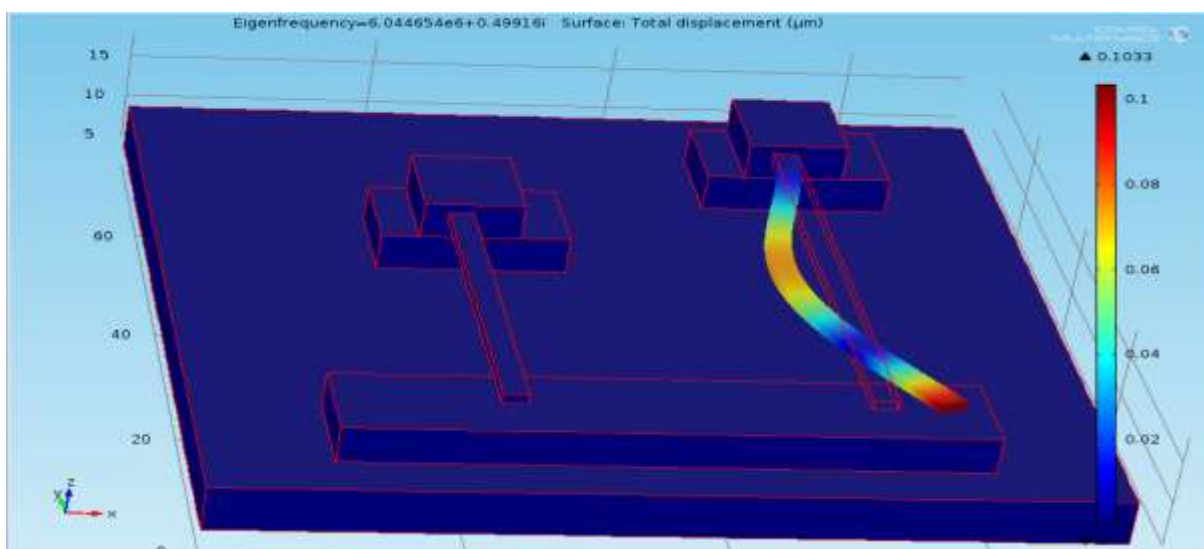


Figure 3.5 : mode3 indésirable

Mode	Partie réelle($\times 10^6$)	Partie imaginaire
1	3.45	0.02
2	2.39	0.01
3	6.04	0.49

Tableau3.1

b) Mode désirable

Le comportement de la structure est illustré en (figure 3.6 à 3.9). On remarque que pour les fréquences notées dans le tableau3.2, la structure vibre correctement permettant ainsi un fonctionnement correct du capteur.

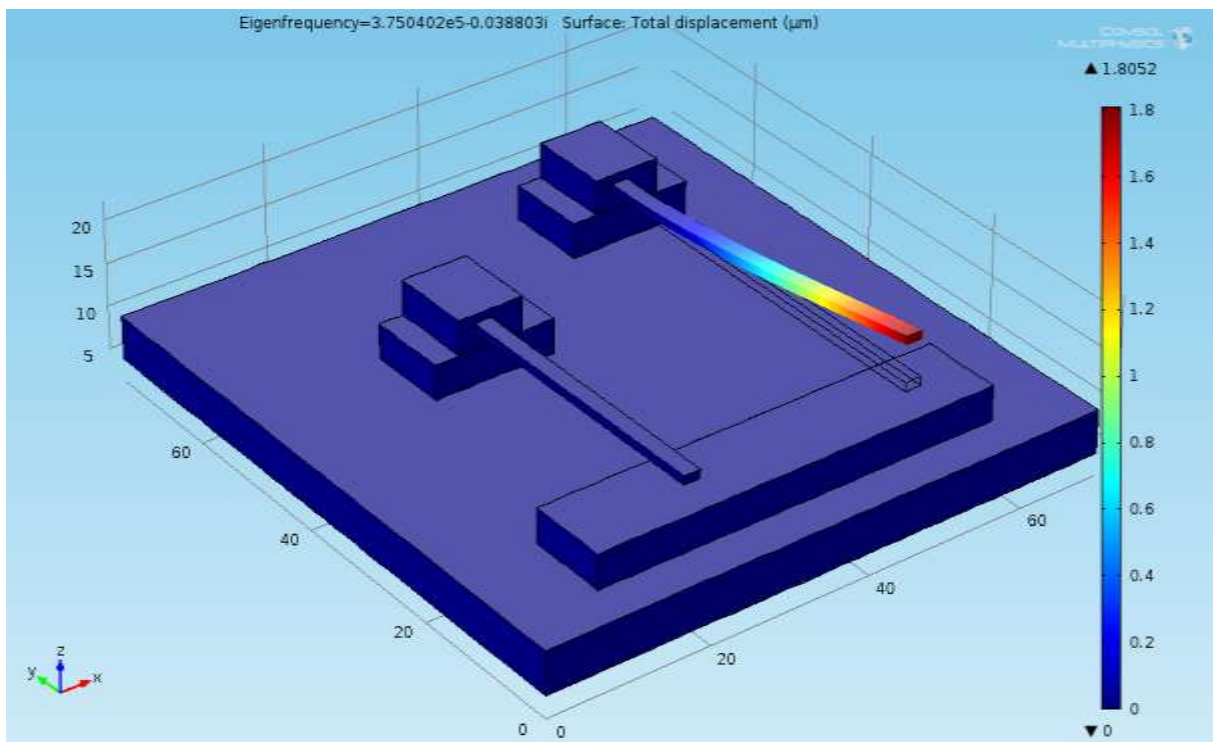


Figure 3.6 : mode1

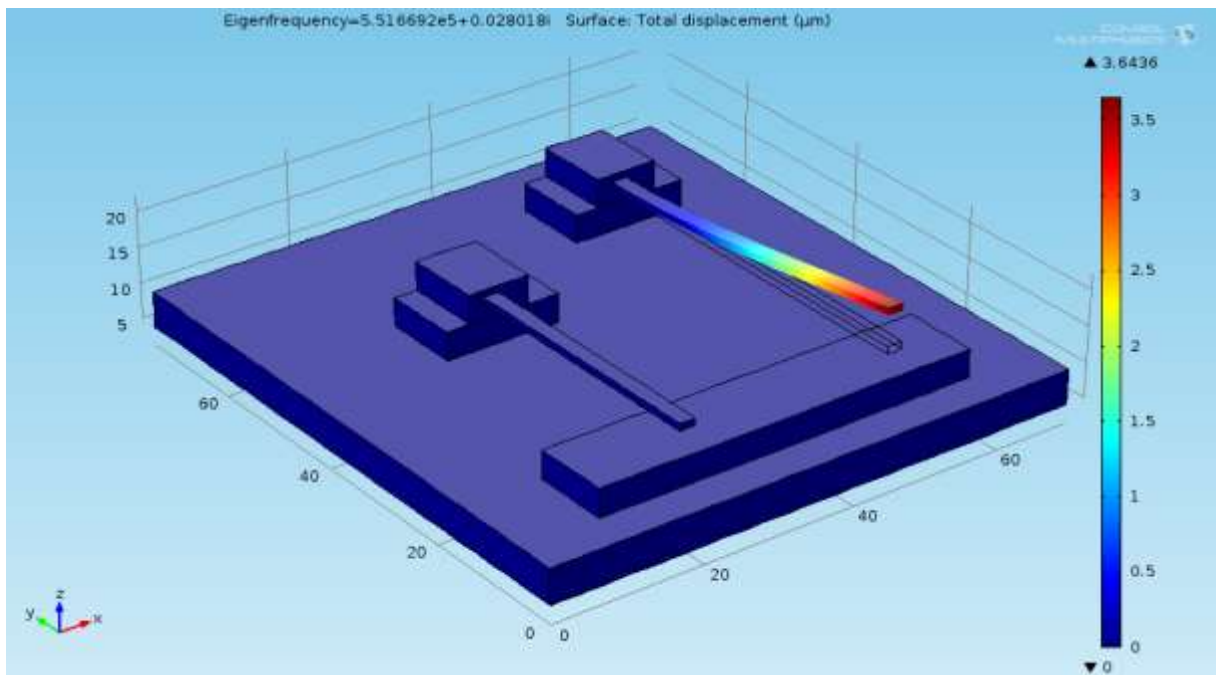


Figure 3.7 : mode2

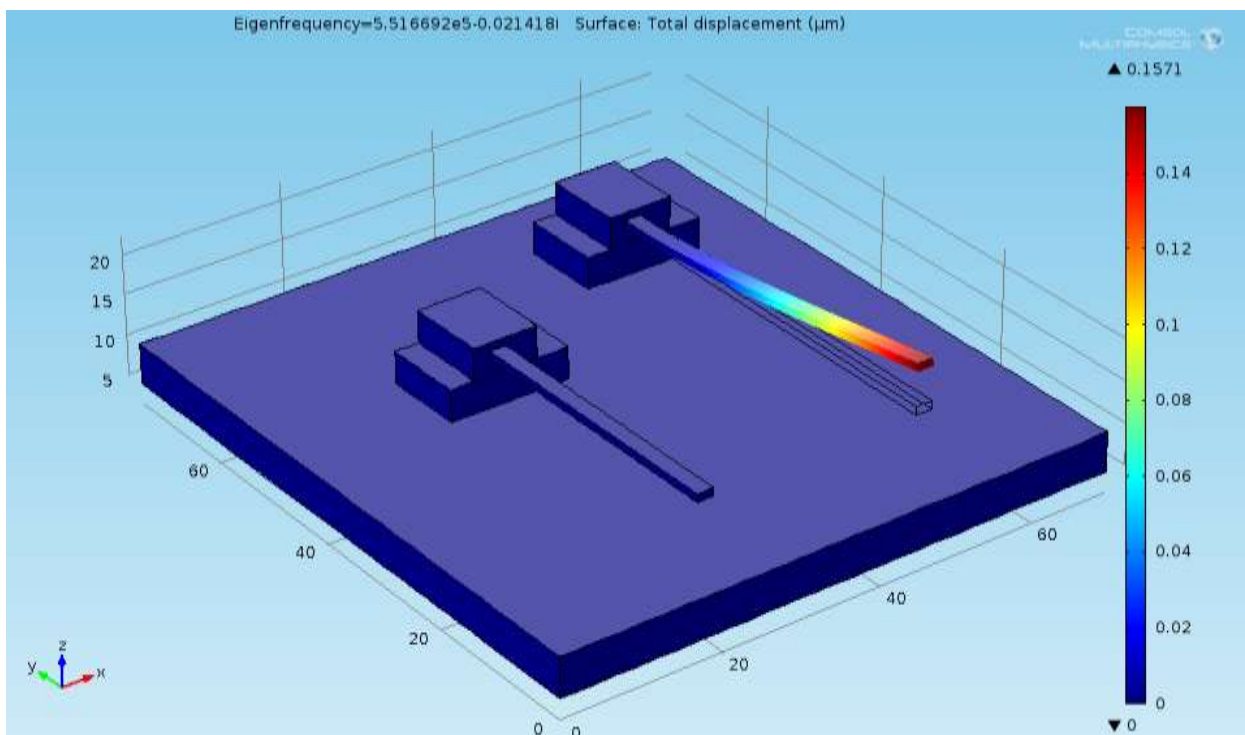


Figure 3.8 : mode 3

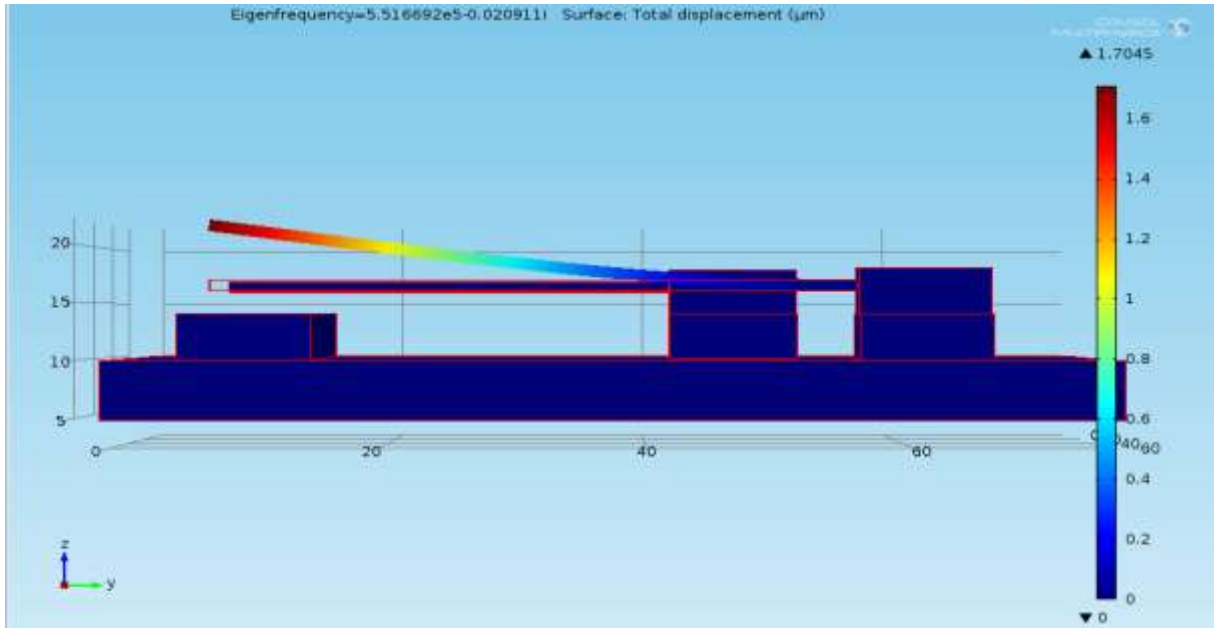


Figure3.9 : mode4

Mode	Partie réelle($\times 10^5$)	Partie imaginaire
1	3.75	-0.038
2	5.51	0.028
3	5.51	-0.021
4	5.51	-0.020

Tableau3.2

On remarque que la structure, dans le cas d'existence de mode réel, la structure change de comportement (figure3.10)

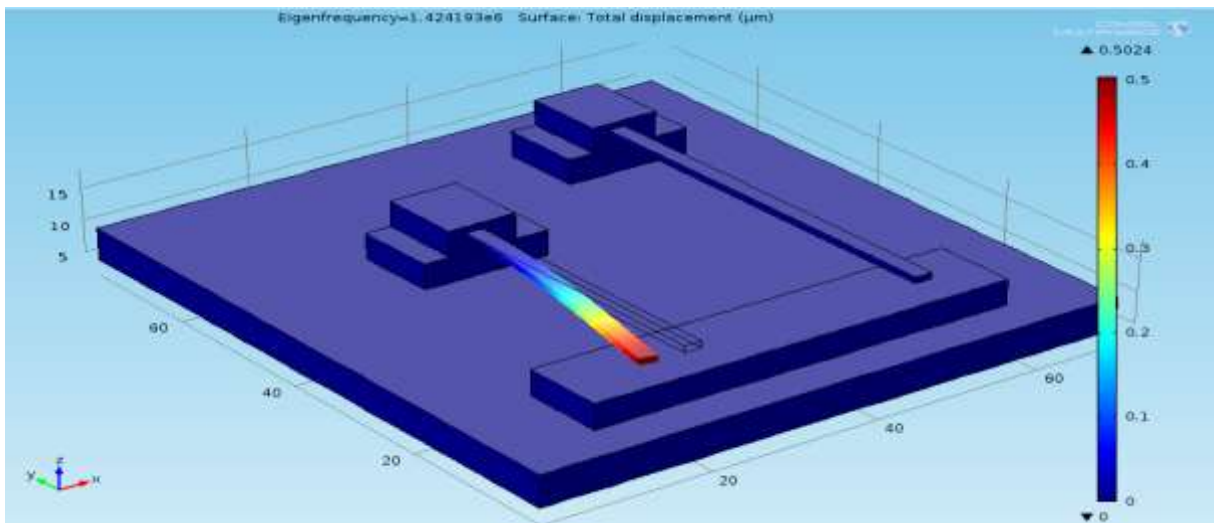


Figure3.10 : comportement de la structure en mode réel

3.2.3 Phénomène électrique

La vibration de la structure engendre l'existence d'un potentiel au niveau de cette structure.

C'est ce potentiel qui sera source d'énergie pour différentes applications. Ce potentiel existe grâce à la caractéristique du matériau (piézoélectrique). La simulation à l'aide du logiciel nous permet de faire le constat ce potentiel (figure3.11 à 3.12)

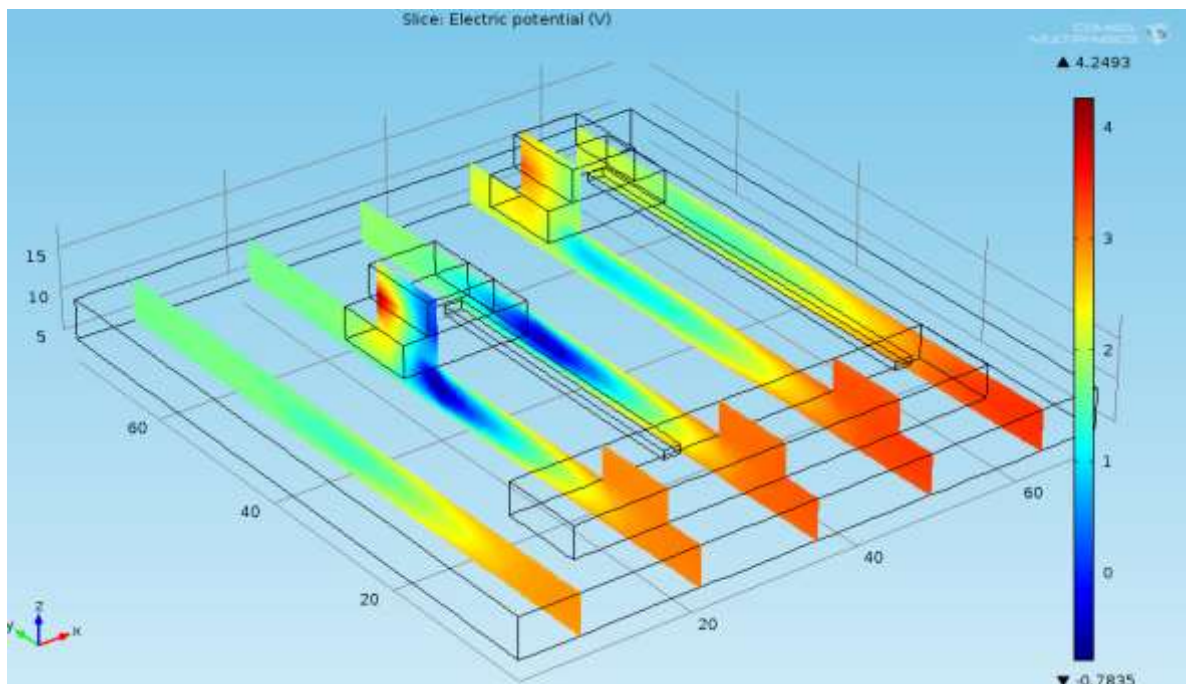


Figure3.11 : potentiel électrique

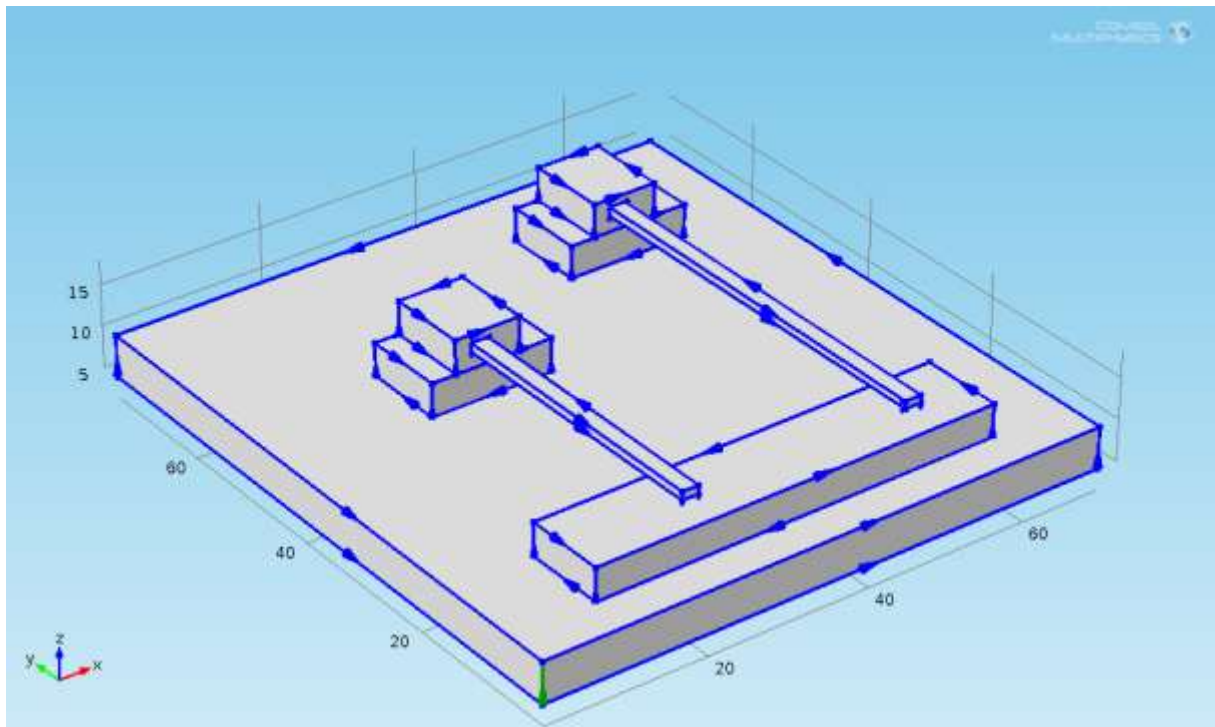


Figure 3.12 : représentation du flux et de la direction du courant dans la structure

3.3 Conclusion

À travers les résultats de ce chapitre nous avons pu mettre en évidence l'existence au niveau de la structure un potentiel électrique qui pourra être utilisé comme source d'énergie dans le cadre de certaines applications. L'utilisation d'un matériau piézoélectrique est primordiale ainsi que les forces sur les cantilevers (pas nécessairement des forces de contact) permettant les vibrations de ces derniers.

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études porte sur l'étude et la simulation d'une structure vibratoire à base de piézoélectrique, à partir des différentes relations théoriques et des simulations faites sous logiciel COMSOL.

Pour cela nous avons commencé par présenter dans le premier chapitre quelques généralités sur les microsystèmes, ainsi que les principales notions théoriques fondamentales (vibrations, micro cantilever) nécessaires à la compréhension des structures autonome fournissant de l'énergie.

Dans le deuxième chapitre nous avons vu les équations mathématiques qui jouent un rôle important dans le succès de fonctionnement de la structure vibratoire et nous avons mentionné les matériaux avec leurs dimensions et leurs propriétés dans ce travail.

Enfin dans le dernier chapitre on a fini par remanier les résultats obtenus par le logiciel COMSOL et on les a présentés sous forme des figures et des tableaux pour mettre en évidence l'existence d'un potentiel électrique au niveau de la microstructure.

En effectuant la simulation, on est parvenu à trouver les vibrations désirable et indésirable de notre structure avec le phénomène électrique.

Perspective : ce serait de suivre notre étude et simuler la fréquence et le déplacement total des poutres en fonction de temps afin de maitriser le comportement de la structure vibratoire.

Bibliographie

[1] : Hélène horsin Molinaro, Olivier français, les technologies MEMS édité le 18/12/2014.

[2] : Julie ABERGEL, Matériaux piézoélectrique à forte déformation pour l'actionnement microsysteme, thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Grenoble 04/06/2014.

[3] : Ramizi mohamed , mahidur R. Sarker and Azah Mohamed, An optimization of rectangular shape piezoelectrique energy harvesting cantilever beam for micro devices, universiti Kebangsaan Malaysia, international journal of applied Electromagnetics and mechanics 50 (2016).

[4] : R. Herdier, D. Jenkins, D. Remiens, M. Dupont, and D. Osmont, "A silicon cantilever beam structure for the evaluation of d_{31} , d_{33} and e_{31} piezoelectric coefficients of PZT thin films," May 2007.

[5] : <http://fr.rsonline.com/web/generalDisplay.html?file=electroniques/la-recolte-d-energie&id=infozone>

[6] : H. Irschik, "A review on static and dynamic shape control of structures by piezoelectric actuation," Engineering Structures, 2002.

[7] : S. Dohn, R. Sandberg, W. Svendsen, and A. Boisen, "Enhanced functionality of cantilever based mass sensors using higher modes," Applied Physics Letters 2005.

- [8] : Catherine POTEL, Philippe GATIGNOL, cours de Mécanique-vibrations, Oscillateurs harmoniques, université du Maine.
- [9] : Adao DELEHELLE, Etude d'un concept innovant d'actionneur électromécanique linéaire à effets magnétique et piézoélectrique en vue d'application dans le domaine des commandes de vol, thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse. France 2008.
- [10] : Guy Feuillard Laboratoire GREMAN UMR 7347 INSA centre val de Loire, Les matériaux piézoélectriques Constitution propriétés et applications.
- [11] : H. H. Yoo and S. H. Shin, "Vibration analysis of rotating cantilever beams," Journal of Sound and Vibration.
- [12] : S. Dohn, R. Sandberg, W. Svendsen, and A. Boisen, "Enhanced functionality of cantilever based mass sensors using higher modes," Applied Physics Letters, vol.86
- [13] : H. Irschik, "A review on static and dynamic shape control of structures by piezoelectric actuation," Engineering Structures, vol. 24
- [14] : N.Sabri:(2001), Etude du phénomène de polarisation rotatoire: Effet Faraday.Thèse de magister Tlemcen
- [15] : M. Olgnon Christian, cours élasticité et résistance des matériaux, Institut National Des Sciences Appliqué De Lyon 2009-2010.
- [16] : <https://www.comsol.fr/comsol-multiphysics>
- [17] : J. Wang, J.-K. Chen, and S. Liao, "An explicit solution of the large deformation of a cantilever beam under point load at the free tip," Journal of Computational and Applied Mathematics, vol.212

[18] : S.-H. S. Lim, D. Raorane, S. Satyanarayana, and A. Majumdar, “Nano-chemo-mechanical sensor array platform for highthroughput chemical analysis,”*Sensors and Actuators, B: Chemical*,vol.119

[19] : A. J. Qavi, A. L. Washburn, J.-Y. Byeon, and R. C. Bailey, “Labelfree technologies for quantitative multiparameter biological analysis,”*Analytical and Bioanalytical Chemistry*,vol.394

[20] : The team, led by University of Illinois electrical and computer engineering and bioengineering professor Rashid Bashir, published its results in the online early edition of the *Proceedings of the National Academy of Science*.