

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLAB-Blida 1



Faculté des sciences

Département de physique

Mémoire présenté par :

BOUTRIF Khensa

&

DJEGHBOUB Zoulikha

En vue d'obtenir le diplôme de Master

Domaine : Sciences de la matière

Filière : Physique

Spécialité : Physique Des Rayonnements

Sujet : Application des matériaux piézoélectriques comme détecteur d'éléments radioactifs.

Soutenu le 27 Septembre 2021, devant le jury composé de :

Mr.BENREKIA M'hamed	Maître assistant A	Président
Mr. BOUNEMRI Ammar	Maître assistant A	Rapporteur
Mr.BELGROUNE Nadir	Maître de conférences B	Examineur

Année universitaire : 2020-2021

Dédicace 1

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

A mes chers parents

Mon père Mohamed

Mon adorable mère Zineb Ben Youcef

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

A mes frères Oussama , Riad, Alaa Eddin et ma chère sœur Ouassila

A ma chère copine et binôme Khensa « Boutrif » qui a partagé avec moi ce travail.

A tous mes enseignants du primaire jusqu'à ce jour.

Je dédie ce travail aussi à tous ma famille et mes amis.

Zoulikha Djeghboub

Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents (Mohamed et Mohamedi Zoubida) ;

Qui nous donne tous les moyens possibles,

Pour leurs sacrifices et leur soutien

Leur patience et leur encouragement durant mon parcours scolaire

A très chers frères et mes adorables sœurs

Ainsi à toute ma famille

A tous mes amis de promotion 2^{ème} année Master physique.

Khensa Boutrif

Remerciements

*Tous d'abord, nous remercions **ALLAH** le miséricordieux de nous avoir donné le courage et la volonté pour que ce travail soit achevé.*

Nous sommes très reconnaissantes à Monsieur BOUNEMRI, pour avoir accepté l'encadrement de ce mémoire. Son champ de connaissances pluridisciplinaires, son aide et ses conseils ont été précieux pour finaliser ce travail. Pour cela nous lui exprimons nos sincères remerciements ainsi que pour sa patience et sa très grande disponibilité.

Merci à nos enseignants de spécialité qui ont acceptés de répondre à certaines questions portant sur le thème de ce mémoire.

Nos sincères remerciements à nos parents tout en espérant qu'ils seront toujours fiers de nous.

Nous remercions également le département de physique, l'université Saad Dahleb de BLIDA.

Notre reconnaissance va aussi vers les membres du jury. Merci pour le temps que vous avez consacré à juger ce modeste travail de mémoire.

Enfin, nous voudrions associer nos remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

A tous un grand merci

ملخص:

يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة على الاهتمام بالمواد الكهرضغطية المرتبطة بمصادر النظائر المشعة. أظهرت المواد الكهرضغطية القدرة على تحويل القوى الميكانيكية إلى مجال كهربائي استجابة لتطبيق الضغوط الميكانيكية. في هذا السياق، تتم دراسة البنية الميكرو مترية، التي تتكون من نظائر مشعة، مادة لجمع الشحن الكهربائي (النحاس)، شعاع نائي ومادة كهرضغطية، باستخدام البرنامج COMSOL. تسلط نتائج المحاكاة الضوء على مفاهيم إزاحة الحزمة الكهرضغطية (الانحراف والاستطالة) وكذلك التحويل الميكانيكي إلى جهد كهربائي. يمكن استخدام هذه الخصائص، من بين أشياء أخرى، للكشف عن وجود مصادر مشعة تنبعث منها جسيمات بيتا ناقصة.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire relate l'intérêt des matériaux piézoélectriques associe à des sources radio-isotopes. Les matériaux piézoélectriques ont montré la capacité de convertir des forces mécaniques en un potentiel en réponse à l'application de contraintes mécaniques. Dans ce contexte une structure micrométrique, comprenant un radio-isotope, un matériau collecteur de charges électriques (cuivre), une poutre et un matériau piézoélectrique, est étudiée sous simulation en utilisant le logiciel de recherche scientifique COMSOL. Les résultats de simulation mettent en évidence les concepts de déplacements de la poutre et du piézoélectrique (déflexion et élongation) ainsi que la conversion mécanique en potentiel électrique. Ces caractéristiques peuvent servir, entre autre, pour la détection de présence de source radioactifs émetteur de particules béta moins.

Abstract :

The work presented in this thesis relates the interest of piezoelectric materials associated with radioisotope sources. Piezoelectric materials have shown the ability to convert mechanical forces into a potential in response to the application of mechanical stresses. In this context, a micrometric structure, comprising a radioisotope, an electric charge collecting material (copper), a beam and a piezoelectric material, is studied under simulation using the software COMSOL. The simulation results highlight the concepts of displacement of the beam and of the piezoelectric (deflection and elongation) as well as the mechanical conversion into electrical potential. These characteristics can be used, among other things, for the detection of the presence of radioactive sources emitting beta minus particles.

Chapitre I : Généralité sur les radio-isotopes et la piézoélectricité

Introduction générale..... 1

1.1 Introduction 4

1.2 Les radio-isotopes 4

1.2.1 Définition des radio-isotopes 4

1.2.2 La radioactivité beta moins..... 4

1.2.3 Propriétés physiques de quelques éléments radio-isotopes 5

1.2.5 Formulation électrique du phénomène 7

1.3 La piézoélectricité..... 8

1.3.1 Définition de l'effet piézoélectrique 8

a/ A l'échelle microscopique 9

1.3.2 Application de la piézoélectricité dans le cadre de ce travail 10

a/ Principe de fonctionnement 11

b/ Objectifs de la conception 12

1.3.3 Théorie simplifiée de la piézoélectricité..... 12

a/ Les équations sensorielles du phénomène 12

1.3.4 Caractéristiques piézoélectriques des matériaux utilisés dans le contexte de ce travail..... 14

Chapitre II : Modélisation par logiciel COMSOL Multiphysics.

2.1 Introduction 17

2.2 Brève introduction au logiciel de simulation Comsol 17

2.2.1 Interface du logiciel Comsol 17

2.2.2 Construction de la structure simulée. 23

2.2.3 Physique choisie pour l'étude de la structure simulée 24

a/ Les conditions en limite 25

b/Physique piézoélectrique..... 25

2.2.4 Paramètres de résolution choisis pour l'étude de la structure simulée. 26

Chapitre III : Résultats et Interprétations.

3.1 Introduction	28
a/ Le modèle simulé.....	30
3.2 Analyse des résultats de simulation	30
3.2.1 Fléchissement du collecteur et du piézoélectrique en fonction du potentiel.	30
3.2.2 Fléchissement du matériau piézoélectrique pour des longueurs de matériaux variables	31
3.3 Mesure du potentiel engendré par la force de fléchissement sur le piézoélectrique.....	32
3.3.1 Relation entre le potentiel et la force.....	Erreur ! Signet non défini.....32
3.3.2 Potentiel engendre par l'effet direct sur le piézoélectrique.....	Erreur ! Signet non défini.34
Conclusion générale	38

Liste des figures

Figure 1.1 : Désintégration bêta moins du Cobalt 60.....	4
Figure 1.2 : Schéma de principe de la collecte de charge.....	6
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement du la phénom phénomène entre un radio-isotope et un collecteur de charge	7
Figure 1.4 : Effet piézoélectrique faisant apparaitre le composant condensateur.....	9
Figure 1.5 : Moment dipolaire	10
Figure 1.6 : Principe de base du fonctionnement d'un dispositif de récupération d'énergie basé sur le rayonnement nucléaire utilisant un transducteur piézoélectrique.....	10
Figure 1.7 : Structure a deux dimensions étudiée dans le cadre de ce travail.....	11
Figure 1.8 : Système d'axe pour repérer le matériau piézoélectrique.....	12
Figure 2.1 : Interface graphique au lancement du logiciel Comsol.....	18
Figure 2.2 : Icones de modélisation de la structure.....	19
Figure 2.3 : Icône du choix de l'espace dimensionnel de travail.....	19
Figure 2.4 : L'icône géométrie et son menu déroulant	20
Figure 2.5 : Icône du choix du matériau	20
Figure 2.6 : (a) Type de maillage , (b) Maillage adopte, triangle libre de taille normale.....	21
Figure 2.7 : Choix de l'étude physique appropriée au problème pose.....	22
Figure 2.8 : Choix de l'étude.....	23
Figure 2.9 : Structure micrométrique simulée.....	23

Figure 2.10 : Menu déroulant de la physique électromécanique.....	24
Figure 3.1 : Effet condensateur Collecteur – Radio-isotope.....	28
Figure 3.2 : Fléchissement de la poutre et du matériau piézoélectrique.....	28
Figure 3.3 : Trace des déplacements avec fléchissement du collecteur et du piézoélectrique	29
Figure 3.4 : Trace des déplacement du collecteur et du piézoélectrique pour une longueur du piézoélectrique de 50 μm en fonction du potentiel électrique.....	30
Figure 3.5 : Fléchissement du matériau ZnO en fonction du potentiel électrique pour des longueurs de 50 à 200 μm	31
Figure 3.6 : Fléchissement du matériau PZT-5J en fonction du potentiel électrique pour des longueurs de 50 à 200 μm	32
Figure 3.7 : Force de fléchissement du matériau piézoélectrique (ZnO) en fonction du potentiel Source-Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.....	34
Figure 3.8 : Force de fléchissement du matériau piézoélectrique (PZT-5J) en fonction du potentiel Source-Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.....	35
Figure 3.9 : Potentiel du matériau piézoélectrique (ZnO) en fonction du potentiel Source- Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.....	36
Figure 3.10 : Potentiel du matériau piézoélectrique (PZT-5J) en fonction du potentiel Source- Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.....	36

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Radio-isotopes émetteurs bêta, la dernière colonne est la plage estimée de pénétration des électrons dans le cuivre.....5

Tableau 1.2 : Potentiel et nombre de particules de quelques radio-isotopese.....8

Tableau 1.3 : Définitions des grandeurs utilisées dans les équations sensorielles de l'effet piézoélectrique.....14

Tableau 1.4 : Caractéristiques des matériaux piézoélectrique ZnO et PZT5J.....15

Les matériaux piézoélectriques ont montré la capacité de convertir des forces mécaniques en un champ électrique en réponse à l'application de contraintes mécaniques ou vice versa. Cette propriété des matériaux à trouver des applications étendues dans une vaste gamme de domaines.

L'origine des forces mécaniques, sur les matériaux piézoélectriques, sont multiples selon les applications. Dans le cadre de notre travail l'origine est un matériau radio-isotope émetteur de radioactivité bêta moins. On associe la source radioactive à un matériau dont le rôle est de collecter les charges beta moins. Cette association, permet par l'intermédiaire, de la théorie électrostatique, des lois de la mécanique classique et des lois de la piézoélectricité de donner naissance à des phénomènes nous permettant de créer des déplacements de matériaux (déflexion de matériaux sous formes de poutres) et de générer des potentiels électriques (caractéristiques des matériaux piézoélectriques). Ces phénomènes sont utilisés pour des applications spécifiques telles que les transducteurs (actionneurs). L'actionneur (qui ne fait pas l'objet de ce travail) associé à un circuit électrique ou électronique (circuit sonore ou affichage numérique) peut être utilisé comme détecteur d'éléments radioactifs. La réalisation de batteries dont la taille est minimisée et la longévité élevée est de nos jours très répandue. Ces types de batteries sont utilisés dans les applications spatiales ainsi que dans le domaine médical grâce à une activité de source radioactive non néfaste sur les organes humains.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons décrire les radio-isotopes et leurs propriétés. Nous détaillerons par la suite la piézoélectricité et les propriétés d'un matériau piézoélectrique. Le modèle micrométrique utilisé est ensuite exposé permettant ainsi de détailler le mode de fonctionnement de la structure utilisée et les paramètres à simuler.

Le deuxième chapitre est consacré à la construction de la structure micrométrique modélisée. Toutes les étapes, sous le logiciel Comsol, sont exposées. Ces étapes sont les clarifications de l'édification géométrique de la structure, les modules physiques utilisés par Comsol et servant de base théorique à la résolution de toutes les équations régissant le comportement de la structure et le type d'étude utilisée pour aboutir à la simulation des paramètres désirés.

Le troisième chapitre regroupe les résultats et les analyses de la simulation comprenant les résultats relatifs aux matériaux piézoélectriques utilisés dans le cadre de ce travail tel que l'oxyde de zinc (ZnO) et le matériau piézoélectrique de type PZT-5J, tous deux disponibles dans la bibliothèque des matériaux du Comsol.

Une conclusion générale permettant de caractériser les paramètres importants de la structure micrométrique suite aux résultats de la simulation.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and rounded corners. The scroll is partially unrolled, with the top and bottom edges curving upwards. The text is centered within the scroll.

Chapitre I

Généralité sur les radio-isotopes et la piézoélectricité.

1.1 Introduction

Dans ce chapitre les radio-isotopes émetteurs de particules bêta moins seront abordés. Suivra alors la notion de piézoélectricité qui sera expliquée. La structure micrométrique sera schématisée pour caractériser les différentes lois électriques et physiques qui nous permettent d'étudier la structure.

1.2 Les radio-isotopes

1.2.1 Définition des radio-isotopes

De nombreux éléments trouvés sur terre existent dans différentes configurations atomiques et sont appelés isotopes qui ont le même numéro atomique mais diffèrent par leur masse atomique. Ces éléments instables se désintègrent par émission d'énergie, de tels isotopes, qui émettent des rayonnements, sont appelés radio-isotopes [1]

1.2.2 La radioactivité bêta moins

Le rayonnement bêta moins est constitué d'un électron chargé négativement. Certains atomes dont les noyaux sont trop chargés en neutrons émettent un rayonnement bêta moins. Un des neutrons au sein du noyau se désintègre en un proton plus un électron, ce dernier étant éjecté. Ainsi l'atome s'est transformé en un autre élément chimique (figure 1.1)

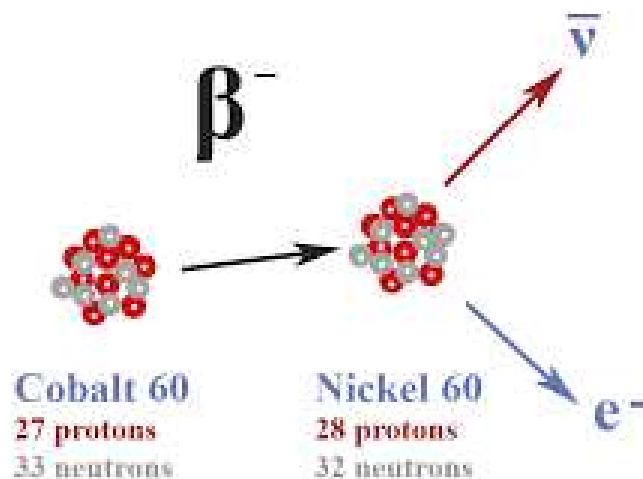


Figure 1.1 : Désintégration bêta moins du Cobalt 60. [2]

L'illustration présentée en figure 1.1, montre un noyau de cobalt 60, qui contient 33 neutrons (en gris) et 27 protons (en rouge), il présente un excès de 6 neutrons. Un neutron va se transformer en proton. Le noyau de cobalt 60 devient plus stable et se transforme en nickel 60 ($^{60}\text{Ni}^+$) avec 28 protons (1 de plus) et 32 neutrons (1 de moins), mais toujours 60 nucléons. Lors de la désintégration, deux particules sont créées, un électron et un antineutrino électronique.

1.2.3 Propriétés physiques de quelques éléments radio-isotopes

Chaque radio-isotope possède des propriétés spécifiques que nous retrouvons dans le tableau 1.1, ci-dessous [3-4]. Les radio-isotopes possèdent des caractéristiques telles que l'énergie cinétique des particules émises lors de la désintégration, la demi-vie de l'élément lui-même, l'activité spécifique (vitesse de désintégration par seconde) par unité de masse, l'activité densité volumique et la portée des particules émises (dans le cuivre comme matériau collecteur de charges négatives).

Dans le cadre du type de structure utilisée dans notre travail et pour une capture de charge optimale (nombre maximum d'électrons), on choisit un matériau avec une faible profondeur d'absorption ou des isotopes à faible énergie électronique.

Selon le tableau, le nickel et le ruthénium sont de bons candidats pour les poutres minces utilisées dans les structures micrométriques.

Radioisotope	Average energy (KeV)	Half life (Year)	Specific activity (g/mCi)	Activity Volume density (mCi/ μm^3)	Estimated range in copper (mm)
^{63}Ni	17.4	100.2	1.763×10^{-3}	5.06×10^{-7}	14
^{32}Si	68.8	170.1	1.543×10^{-3}	1.15×10^{-7}	107
^{90}Sr	195.8	28.8	7.25×10^{-8}	3.50×10^{-7}	332
^{106}Ru	10.03	1.06	3.03×10^{-7}	4.08×10^{-7}	5
^{32}P	694.9	0.04	3.50×10^{-9}	5.20×10^{-7}	1344

Tableau 1.1 : Radio-isotopes émetteurs bêta, la dernière colonne est la plage estimée de pénétration des électrons dans le cuivre. [5]

1.2.4 Phénomène électrostatique entre l'émetteur beta moins et le matériau collecteur de charges électrons

Dans le cadre de notre étude l'élément radio-isotope est considéré comme étant une source générant des charges négatives (les électrons). Ces charges sont collectées par un matériau collecteur de charge, la poutre dans le cas illustré en figure 1.2.

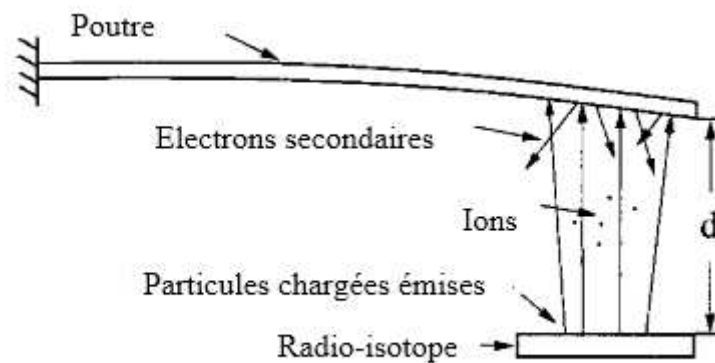


Figure 1.2 : Schéma de principe de la collecte de charge. [4]

L'illustration en figure 1.3, représente le principe de fonctionnement du phénomène sous l'effet des forces électrostatiques qui sont générées. C'est l'effet électrique de l'existence d'un composant électrique qui est le condensateur de capacité C. Le condensateur existe car la structure ainsi formée représente deux matériaux se trouvant dans un milieu de coefficient diélectrique ϵ (ici l'air), de charges électriques opposées et séparés par une distance d.

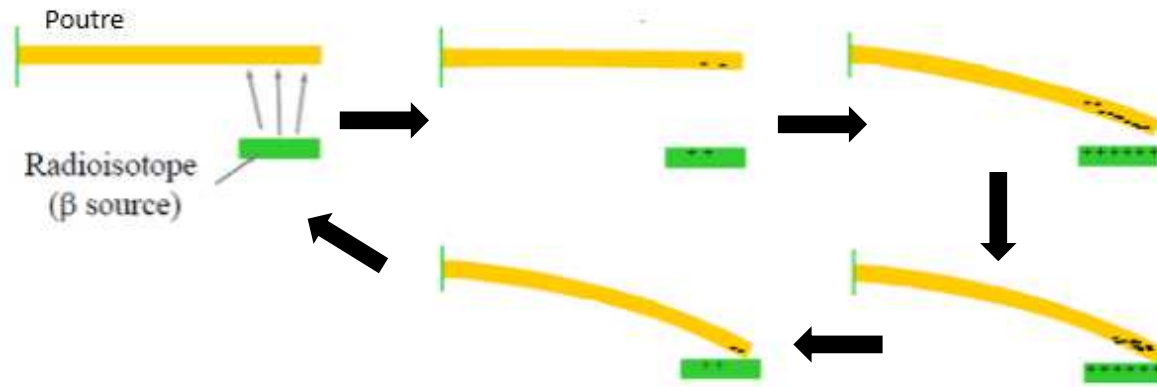


Figure 1.3 : Principe de fonctionnement du phénomène entre un radio-isotope et un collecteur de charge. [6]

Le radio-isotope produit des charges (électrons) sont collectés par le cantilever ancré. Les charges positives sont laissées dans la source en raison de la conservation de la charge. Au fur et à mesure que de plus en plus de charges collecté, la force électrostatique devient plus grande et tire le porte-à-faux vers le radio-isotope. Finalement, le porte-à-faux entre en contact avec la source .Des charges sont neutralisées par transfert de charge, La force électrostatique devient presque zéro car la plupart des charges sont neutralisées. La force de ressort du cantilever le rétracte dans sa position initiale et un nouveau cycle commence.

1.2.5 Formulation électrique du phénomène

Le phénomène est régi par les équations électrostatiques [4] tel que :

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (1.1)$$

$$C = \frac{\epsilon_0 * S}{e} \quad (1.2)$$

$$V = \sqrt{\frac{2E e}{\epsilon_0 * S}} \quad (1.3)$$

Avec :

E : énergie du radio-isotope, ϵ_0 : permittivite du vide, S : la surface de collecteur, e la distance entre le radio-isotope et le collecteur.

Le potentiel V aux bornes du condensateur ainsi formé s'exprime aussi en fonction de la charge électrique q, par l'équation :

$$V = \frac{q}{4\pi r \epsilon_0} \quad \Longrightarrow \quad q = 4\pi r \epsilon V \quad (1.4)$$

Avec :

q: la charge des électrons

r: distance entre le radio-isotope et le matériau conducteur (le collecteur).

Dans le cas de notre travail et avec les conditions de travail suivantes :

$$e = r = 2\mu\text{m}$$

Matériau conducteur de longueur 60 μm et de largeur 2 μm

On a les potentiels et le nombre des charges (particules béta moins) listes dans le tableau 1.2 suivant :

Radio-isotope	Energie (keV)	Potentiel (V)	nombre des particules
63Ni	17,3	3,228142196	4485,342175
63 Ni	67	6,352826674	8826,935022
32Si	68,8	6,437597568	8944,719941
90Sr	195,8	10,86015313	15089,63977
106Ru	10,03	2,457989773	3415,253891
32P	694,9	20,45929955	28427,17376

Tableau 1.2 : Potentiel et nombre de particules de quelques radio-isotopes .

1.3 La piézoélectricité

1.3.1 Définition de l'effet piézoélectrique

L'effet piézoélectrique résulte d'un déplacement des atomes (chargés positivement ou négativement) à l'intérieur de certains solides déformables (matériaux piézoélectriques), qui présentent des structures cristallines particulières (on parle de cristal piézoélectrique) ne présentant pas de centre de symétrie.

a/ A l'échelle macroscopique

L'effet piézoélectrique peut être considéré à l'échelle macroscopique comme une polarisation électrique d'un solide (3D) déformable, sous l'effet de forces appliquées sur sa surface (et en particulier de pression).

Si les faces du solide sont métallisées on peut ramener le problème à un condensateur plan (figure 1.4) au sein duquel on voit "apparaître" des charges lorsque des forces sont appliquées sur le solide [7]. Cet effet est nommé effet direct.

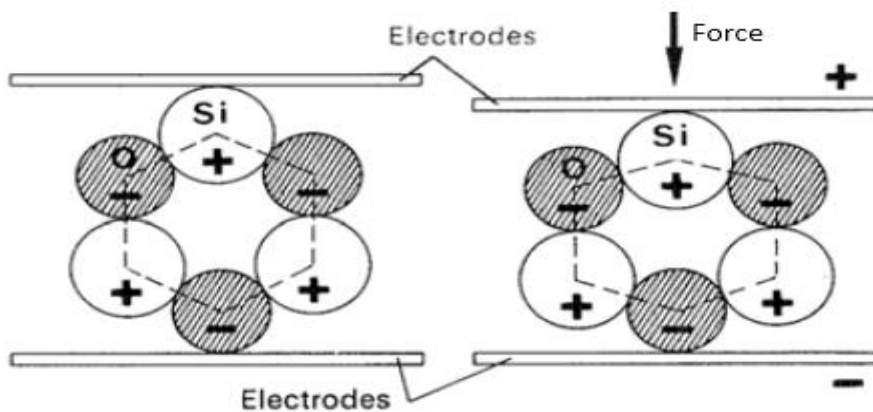


Figure 1.4 : Effet piézoélectrique faisant apparaître le composant condensateur.

Réciproquement, si on applique une tension sur les faces du "condensateur", on voit apparaître un champ électrique à l'intérieur du matériau.

Ce champ sépare les barycentres des charges positives et négatives présentes à l'intérieur du matériau, ce qui peut se traduire soit par une déformation du matériau (si le matériau est libre de se déformer), soit par l'apparition d'une force (si on empêche le matériau de se déformer). Cet effet est nommé l'effet inverse.

a/ A l'échelle microscopique

L'effet piézoélectrique peut être considéré à l'échelle microscopique comme un déplacement interne du barycentre des charges électriques positives et du barycentre des charges électriques négatives dans une même structure cristalline, lorsque tous les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres sous l'effet d'une déformation du cristal.

Lorsque ces barycentres de charges positives et négatives sont distincts, il y a polarisation (électrique) du cristal, qui se traduit par un moment dipolaire $p = q.l$, où q est la charge et l la distance séparant les deux charges (figure 1.5)

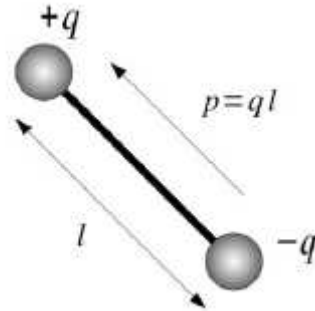


Figure 1.5 : Moment dipolaire.

1.3.2 Application de la piézoélectricité dans le cadre de ce travail

L'illustration en figure 1.6, nous permet de distinguer une partie de la structure déjà exposée et relative aux effets électrostatiques. Lorsque la poutre fixée au collecteur de charges est en phase de fléchissement, le matériau piézoélectrique fixé à la poutre va subir les effets de ces fléchissements et à son tour il se trouve sous l'effet d'une force (de fléchissement aussi). C'est l'effet direct de la piézoélectricité qui apparaît sur le matériau piézoélectrique : une différence de potentiel apparaît sur les faces du matériau (à deux dimensions on parlera de bords du matériau).

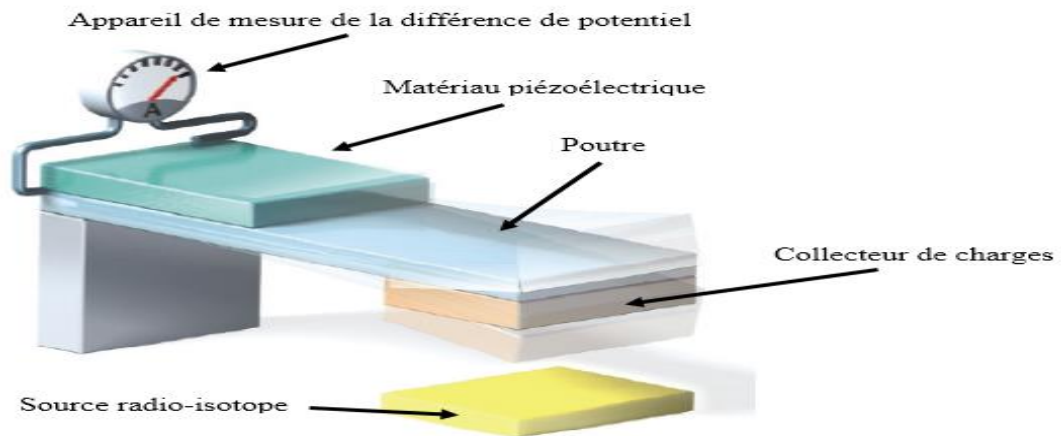


Figure 1.6 : Principe de base du fonctionnement d'un dispositif de récupération d'énergie basé sur le rayonnement nucléaire utilisant un transducteur piézoélectrique. [3]

Dans le cadre de notre application nous avons opté pour la structure illustrée en figure 1.7.

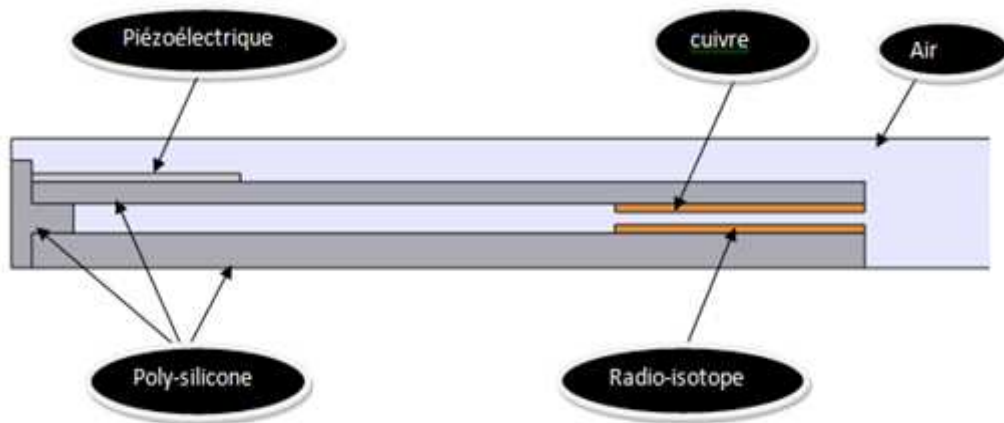


Figure 1.7 : Structure a deux dimensions étudiée dans le cadre de ce travail.

- La poutre supérieure supporte le matériau piézoélectrique. Les deux sont encastrés, à la partie en poly-silicium utilisée en même temps comme support pour ces deux matériaux.
- La poutre inférieure, utilisée comme support de la source radio-isotope, et en calle (ou encastrée) à la partie en poly-silicium servant de support à la poutre supérieure et au matériau piézoélectrique.
- Le collecteur de charges électriques en provenance de la source radio-isotope est en cuivre. Il est fixé sur la face inférieure de la poutre supérieure.

a/ Principe de fonctionnement

- La source radio-isotope émet de charges négatives vers le collecteur qui les récupère.
- Nous sommes en présence d'un matériau chargé sur sa face inférieure de charges négatives et d'une source radio-isotope appauvrie sur sa face supérieure en charges, elle est maintenant chargée positivement.
- Le phénomène d'existence d'un composant condensateur existe.
- A un instant donné, une force d'attraction naît, et le collecteur est attiré vers la source radio-isotope : il y a fléchissement de la poutre supérieure.
- Le fléchissement de la poutre supérieure induit, lorsque la force d'attraction augmente, un fléchissement du matériau piézoélectrique : c'est l'effet direct, il y a existence d'une différence de potentiel entre les faces du matériau piézoélectrique.

b/ Objectifs de la conception

Dans le cadre de ce travail il s'agit d'observer ce phénomène sous simulation, de « mesurer » les déplacements et la différence de potentielle au niveau du piézoélectrique.

1.3.3 Théorie simplifiée de la piézoélectricité.

L'effet piézoélectrique peut s'avérer relativement complexe, faisant intervenir des tenseurs de couplage, déformation / champ électrique, d'ordres élevés.

a/ Les équations sensorielles du phénomène

- En premier lieu, il convient de définir un système d'axes (figure 1.8), pour repérer le matériau piézoélectrique [8] :

par convention, l'axe de polarisation est dirigé selon l'axe 3 (ou z). Conformément à la norme IEEE « IEEE Standard of Piezoelectricity », on définit un trièdre de référence orthogonal Oxyz.

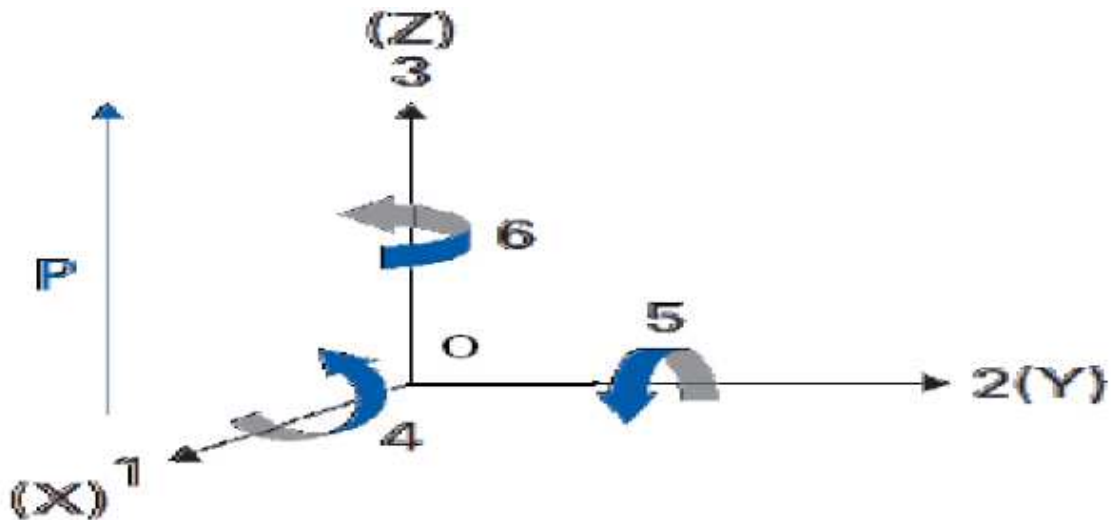


Figure 1.8 : Système d'axe pour repérer le matériau piézoélectrique.

- En deuxième lieu, écrire les équations de couplage.

Quatre couples de variables indépendantes (T et D, S et D, E et T, E et S) représentent les équations d'état d'un matériau piézoélectrique. Les exposants E, D, T, S signifient respectivement :

E : Champ électrique constant

D : Déplacement électrique

T : Contrainte mécanique

S : Déformation mécanique

Les équations couplées s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} T_\alpha = c_{\alpha\beta}^E S_\beta - e_{i\alpha} E_i & (1.5) \\ D_i = \varepsilon_{ij}^S E_j + e_{i\alpha} S_\alpha & (1.6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} S_\alpha = s_{\alpha\beta}^E T_\beta + d_{i\alpha} E_i & (1.7) \\ D_i = \varepsilon_{ij}^T E_j + d_{i\alpha} T_\alpha & (1.8) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_i = \beta_{ij}^S D_j - h_{i\alpha} S_\alpha & (1.9) \\ T_\alpha = c_{\alpha\beta}^D S_\beta - h_{i\alpha} D_i & (1.10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_i = \beta_{ij}^T D_j - g_{i\alpha} T_\alpha & (1.11) \\ S_\alpha = s_{\alpha\beta}^D T_\beta + g_{i\alpha} D_i & (1.12) \end{cases}$$

Les constantes piézoélectriques (caractéristiques du matériau) vérifient entre elles les relations suivantes :

$$d_{\alpha\beta} = \varepsilon_{ij}^T g_{i\beta} = \varepsilon_{j\alpha}^T s_{\alpha\beta}^E \quad (1.13)$$

$$e_{j\beta} = \varepsilon_{ij}^S h_{i\beta} = d_{j\alpha} c_{ij}^E \quad (1.15)$$

$$g_{j\beta} = \beta_{ij}^T d_{i\beta} = h_{j\alpha} s_{\alpha\beta}^D \quad (1.14)$$

$$h_{\alpha\beta} = \beta_{ij}^S e_{i\beta} = g_{j\alpha} c_{\alpha\beta}^D \quad (1.16)$$

Les indices (i, j, k = 1, 2, 3) et les ($\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) désignent les composantes des différentes grandeurs suivant les trois axes orthogonaux du système d'axes.

Le tableau 1.3, ci-bas résume les définitions des grandeurs utilisées dans les équations précédentes.

Grandeurs physiques	Symboles	Unités	Tenseurs
Déplacement électrique	D	[C/m ²]	3×1
Champ électrique	E	[V/m]	3×1
Contrainte mécanique	T	[N/m ²]	6×1
Déformation mécanique	S	[m/m]	6×1
Permittivité diélectrique	ϵ	[F/m]	3×3
Imperméabilité diélectrique	β	[m/F]	3×3
Rigidité élastique	c	[N/m ²]	6×6
Compliance élastique	s	[m ² /N]	6×6
Coefficients traduisant la proportionnalité entre :	Symboles	Unités	Tenseurs
Charge et contrainte	d	[m/V]	3×6
Charge et déformation	e	[N/Vm]	3×6
Déformation et champ électrique	h	[V/m]	3×6
Contrainte et champ électrique	g	[Vm/N]	3×6

Tableau 1.3 : Définitions des grandeurs utilisées dans les équations sensorielles de l'effet piézoélectrique.

Nous remarquons bien à travers cet ensemble d'équations la complexité de ce phénomène. Dans le cadre de notre travail et en utilisant le logiciel de simulation Comsol, ce dernier prend en « charge » lui-même cette complexité pour résoudre le problème. L'utilisateur en spécifiant, au logiciel, le phénomène physique utilisé, permet à ce dernier par l'intermédiaire de sa bibliothèque de trouver les équations et de les traiter facilitant ainsi la tâche à l'utilisateur.

1.3.4 Caractéristiques piézoélectriques des matériaux utilisés dans le contexte de ce travail

Dans ce mémoire nous nous intéressons à deux matériaux de piézoélectriques, dont les caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 1.4 suivant :

Caractéristique / Matériau	PZT5J	Zinc Oxyde
Permittivité relative	{1641.3, 1641.3, 1143}	{8.5446, 8.5446, 10.204}
Masse volumique [kg/m ³]	7400	5680
Module d'Young [Pa]	$5.5 \cdot 10^{10}$	$113.23 \cdot 10^9$
Coefficient de Poisson	0.31	0.3544

Tableau 1.4 : Caractéristiques des matériaux piézoélectrique ZnO et PZT5J.

Ces caractéristiques sont utilisées dans les équations mécaniques (module d'Young, coefficient de Poisson et masse volumique) et dans les équations électriques (permittivité relative).

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left side and rounded corners at the top and bottom. The text is centered within this border.

Chapitre II

Modélisation par logiciel COMSOL Multiphysics

2.1 Introduction

La construction et l'étude de la structure exposée au chapitre précédent, figure 1.7, vont être clarifiées dans ce chapitre. Le logiciel de simulation utilisé dans ce contexte est le Comsol Multi-physics. C'est un logiciel de simulation de haut niveau utilisé dans tous les domaines physiques d'où l'appellation multi-physics [9].

2.2 Brève introduction au logiciel de simulation Comsol

COMSOL Multiphysics 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.

Avec ce logiciel on va donc exécuter un programme informatique sur un ordinateur en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe (c'est la simulation numérique). La méthode utilisée est nommée méthodes des éléments finis (MEF, ou FEM pour *finite element method* en anglais), elle sert à résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques.

La méthode des éléments finis [10], fait partie des outils de mathématiques appliquées. Il s'agit de mettre en place, à l'aide des principes hérités de la formulation variationnelle ou formulation faible, un algorithme discret mathématique permettant de rechercher une solution approchée d'une équation aux dérivées partielles (ou EDP) sur un domaine compact avec conditions aux bords et/ou dans l'intérieur du compact. On parle couramment de conditions de type Dirichlet (valeurs aux bords) ou Neumann (gradients aux bords) ou de Robin (relation gradient/valeurs sur le bord).

2.2.1 Interface du logiciel Comsol

La figure 2.1, illustre l'interface de travail au lancement du logiciel Comsol. Quelques explications, non exhaustives sont ajoutées.

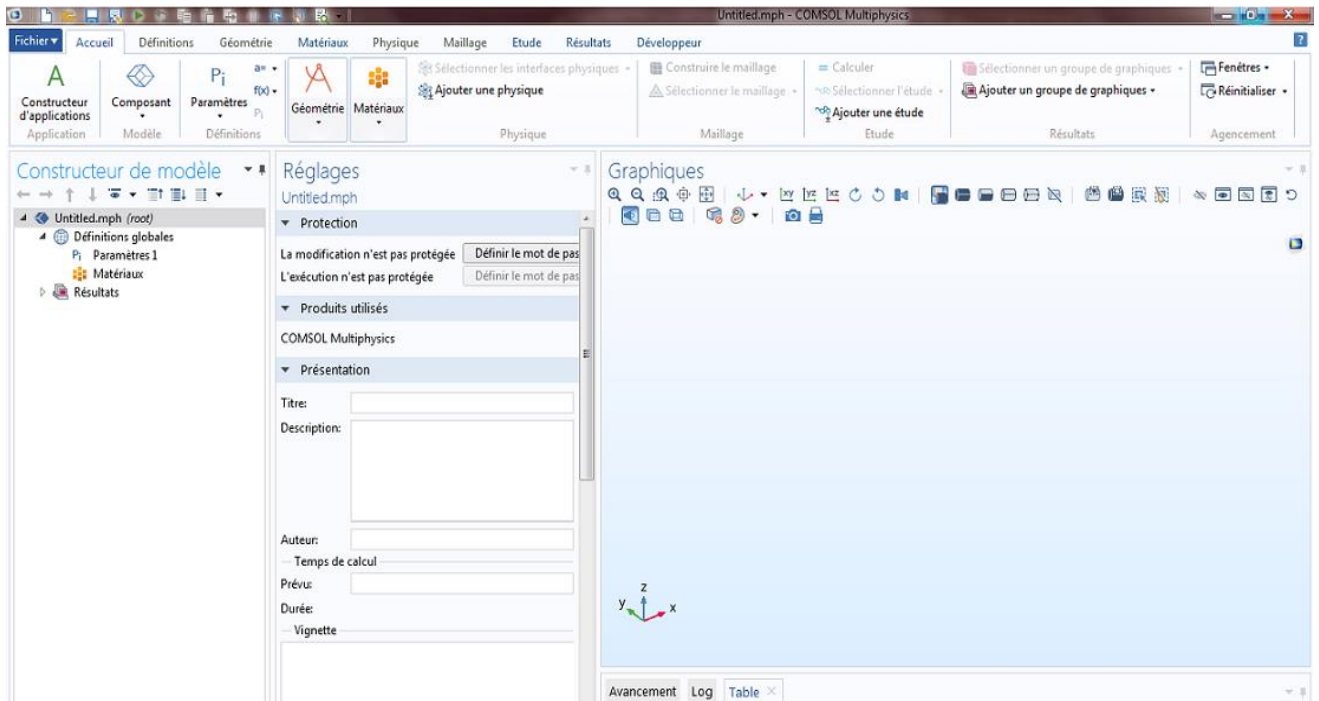


Figure 2.1 : Interface graphique au lancement du logiciel Comsol.

- Une fenêtre Constructeur du modèle qui permet de construire le modèle dans les domaines géométrique (structure), physique (équations de traitement du modèle), matériau (matériaux utilisés pour la structure), maillage (type de découpage de l'espace servant à affiner la solution du problème considéré) et étude (type d'étude choisie pour le traitement et l'établissement des résultats).

- Une fenêtre de réglages où apparaissent toutes les initialisations correspondantes à l'état apparaissant dans la fenêtre de construction du modèle.

- Une fenêtre graphique où apparaît la géométrie édifiée par l'utilisateur, le maillage choisi, les résultats (phénomènes physiques, trace de courbe, résultats).

Un zoom sur la partie supérieure de l'interface fait apparaître un ensemble d'icônes (figure 2.2) qui correspondent aux actions suivantes :



Figure 2.2 : Icones de modélisation de la structure.

- L'icône composant permet de choisir l'espace de travail une dimension (x), deux dimensions (x,y) et trois dimensions (x,y,z). Son menu déroulant est comme suit (figure 2.3) :



Figure 2.3 : Icône du choix de l'espace dimensionnel de travail.

Dans le cadre de ce travail le choix s'est porté sur une structure à deux dimensions (2D).

- L'icône géométrie permet d'utiliser un ensemble de formes géométriques, pour la construction de la structure étudiée. Elle prend forme au niveau de la fenêtre constructrice du modèle une fois l'espace de travail sélectionné (figure 2.4). Son menu déroulant contient l'ensemble des figures géométriques utilisées pour la construction.

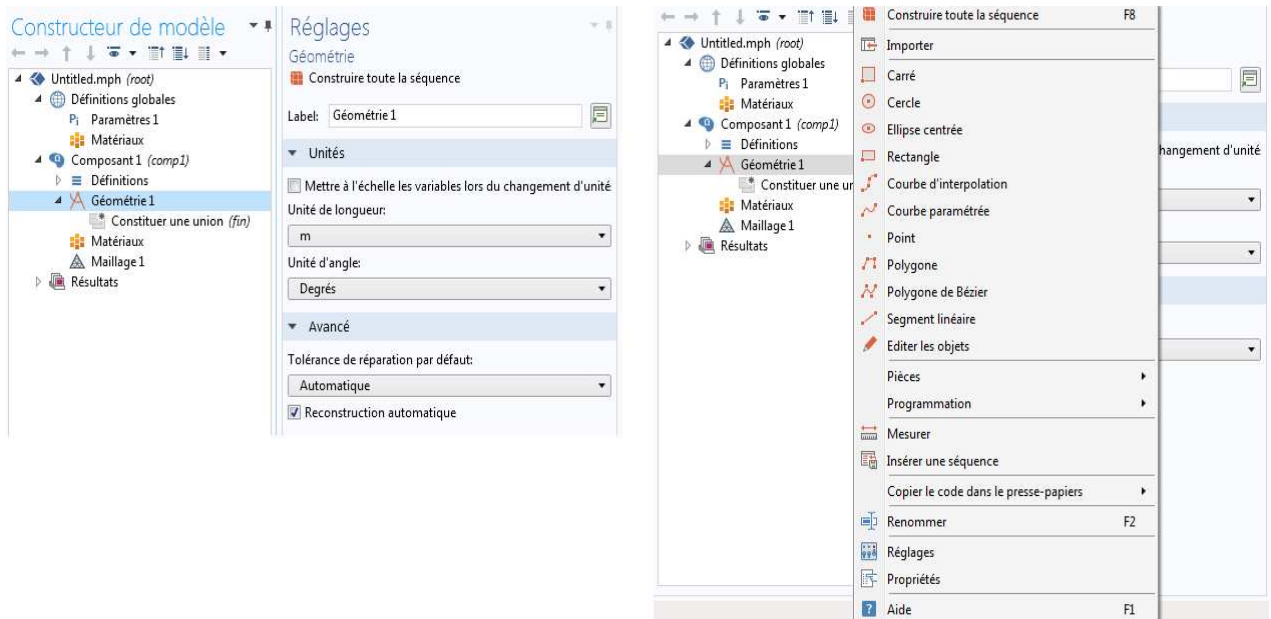


Figure 2.4 : L'icône géométrie et son menu déroulant.

- L'icône matériau, qui apparaît au niveau de la fenêtre de constructeur du modèle lorsque l'espace de travail est sélectionnée permet de choisir le matériau formant les différentes parties de la structure. Le Comsol possède une bibliothèque intégrée que l'utilisateur pourra utiliser pour ce choix (figure 2.5). Il existe aussi un choix de matériau par spécification du domaine physique.

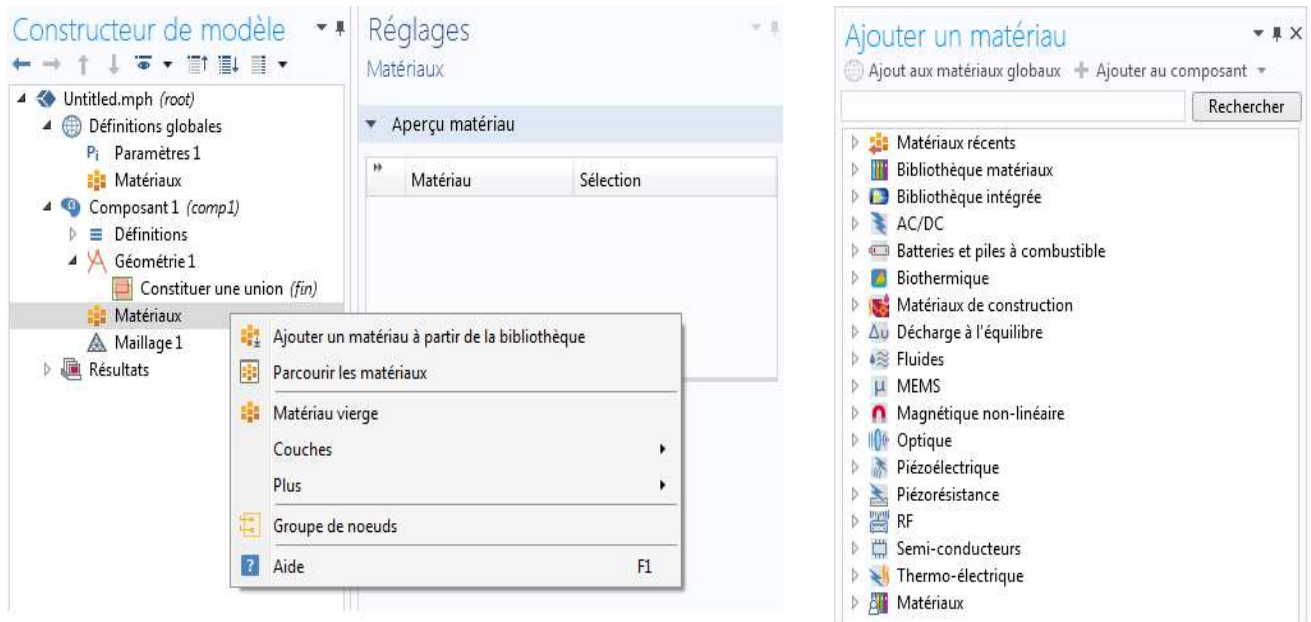


Figure 2.5 : Icône du choix du matériau.

- L'icône Maillage qui apparaît aussi lors de la sélection de l'espace de travail, dans la fenêtre constructrice du modèle, permet le choix du maillage à utiliser (figure 2.6a). On rappelle que le maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques [11]. La figure 2.6b (l'image de la structure est en mode paysage), illustre la décomposition de l'espace et de la structure par un maillage formé de cellules en triangle libre adopté sur la structure simulée dans le contexte de ce travail. Plus le maillage est affiné plus le temps de calcul pour la résolution des équations différentielles définissant la dynamique de la structure est long, car la précision sur les calculs augmente.

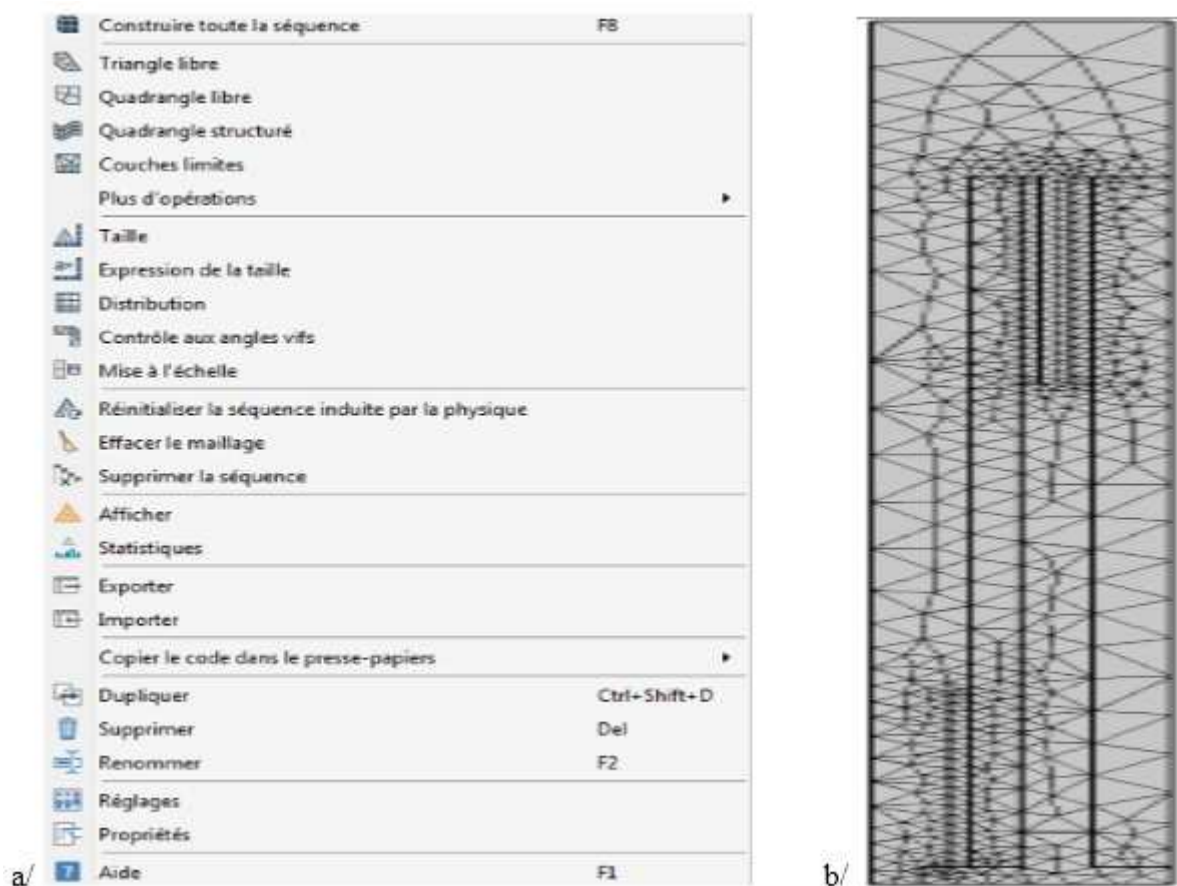


Figure 2.6 : (a) Type de maillage, (b) Maillage adopté, triangle libre de taille normale.

- L'icône Ajouter une physique, permet le choix du domaine physique utilisé pour résoudre le problème posé. Dans le cas de ce travail on est en présence d'une structure, donc on a un élément mécanique (dans le sens d'objet) et on est en présence de phénomènes tant mécaniques (fléchissement, force), qu'électrique (effets électrostatiques). Notre étude doit donc se faire dans le domaine de l'électromécanique. En sélection l'icône ajouter une physique un menu de choix apparait (figure 2.7). L'utilisateur pourra choisir la physique appropriée à son étude dans la panoplie des modules proposés (Acoustique, Transport des espèces, Electrochimie, Transport de chaleur, Optique, Plasma, Radio Fréquence, Semi-conducteur, Mécanique des Structures, Mécanique du solide (solid), Plaque (plate), Poutre (beam), Treillis (truss), Dynamique multicorps (mbd), Système mécanique discret (lms), Thermomécanique, Thermoélasticité, Chauffage par effet Joule et thermodilatation, Poroélasticité, Électromécanique, Électromécanique, éléments de frontière).

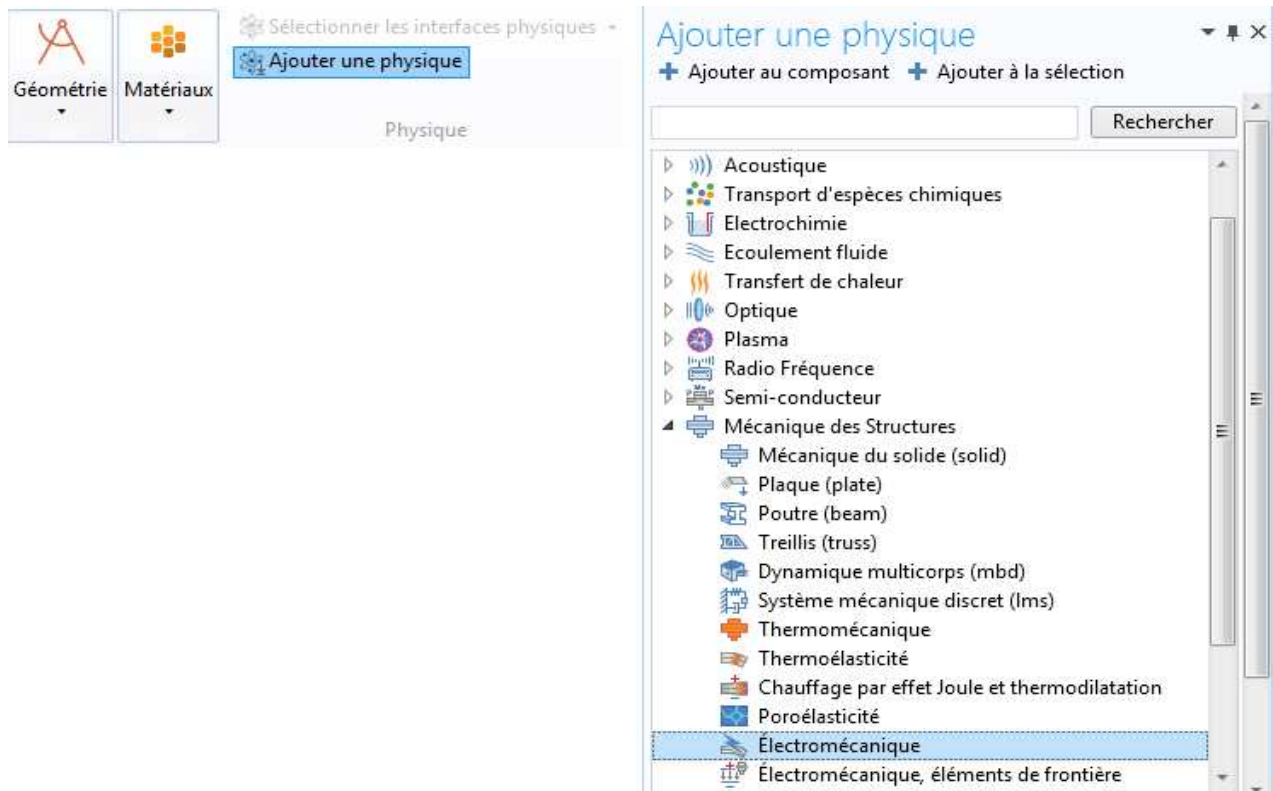


Figure 2.7 : Choix de l'étude physique appropriée au problème posé.

- L'icône Etude permet de sélectionner l'étude envisagée, c'est-à-dire le domaine ou doit se faire la résolution des équations différentielles régissant la dynamique du système posé afin d'avoir les résultats du problème posé (figure 2.8).

Dans le cadre de ce travail l'étude stationnaire a été choisie. Notre objectif étant de simuler le comportement structurel et de faire des mesures sur des grandeurs électriques, cette étude est suffisante.

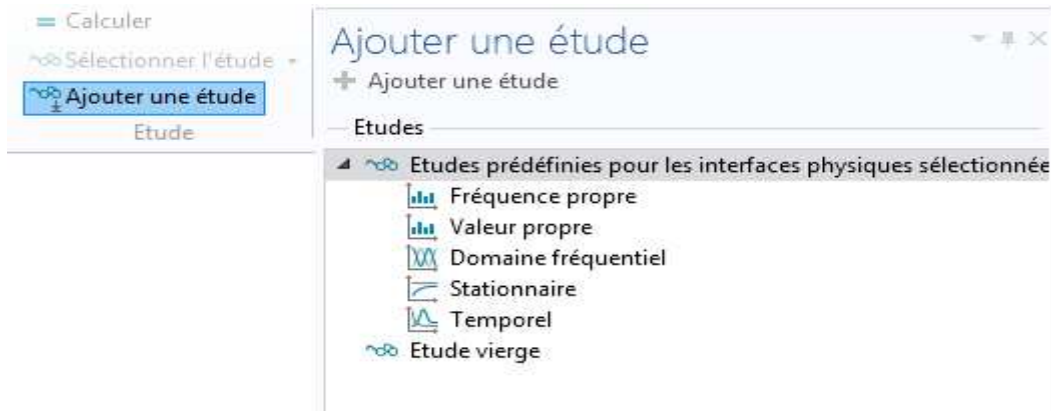


Figure 2.8 : Choix de l'étude 1

2.2.2 Construction de la structure simulée.

La structure simulée est une structure à deux dimensions établie selon des figures géométriques simples qui sont des rectangles. Elle comprend (figure 2.9) :

- La structure « mère » formée d'éléments en poly-silicium (matériau).
- Les éléments représentant la source radio-isotope, le collecteur et le piézoélectrique.

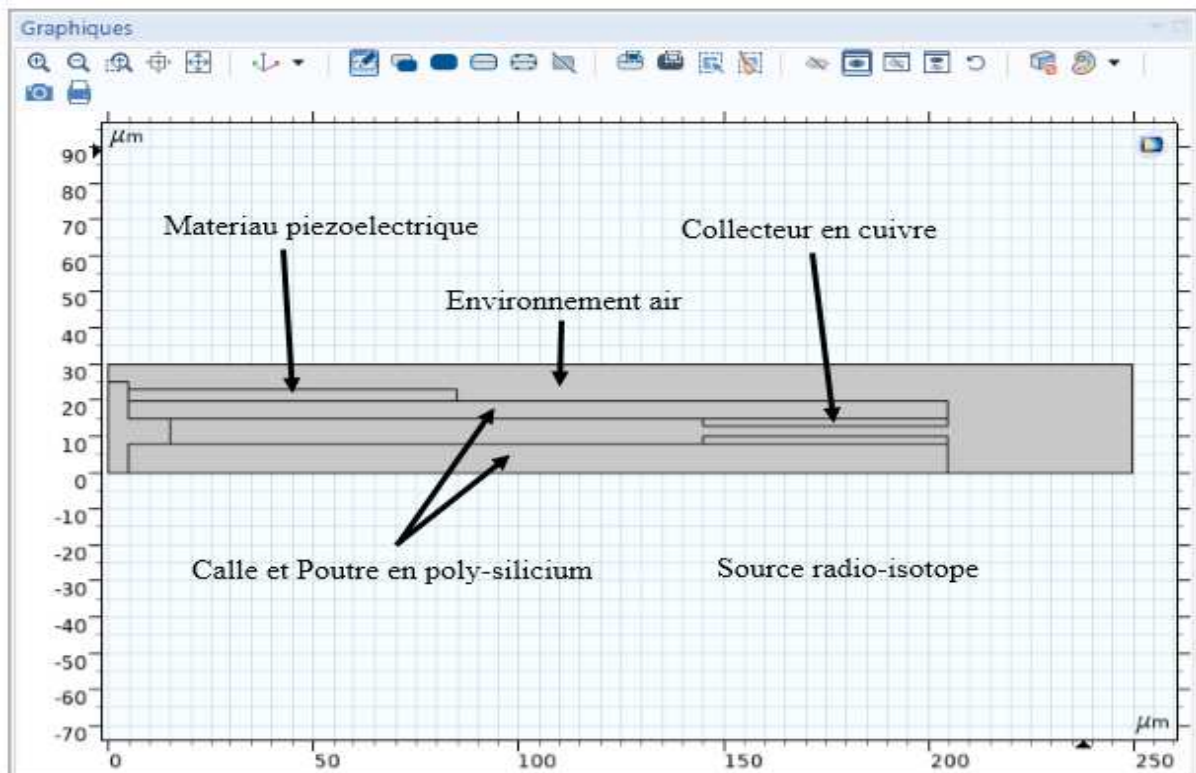


Figure 2.9 : Structure micrométrique simulée.

Le collecteur et la source radio-isotope sont mis « face à face » pour permettre d’avoir une image du composant condensateur dont le diélectrique et l’air.

La calle en poly-silicium sert de calle pour la poutre inferieure et pour la poutre supérieure. Le mouvement de flexion vers le bas.

Le matériau définissant le collecteur ainsi que le radio-isotope sont le cuivre.

Le matériau définissant la structure piézoélectrique est le PZT-5J et l’oxyde de zinc (ZnO). L’étude étant faite sur deux matériaux différents.

2.2.3 Physique choisie pour l’étude de la structure simulée.

La physique utilisée pour l’étude de la structure est l’électromécanique (c’est une physique du module Mécanique des structures). Nous pouvons à travers cette théorie établir (par logiciel) tous les phénomènes mécaniques tels que les déplacements des poutres (sous forme de flexion), les forces qui engendrent ces déplacements. Nous pouvons établir aussi tous les phénomènes électriques relatifs au composant condensateur formé lors de l’interaction radio-isotope-collecteur de charges. La figure 2.10, représente le menu déroulant de la physique choisie. En se basant sur ce menu nous allons clarifier comment cette physique intervient sur la structure.

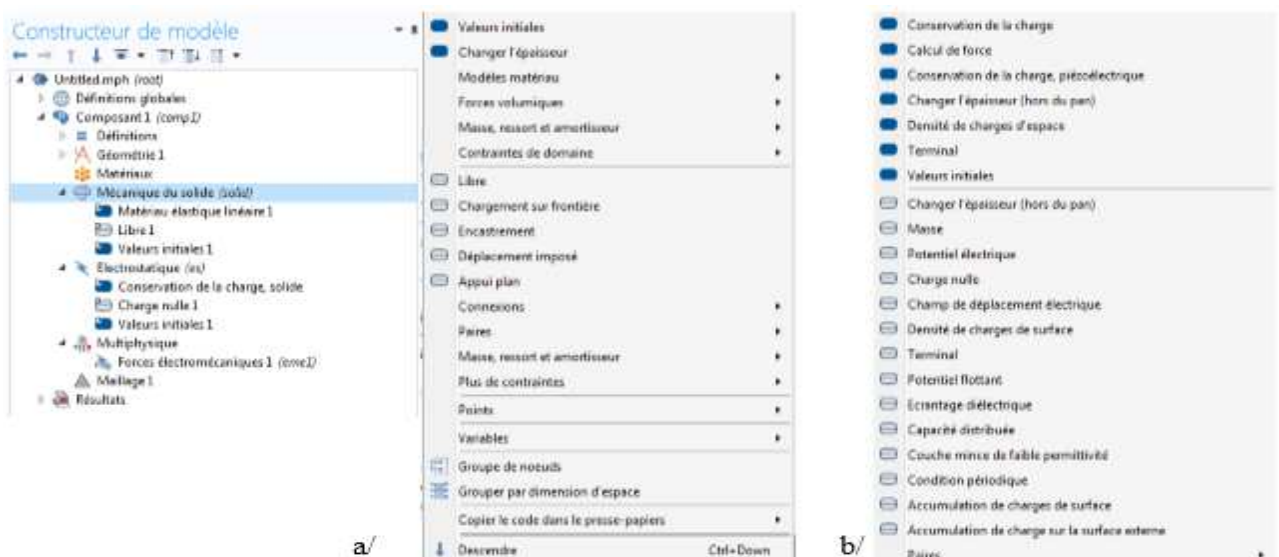


Figure 2.10 : Menu déroulant de la physique électromécanique

a/ Menu déroulant partie mécanique du solide ; b/ Menu déroulant partie Electrostatique.

- La partie mécanique du solide nous permet d'imposer les hypothèses de travail suivantes sur la structure :

a/ Les conditions en limites

* Matériau élastique linéaire : (se trouve en même temps sous le menu déroulant du Modèles matériau), cet état physique s'applique aux parties mobiles (poutre supérieure, collecteur et piézoélectrique)

* Encastrement : cet état physique permet de fixer la poutre supérieure et le piézoélectrique sur la calle (cote haut)

- La partie électrostatique sert comme application de :

* L'effet terminal, sur le collecteur de charges, qui sera caractérisé dans notre application par un potentiel Vdc de valeur continue.

* L'effet masse, sur la partie simulant le radio-isotope. Dans ce cas le potentiel vaut 0 V.

b/ Physique piézoélectrique

Pour l'application de l'effet physique piézoélectrique sur le matériau définissant la structure piézoélectrique on choisit d'ajouter une deuxième étude physique en se basant toujours sur le module Mécaniques des structures dans lequel la « sous physique » Dispositifs piézoélectriques est sélectionnée. L'application de cet état physique (Dispositifs piézoélectriques) nous permettra de faire des mesures (appareillage virtuel) des potentiels apparaissant sur les faces du matériau piézoélectrique lorsqu'il subit des forces de flexion. La notion de potentiel flottant sera utilisée. Cette notion est définie par l'utilisation d'une sonde de mesure (par logiciel) posée sur un point de surface d'où le terme potentiel flottant.

2.2.4 Paramètres de résolution choisis pour l'étude de la structure simulée.

Les résultats qui vont être présentés dans ce travail sont établis dans le cadre d'une étude stationnaire. Les variables présentes dans le phénomène n'étant pas des fonctions du temps.

3.1 Introduction

Ce chapitre comporte tous les résultats trouvés dans le cadre de la simulation de la microstructure proposée. L'objectif étant de pouvoir mesurer les déflexions de la poutre supérieure en poly-silicium et du matériau piézoélectrique (ZnO et PZT-5J) ainsi que les potentiels obtenus sur les faces de ces deux matériaux piézoélectriques. Ces résultats serviront de prédiction sur le matériau à utiliser pour édifier la structure optimale. Pour cela on introduit dans l'étude stationnaire ce qu'on appelle une étude paramétrique utilisée lorsqu'on veut obtenir des résultats pour des paramètres dont les valeurs sont estimées dans une gamme (potentiel(Vdc), longueur des poutres, longueur du matériau piézoélectrique).

3.2 Le modèle simulé

Comme introduction, les figures 3.1 et 3.2 illustrent respectivement la notion de potentiel au niveau du condensateur et la notion de déplacement de la poutre supérieure sous l'effet de la force électrostatique.

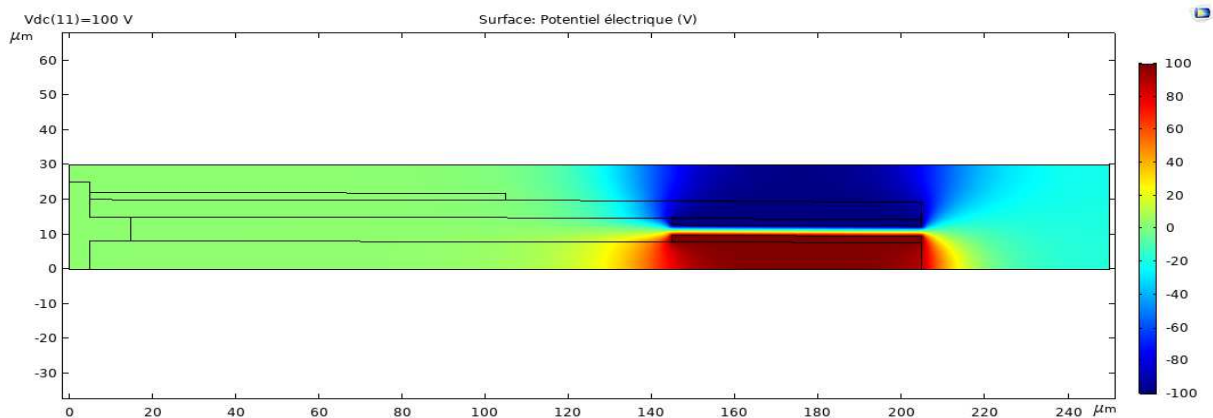


Figure 3.1 : Effet condensateur Collecteur – Radio-isotope 1

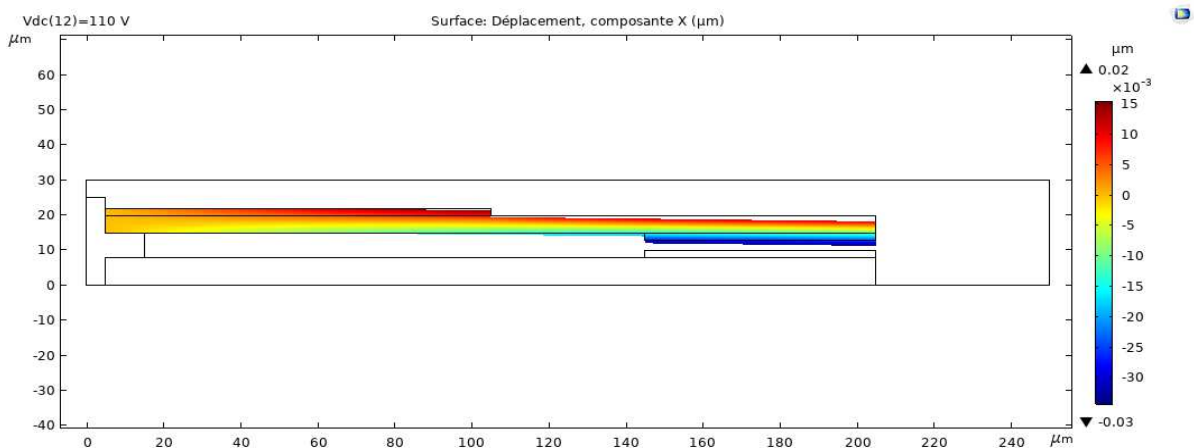


Figure 3.2 : Fléchissement de la poutre et du matériau piézoélectrique

L'illustration en figure 3.1, illustre bien la valeur du potentiel sur le collecteur (potentiel négatif) et la valeur du potentiel sur le radio-isotope (potentiel positif). La référence étant bien entendu la barre des légendes située sur le côté droit de la figure.

L'illustration en figure 3.2, illustre le fléchissement de l'ensemble collecteur plus le matériau piézoélectrique supporté par la poutre supérieure. La force électrostatique est à l'origine de ce déplacement. Les déplacements sont tracés respectivement pour les points extrêmes droit et gauche, de la face inférieure du collecteur et de la face supérieure du piézoélectrique.

La figure 3.3 quant à elle nous permet de voir l'évolution graphique de ces déplacements, pour le collecteur (figure 3.3a) et pour le matériau piézoélectrique (figure 3.3b), dans ce cas le ZnO.

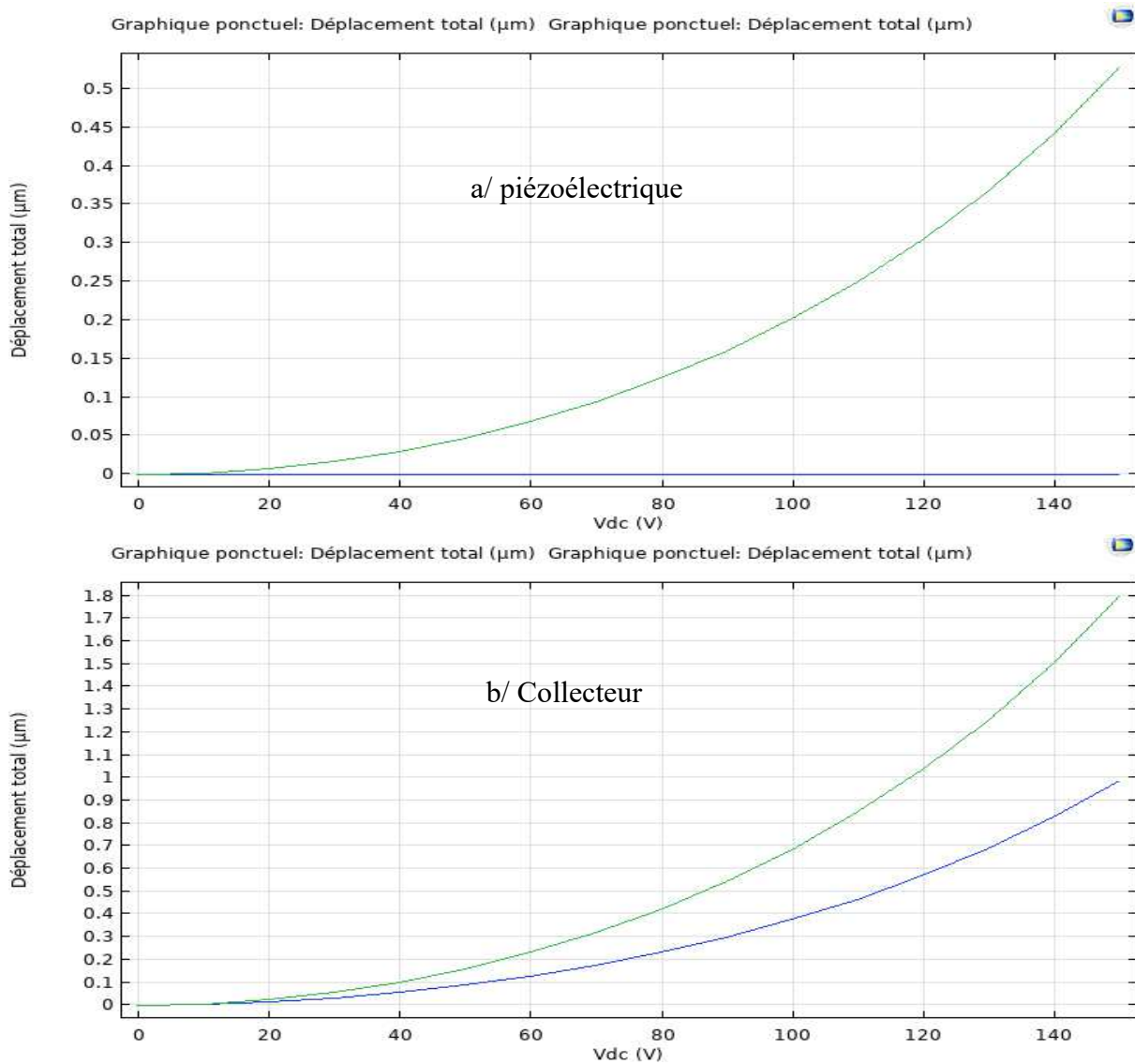


Figure 3.3 : Trace des déplacements avec fléchissement du collecteur et du piézoélectrique.

3.2 Analyse des résultats de simulation

Dans cette partie on utilise la longueur du matériau piézoélectrique comme variable paramétrique. Les longueurs varient de 50 μm à 250 μm par pas de 50 μm . Nous présentons ci bas les résultats obtenus.

3.2.1 Fléchissement du collecteur et du piézoélectrique en fonction du potentiel.

Les figures suivantes représentent le déplacement du collecteur dans le cas où la poutre supporte le piézoélectrique ZnO ensuite le piézoélectrique PZT-5J. Ce déplacement se fait en fonction du potentiel aux bornes du condensateur. La longueur de l'élément piézoélectrique est de 50 μm .

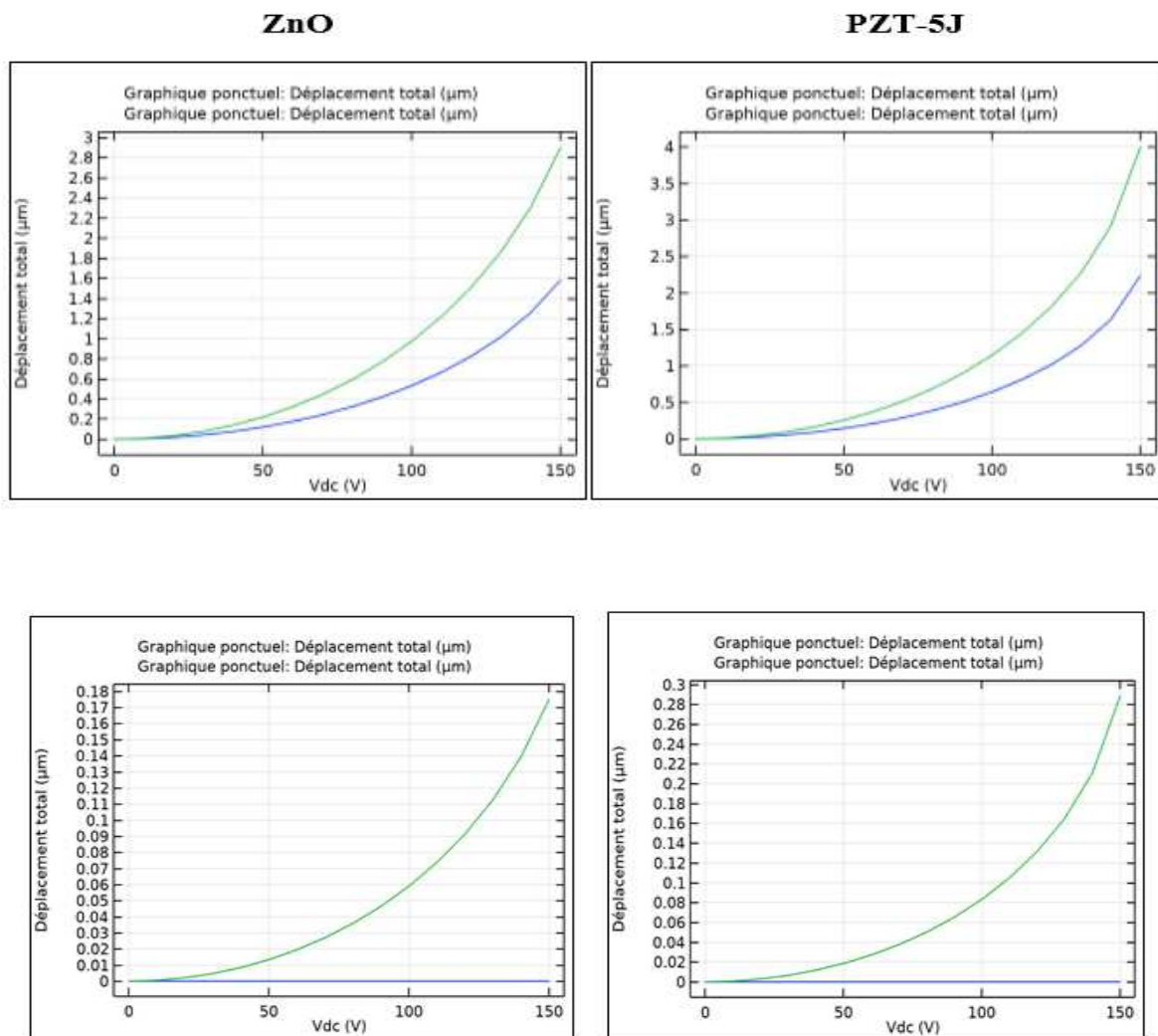


Figure 3.4 : Trace des déplacements avec fléchissement du collecteur et du piézoélectrique pour une longueur du piézoélectrique de 50 μm en fonction du potentiel électrique.

On remarque que le fléchissement est plus élevé lorsque la poutre supporte le matériau PZT-5J. Les caractéristiques mécaniques, et surtout le module d'Young des matériaux, sont la principale cause de cet effet. Le PZT-5J a un module d'Young de $5.5 \cdot 10^{10}$ Pa et le ZnO possède un module d'Young de $11.32 \cdot 10^{10}$ Pa. Comme le module d'Young est par définition, la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau (il doublerait donc de longueur), on estime donc que c'est la cause principale de ce résultat.

3.2.2 Fléchissement du matériau piézoélectrique pour des longueurs de matériaux variables.

Les illustrations en figure 3.5 – 3.6, décrivent les variations des fléchissements du matériau piézoélectrique, pour des longueurs de ce matériau allant de 50 à 200 μm

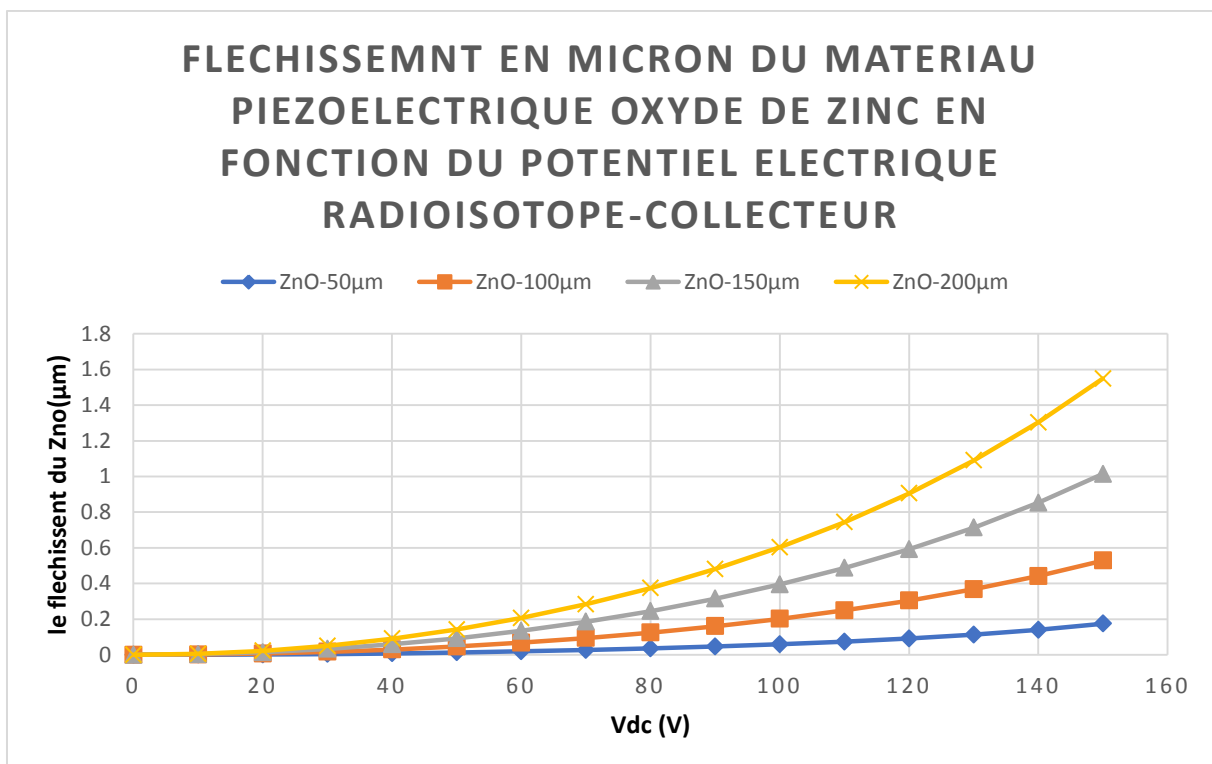


Figure 3.5 : Fléchissement du matériau ZnO en fonction du potentiel électrique pour des longueurs de 50 à 200 μm .

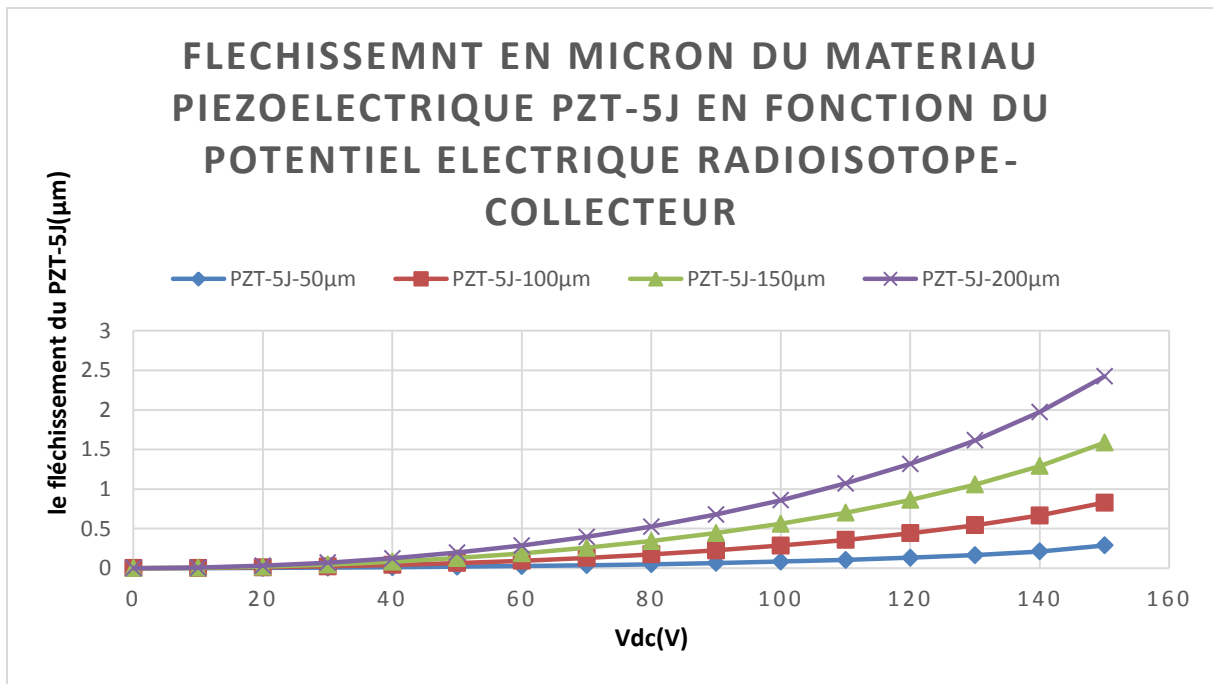


Figure 3.6 : Fléchissement du matériau PZT-5J en fonction du potentiel électrique pour des longueurs de 50 à 200µm.

Le fléchissement du matériau piézoélectrique (PZT-5J) est supérieur à celui du matériau piézoélectrique (ZnO). De plus, plus la longueur du matériau est élevée plus ce fléchissement croît et ces variation à cause des propriétés mécaniques.

Suite à ces résultats nous allons simuler la mesure du potentiel engendré sur la surface (ou en un point de la surface) du matériau piézoélectrique.

3.3 Mesure du potentiel engendré par la force de fléchissement sur

Le piézoélectrique.

3.3.1 Relation entre le potentiel et la force

La déformation est subie par des objets ou des supports physiques sous l'action de forces externes, par exemple, il peut s'agir d'écrasement, de compression, de déchirure, de torsion, de

cisaillement ou de séparation des objets. Dans le langage de la physique, deux termes décrivent les forces exercées sur les objets soumis à une déformation :

contrainte et déformation.

La contrainte est une quantité qui décrit l'ampleur des forces qui provoquent la déformation.

La contrainte est généralement définie comme la force par unité de surface.

Un objet ou un support soumis à une contrainte se déforme. La grandeur qui décrit cette déformation est appelée déformation. La déformation est donnée sous forme de changement fractionnaire de longueur (sous contrainte de traction) ou de volume (sous contrainte de volume) ou de géométrie (sous contrainte de cisaillement). Par conséquent, la déformation est un nombre sans dimension. La relation générale entre la contrainte et la déformation est donnée par l'équation suivante [12] :

$$\text{Contrainte} = (E) \cdot \text{Déformation} \quad (3.1)$$

$$\text{Contrainte} = \text{Pression exercée sur la surface} / \text{Surface} \quad (3.2)$$

$$\text{Déformation} = \Delta L / L_0 = (L - L_0) / L_0 \quad (3.3)$$

E : Module d'Young du matériau.

$$L : \text{longueur finale après déformation de l'élément} = (D^2 + L_0^2)^{1/2} \quad (3.4)$$

Avec D le déplacement (longueur du fléchissement de l'élément)

L_0 : longueur initiale avant déformation de l'élément

Les règles générées par le phénomène de piézoélectricité sont données comme suit [8] :

$$\square \text{ L'équation } P_i = d \cdot P \quad (3.5)$$

Définissant l'effet de polarisation interne (P_i) généré par la pression P due à la force F. Dans cette équation, d représente le coefficient piézoélectrique du matériau.

$$\square P_i = Q/S \quad (3.6)$$

Ou Q représente la charge électrique cumulée sur les faces en regard du condensateur de capacité C, induit par l'effet de la polarisation interne. S la surface des faces (armatures)

$$\square C = \epsilon \cdot S/e \quad (3.7)$$

ϵ coefficient diélectrique du matériau, e distance entre les armatures du condensateur.

$$\square V \text{ potentiel électrique généré entre les faces en regard du matériau} = Q/C \quad (3.8)$$

En combinant l'ensemble de ces équations on aura l'expression du potentiel V et de la force F :

$$F = S.E.(\Delta L/L_0) \tag{3.9}$$

$$V = \frac{d}{\epsilon} \cdot e \cdot E \cdot \frac{\Delta L}{L_0} \tag{3.10}$$

3.3.2 Potentiel engendré par l'effet direct sur le piézoélectrique

Dans cette partie on opère de la façon suivante :

* On récupère les tables des mesures des longueurs de fléchissement subit par le matériau piézoélectrique (ZnO et PZT-5J). Ces tables sont disponibles au niveau du logiciel Comsol sous forme de fichiers.

Ce travail se fait pour des longueurs du matériau piézoélectrique (L_0) variables dans la gamme 50-200 μm .

* On calcul (fichiers Matlab), les forces pour chaque longueur de fléchissement (Voir Annexe)

Toutes les données correspondent un potentiel variable (potentiel matériau collecteur et source radio-isotope).

Les résultats obtenus sont illustrés en figure 3.7 et 3.8

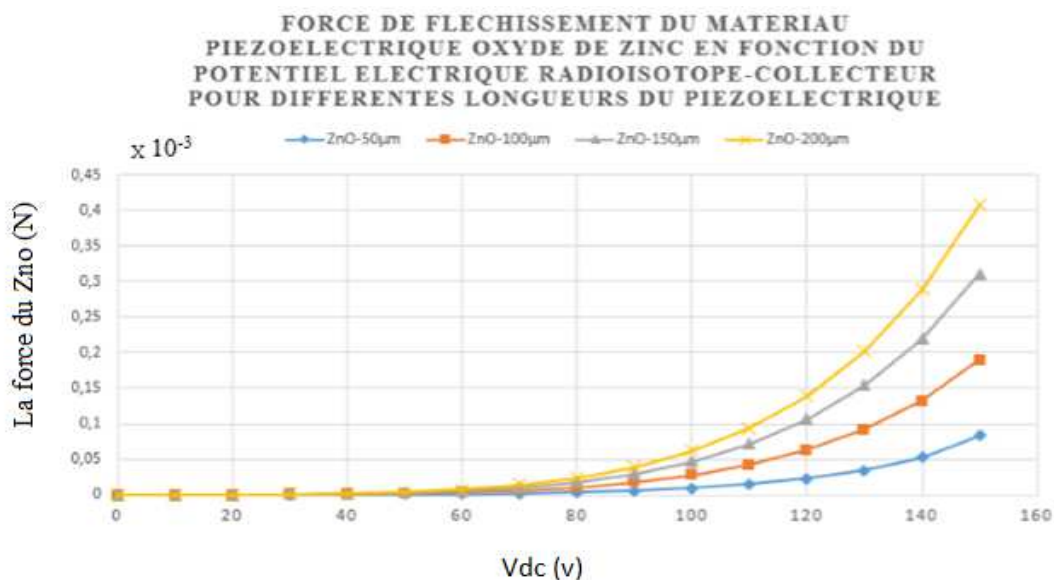


Figure 3.7 : Force de fléchissement du matériau piézoélectrique (ZnO) en fonction du potentiel Source-Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.

La force varie dans une gamme de 0 à 0.45 mN. Plus le matériau piézoélectrique est « long » plus la force de fléchissement est importante.

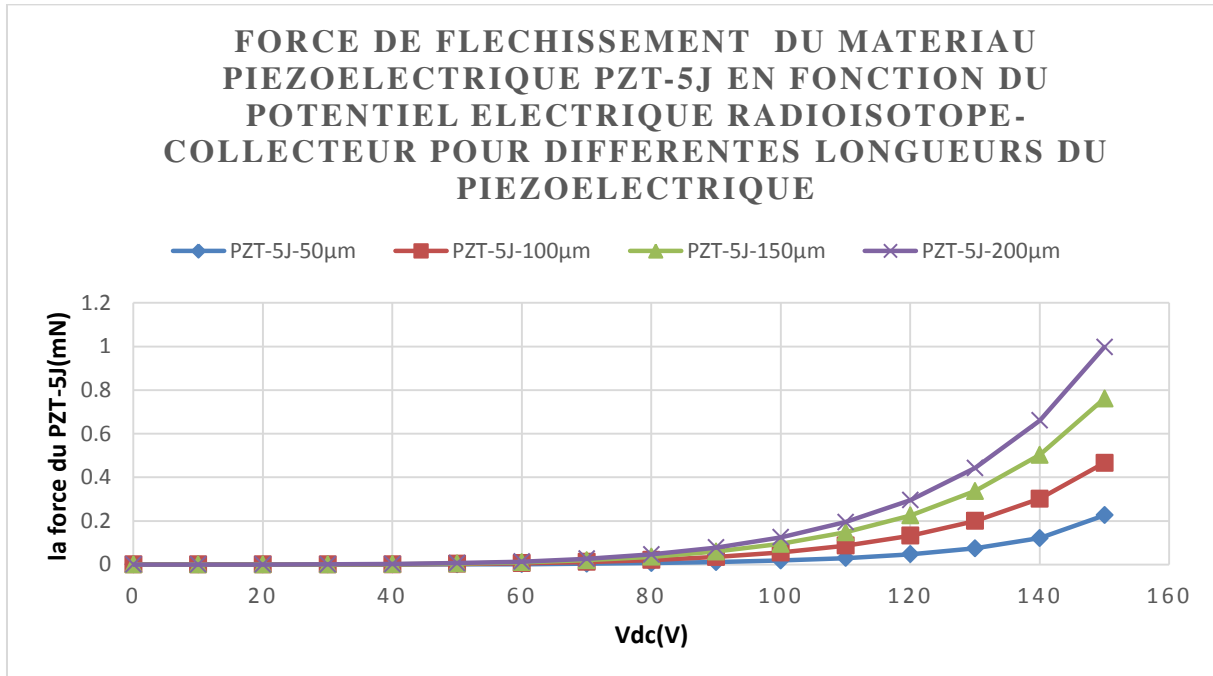


Figure 3.8 : Force de fléchissement du matériau piézoélectrique (PZT-5J) en fonction du potentiel Source-Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.

Dans le cas du PZT-5J, la force de fléchissement varie dans la gamme 0 à 1 mN. Elle est approximativement le double que pour le ZnO.

Les résultats trouvés sont en concordance. Le fléchissement est important pour le PZT-5J (module d'Young plus grand que celui du ZnO) ce qui entraîne donc une force plus importante pour le PZT-5J que pour le ZnO, dans les mêmes conditions d'expérience.

Connaissant les forces nous pouvons maintenant déduire les potentiels électriques en utilisant la formule explicitée par l'équation (3.10). Les coefficients piézoélectriques des matériaux utilisés sont tels que [13-14] :

Coefficient piézoélectrique du ZnO = $17.5 \cdot 10^{-12}$ C/N

Coefficient Piézoélectrique du PZT-5J = $390 \cdot 10^{-12}$ C/N

Les constantes diélectriques valent (Comsol) :

Constante diélectrique du ZnO = $(8.54) \cdot 8.85418782 \cdot 10^{-12}$ F/m

Constantes diélectrique du PZT-5J = $(1641.3) * 8.85418782 * 10^{-12}$ F/m

Les résultats sont illustrés en figure 3.9 et 3.10 suivantes :

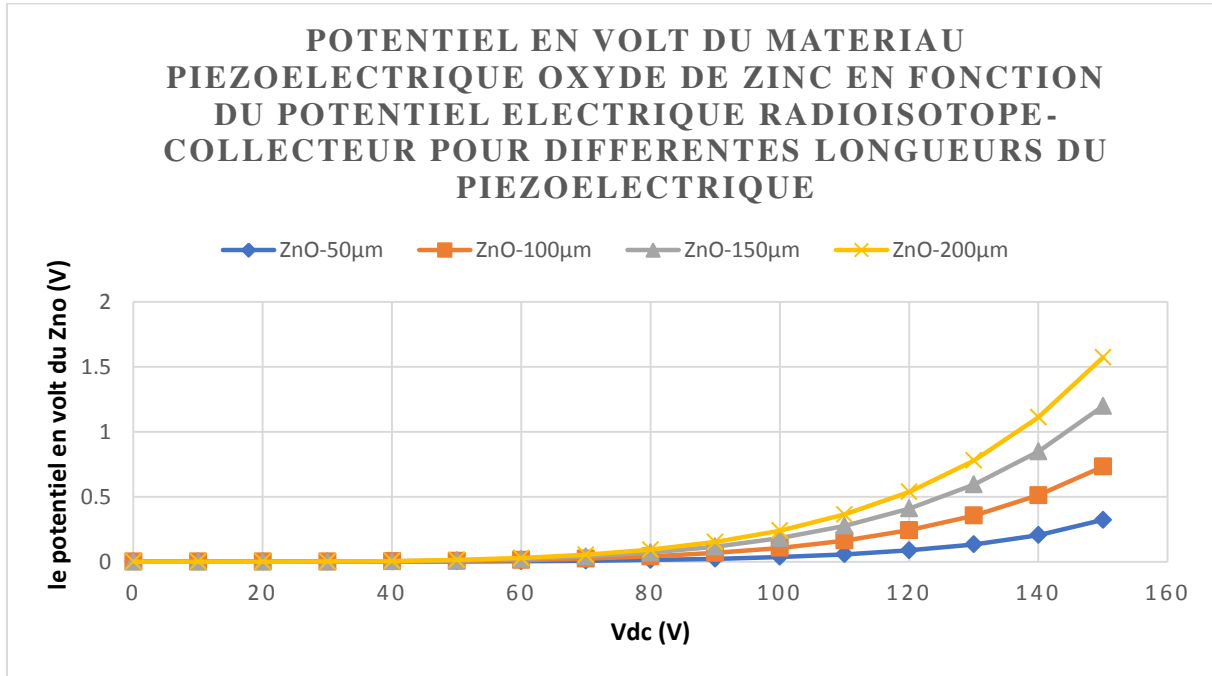


Figure 3.9: Potentiel du matériau piézoélectrique (ZnO) en fonction du potentiel Source- Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.

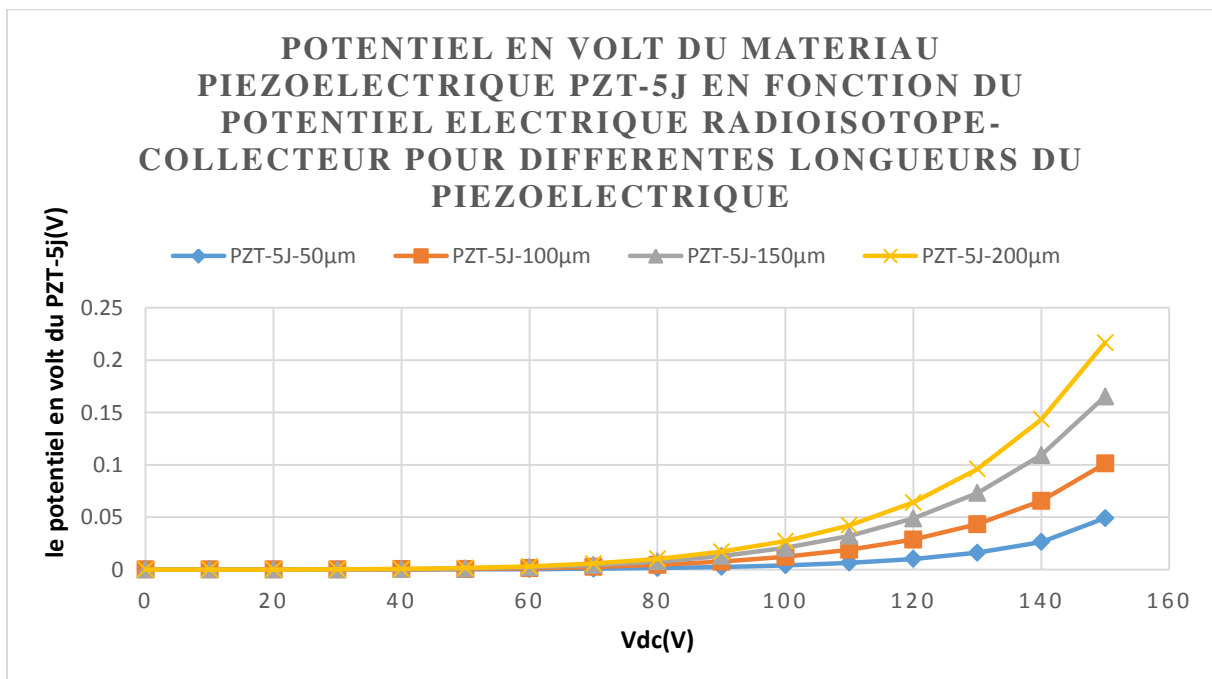


Figure 3.10 : Potentiel du matériau piézoélectrique (PZT-5J) en fonction du potentiel Source- Collecteur, pour différentes longueurs du piézoélectrique.

Le potentiel généré aux bornes du matériau piézoélectrique croit lorsque le potentiel aux bornes du condensateur, collecteur de charges-Source radio-isotope beta moins, croit. Ce potentiel suit une courbure croissante, aussi, lorsque la poutre formant le piézoélectrique croit en longueur. Cependant le matériau PZT-5J, même s'il présente des caractéristiques mécaniques intéressantes, fléchissement croissant et force croissante avec le potentiel collecteur – radio-isotope, on remarque que du point de vue électrique le potentiel piézoélectrique reste faible en comparaison avec celui du matériau ZnO. La différence fondamentale réside dans le fait que la constante diélectrique du PZT-5J est très élevée devant celle de du ZnO.

Conclusion générale

Cette étude a porté sur la propriété des dispositifs piézoélectriques capables de transformer l'énergie mécanique vers une énergie électrique. Dans ce cadre une simulation simplifiée d'une source à rayonnement beta moins est utilisée en parallèle avec un matériau collecteur de charges en provenance de cette même source, permettant de « créer » un milieu favorable aux phénomènes de l'électrostatique. Le logiciel COMSOL Multiphysics nous a permis de simuler une microstructure basée sur des matériaux piézoélectriques le ZnO et le PZT-5J. Lors de cette modélisation, nous avons fait une étude paramétrique incluant la géométrie de notre microstructure, les paramètres et les coefficients piézoélectriques. Conclure sur quel matériel piézoélectrique à utiliser nécessite des objectifs réels.

REFERENCES

- [1] Kotya Naik Maloth, Nagalaxmi Velpula, Sridevi Ugrappa, Srikanth Kodangal
Radioisotopes : An overview
International Journal of Case Reports and Images, Vol. 5 No. 9, September 2014.
- [2] <http://www.astronoo.com/fr/articles/neutrino.html>; Vu le 10 aout 2021 à 18:30
- [3] Goudara Ravi Prakash*, K. M. Vinayaka Swamy, B. G. Sheeparamatti
Simulation of Nuclear Radiation Based Energy Harvesting Device
using Piezoelectric Transducer
Proceeding of the 2011 Comsol conference in Bangalore.
- [4] Hui Li and Amit Lala
Self-reciprocating radioisotope-powered cantilever
Journal of applied physics Volume 92, Number 2, 15 July 2002.
- [5] Stopping Powers for Electrons and Positrons
International Commission on Radiation Units and Measurements, 1984.
- [6] Suhas Kumar
Atomic Batteries: Energy from Radioactivity
Department of Electrical Engineering, Stanford University, Stanford, CA 94305.
17 Nov, 2015.
- [7] Stephane Durand et Herve Lissek
La transduction piezoelectrique - <http://electroacoustique.univ-lemans.fr>
- [8] A. Bounemri
Université Blida 1, Cours Matériaux Intelligents Année 2019-2020.
- [9] COMSOL Multiphysics software understand, predict, and optimize - <http://www.comsol.com>
- [10] COMSOL Multiphysics Reference Guide ,pg:546.
- [11] COMSOL_ReferenceManual.
- [12] Samuel J.L, Jeff S., William M.

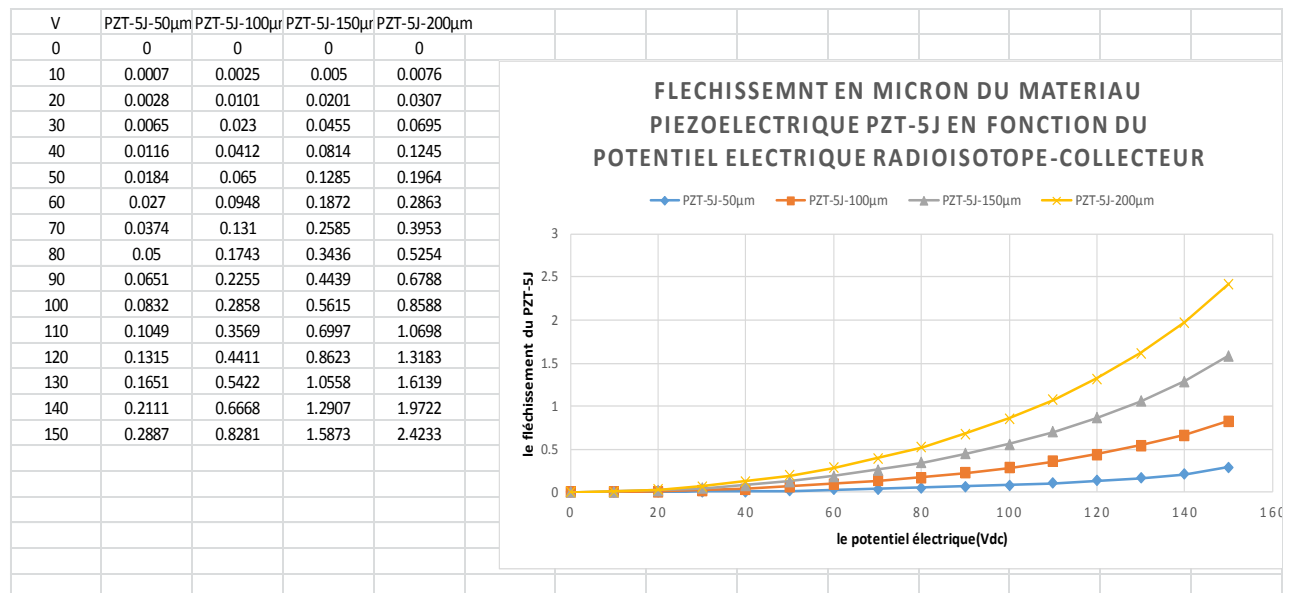
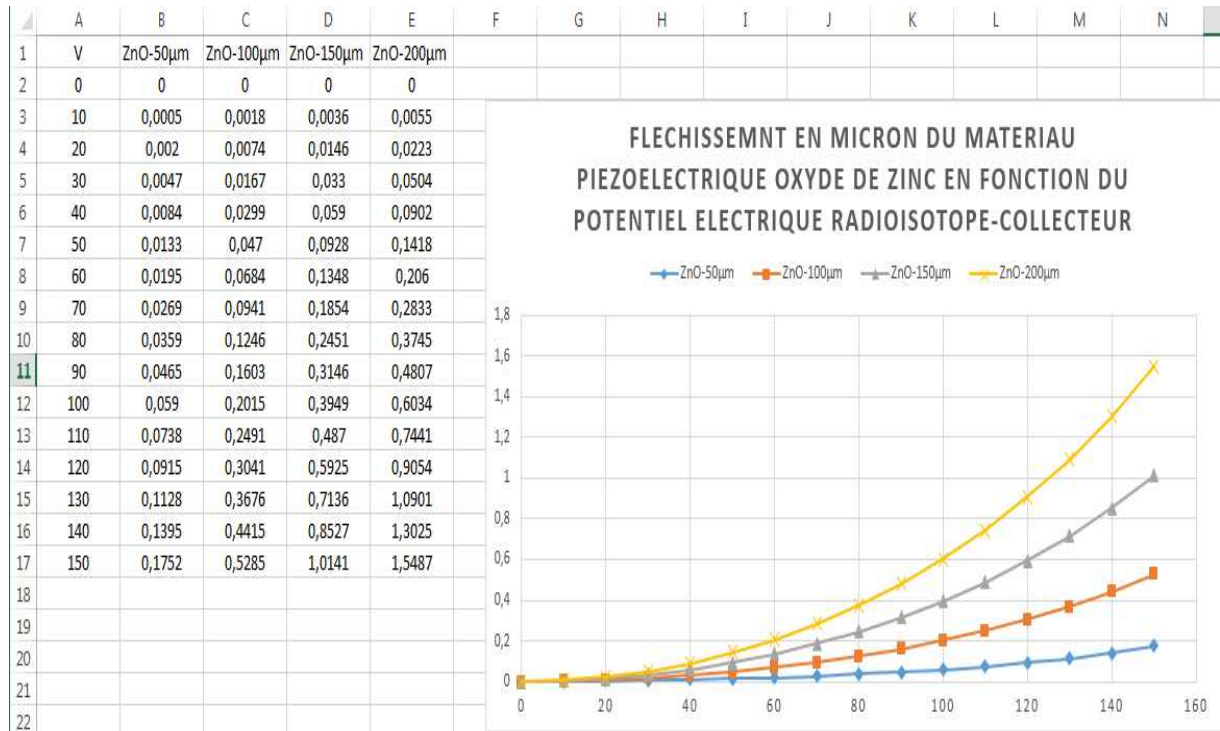
University Physics Volume 1 - Chapter 12: Static Equilibrium and Elasticity
Openstax, 2016.

[13] <https://support.piezo.com/article/62-material-properties>; Vu le 10aout2021 à 14:00

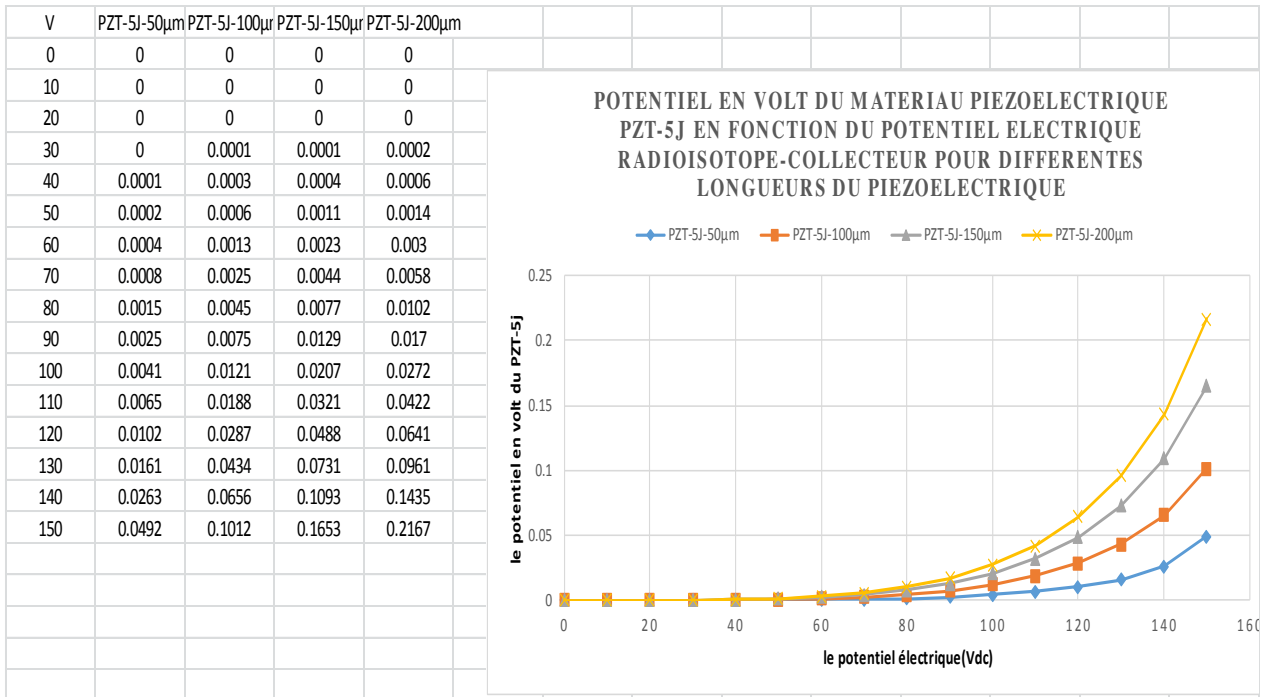
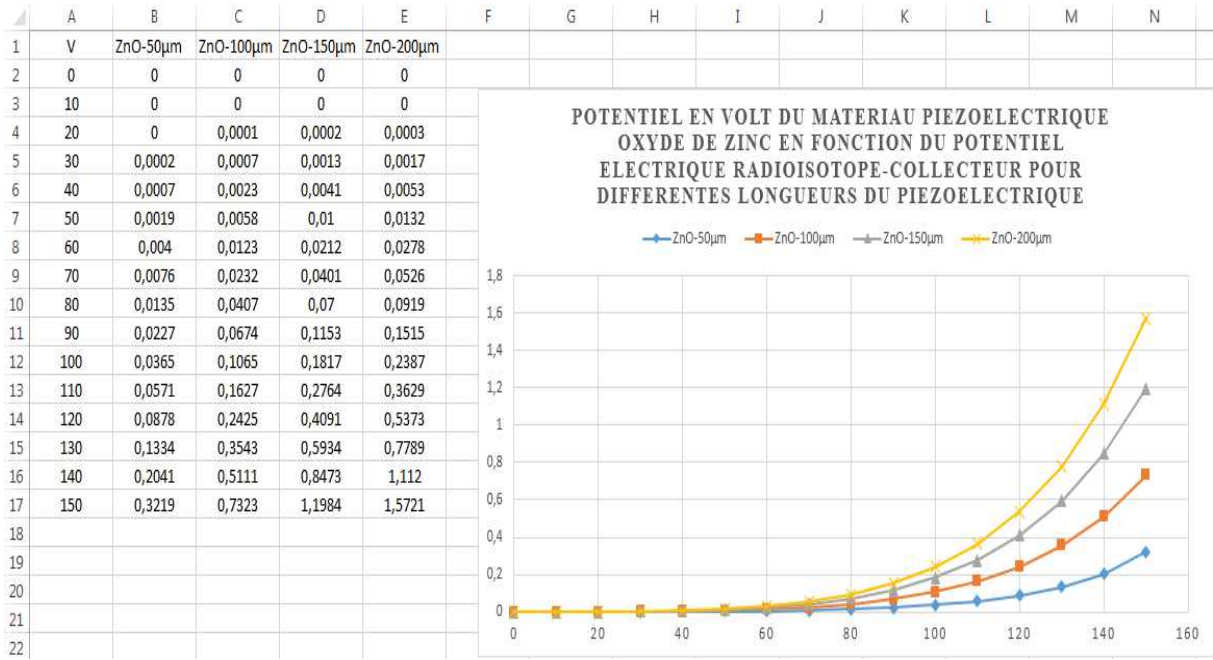
[14] <https://publications.polymtl.ca/> ; Vu le 10aout2021 à 16:00

Annexe

Données des fléchissements des poutres piezoelectriques



Données des potentiels électriques au niveau des piézoélectriques



Calcul du potentiel électrique (piézoélectrique ZnO)

```
1 - clc;clear all;close all;
2 - e = 2*10^(-6);%épaisseur piezoelectrique = distance entre armatures du condensateur forme par effet piezoelec.
3 - d = 17.5*10^(-12);%coefficient piezoelectrique du ZnO C/N Coulomb/Newton
4 - E = 113.29*10^9;%Module d'Young en Pa
5 - Epsilon =(8.54)*8.85418782*10^(-12);% F/m Farad/metre
6 - V = [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150]; %Vecteur potentiel Source-Collecteur
7 - L01 = 50; %Longueur initiale du piezoelectrique
8 - d1 = [0 0.0005 0.0020 0.0047 0.0084 0.0133 0.0195 0.0269 0.0359 0.0465 0.059 0.0738 0.0915 0.1128 0.1395 0.1752];
9 - %d1 : Vecteur flechissement en micron
10 - %Calcul vecteur force en Newton vecteur ligne
11 - for i = 1 : 16
12 -     P1(1,i) = (d*E*e*( ((d1(1,i)^2 + L01^2)^0.5) - L01))/(Epsilon*L01);
13 - end
14 - L02 = 100;
15 - d2 = [0 0.0018 0.0074 0.0167 0.0299 0.047 0.0684 0.0941 0.1246 0.1603 0.2015 0.2491 0.3041 0.3676 0.4415 0.5285];
16 - for i = 1 : 16
17 -     P2(1,i) = (d*E*e*( ((d2(1,i)^2 + L02^2)^0.5) - L02))/(Epsilon*L02);
18 - end
19 - L03 = 150;
20 - d3 = [0 0.0036 0.0146 0.033 0.059 0.0928 0.1348 0.1854 0.2451 0.3146 0.3949 0.487 0.5925 0.7136 0.8527 1.0141];
21 - for i = 1 : 16
22 -     P3(1,i) = (d*E*e*( ((d3(1,i)^2 + L03^2)^0.5) - L03))/(Epsilon*L03);
23 - end

24 - L04 = 200;
25 - d4 = [0 0.0055 0.0223 0.0504 0.0902 0.1418 0.206 0.2833 0.3745 0.4807 0.6034 0.7441 0.9054 1.0901 1.3025 1.5487];
26 - for i = 1 : 16
27 -     P4(1,i) = (d*E*e*( ((d4(1,i)^2 + L04^2)^0.5) - L04))/(Epsilon*L04);
28 - end
29 - plot(V,P1,'k',V,P2,'r',V,P3,'b',V,P4,'g','LineWidth',2)
30 - xlabel('Potentiel Radio-isotope-Collecteur en Volt');
31 - ylabel('Potentiel du piezoelectrique en Volt')
32 - title('Potentiel du materiau piezoelectrique (ZnO) en fonction du potentiel Source-Collecteur, pour differentes longueurs du pi
33 - legend('ZnO : L0 =50 micron','ZnO : L0 =100 micron','ZnO : L0 =150 micron','ZnO : L0 =200 micron',2);
```