REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Etude et conception d'un moteur linéaire actionné par des éléments piézoélectriques

Présenté par :

Mr. Mohammedi Youssef

Mr. Ykhlef Abdessmad Mohammed elAmine

Proposé et Dirigé par :

Dr. Zemirline Adel

Année universitaire 2022-2023

Remerciements

Je remercie le promoteur Dr Zmirline Adel de leur soutien, de leurs bons conseils et Tout d'abord, je remercie Dieu de nous avoir donné la capacité d'écrire et de penser, le pouvoir d'y croire, la patience d'aller au bout du rêve et la volonté de faire ce travail

de leur grande générosité dans l'élaboration de ce projet.

Je remercie l'étudiante du doctorant TOUATI Naima Pour toute l'aide

J'aimerais également examiner ce remercier le jury pour les efforts qu'il a déployés pour modeste travail.

Sans oublier de remercier les chers parents, qui ont toujours prié pour nous, qui n'ont pas cessé de nous encourager, de nous soutenir et qui ont fait ce que nous sommes aujourd'hui.

Tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à ce travail.



Dédicace

Ce qui reste à la fin de ce long voyage éducatif n'est pas le goût amer des tribulations qui ont été dépassées, mais la satisfaction avec le sens du succès et la réalisation de l'objectif de réaliser cet humble travail auquel je consacre

Ma chère mère, mon cher père, sans eux, je n'aurais pas atteint ce stade d'étude, Dieu m'a aidé à les honorer et à les servir, Dieu les préserve.

A mes chers frères Majid Abdou Mohammed et ma sœur Rofaida

À toute ma famille.

Pour tous les enseignants du Département de génie mécanique de l'Université Médéa.

À tous mes amis, en particulier Walid Redha Younes sohaib amine islam Djamel

À toute la promotion de 2023

À tous ceux qui m'ont soutenu.

Dédicace

Ce qui reste à la fin de ce long voyage éducatif n'est pas le goût amer des tribulations qui ont été dépassées, mais la satisfaction avec le sens du succès et la réalisation de l'objectif de réaliser cet humble travail auquel je consacre

Ma chère mère, mon cher père, sans eux, je n'aurais pas atteint ce stade d'étude, Dieu m'a aidé à les honorer et à les servir, Dieu les préserve.

A mon cher frère hamza et mes sœurs Siham Habiba Warda et Linda

À toute ma famille.

Pour tous les enseignants du Département de génie mécanique de l'Université Médéa.

À tous mes amis, en particulier Amine Redha Younes soheib amine Islam

À toute la promotion de 2023

À tous ceux qui m'ont soutenu.

الملخص

تطور استخدام المواد الكهروضوئية في الهندسة بشكل كبير في السنوات الأخيرة. تكشف الأبحاث الببليوغرافية عن ثراء الدراسات التي أجريت في هذا المجال والتي تسلط الضوء على حسن توقيتها وأهميتها. كمساهمة في النمذجة ودراسة السلوك الديناميكي، نقترح النظر في محرك يعتمد على المواد الكهروضوئية المصممة رياضيًا من خلال قبول بعض الجوانب الميكانيكية، مثل تأثير الاحتكاك على سلوك المحرك والتغيرات في الهندسة. بعد ذلك، باستخدام برنامج حساب، تمكنا من دراسة إعادة تصميم المحرك المعدل. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها زيادة كبيرة في الخصائص الديناميكية، ولكن لوحظ أيضًا فقدان سرعة المحرك.

الكلمات المفتاحية: الكهرو ضغطية، الإزاحة، المحرك الخطي، قانون برنولي، المحاكات.

Abstract:

The use of piezoelectric materials in the field of engineering is one of the most applications in recent years and as a contribution to the study of dynamic behavior we propose some additions and changes added in a piezoelectric motor, this modification deals with geometric parameters and the friction aspect. Using Ansys Workbench code we study it dynamic response. The obtained results show an increase in the dynamic characteristics of the modified motor in one hand, in other hand, a lost in a motor speed were noticed.

Key words: Piezoelectricity, Displacement, Linear motor, Bernoulli low, Actuation, Simulation.

Résume

L’utilisation des matériaux piézoélectriques dans le domaine de l’ingénierie a pris une ampleur considérable ces dernières années. La recherche bibliographique révèle la richesse des études faites dans ce domaine mettant en évidence leur actualité et leur importance. Comme contribution à la modélisation et à l’étude du comportement dynamique, on se propose de considérer un moteur a base de matériaux piézoélectriques modélisées mathématiquement en admettant quelques aspects mécaniques, tels que l’effet du frottement sur le comportement du moteur et des modifications dans la géométrie. Ensuite, à l’aide d’un logiciel de calcul on a pu étudier la réponse du moteur modifié. Les résultats obtenus montrent une augmentation considérable des caractéristiques dynamique, mais aussi une perte de la vitesse du moteur

Mots clés : Piézoélectricité, Déplacement, Moteur linaire, loi de Bernoulli, Actuation

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Hiérarchie des matériaux cristallins ayant des propriétés piézoélectriques

Figure I.2 : Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité :

a) Illustration de l'effet direct etinverse d'un matériau Piézoélectrique,

b) L'effet Piézoélectrique direct.

Figure I.3: Représentation schématique de l'apparition de la polarisation

(a) Corps Centro symétrique (non Piézoélectrique)

(b) Corps non Centro symétrique (Piézoélectrique)

Figure I.4 : Organigramme des différentes classes cristallines.

Figure I.5 : Schématisation des domaines

a) avant polarisation, b) pendant polarisation et c) après polarisation

Figure I.6 : Définitions des directions dans un milieu Piézoélectrique

Fig. II-1 : Classification des moteurs piézoélectriques

Fig. II-2 : Synoptique du principe de travail de l'USM

Fig. II .3 : Schéma d'une poutre droite.

Figure II .4 : Polarisationparallèle.

Figure II.5 : Polarisation antiparallèle

Figure III.1 : la géométrie

Figure III.2: Organigramme de simulation dans Ansys

Figure III.3: la géométrie en Spaceclam

Figure III.4: le schéma de transfert de la charge

FigureIII.5 : maillage de la géométrie

Figure III.6 : support fixe et voltages

Figure III.7: les conditions aux limites et les propriétés des matériaux

Figure III.8: Les déplacements obtenus en appliquant la fréquence

Figure III.9: Déplacements produit en appliquant la fréquence 11460 Hz.

Figure III.10: déplacement directionnel de la tige

Figure III.11 : Méthode Newton Raphson

Figure IV.1 : Analyse modale du 5ième et 20ième fréquence

Figure IV.2 : déplacement directionnel de la tige en fonction de la fréquence Pour un coefficient frottement de 0,2

Figure IV.3 : vitesse de la tige en fonction de la fréquence Pour un coefficient frottement de 0,2

Figure IV.4: déplacement directionnel de la tige en fonction de la fréquence Pour un coefficient frottement de 0,3

Figure IV.5: vitesse de la tige en fonction de la fréquence Pour un coefficient frottement de 0,3

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Équations piézoélectriques

Tableau III -1 : Les caractéristiques géométriques du système

Tableau III -2 : Type de matériau d'Acier standard et Pièze PZT 5

Tableau IV-1 : Les Fréquences d'analyses modale

Tableau IV-2 : les vitesses et déplacements de la tige en mode propre Pour un coefficient frottement de 0,2

Tableau IV-2 : les vitesses et déplacements de la tige en mode propre Pour un coefficient frottement de 0,3

Sommaire :

Remerciements……

Dédicace…….

Dédicace…….

Résume……

Références Bibliographiques ……...

Liste des figures……..……

Liste des tableaux……

Sommaire……

Introduction……..……13

Chapitre 01: Généralité sur les matériaux piézoélectriques…….……....16

I.1La Piézoélectricité ……16

I.1.1 L'effet piézoélectrique ……17

I.1.2. Symétrie et Piézoélectricité ……17

I.2La Ferroélectricité……..……19

I.2.1 Définition…….……..……19

I.2.2 Polarisation…….……19

I.2.3Température de Curie et transition de phase……20

I.3 Les principaux matériaux piézoélectriques……..……..….21

I.3.1 Les cristaux…….21

I.3.2 Les céramiques……21

I.3.3 Les polymères…….21

I.4Les propriétés Piézoélectriques, diélectriques et mécaniques d'un matériau Piézoélectrique……..…….22

I.4.1. Equations piézoéletriques…….……22

I.4.2. Equation d'état.……...…….…22

I.4.3Les coefficients Piézoélectriques…….……24

I.4.4Définition des coefficients Piézoélectriques…….……24

I.5 Applications des matériaux piézoélectriques……26
Conclusion……27
Chapitre 02 Etude théorique……28
II.1 Classification des moteurs piézoélectriques et principes de fonctionnement……29
II.2 Moteurs piézoélectriques à ultrasons ……30
II.3 Modélisation des poutres piézoélectriques Géométrie……30
II.4 Relations théoriques de couplage électromécanique appliqué aux poutres……32
II.4 .1L'énergie potentielle U……34
II.4.2L'énergie cinétique T……35
II.4.3L'équation du mouvement ……35
Chapitre 03 : Modélisation Numérique……36
III.1 Présentation du code Ansys ……37
III.2.1 ANSYS Mechanical ……37
III.2.2 ANSYS CFX et fluent ……37
III.2.3 Gambit ……38
III.2.4 Ansys auto dyn et Ansys LS DYNA ……38
III .2.5 Ansys Electromagnetics et an soft ……38
III.2.6 Ansys Multiphysics ……38
III.2.7 Ansys classic ……39
III.2.8 Ansys Workbench……39
III.3.1 Modélisation du moteur……39
III.3.2 Méthode newton Raphson ……48
CHAPITRE 04 : Résultats et Interprétation……50
IV.1 Résultats et interprétation ……51
IV.2 L'analyse modale……51
IV.3 Analyse Harmonique ……53
Conclusion Générale ……58
Références Bibliographiques ……59

Introduction

INTRODUCTION

Ces dernières années, les applications mettant en œuvre des matériaux Piézoélectriques se sont considérablement développées. L'avantage de ces matériaux est Qu'ils couplent fortement les grandeurs mécaniques et électriques. L'intérêt principal des Matériaux piézoélectriques est qu'ils permettent d'agir sur l'état mécanique d'une structure par modification du champ électrique appliqué au sur ce dernier. Ceci a débouché sur les Applications de contrôle de vibration et d'actionneur de positionnement. En favorisant l'écoulement de charges dans un matériau piézoélectrique collé à une structure, il est possible D'extraire de petites puissances (allant du micro au milliwatt). Enfin les matériaux Piézoélectriques ont trouvé un champ d'application particulièrement intéressant dans la conversion d'énergie électrique : les transformateurs piézoélectriques permettent de remplacer avantageusement les transformateurs électromagnétiques en particulier pour des applications Sujettes à la miniaturisation. D'une manière générale, leur utilisation tend à se développer dans les appareils électroniques mobiles ou embarqués telle que la méthode passive, active et semi-passive ou semi-active. Les méthodes de Contrôles passifs sont généralement considérées comme stable à cause de l'inexistence d'une Rétroaction externe directement exercée sur la structure cible. Toutefois, il est généralement volumineux et sensible aux changements environnementaux. Au contraire, le contrôle actif peut conditionner le contrôle des structures à large bande de fréquence, mais la réduction du bruit et des vibrations est un sujet de recherche prioritaire dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'équipement sportif, la Mesure, etc. Afin de répondre à ces préoccupations, de nombreuses méthodes D'amortissement vibratoire utilisant les matériaux piézoélectriques ont été développées. Par ailleurs, il est également limité par l'instabilité provoquée par certains Problèmes de contrôle et d'encombrement. Les méthodes semi-passives ou semi-actif héritent Des avantages des deux contrôle passif et actif et tend à devenir un sujet d'actualité dans le Domaine de contrôle des vibrations.

Le premier chapitre, introductif, rappelle tout d'abord certaines notions fondamentales de la Piézoélectricité. Les deux effets piézoélectriques y sont décrits, puis les différentes formes des Équations constitutives y sont exprimées. On définira ensuite la notion de couplage Électromécanique, qui traduit la capacité d'un matériau piézoélectrique à convertir de L'énergie mécanique en énergie électrique ou inversement.

Le chapitre II illustre Classifications des moteurs piézoélectriques et principes de fonctionnement et moteurs piézoélectriques à ultrasons et modélisation des poutres

piézoélectriques géométrie et relations théoriques de couplage électromécanique appliquées aux poutres et L'énergie potentielle U et l'énergie cinétique T et 'équation du mouvement prend la forme finale

Le chapitre III décrit la modélisation et la simulation des moteurs dans Ansys et diverses étapes et méthode de résolution

Le chapitre IV précise que les résultats, l'interprétation et la comparaison avec les travaux antérieurs

Chapitre 01
Généralité sur les matériaux piézoélectriques

Introduction générale

L'effet piézoélectrique a été découvert par Pierre et Jacques Curie en 1880[1], les matériaux piézoélectriques sont très largement utilisés dans les actionneurs ou les capteurs à cause de leur aptitude à convertir l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Ces matériaux dits intelligents peuvent être utilisés dans différentes applications comme les mécanismes d'injection, les moteurs piézoélectriques, les sonars… etc. L'activité de ces matériaux est liée au fait qu'ils présentent une polarisation macroscopique due à l'existence d'un moment dipolaire résultant de l'absence de Centro symétrie**.**

Parmi les matériaux piézoélectriques les plus utilisés il existe une famille particulière pour laquelle la polarisation macroscopique peut être modifiée par l'application d'un champ électrique ces matériaux dits ferroélectriques. Parmi les matériaux les plus utilisés en s'intéressent d'étudier le PZT.

Le PZT possède de bonnes caractéristiques piézoélectriques et un excellent coefficient de couplage électromécanique, ce qui explique leur rôle important dans le domaine de matériaux adaptatifs.

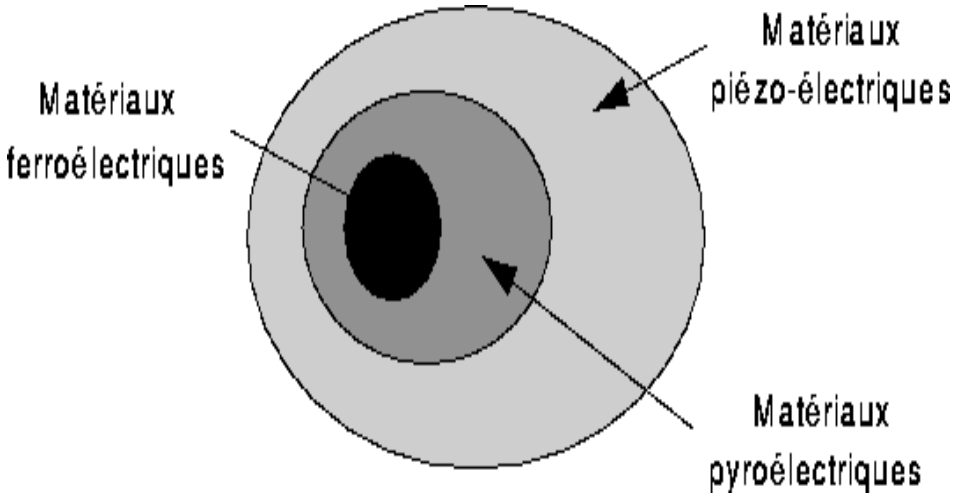


Figure I.1 : Hiérarchie des matériaux cristallins ayant des propriétés piézoélectriques.

I.1.La Piézoélectricité

I.1.1 L'effet piézoélectrique

La piézoélectricité caractérise l'aptitude de certains matériaux cristallins de convertir une contrainte mécanique en une énergie électrique et réciproquement [**2**].

Il s'agit d'une polarisation électrique induite par une déformation mécanique dans des cristaux appartenant à certaines classes cristallines. Cette polarisation est proportionnelle à la déformation et charge de signe avec elle. Cet effet appelé « effet piézoélectrique direct », est réversible : l'application d'un champ électrique externe induit une déformation mécanique c'est l'effet piézoélectrique inverse [**2**].

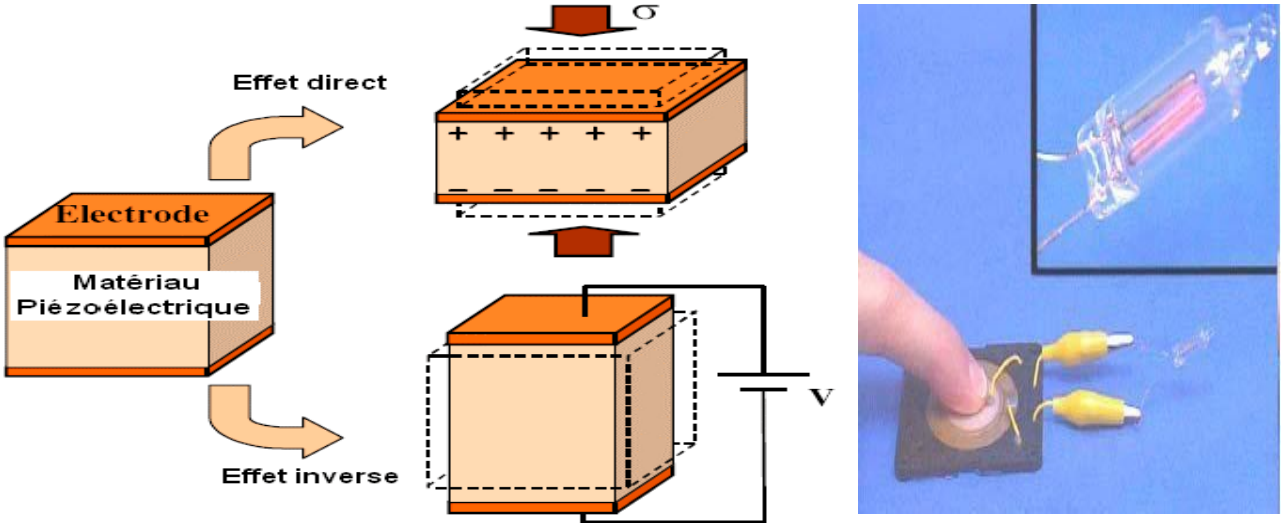


Figure I.2 : Schématisation de l'effet de la Piézoélectricité :
a) Illustration de l'effet direct et inverse d'un matériau Piézoélectrique,
b) L'effet Piézoélectrique direct.

I.1.3. **Symétrie et Piézoélectricité**

A l'échelle de la maille cristalline, la Piézoélectricité se manifeste par une polarisation de la maille, résultant de la séparation du centre de gravité des charges positives et négatives.

L'origine de l'effet piézoélectrique est liée à la structure et la symétrie

cristallines des matériaux. En effet, pour qu'un cristal soit piézoélectrique, il doit être non Centro symétrique c'est-à-dire que les barycentres des charges positives et négatives ne coïncident pas dans la maille (figure I-3) [4].

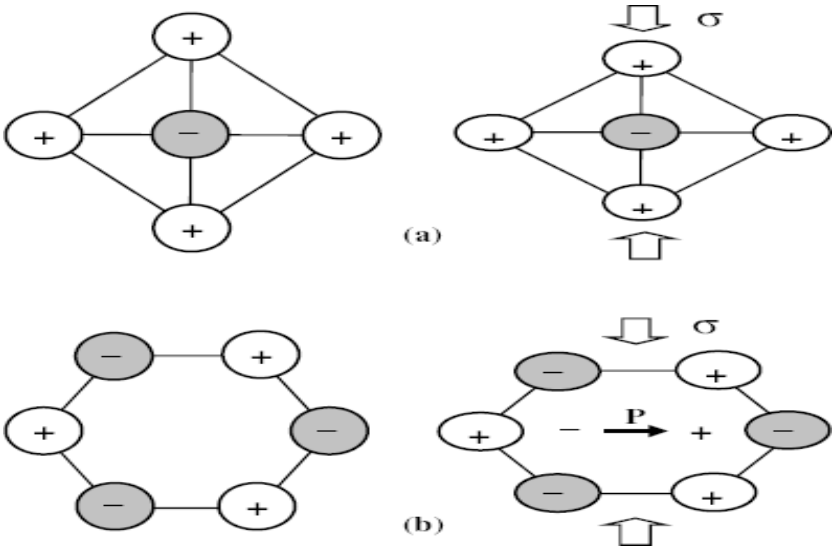


Figure I.3 : Représentation schématique de l'apparition de la polarisation
(a) Corps Centro symétrique (non Piézoélectrique)
(b) Corps non Centro symétrique (Piézoélectrique)

Sur les 32 classes cristallines, figure (I-4), 21 sont dépourvues de centre de symétrie, parmi celles-ci, 20 sont piézoélectriques. Dans ces 20 classes, 10 présentent une polarisation spontanée en l'absence d'un champ extérieur et possèdent une polarisation naturelle selon au moins une direction ; elles sont dites pyroélectriques et polaires en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température.

Enfin, les cristaux ferroélectriques correspondent à un sous-groupe des pyroélectriques pour lesquels l'axe polaire, support d'un dipôle permanent et mobile dans le réseau cristallin sous l'influence d'un champ électrique extérieur. Ils ont eux la particularité de pouvoir se polariser selon deux axes ou plus, chaque direction étant équiprobable [**4**].

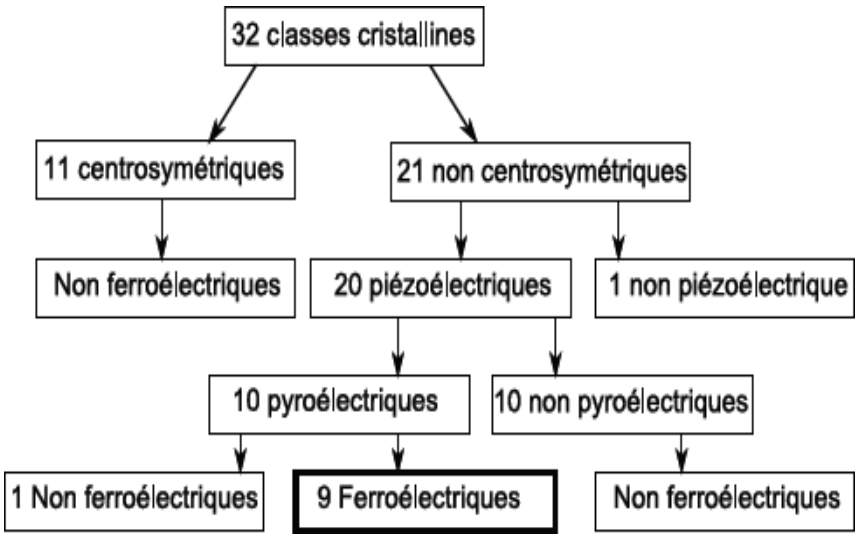


Figure I.4 : Organigramme des différentes classes cristallines.

I .2La Ferroélectricité

I.2.1. Définition

La Ferroélectricité forme un sous-groupe de la pyroélectricité comme la montre la (figure I-4).La direction de polarisation d'un cristal ferroélectrique varie en fonction du champ électrique extérieur. Elle peut être simplement réorientée voire même s'inverser si le champ est suffisamment intense [5].

Le terme ferroélectrique a été utilisé pour la première fois en 1935, par MULLER pour rappeler le comportement hystérétique de la polarisation électrique macroscopique en fonction du champ électrique appliqué.

Un matériau ferroélectrique ne présente pas de propriété macroscopique piézoélectrique avant polarisation. Une fois polarisé, il devient alors piézoélectrique.

I.2.2 Polarisation

Les ferroélectriques sont des matériaux dont il est possible de réorienter l'axe de polarisation en les soumettant à un champ électrique suffisamment fort [**6**].

- Du point de vue macroscopique le matériau ferroélectrique "non polarisé " est organisé en différents domaines de polarisation aléatoires dont il résulte une polarisation macroscopique nulle.
- Le matériau soumis à un champ électrique aura pour tendance de réaligner ses différents domaines dans la direction d'application du champ, le matériau est alors

macroscopiquement polarisé (polarisé Ps).

- Cet effet de polarisation est "rémanent", c'est-à-dire que lorsque l'on supprime le champ électrique tous les domaines ne retournent pas dans un état d'orientation aléatoire et il existe alors un état de polarisation macroscopique rémanent (Pr).

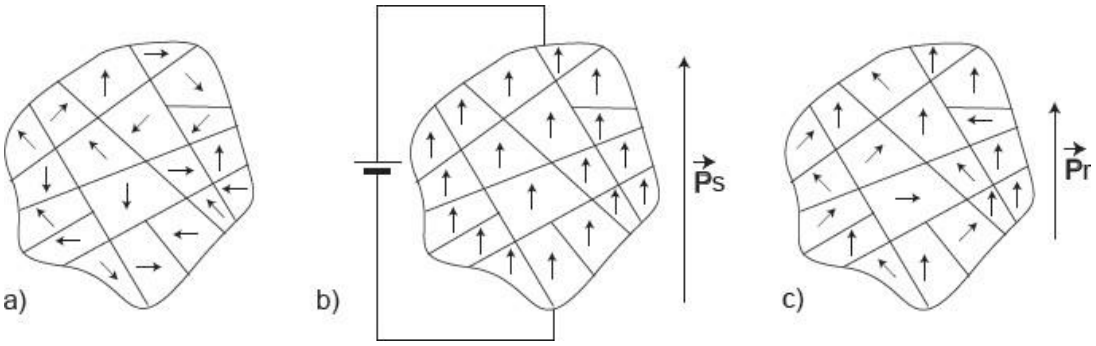


Figure I.5 Schématisation des domaines

a) avant polarisation, b) pendant polarisation et c) après polarisation

I .2.3Température de Curie et transition de phase

La transition de phase d'un matériau ferroélectrique correspond à un changement dans la structure cristalline, qui se produit généralement à une température bien définie et qui s'accompagne d'une modification de l'orientation et/ou de l'amplitude de la polarisation électrique. Le matériau passe de l'état ferroélectrique à l'état para électrique [7]

Le point de Curie Tc est la température au-delà de laquelle un matériau ferroélectrique subit une transition de phase structurale vers un état où la polarisation spontanée de la maille disparaît. Au-delà de cette température, le matériau ferroélectrique se retrouve dans un état para électrique non polaire. Le passage polaire - non polaire correspond à une transition de phase

I.3 Les principaux matériaux piézoélectriques

Nous allons considérer les classes principales de matériaux piézoélectriques : les cristaux qui possèdent une piézoélectricité naturelle, les céramiques, les polymères et les composites qui doivent être polarisés.

I.3.1 Les cristaux

Le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz mais ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs médicaux : son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage très faible.

I.3.2 Les céramiques

Les céramiques piézo-électriques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique. Ils sont souvent utilisés tels quels mais entrent également dans la fabrication des composites que nous décrivons plus loin.

En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière.

Citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée ; les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT et enfin les métaniobates de plomb utilisé pour l'imagerie haute résolution.

I.3.3 Les polymères

Les polymères ou les co-polyméres comme respectivement le Poly-Vinyl-DiFluoridène ou PVDF et le (PVDF-Tr FE) partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous- marine réception. Le PVDF en est le représentant le plus connu, les chaines de polymères peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique.

I.4 Les propriétés Piézoélectriques, diélectriques et mécaniques d'un matériau Piézoélectrique

I.4.1. Equations piézoélectriques

I.4.1.1. Equation d'état

Pour décrire le couplage entre les deux formes d'énergie dans un matériau piézoélectrique (mécanique et électrique), on néglige l'énergie thermique. Des équations piézoélectriques sont démontrées en reliant toutes les variables.

Trois types de variables interviennent :

- Coefficients purement électriques
- Coefficients purement mécaniques
- Coefficients mixtes traduisant le couplage entre les deux premières catégories.

Les propriétés mécaniques d'un matériau dépendent de ses constants élastiques, paramètres qui définissent la relation existante entre les déformations S_i et les contraintes T_i. De la même façon, les propriétés électriques sont caractérisées par les constantes diélectriques

qu'associent les composantes du déplacement diélectrique D_i à celles du champ électrique E_i.

L'effet piézoélectrique conjugue les paramètres électriques et mécaniques.

Variables indépendantes	Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
E, σ	$D = d\sigma + \bar{\varepsilon}^{\sigma} E$	$\varepsilon = s^{E}\sigma + d^{\sigma} E$
D, σ	$E = \beta^{\sigma} D - g\sigma$	$\varepsilon = \varepsilon^{D}\sigma + g^{\sigma} D$
E, ε	$D = e^{s} E + e\varepsilon$	$\sigma = c^{E}\varepsilon - e^{\sigma} E$
D, ε	$E = \beta^{s} - h\varepsilon$	$\sigma = c^{D}\varepsilon - h^{\sigma} D$

Tableau I-1 : équations piézoélectriques

Avec :[10]

Elastique

Déformation	ε	
Contrainte	σ	$N\ m^{-2}$
Compleance	s	$m^2 N^{-1}$
Rigidite	c	$N\ m^{-2}$

Electrique

Potentiel	φ	V
Champ	E	V m^{-1}
Charge	Q	C
Deplacement	D	C m^{-2}

Dielectrique

Permitivite	ε	F m^{-1}
Impermeabilite	β	m
Constante	$\varepsilon/\varepsilon_0$	

Piézoélectrique

d constante	d	C N^{-1}
e constante	e	C m^{-2}
g constante	g	V m N^{-1}
h constante	h	N C^{-1}

La compliance ou est défini comme étant :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{deformations\ la\ direction\ i}{contrainte\ dans\ la\ direction\ j}$$

$$= \frac{\varepsilon_i}{\sigma_j}$$

De la même façon on définit le constant élastique

$$C_{ij} = \frac{contrainte\ dans\ la\ direction\ i}{deformation\ dans\ la\ direction\ j}$$

Les indices i et j prennent des valeurs de 1 à 6, avec les dénominations suivantes : T1, T2, T3 : contraintes de tension parallèles aux axes 1, 2 et 3 respectivement. T4, T5, T6 : Contraintes de cisaillement autour des axes 1, 2 et 3. De même pour les déformations Si.

I.4.1.2. Les coefficients Piézoélectriques

On dénombre quatre modules piézoélectriques différents formant une matrice de 3 lignes et de6 colonnes (tenseur d'ordre 3) et traduisant le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. A partir des équations précédentes, nous pouvons déterminer les relations entre les coefficients piézoélectriques.

$$d_{mi} = \varepsilon^{\sigma}_{mn} g_{ni} = e_{mj} \varepsilon^{E}_{ji}$$
$$g_{mi} = \beta^{\sigma}_{nm} d_{ni} = h_{mj} \varepsilon^{D}_{ji}$$
$$e_{mi} = \varepsilon^{s}_{nm} h_{ni} = d_{mj} c^{E}_{ji}$$
$$h_{mi} = \beta^{T}_{nm} e_{ni} = g_{mj} \varepsilon^{D}_{ji}$$

Avec m, n=1à 3 et i, j=1à 6

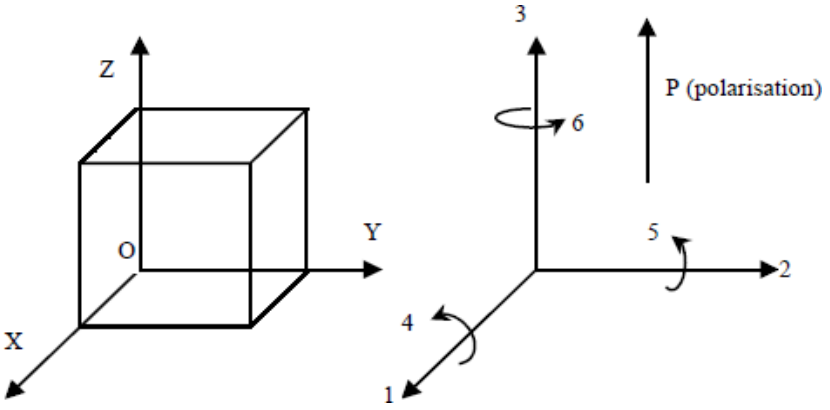


Figure I.6 : Définitions des directions dans un milieu Piézoélectrique

Les deux indices des coefficients piézoélectriques désignent respectivement la direction de l'axe de polarisation et celui de la déformation de l'échantillon. Les indices i, j, m et n respectent la notation tensorielle de la figure (I-6).

I.4.1.3. Définition des coefficients Piézoélectriques

- Constante de charge d : traduit la liaison entre la contrainte et l'induction électrique à champnul ou constant (en C/N).

- Constante de tension g : indique la relation entre la contrainte mécanique et le champélectrique à induction nul ou constant (en C/m^2).

- Constante piézoélectrique e : indique la relation entre la déformation et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/m^2)

- Constante piézoélectrique h : C'est le coefficient Piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à induction nulle ou constante (enV/m ou N/C) [7].

I.5 Applications des matériaux piézoélectriques

Le domaine d'application des matériaux piézoélectriques est très vaste car il est possible d'exploiter soit l'effet direct, soit l'effet inverse soit les deux alternativement. Quelques applications des matériaux piézoélectriques sont données dans le tableau en fonction de l'effetutilisé.

Applications basées sur L'effet direct	Applications basées sur L'effet inverse	Applications basées sur les Deux effets
▪Microphone ▪Hydrophone ▪Capteur de choc ▪Accéléromètres ▪Allumage ▪Capteur de pression ou deconstraintes	▪Haut-parleur ▪Buzzer Transducteur sonar ▪Nébuliseur ▪Moteurs ultrasonores Relais Micro positionnement ▪Ajustement laser ▪Imprimante à jet d'encre ▪Dispositifs acousto-optiques ▪Pompe piézoélectrique ▪Bistouri piézoélectrique	▪Transducteur d'ultrasonspour diagnostic médical(échographie). ▪CND par ultrasons ▪Détecteur de proximité ou deprésence ▪Mesures de distances ou dedébits ▪Gyroscope ▪Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW) ▪Lignes à retard. Transformateur piézoélectrique.

Tableau I-2 : Applications des matériaux ferroélectriques en fonction de l'effet

Conclusion

Le PZT est actuellement l'un des meilleurs candidats pour toutes les applications nécessitant une céramique massive comme par exemple pour les applications médicales ou la maitrise de petits déplacements en mécanique. La suite naturelle dans ce genre de développement est la réduction des dimensions et des couts de fabrication. C'est pourquoi son intégration en films minces sur silicium ouvre au PZT le champ d'application des micros capteurs et micro actionneurs. Dans cette optique, il est donc important de faire des gros efforts de recherche sur ce matériau en film mince et apporter de nouveaux outils de caractérisation et d'intégration des films de PZT sur silicium[8]

CHAPITRE 02

Etude théorique

2.1 Classification des moteurs piézoélectriques et principes de fonctionnement

Les moteurs piézoélectriques peuvent être classés selon différents critères, y compris le type de mouvement (linéaire, rotatif), plage de fonctionnement en fréquence, géométrie du stator et principe de fonctionnement.

Dans le présent travail, les moteurs piézoélectriques sont classés en sous-catégories afin d'intégrer les critères les plus utilisés, comme indiqué dans Fig. II-1. Dans le premier niveau de Fig. II-1, les moteurs piézoélectriques sont classés en fonction du type de mouvement en moteurs linéaires ou rotatifs. Ces deux types de moteur piézoélectrique peuvent être classés en fonction de la plage de fonctionnement de fréquence en moteurs quasi statiques et ultrasoniques. Deux catégories de moteur piézoélectrique quasi-statiques peuvent être distinguées en fonction de la méthode de conduite, qui sont les moteurs à pas et à inertie.

Le principe de fonctionnement des moteurs à inertie est basé sur la méthode d'entraînement par glissement de manche, alors que le

Les moteurs piézoélectriques pas à pas commercialisées peuvent être conçues en moteurs ichor et les moteurs à ultrasons (USM) sont classés en fonction de la méthode de propagation des ondes en déplacement et ondes stationnaires USM[9].

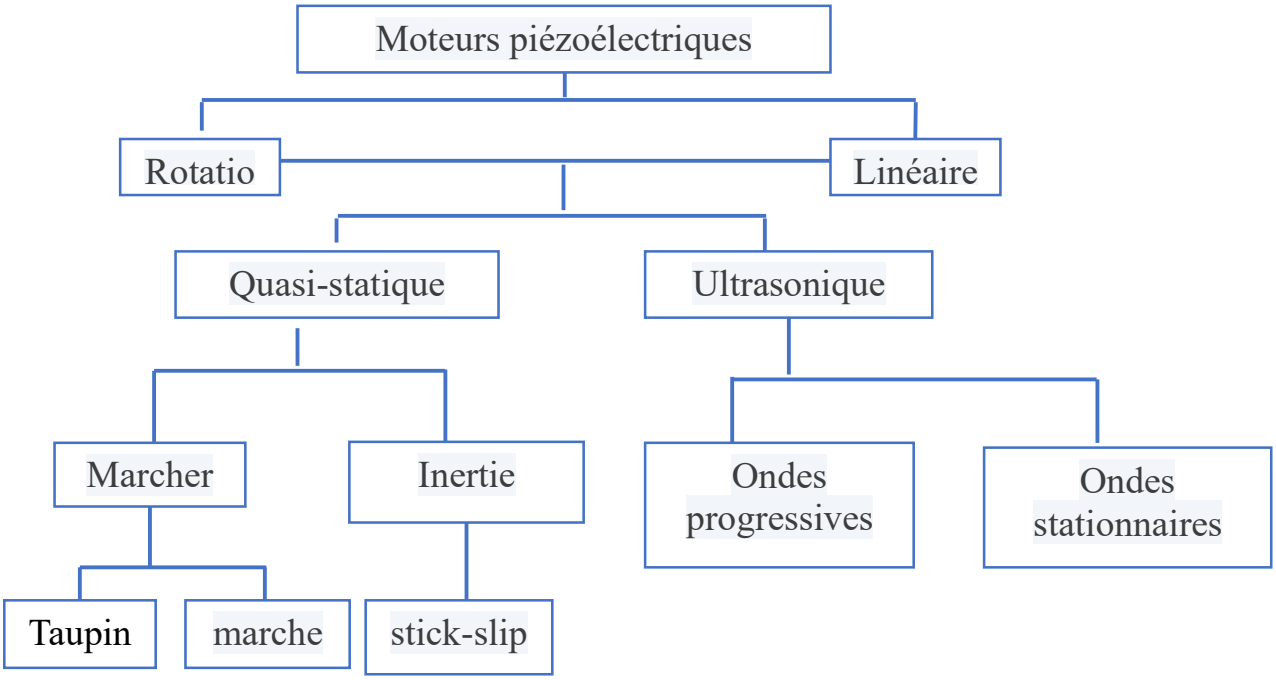


Fig. II-1 : Classification des moteurs piézoélectriques

2.2 Moteurs piézoélectriques à ultrasons

Le moteur à ultrasons (USM) est un moteur piézoélectrique à haute fréquence (supérieur à 20 kHz) à l'une de ses fréquences résonantes mécaniques. Comme le principe de travail est basé sur l'inverse effet piézoélectrique, les tensions appliquées seront converties par la céramique piézoélectrique en résonance vibrations. Ces vibrations sont transmises à une pièce mobile (rotor) souvent par contact frictionnel, conduisant à un mouvement rotatif ou linéaire. Le principe de fonctionnement de l'USM peut être décrit par le processus donné à la fig. II-2 :

Étape 1 : L'énergie électrique est convertie en vibrations ultrasoniques par le piézoélectrique matériau monté sur le stator.

Etape 2 : Les vibrations résonantes seront amplifiées et transmises au rotor par frottement couplage pour créer du mouvement

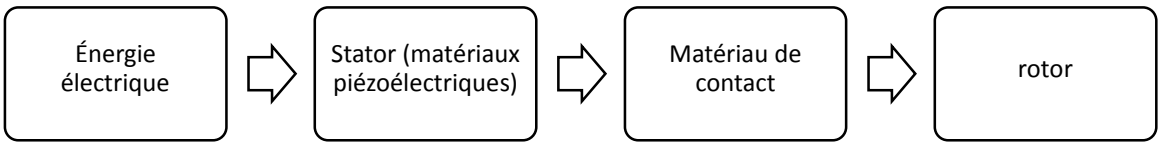


Fig. II-2 : Synoptique du principe de travail de l'USM

2.3 Modélisation des poutres piézoélectriques

On appelle poutre un solide dont deux dimensions sont relativement petites par rapport à la troisième. Les poutres sont des éléments très répandus en construction.

Elles sont associées, entre elles ou à d'autres types d'éléments pour constituer Des systèmes ou structures utilisés dans le bâtiment, l'aéronavale, l'aéronautique,

L'automobile et dans la fabrication de machines.

On considère une poutre de longueur L, de masse volumique et de section

Droite A tel qu'illustre sur la figure II .3. Les principales hypothèses adoptées sont

Les suivantes :

- L'épaisseur est faible devant la longueur totale de la poutre.

- Le plan (x y} est un plan de symétrie de la poutre.

- Le matériau est homogène et isotrope. Son comportement est linaire et Elastique.

- Les déplacements et les déformations sont petits.

- Au cours de la mise en charge, la section droite reste plane.

- La flexion se fait autour de l'axe Oy.

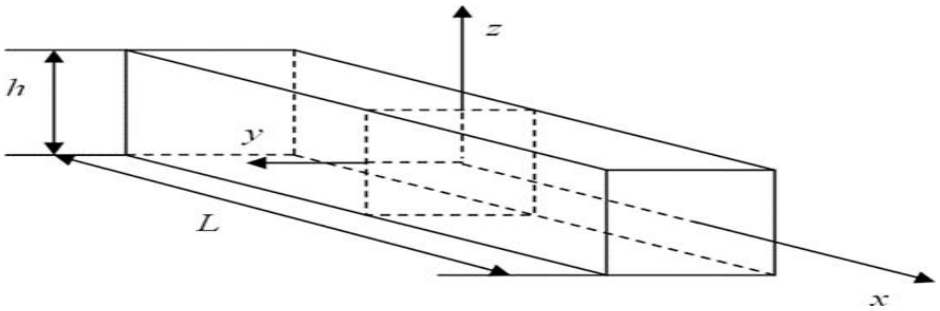


Fig. II .3 : Schéma d'une poutre droite.

La théorie d'Euler

Champ de déplacement relatif à la théorie d'Euler-Bernoulli est donné par :

$$\begin{cases} u = u_0 \\ v = 0 \\ w = w_0 \end{cases}$$

Les déformations

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \dfrac{\delta_u}{\delta_x} \\ \varepsilon_y = 0 \\ \varepsilon_z = 0 \\ \gamma_{xy} = 0 \\ \gamma_{yz} = 0 \\ \gamma_{xz} = \dfrac{\delta_w}{\delta_x} \end{cases}$$

2 .4 Relations théoriques de couplage électromécanique appliqué aux poutres :

Les relations traduisant le couplage entre les contraintes mécaniques et les constantes piézoélectrique Sous forme matricielle la relation peut être écrite de la façon suivante en négligeant l'effet de la température :

$$\begin{cases} \{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\} - [e]^t\{E\} \\ \{D\} = [e]\{\varepsilon\} + \overline{[\varepsilon]}\{E\} \end{cases}$$

Les relations traduisant le phénomène de couplage électromécanique ont été traitées. [10]

Donc les matrices des permittivités, des élasticités et des constantes

Piézoélectriques relatives aux matériaux piézoélectriques et plus précisément les PZT5 (comme application dans notre travail ont considère lesPZT5) prennent respectivement

Les formes générales suivantes :

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\overline{\varepsilon}] = \begin{bmatrix} \overline{\varepsilon}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{\varepsilon}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{\varepsilon}_{33} \end{bmatrix}$$

La combinaison entre le système d'équations avec les matrices permet de calculer les contraintes dans un matériau piézoélectrique, en admettant les effets de la température ainsi que les hypothèses énumérées ci-dessus, et cela en appliquant la loi de Hooke généralisée et la relation du déplacement diélectrique pour les matériaux piézoélectriques [11]:

$$\begin{Bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{yz}\\ \tau_{xz}\\ \tau_{xy}\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & Q_{16}\\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & Q_{26}\\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & Q_{36}\\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & Q_{45} & 0\\ 0 & 0 & 0 & Q_{54} & Q_{55} & 0\\ Q_{61} & Q_{62} & Q_{63} & 0 & 0 & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\\ \gamma_{xy}\end{Bmatrix}-\begin{bmatrix}0 & 0 & e_{31}\\ 0 & 0 & e_{32}\\ 0 & 0 & e_{33}\\ 0 & e_{24} & 0\\ e_{15} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}E_x\\ E_y\\ E_z\end{Bmatrix}$$

Après calcul les formes finales suivantes sont obtenues :

$$\begin{cases}\sigma_x=\left(Q_{11}-\dfrac{Q_{12}^2}{Q_{22}}\right)\varepsilon_x-\left(e_{31}-\dfrac{Q_{21}}{Q_{22}}e_{32}\right)E_Z\\ \tau_{XZ}=\left(Q_{55}-\dfrac{Q_{45}^2}{Q_{44}}\right)\gamma_{xz}\end{cases}$$

Posant :

$$\begin{cases}\sigma_x=\overline{Q}_{11}\varepsilon_x-\tilde{e}_{31}E_z\\ \tau_{xz}=\bar{Q}_{55}\gamma_{xz}\end{cases}$$

Avec :

$$\bar{Q}_{11}=Q_{11}+Q_{12}\left(\frac{Q_{26}Q_{61}-Q_{21}Q_{66}}{Q_{22}Q_{66}-Q_{26}^2}\right)+Q_{16}\left(\frac{Q_{61}Q_{22}-Q_{62}Q_{21}}{Q_{26}^2-Q_{22}Q_{66}}\right)$$

$$\bar{Q}_{55}=Q_{55}-\frac{Q_{45}^2}{Q_{44}}$$

$$\bar{\bar{\varepsilon}}_{33}=\left[\bar{\varepsilon}_{33}+\frac{Q_{66}e_{32}^2}{Q_{22}Q_{66}-Q_{26}^2}\right]$$

$$\tilde{e}_{31}=\left[e_{31}+e_{32}\frac{Q_{26}Q_{61}-Q_{21}Q_{66}}{Q_{22}Q_{66}-Q_{26}^2}\right]$$

On distingue deux cas de figure, cas d'un montage en série et celui en parallèle.

Dans le cas où la couche piézoélectrique est montée en parallèle, le champ électrique et la polarisation possèdent la même orientation. (Figure II .4)

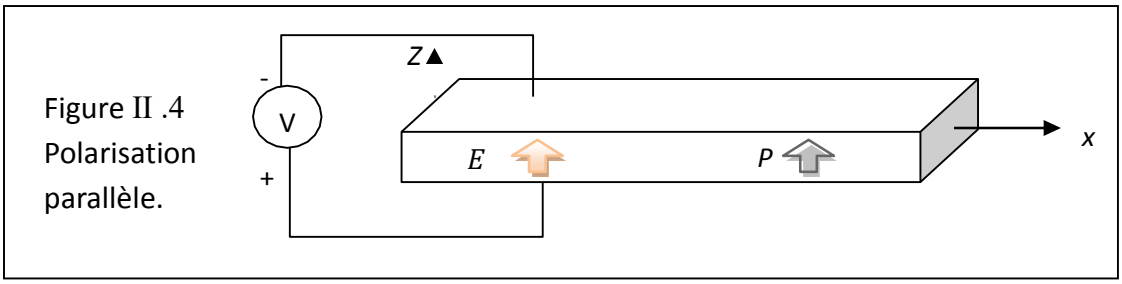


Figure II .4 Polarisation parallèle.

$$\begin{cases} \sigma_x = \bar{Q}_{11}\varepsilon_x - \tilde{e}_{31}E_z \\ \tau_{xz} = \bar{Q}_{55}\gamma_{xz} \end{cases}$$

Dans le cas où la couche piézoélectrique est montée en série dite antiparallèle, le champ électrique et la polarisation possèdent deux orientations différentes. (Figure II .5)

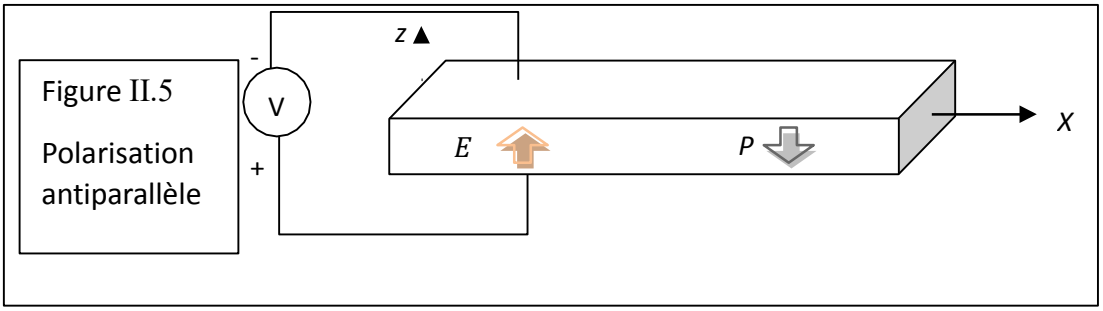


Figure II.5 Polarisation antiparallèle

$$\begin{cases} \sigma_x = \bar{Q}_{11}\varepsilon_X + \tilde{e}_{31}E_z \\ \tau_{xz} = \bar{Q}_{55}\gamma_{xz} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_x = \bar{Q}_{11}\varepsilon_x + \tilde{e}_{31}E_z \\ \tau_{xz} = \bar{Q}_{55}\gamma_{xz} \end{cases}$$

2.4 .1 L'énergie potentielle U :

L'énergie potentielle d'un domaine de volume V est donnée par la relation qui permet de déterminer les quatre termes liés à l'élasticité du matériau, la température, la piézoélectricité et finalement le terme diélectrique. Apres quelque considérations mathématiques on obtient les matrices masse et rigidité suivantes :

$$\bar{U} = \frac{1}{2}\int (\varepsilon\sigma - DE)dV = \frac{1}{2}\int (\{\varepsilon\}^T\{\sigma\} - \{D\}^T\{E\})dV$$

$$\bar{U} = \bar{U}_{Elastic} + \bar{U}_{Piezoelectric}$$

$$\overline{U}_{Elastic} = \frac{1}{2}\{q\}^T[K_{uu}]\{q\}$$

$$\overline{U}_{Piezoelectric} = \frac{1}{2}\{q\}^T[K_{u\emptyset}]\{\emptyset\} + \frac{1}{2}\{\emptyset\}^T[K_{\emptyset u}]\{q\}$$

2 .4.2 L'énergie cinétique T :

L'énergie cinétique s'écrit sous la forme :

$$T = \frac{1}{2}\int \rho(\dot{u}^2 + \dot{v}^2 + \dot{w}^2)dV$$

2.4.3 L'équation du mouvement prend la forme finale suivante [11] :

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K_{uu}]\{q\} + [K_{u\emptyset}]\{q\} = \{F\}$$

Avec :

$[M]$Matrice inertie

$[K_{uu}]$Matrice rigidité

$[K_{u\emptyset}]$Matrice couplage électromécanique

$[F]$Vecteur des degrés de liberté généralisé

$[\emptyset]$Vecteur du potentiel électrique

CHAPITRE 03
Modélisation Numérique

III.1 Présentation du Code ANSYS

Est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. ANSYS développe, promeut et assure le support de ses logiciels de simulation servant à prédire le comportement d'un produit dans son environnement. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie[12].

- Aspects techniques
- Principaux produits

ANSYS Structural : Ce programme permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

III .2.1 ANSYS Mechanical :

Ce programme dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

III.2.2 ANSYS CFX et Fluent :

Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetées par ANSYS respectivement en février 2003 et en février 2005. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de mailleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose

d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress…), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU)[12].

III.2.3 Gambit :

Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce meilleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un meilleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

III .2.4 ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :

Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

III .2.5 ANSYS Electromagnetics et An soft :

Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

III .2.6 ANSYS Multiphysics :

Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

Environnements logiciels

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

III.2.7ANSYS classic :

Première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique[12] ;

III.2 .8ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate-forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle en éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS[12].

III.3.1 Modélisation du Moteur

Dans cette recherche, nous avons ajouté quelques modifications au moteur piézoélectrique pour connaître son comportement et les résultats obtenus à partir de la vitesse et du déplacement.

Dans la figure ci-dessous, les ajouts que nous avons faits au moteur

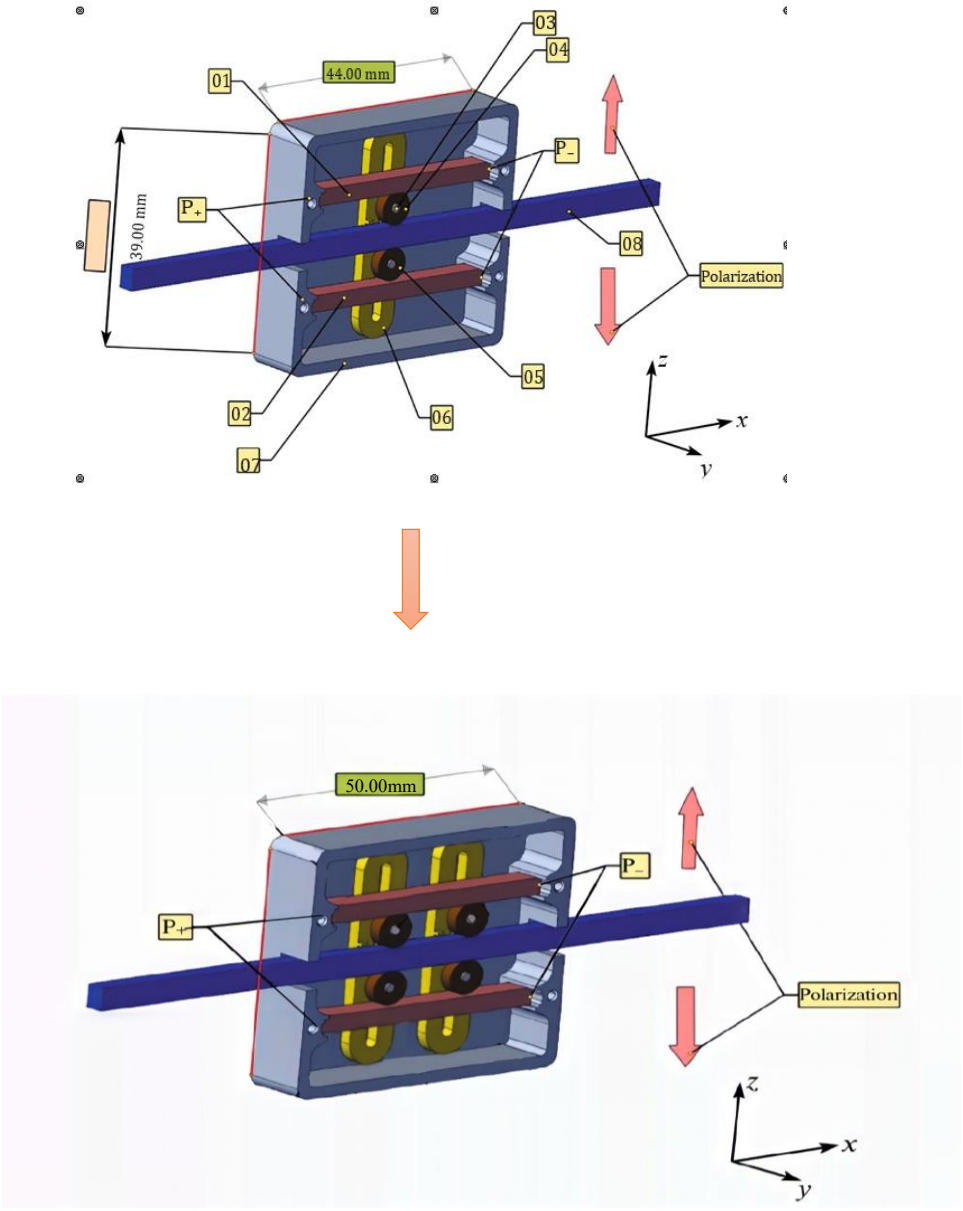


Figure III.1 : la modification de la géométrie

Vue détaillée du moteur piézo

01 Poutre piézoélectrique supérieure.**02** Poutre piézoélectrique inférieure. **03** Axe supérieur.

04 Roue motrice supérieure.**05** Roue motrice inférieure.**06** Support**07** Bloc d'assemblage.

08 Tige de commande. (P+, P–) respectivement positif et négatif [11]

Organigramme de simulation dans Ansys fonctionne de la manière décrite dans le format ci-dessous

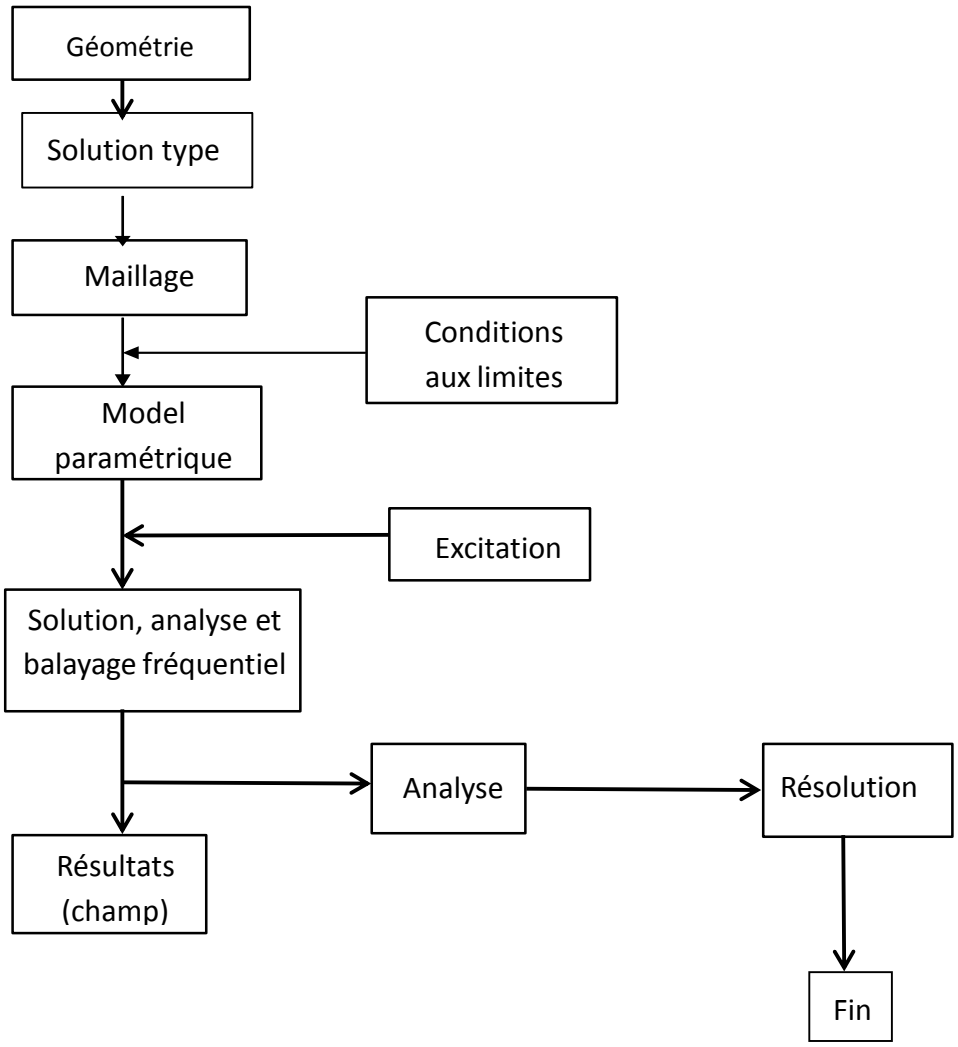


Figure III.2 : Organigramme de simulation dans Ansys

Pour utiliser ANSYS, il faut suivre les étapes suivantes :

Créer une géométrie ou importer une géométrie existante avec des modifications

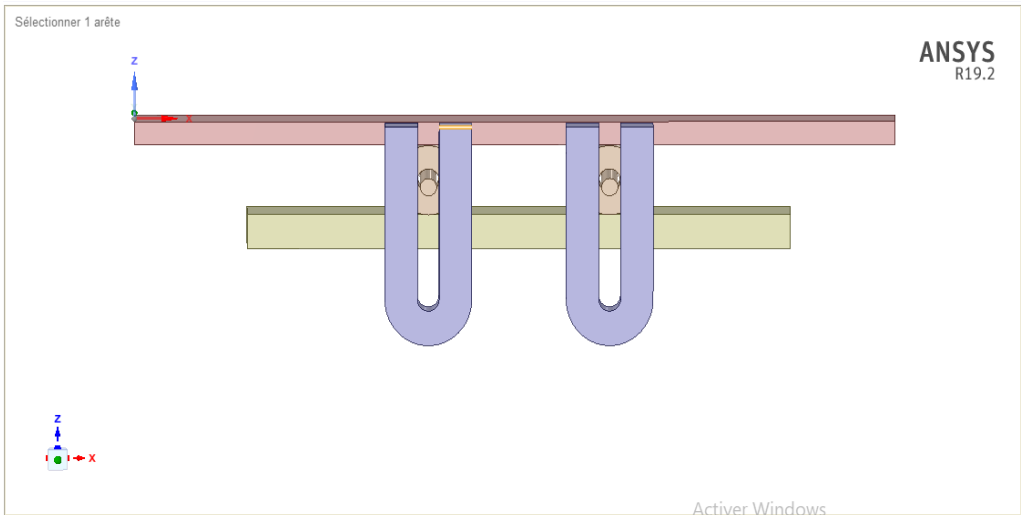


Figure III.3 : la géométrie en spaceclaim

Les caractéristiques géométriques du système

Paramètre	Valeur
Tige	
Longueur	70 mm
Largeur	3 mm
épaisseur	2 mm
Piezo	
Longueur	50 mm
Largeur	3,5 mm
Épaisseur	3 mm
Galet inf.	
Diamètre ext	6 mm
Diamètre int.	2 mm
L'axe inf.	
Diamètre	1,5 mm

Tableau III -1 : Les caractéristiques géométriques du système

ANSYS Workbench permet de faire une simulation d'une manière très aisée, le schéma de transfert de la charge, est illustré dans la figure :

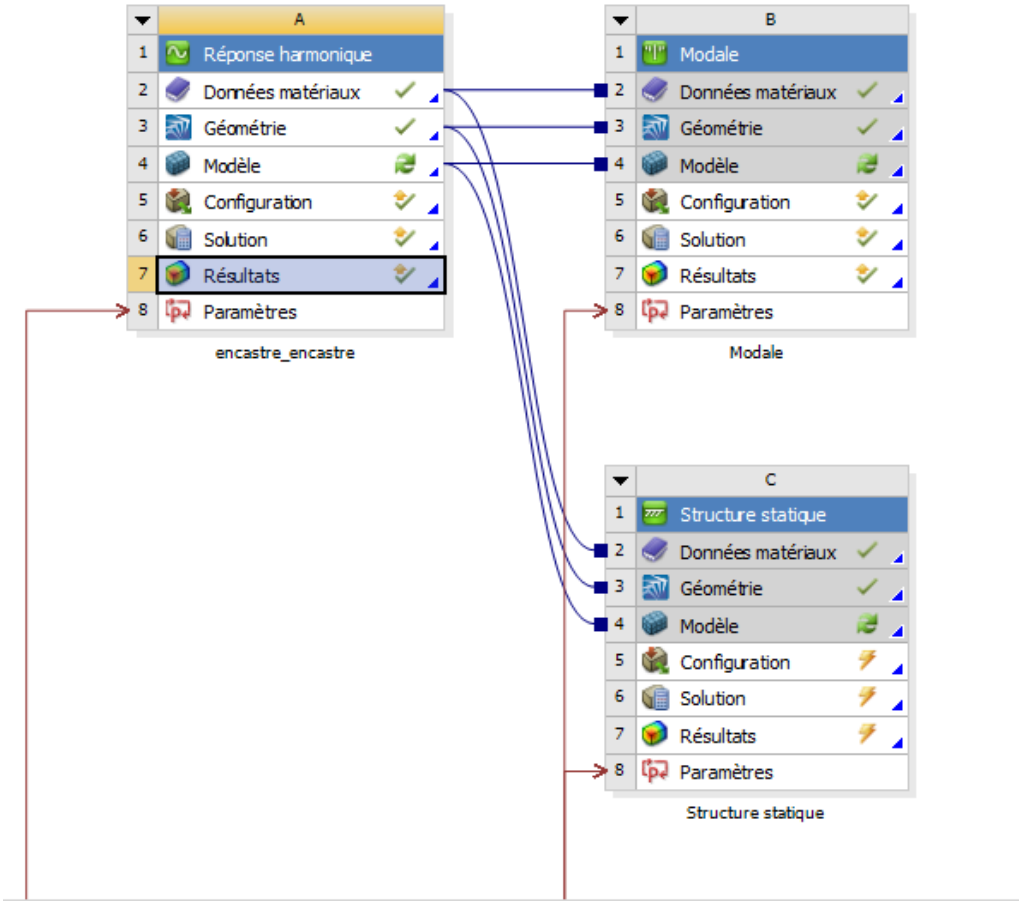


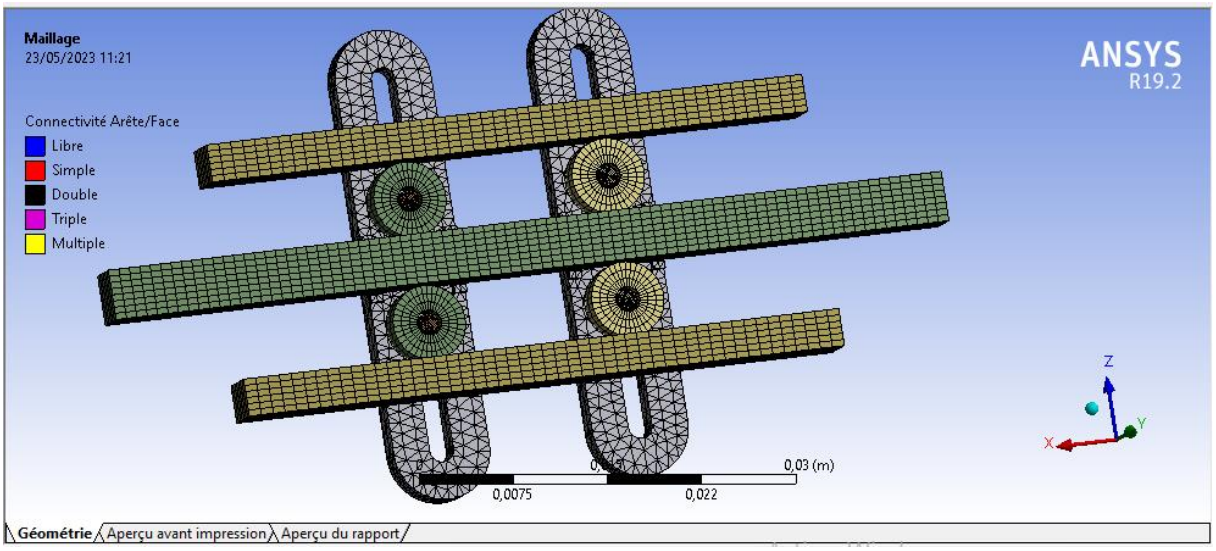
Figure III.4 : le schéma de transfert de la charge.

Type de matériau : [13]

	Acier standard	PZT 5
la densité ρ	7.7 ÷ 8.1 [kg/dm3]	7.87 [g/cm3]
le module d'élasticité E	190÷210 [GPa]	
le coefficient de Poisson ν	0.27 ÷ 0.30	0.31 ÷ 0.34

Tableau III -2 : Type de matériau d'Acier standard et PZT 5

Créer un maillage pour la géométrie



FigureIII.5 : maillage de la géométrie

À propos de Maillage

- Les nombres des éléments : 14380
- Les nombres des nœuds : 57193

Les conditions aux limites

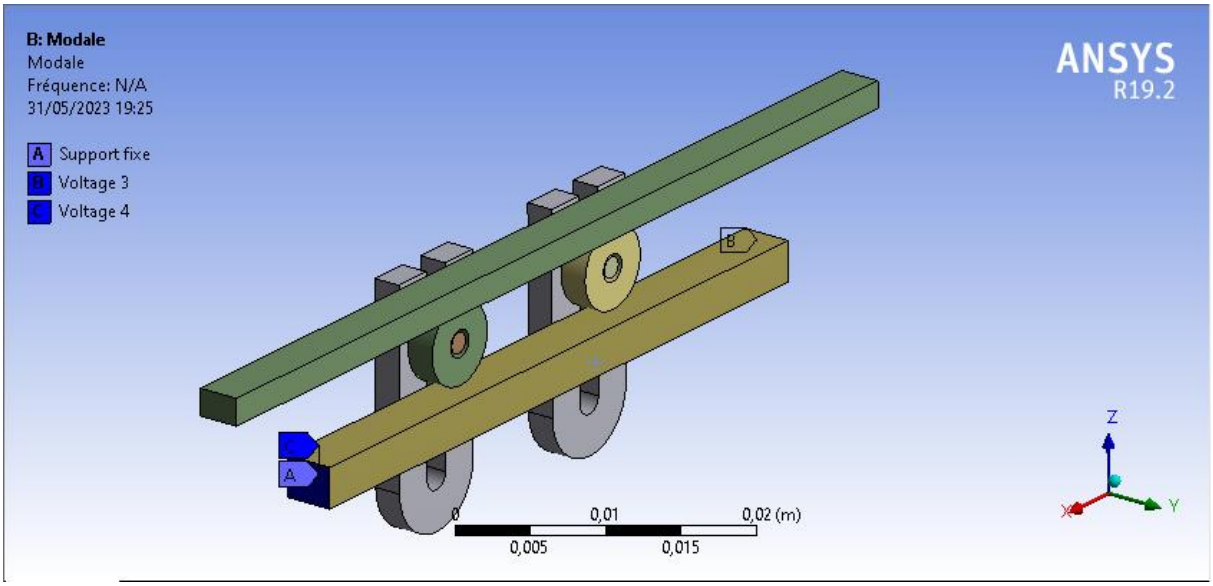


Figure III.6 support fixe et voltages

L'arborescence de la simulation dans Mechanical.

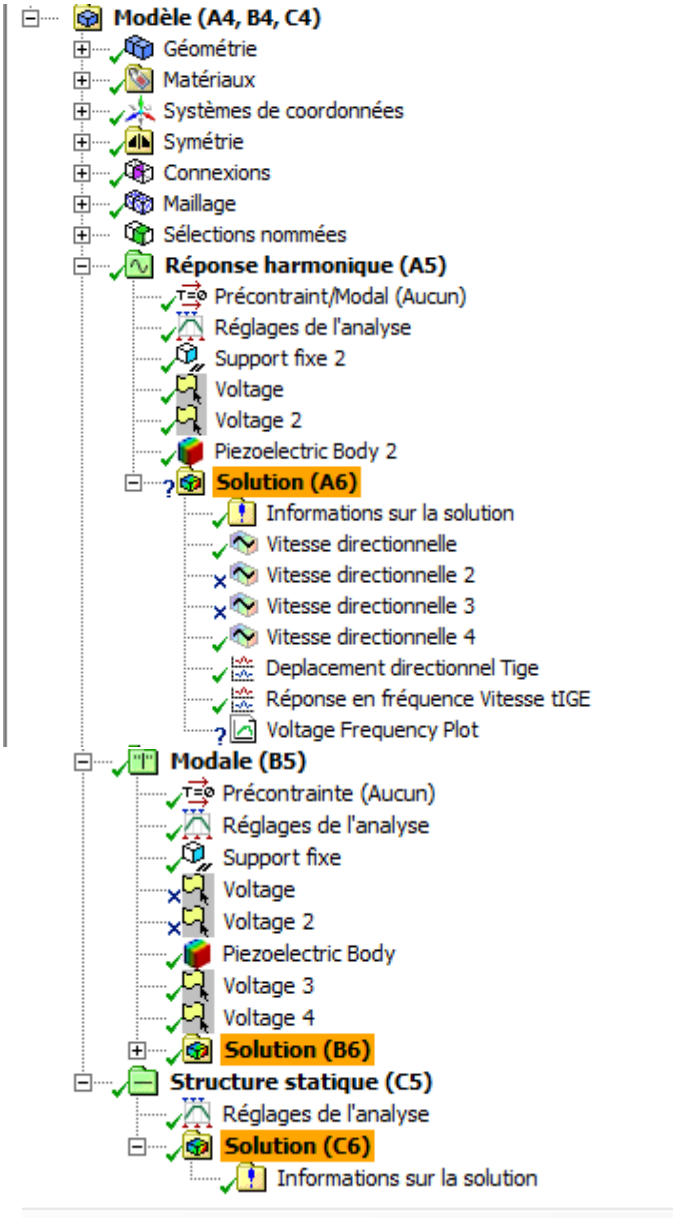


Figure III.7 : les conditions aux limites et les propriétés des matériaux

Les déplacements obtenus en appliquant la fréquence sont présentés en **Figure III.9**

Données tabulaires

	Fréquence [Hz]	Amplitude [m]	Angle de phase [°]
1	10725	1,0424e-007	0,
2	10950	2,677e-008	180,
3	11175	9,615e-009	180,
4	11400	4,8782e-009	0,
5	11625	1,0288e-008	180,
6	11850	6,3857e-009	180,
7	12075	4,8619e-009	180,
8	12300	3,9593e-009	180,
9	12525	3,3434e-009	180,
10	12750	2,8908e-009	180,
11	12975	2,5422e-009	180,
12	13200	2,2645e-009	180,
13	13425	2,0377e-009	180,
14	13650	1,8488e-009	180,
15	13875	1,6889e-009	180,
16	14100	1,5517e-009	180,
17	14325	1,4327e-009	180,
18	14550	1,3284e-009	180,
19	14775	1,2362e-009	180,
20	15000	1,154e-009	180,

TABLEAU III.1 : Les amplitudes en fonction des fréquences propres.

L'analyse modale a permet d'obtenir les fréquences propres des éléments piézoélectriques ainsi que les modes propres associer à ces fréquences (Voir tableau Chap. 4)

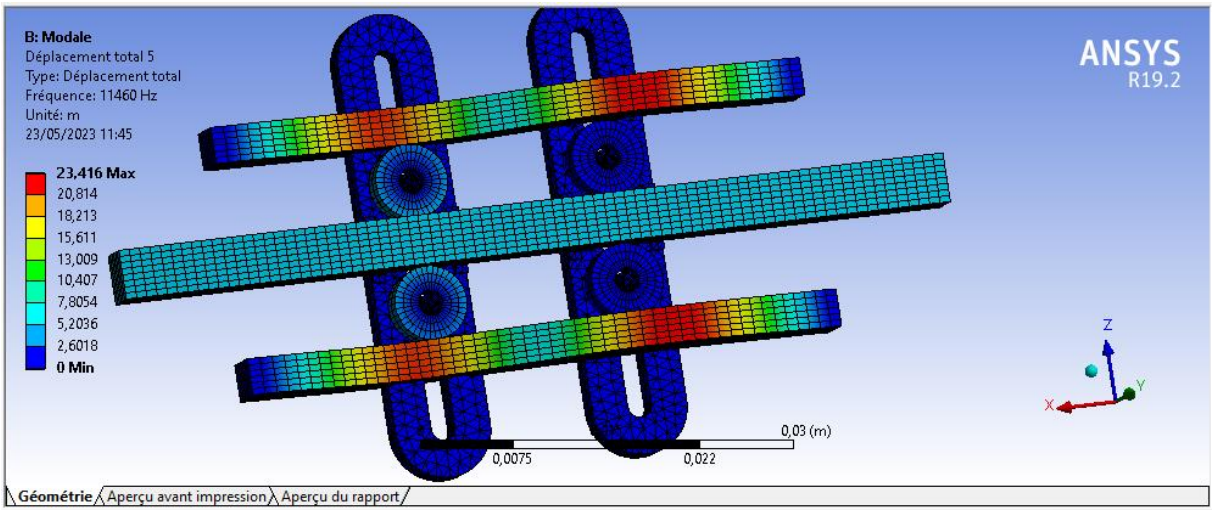


Figure III.9 : Déplacements produit en appliquant la fréquence 11460 Hz.

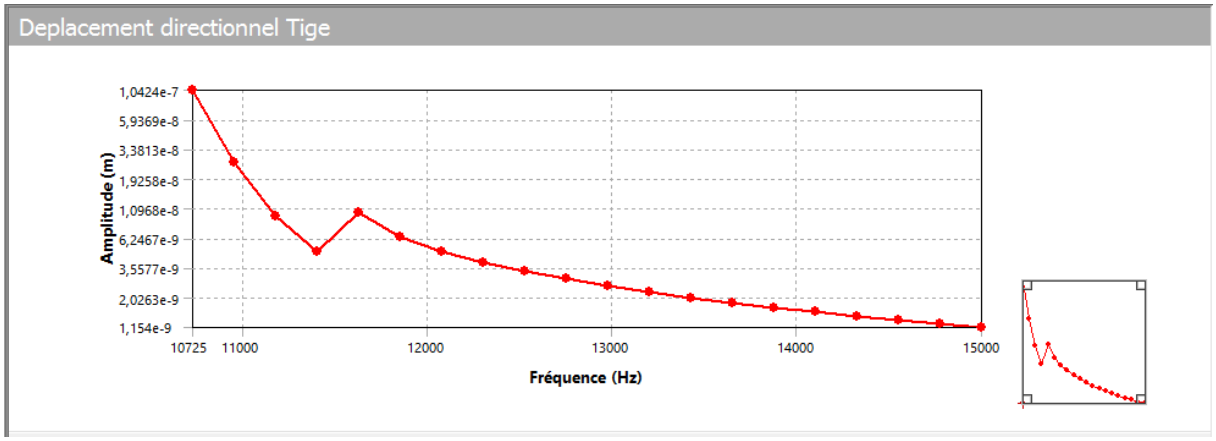


Figure III.10 : déplacement directionnel de tige

Le solveur d'Ansys utilise la Méthode de Newton Raphson pour la résolution des équations.

III .3.2Méthode Newton Raphson :

Comme nous le savons, les équations linéaires ne donnent pas la réponse pour l'analyse non linéaire. Cependant, des séries itératives d'approximations linéaires avec corrections peuvent être utilisées pour analyser la structure non linéaire. Ce processus itératif d'équilibre appelé méthode Newton Raphson.

Dans le cas d'une simulation non linéaire, la rigidité de la structure n'est pas constante par rapport à la charge (la force par rapport au déplacement n'est pas aussi droite). Ces changements de rigidité sont principalement dus à un matériau non linéaire (le matériau n'obéit pas à la loi des crochets, à une déformation plastique du matériau après limite d'élasticité), à une géométrie non linéaire (grande déformation due à des charges petites ou plus importantes) ou à une non linéarité de contact (l'état du contact change brusquement). Dans de tels scénarios non linéaires, des changements soudains dans tous les aspects (comme l'application de la charge complète en une seule étape) peuvent causer des difficultés de convergence. Les charges doivent donc être appliquées progressivement pour éviter les problèmes de convergence.

Voyons un exemple simple comme le montre le graphique.

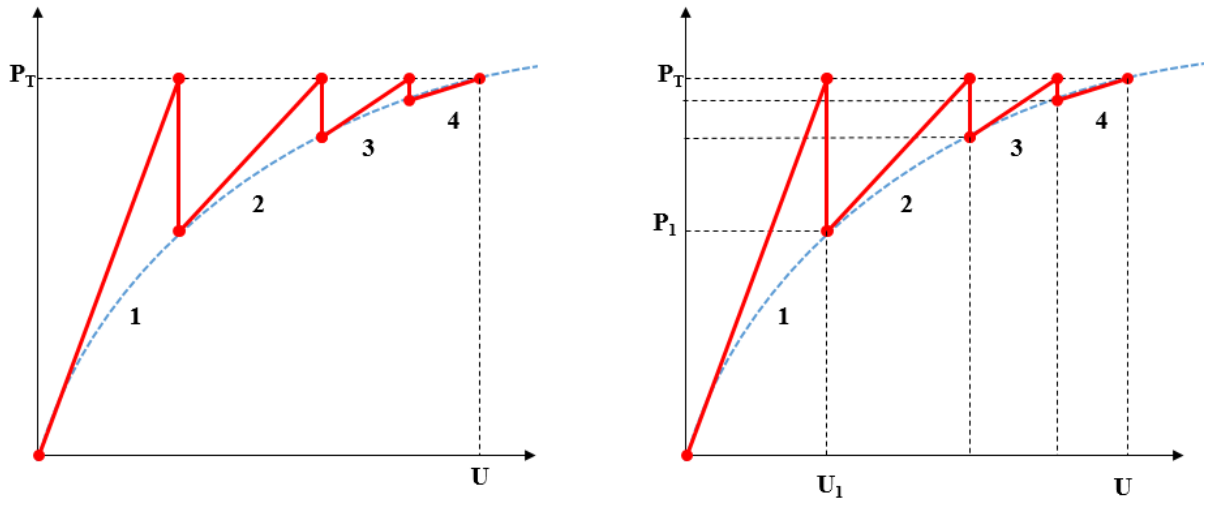


Figure III.11 : Méthode Newton Raphson

CHAPITRE 04

Résultats et Interprétation

IV.1 Résultats et interprétation

Après la conception du moteur dans Spaceclam. La solution des résultats en ANSYS Mechanical était la suivante.

IV.2 L'analyse modale

Tableau des fréquences :

1	25,965
2	4362,3
3	6696,6
4	10774
5	11460
6	21169
7	22897
8	25413

9	28888
10	31749
11	32891
12	34829
13	38274
14	39154
15	46218
16	48944

17	56750
18	60638
19	65058
20	68502
21	69680
22	70206
23	75808
24	82525
25	85062

Tableau IV-1 : Les Fréquences d'analyses modales

En analysant les modes propres associer à chaque fréquence propre du tableau IV-1 on trouve que les fréquences $5^{ième}$ et $20^{ième}$ produisent le mouvement désiré.

Ces fréquences sont comprises entre 10500 et 69500 Hz donc l'analyse fréquentielle se limite à cette fourche.

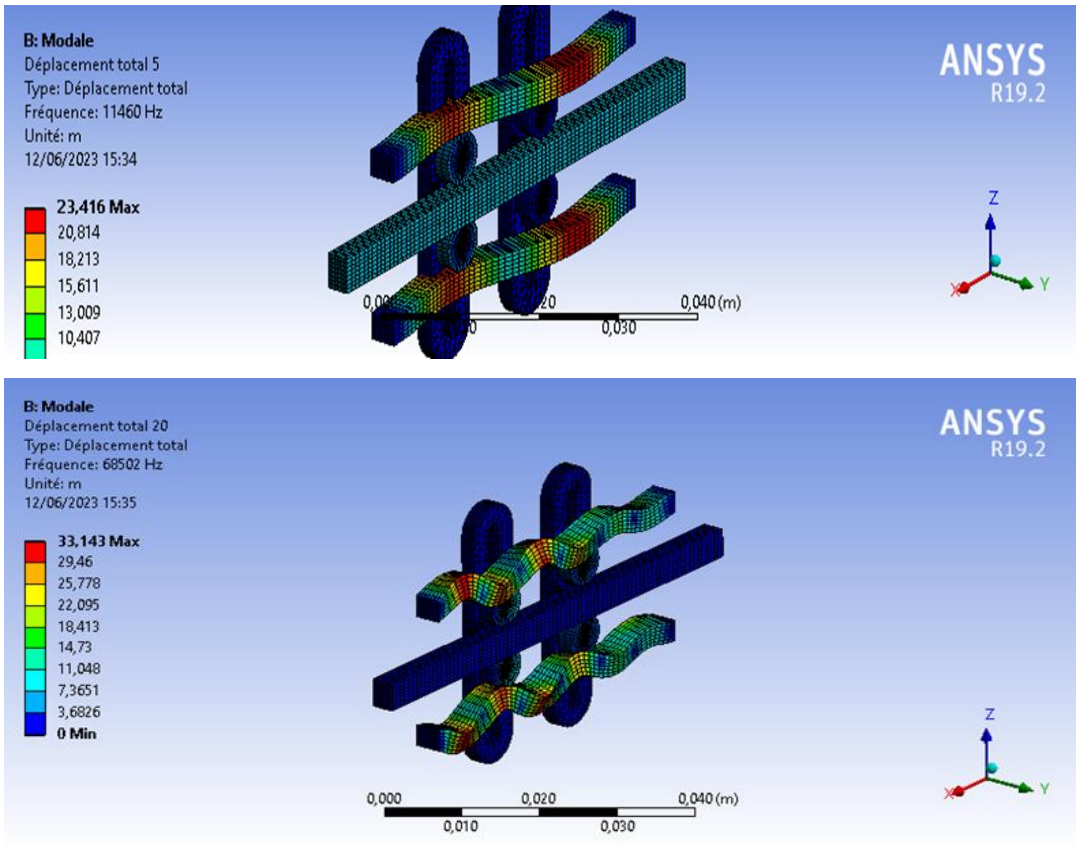


Figure IV.1 : Analyse modale du 5^{ième} et 20^{ième} fréquence

IV.3 Analyse Harmonique

On a pris en considération deux valeurs (0,2 et 0, 3) pour le coefficient de frottement entre les galets et la tige.

Pour un coefficient de frottement de valeur de 0,2 :

Déplacement directionnel de la tige : l'analyse fréquentielle du moteur a donné le spectre de la figure III.10. L'amplitude exprime le déplacement selon l'axe « x » de la tige.

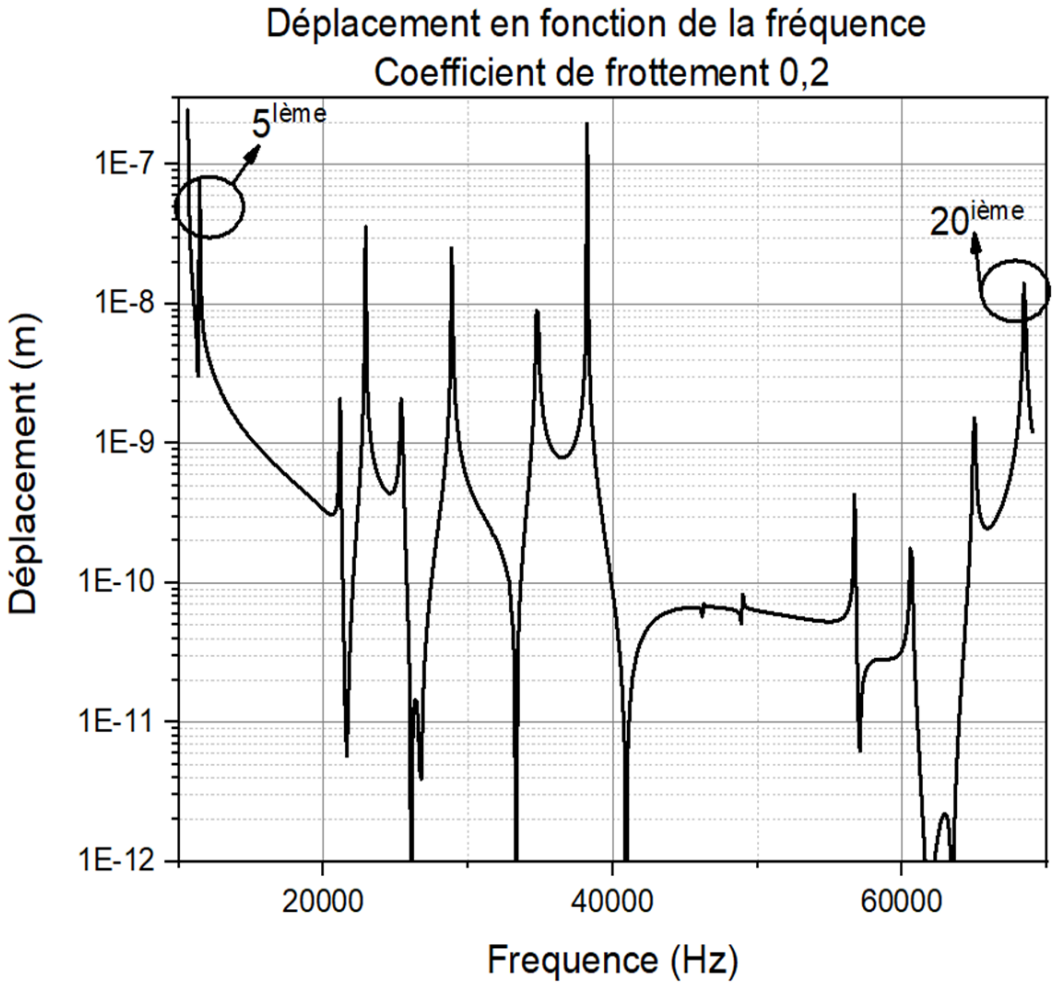


Figure IV.2 : déplacement directionnel de la tige en fonction de la fréquence Pour coefficient de frottement 0,2

Vitesse de la tige :

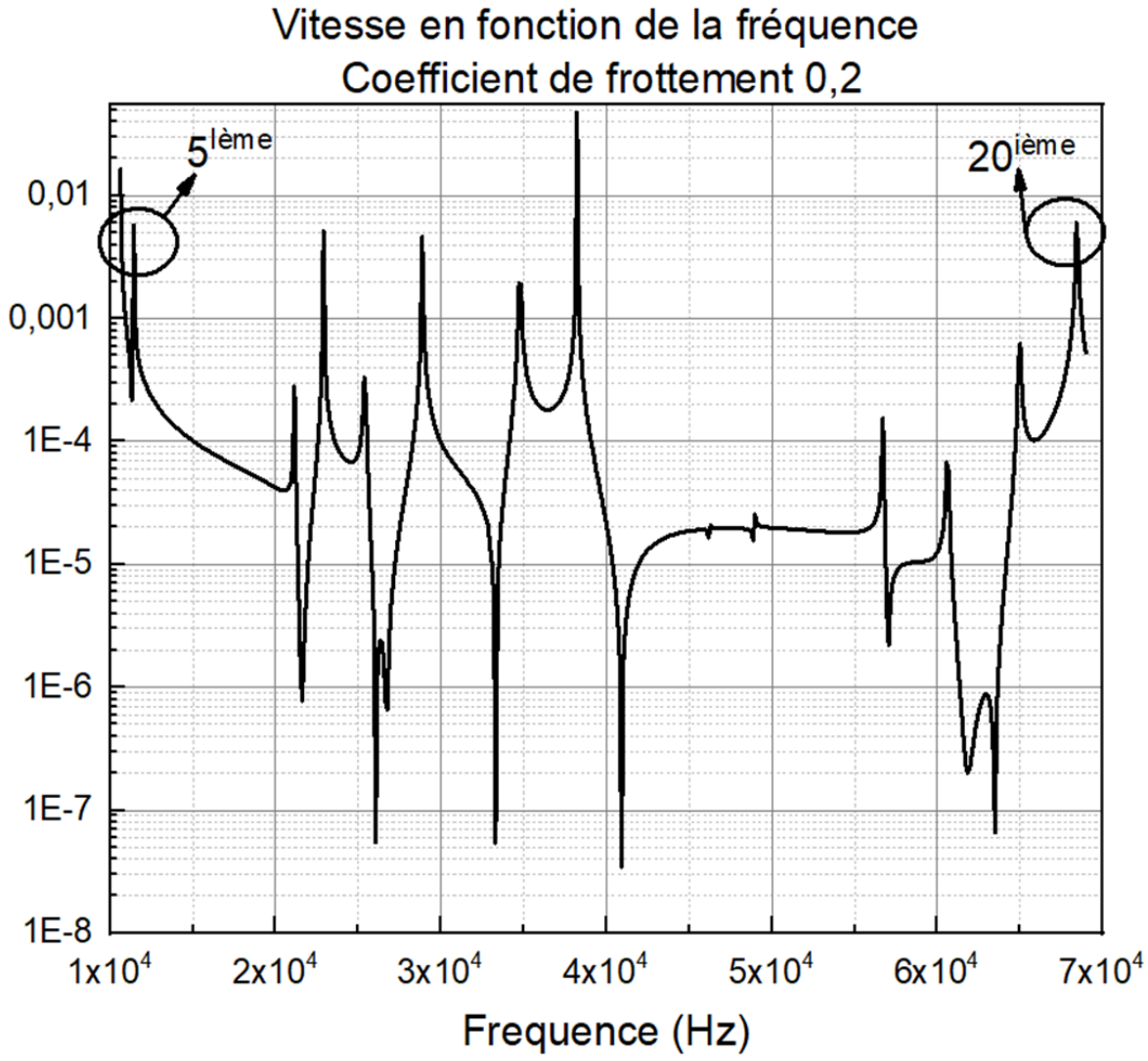


Figure IV.3 : vitesse de la tige en fonction de la fréquence Pour coefficient de frottement 0,2

	5eme	20eme
Déplacement de tige	9,06E-09	2,43E-09
Vitesse de tige	6,31E-04	1,96E-04

Tableau IV-2 : les vitesses et déplacements de la tige en mode propre Pour coefficient de frottement 0,2

Pour coefficient de frottement 0,3 :

Déplacement directionnel de la tige :

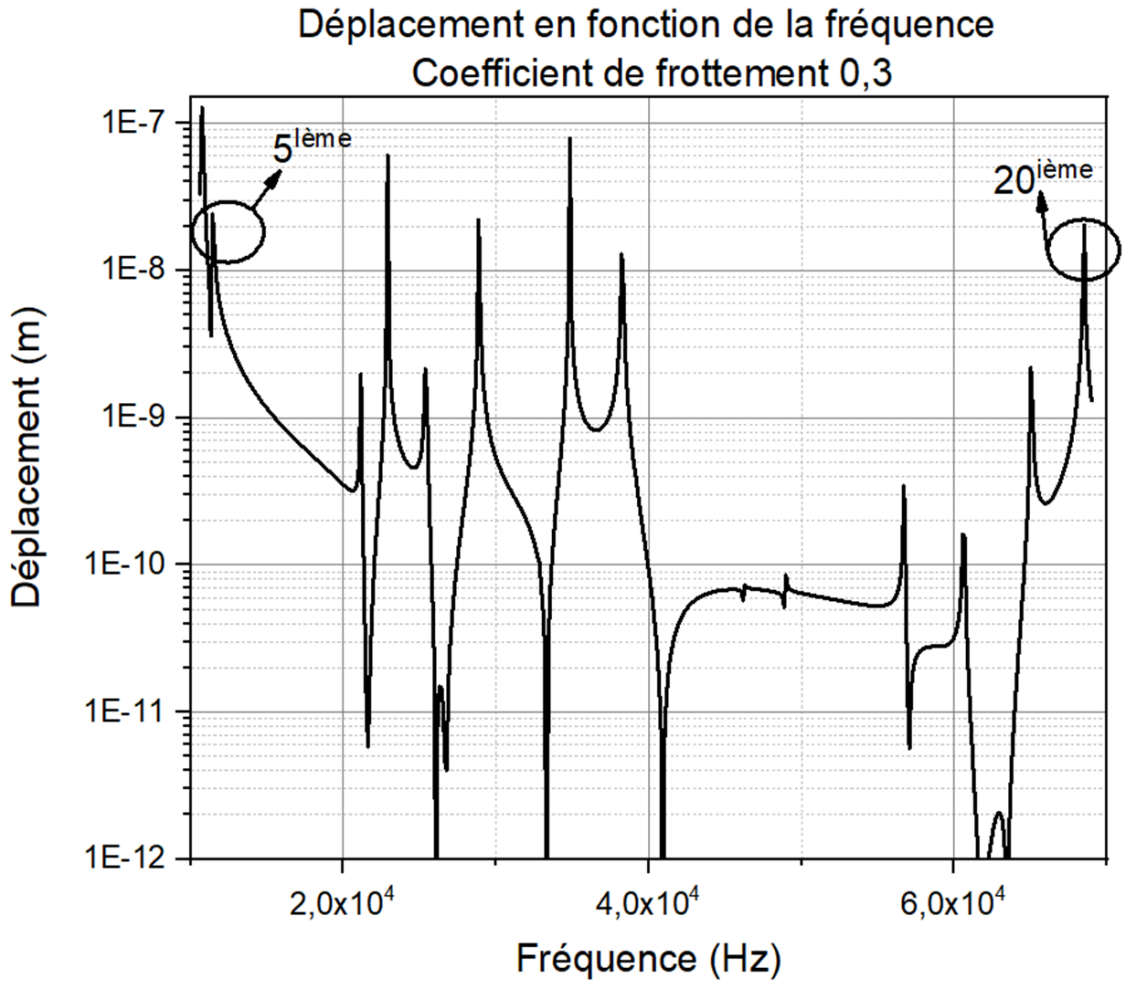


Figure IV.4 : déplacement directionnel de la tige en fonction de la fréquence Pour coefficient de frottement 0,3

Vitesse de la tige :

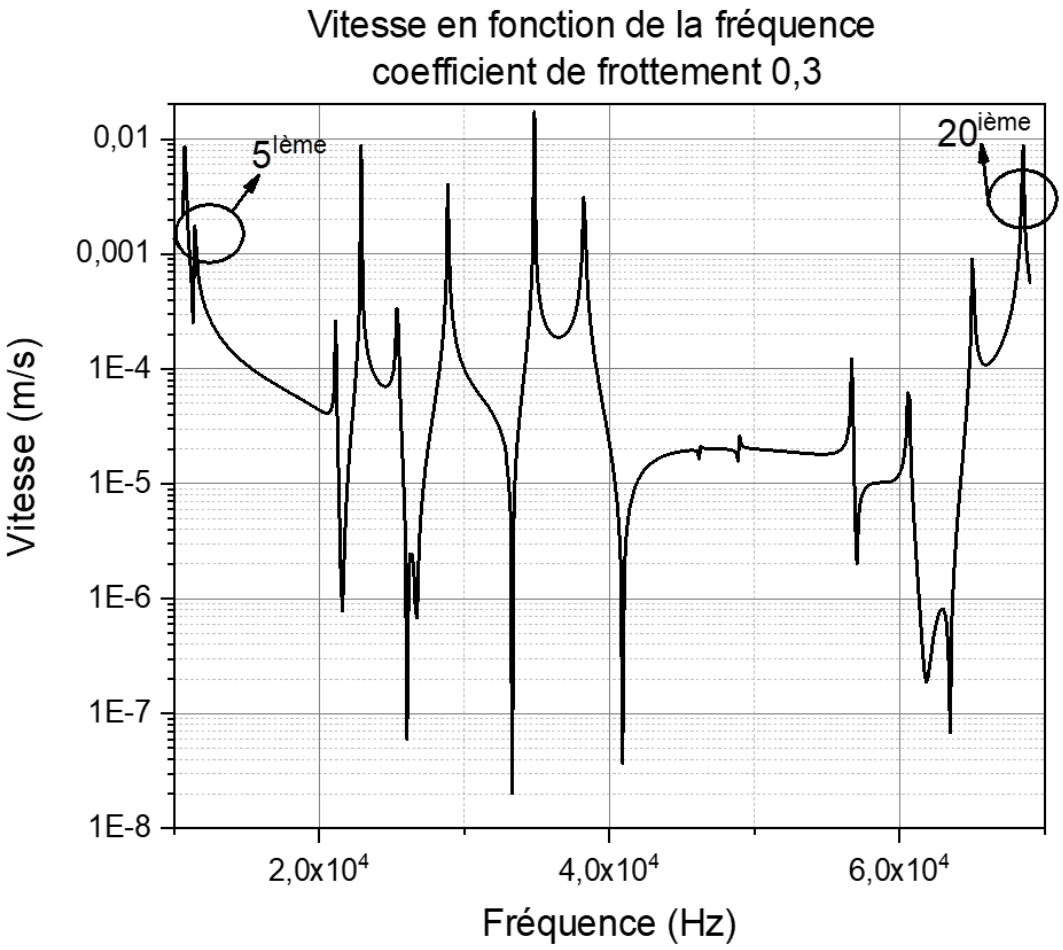


Figure IV.5 : vitesse de la tige en fonction de la fréquence Pour coefficient de frottement 0,3

	5eme	20eme
Déplacement de tige	1,39E-08	2,74E-09
Vitesse de tige	9,66E-04	2,21E-04

Tableau IV-2 : les vitesses et déplacements de la tige en mode propre Pour coefficient de frottement 0,3.

D'après les résultats obtenus on constate que le coefficient de frottement influe positivement sur la vitesse, une bonne adhérence entre les galets et la tige améliore la qualité de la vitesse produite. En comparant les résultats obtenus par l'article [11] avec ceux obtenues par le présent travail on constate que….

- Une nette amélioration dans le déplacement et la vitesse produites par la $5^{ième}$ fréquence pour le coefficient 0,3 que pour ceux de la $20^{ième}$ fréquence, ce qui explique notre choix de fréquence de service qui est 11460 Hz

La $11^{ième}$ fréquence produit une vitesse de l'ordre de 10^{-2} m/s, mais le mouvement obtenu n'est pas désiré pour le fonctionnement du moteur

Conclusion Générale

Nôtre travail consiste a l'étude et la conception d'un moteur linéaire actionné par des éléments piézoélectriques en ajoutant quelques modifications géométriques (galets avec leur support) et des changements des coefficients de frottement pour étudier le comportement ainsi que leur influence sur la vitesse et déplacement de la tige. pour faire une comparaison à l'étude précédente mentionné ci-dessus où le résultat a été que le coefficient de frottement influe positivement sur la vitesse, une bonne adhérence entre les galets et la tige améliore la qualité de la vitesse produite

Pour les études futures, ce moteur peut être étudié en tenant compte du changement d'effet de température, du type de matériau (Alu, Acier, Bronze… etc) ou de la tension appliquée.

Références Bibliographiques :

[**1**] CURIE. P, CURIE. J, Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémièdres à face inclinées. C.R. R. Acad. SCI. Paris, 1880, Tome 91, p 294.

[**2**] Jaffe, B. Piezoelectric ceramics. London: Academic Press, p.317, 1971.

[**3**] E. Boucher. Thèse doctorat, Université de Lyon, n° 02 ISAL 0088, 2002.

[**4**] A. HAJJAJI, Caractérisation multi échelle et lois de comportement dans les matériaux ferroélectriques. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2007.P 172.

[**5**] A. BENAYAD, Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique : élaboration, caractérisation et application. Thèse de doctorat : L'institut National des Sciences Appliquéesde Lyon ,2005. P 159.

[**6**] A. PARENT, Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants. Thèse de doctorat : Faculté des Sciences d'Orsay-Université de Paris-sud, 2008. P167.

[**7**] B. GUIFFARD, Elaboration et caractérisation des céramiques ferroélectriques de type PZT fluoré. Thèse de doctorat : Institut National des sciences Appliquées de Lyon, 1999. P151.

[8]Mouhammed Brahim. Modeling and Position Control of Piezoelectric Motors. Automatic. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. English.

[9]Mouhanned Brahim. Modeling and Position Control of Piezoelectric Motors. Automatic. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. English.

[10] P. De Boé. "Les éléments Piezo-laminés appliqués à la dynamique des structures". Thèse de Doctorat de l'université de Liège (2003).

[11] Zemirline Adel, Contribution a l'analyse et l'etude dynamique des poutres, plaques et coques en considérant les effets de l'amortissement structural de latemerature et de la piézoélectricité. Thèse de doctorat : Université de Saad dahleb Blida, 2016

[12]Site officiel du programme ANSYS 2023 Copyright, Inc. 12_5_2023

[13] 2023 Key to Metals AG. Tous droits réservés. Inc. 12_5_2023