REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Construction Mécanique

La Piézoélectricité appliquée aux plaques

Présenté par
Kherroub noureddine
Mabrouki othmane fouad

Proposé et dirigé par

ZEMIRLINE Adel

Promotion 2020

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier **ALLAH** *pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir et pour nous avoir donné du courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.*

Nos remerciements à nos parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute la vie et qui continueront à nous aider dans tous les projets de l'avenir. Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur

***Dr.* ZEMIRLINE Adel** Devant le *pour l'encadrement de ce mémoire son aide, sa patience et sa confiance qu'elle nous a accordée. Nous tenons à remercier : les membres de jury pour avoir accepté de juger notre travail.*

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

« MERCI »

Dédicaces

Tout d'abord je tiens à rendre grâce à **ALLAH** *qui m'a guidé sur la bonne voie.*

Je dédie avec grand plaisir, ce modeste travail à :

Je puisse les honores ;

A mon père ;

A ma chère mère ;

A mes frères et mes chères sœurs ;

*A tout la famille (**kherroub**)*

Et à tous les amis sans exception ;

*A mon binôme **foaed***

Et à Tous mes collègues génie mécanique promotion 2020

Noureddine kherroub

Dédicaces

Tout d'abord je tiens à rendre grâce à **ALLAH** *qui m'a guidé sur la bonne voie.*

Je dédie avec grand plaisir, ce modeste travail à :

Je puisse les honores ;

A mon père

A ma chère mère

A tout la famille

A tous mes amis(e) sans exception ;

A mon binôme ***noureddine***

A Tous mes collègues génie mécanique avec qui j'ai partagé les meilleurs moments.

.

Mabrouki Othmane Fouad

Résumés

ملخص:

زاد استخدام المواد الكهروضغطية في مجال الهندسة بشكل كبير في السنوات الأخيرة، و كمساهمة في دراسة السلوك الديناميكي و السكوني نقترح صفائح ذات خاصية كهرو ضغطية نطبق عليها شحن كهر بائية في مناطق معينة على سطحها وبأشكال مختلفة مع مراعات شكل الصفيحة وحجمها من اكبر الى متوسط الى اصغر للمقارنة بين التشوهات الناتجة عن شحنة كهربائية وذلك باستخدام نظامansys2019 ;

الكلمات المفتاحية .

كهرو ضغطية , صفيحة رقيقة ,صفيحة غليظة , ansys(Workbench)

Abstract

The use of piezoelectric materials in the field of engineering has increased significantly in recent years, as a contribution to the study of dynamic and static behavior we propose different piezoelectric panels to verify the effect of several parameters on their response. These panels are exposed to electrical force, and the electrodes of the plates take several shapes, taking into account the shape and size of the plate from largest to medium to smallest to face the distortions caused by the electric force using the ansys2019 system

Keywordsplates, thin plate ,Thick plate, Piezoelectric, ansys(Workbench) ,

Résumé

L'utilisation de matériaux piézoélectriques en ingénierie a considérablement augmenté ces dernières années, en tant que contribution à l'étude du comportement

Dynamique et statique, nous proposons différents panneaux piézoélectriques pour étudier l'influence de certaines variables sur leurs réponses.

Ces plaques sont soumises à une charge électrique et leurs électrodes prennent des formes différentes.

Nous appliquons une force électrique dans certaines zones de sa surface et sous différentes formes, en tenant compte de la forme et de la taille de la plaque du plus grand au moyen au plus petit pour comparer les déformations causées par la force électrique, en utilisant le système ansys2019

les mots clés :, Plaque épaisse ,plaque mince, piézoélectrique, ansys (Workbench)

Liste des notations

{ }	Vecteur colonne
[]	Matrice
Σ	Sommation
E1, E2	Module de Young
ν	Coefficient de poisson
u	Déplacement suivant
X w	Déplacement transversale
u,,	Déplacements suivant respectivement ox ,oy,oz
x, ,	Coordonnées cartésiennes
γxz, γxy, γyz	Composantes de déformatio
n τxz, τyz	Contrainte de cisaillement
σx, σy	Contrainte normale
σx, σy	Contraintes longitudinales
τxz, τyz	Contraintes de cisaillement transversales
ε	Contrainte de déformation
Ω	La surface supérieure
Q	La charge transversale appliquée
Qij	Coefficient de rigidité
M	Le moment de flexion
N	L'effort normal
Nx	Effort normal par unité de longueur
Mx	Moment de flexion par unité de longueur
ψ	Rotation de la fibre moyenne
α	Coefficient d'expansion thermique
PZT	zircono-titanate de plomb
h	Epaisseur

Sommaire

Remerciements 2

Dédicaces 3

Dédicaces 4

Résumés 5

Liste des notations 6

Sommaire 7

Listes des figures 10

Liste des tableaux 12

.1.Introduction 13

2. Historique 13

3. Etat de l'art 14

CHAPITRE I 20

Etude théorique 20

1: introduction 21

2 :La théorie de la piézoélectricité. 21

2.1 : Effets piézoélectriques 21

2.3 :Relations théoriques : 22

2.4 :Coefficient de couplage piézoélectrique 22

2.5 : Les matériaux piézoélectriques 23

I.3. Théorie des plaques : 26

3.1. Les théories des plaques : 26

3.1.1 Les plaques minces : 26

3.1.1.1définitions : 26

3.1.1.2 Cinématique de déformation : 27

3.1.1.3 Expression des déformations : 28

3.1.1.4 Relations contraintes déformations: 29

3.1.1.7 Lois de changement de repère pour les moments 30

3.1.1.8 Calcul de l'énergie de déformation : 31

3.1.1.9 L'énergie cinétique : 31

3.1.1.10 Équation de la plaque: 32

3.2.2 Les plaques épaisses: 32

3.2.2.1 Introduction 32

3.2.2.2. La théorie de Mindlin : 33

3.2.2.3. Champ de déplacement : 33

3.2.2.4. Relations contraintes – déformations: 34

3.1.2.5 Fonction d'énergies : 34

3.1.2.6. Equation du mouvement : 34

Chapitre II :**LA MÉTHODE DES** 36

ÉLÉMENTS FINIS 36

1. Introduction 37

2.Principe de la méthode des éléments finis 37

Déformation 38

Contrainte 38

Chapitre III : Etude numérique 40

1 :Introduction au logiciel de modélisation et de calcul ANSYS 41

1.2 :Définition 41

1.3 :Principaux produits et capacités 41

1.4 :Plateformes ou environnements 41

1.5 :Organisation de logiciel ANSYS 42

CONCLUSION 53

REFERENCES 55

Listes des figures

Figure.1 Sol de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique par AgoraEnergy [4] 15

Figure.2 Vue éclatée des différents composants du moteur piézoélectrique (à droite) et représentation de l'entrainement du rpar les crêtes de l'onde progressive (à gauche) [4] 15

Figure.3. Les BionicANTs de Festo des fourmis robots à pattes piézoélectrique [4]. 16

Figure.4 Les Robobees principe et constitution. [4] 16

Figure.5 Le Proteus, vue éclatée (à gauche). Action du Proteus sur une tumeur ciblée [4] 17

Figure.6 Chaussure piézoélectrique de MIT [5]. 17

Figure.7: Prototype d'implant dans le genou [05] 18

Figure.08 : Jambe et genouillère génératrice d'énergie pour les tests en situation [5]. ... 19

Fig.I.1 : Effets piézoélectriques direct et inverse.[6] 21

FigureI.2: Corps centrosymétriquc et corps non centros\métrique [6] 22

Figure.I.3: Coefficients de couplage piézoélectrique [6] 23

Figure.I.4: Orientation des grains dans le cristal [6] 24

FigI.5 : Forces agissant sur l'élément de plaque[7] 26

FigI.6 : moments agissant sur l'élément de plaque[7] 27

FigI.7:déformations suivant x 27

FigI.8 .présentation de déplacements u,w 28

FigI.9.changement de repère pour les moments.[7] 31

FigI.10. équilibre de l'élément de plaque 32

Fig I.11. Schéma du déplacement pour la théorie des plaques de Mindlin 33

Fig..1 Les données du matériaux 43

Figure III -2 Géométrie et Maillage de la plaque e=10 44

Figure III.3 :a), b) et c) : Déplacement dans la plaque e=10 45

Figure III.4 :a), b) et c) : Déplacement dans la plaque e=5 46

Figure III. 5 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque e=2.5..... 47

Figure III. 6 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surface Carré e=10..... 47

Figure III. 7 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surfaceCarré e=5..... 48

Figure III. 8 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surfaceCarré e=2.5..... 49

Figure III -9 Géométrie et Maillage de la plaque..... 50

Figure III -10 : a), b) et c) : Déplacement dans la Plaque en électrodes zigzag ou (Z) 51

Figure III -11 Géométrie et Maillage de la plaque..... 52

Figure III -12 : a)et b) : Déplacement dans la Plaque en électrodes zigzag ou (Z).... 53

Liste des tableaux

Tableau.I.1: Avantages et inconvénients de chaque famille de matériaux[6]..... 24

Tableau.I.2: Comparaison des matériaux piézoélectriques [6]..... 25

Tab III.1.Propriétés du matériaux PZT-5H.[2]43Figure III-2 Géométrie et Maillage de la plaque e=10 44

.1.Introduction

La piézoélectricité (du grec πιέζειν,) *piézein*, presser, appuyer) est la propriété que possèdent certains matériaux de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique *direct* ; le second effet piézoélectrique *inverse*. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Une application parmi les plus familières est l'allume-gaz. Dans un allume-gaz, la pression exercée produit une tension électrique qui se décharge brutalement sous forme d'étincelles : c'est une application de l'effet direct. De manière plus générale, l'effet direct peut être mis à profit dans la réalisation de capteurs (capteur de pression…) tandis que l'effet inverse permet de réaliser des actionneurs de précision (injecteurs à commande piézoélectrique en automobile, nanomanipulateur…)…etc

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Le plus connu est sans doute le quartz, toujours utilisé aujourd'hui dans les montres pour créer des impulsions d'horloge. Mais ce sont des céramiques synthétiques, les PZT, qui sont le plus largement utilisées aujourd'hui dans l'industrie. En 2010, le marché des dispositifs piézoélectriques est estimé à 14,8 milliards de dollars[1].[1]

2. Historique

Certains matériaux se polarisent lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. Ce phénomène a été observé expérimentalement, pour la première fois par Jaques et Pierre Curie en 1880. En effet, ces derniers découvrirent que certains cristaux développaient des charges négatives et positives sur certaines portions de leurs surfaces lorsqu'ils étaient compressés dans des directions particulières. Ces charges étaient proportionnelles à la pression exercée et disparaissent lorsque la pression cesse d'être exercée. Avant la fin de l'année 1881, les frères Curie vérifièrent et affirmèrent l'existence de l'effet inverse, c'est-à-dire, que ces mêmes cristaux, lorsque soumis à l'action d'un champ électrique, se déformaient. Le phénomène ainsi décrit porte le nom de « piézoélectricité »

La piézoélectricité se rapproche beaucoup de l'électrostriction. L'électrostriction est un phénomène selon lequel tous les cristaux se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Inversement, une modification mécanique des dimensions d'un cristal, par application de contraintes, pourra faire apparaître des moments dipolaires : mais ce phénomène n'existe que pour quelques cristaux tels que la somme des moments qui apparaissent ne soit pas nulle. C'est dans ce cas qu'on parle de piézoélectricité. Tandis que l'électrostriction n'est pas réversible, la piézoélectricité est caractérisée par une réciprocité de l'effet direct (application d'une déformation mécanique par application d'un champ électrique) et l'effet inverse (apparition d'une polarisation par application de contraintes mécaniques[02]

3. Etat de l'art

Plusieurs organismes se sont intéressés au domaine du développement scientifique dans le domaine de la fabrication de dispositifs à système piézoélectrique, y compris des convertisseurs piézoélectriques, qui coïncidait avec le développement scientifique en 1950 des céramiques ferroélectriques appartenant à la famille cristalline des Pérovskites. La première architecture fut proposée en 1956 et brevetée en 1958 par Charles A. Rosen qui conçut une structure élévatrice de tension façonnée dans un barreau de titanate de baryum (BaTiO3) qui trouve ses premières applications en tant que filtre passe-bande et alimentation haute tension Malgré le caractère novateur de cette technologie, le transformateur piézoélectrique a été délaissé et n'a suscité que peu d'intérêt lors des années qui ont suivi son invention. [3]

Dans les années 70, des entreprises américaines et japonaises (Motorola, Denki Onkyo, Matsushita, etc.) ont voulu utiliser les transformateurs piézoélectriques pour générer la tension nécessaire dans le tube cathodique de la télévision. Dans les années 80, Siemens et General Electric ont travaillé sur une éventuelle application des transformateurs piézoélectriques pour déclencher la commande des commutateurs de puissance tels que le thyristor, mosfet, etc, avec un découplage galvanique, mais sans succès. Il a fallu attendre la fin des années 80 et l'amélioration significative des techniques de fabrication des céramiques piézoélectriques,

que le concept de Rosen soit révisé et orienté principalement vers l'utilisation des transformateurs piézoélectriques dans l'alimentation des lampes à cathode froide pour les écrans à cristaux liquides (CCFL) [3]

Cette technologie n'a atteint un succès commercial que dans les années 90 quand plusieurs entreprises japonaises décident d'introduire le transformateur piézoélectrique dans des applications nécessitant des circuits électroniques miniaturisés Actuellement, près de 30 millions de transformateurs piézoélectriques sont vendus dans le monde chaque année pour différentes applications et à des prix de plus en plus abordables. [3]

L'optimisation du concept initial de Rosen, suite aux progrès réalisés dans la synthèse des céramiques piézoélectriques a donné naissance à une variété de transformateurs de tension piézoélectriques depuis 20 ans. Le primaire et le secondaire sont polarisés dans un bain d'huile avec des champs électriques de quelques kV/cm pendant quelques minutes (20mn) sous une température de l'ordre d'une centaine de degrés[3]

De dimensions millimétriques (volume total < 1cm3) et de poids légers (quelques grammes), ils opèrent dans une gamme de fréquences allant de 1 kHz à 2 MHz, fournissent des densités de puissance allant de 5 à 100 W/cm3 avec un rendement supérieur à 90% et délivrent des tensions pouvant atteindre plusieurs milliers de volts et opérant dans une gamme de température allant de - 40°C à 80°C Depuis quelques années, des micro-transformateurs de moins de 5mm de diamètre et de moins de 1mm d'épaisseur ont été développés

En outre, on assiste ces dernières années à un accroissement spectaculaire de l'utilisation des plaques piézoélectriques multicouches dans la fabrication des transformateurs piézoélectriques [3]

AgoraEnergy développe un sol qui récupère l'énergie mécanique des passants pour la convertir en énergie électrique, grâce à une dalle spéciale contenant des éléments piézoélectriques. Dans des lieux a forte affluence, l'AgoraEnergy est une source durable et locale. Elle peut être utilisée dans l'environnement urbain pour alimenter par exemple l'éclairage et l'affichage.[4]



Figure.1 Sol de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique par AgoraEnergy [4]

Le service mécanique à l'université du Mons en Belgique travaille dans la modélisation de moteur piézoélectrique à onde progressive [4]. Cette dernière en se propageant dans l'anneau statorique, impose à chaque point de celui-ci une trajectoire elliptique (figure), un disque libre en rotation, posé sur le stator vibrant entraine un mouvement de rotation continu à partir d'une vibration piézoélectrique à haute fréquence

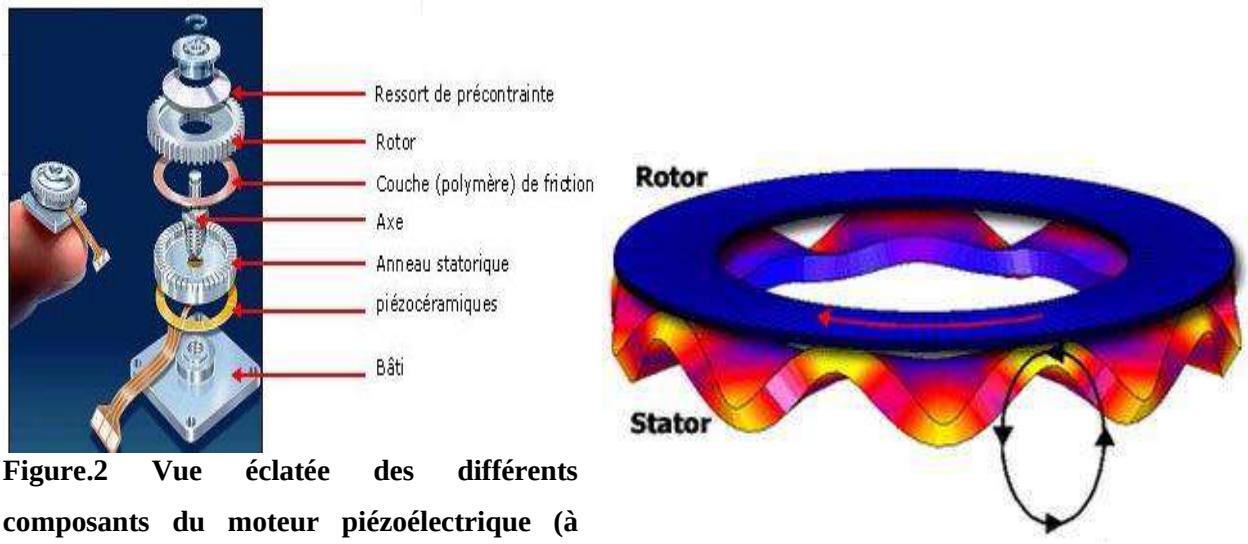


Figure.2 Vue éclatée des différents composants du moteur piézoélectrique (à droite) et représentation de l'entrainement du rpar les crêtes de l'onde progressive (à gauche) [4]

La firme FESTO a développé les BionicANTs ou les robots fourmis, ceux sont des robots capables de collaborer entre eux pour résoudre (ensemble) des taches complexes [4]. Les pattes de ces fourmis sont des actionneurs souples piézoélectriques qui nécessitent peu d'énergie et facilitent les mouvements

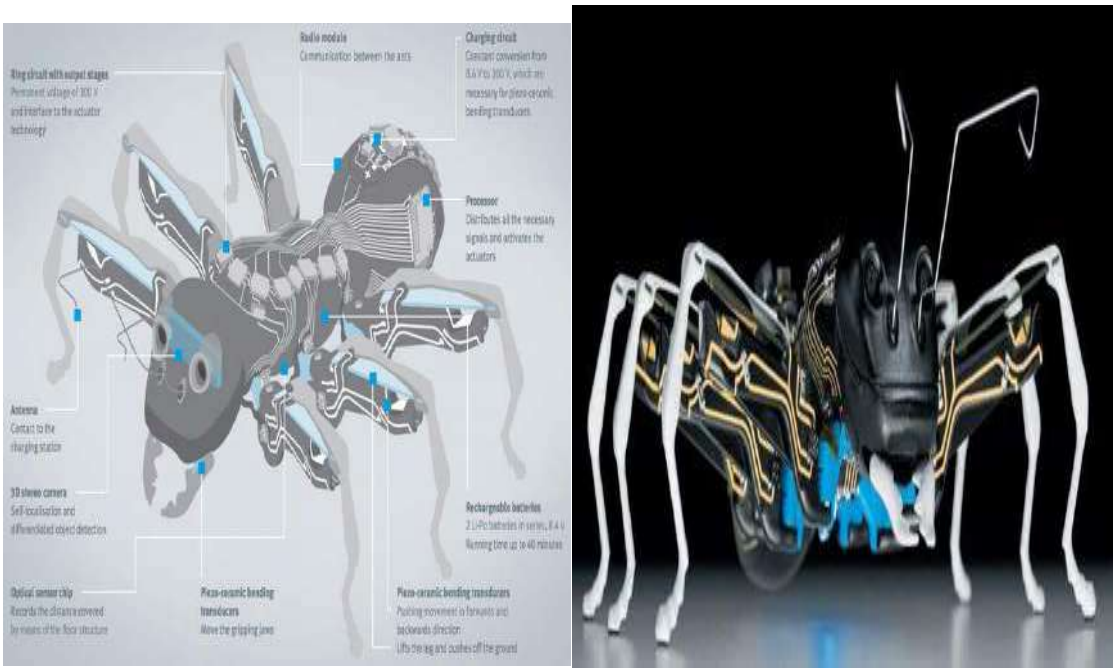


Figure.3. Les BionicANTs de Festo des fourmis robots à pattes piézoélectrique [4].

R. Wood, R. Nagpal et G. Y. Wei [4,] ont étudié et réalisé des robots minuscules destinés a remplacer les abeilles (exterminées par les pesticides) qui n'arrivent plus à polliniser (mode de reproduction des fleurs) efficacement les plantes, leur vol
réalisé grâce à des actionneurs piézoélectriques imitant ainsi celui des insectes.

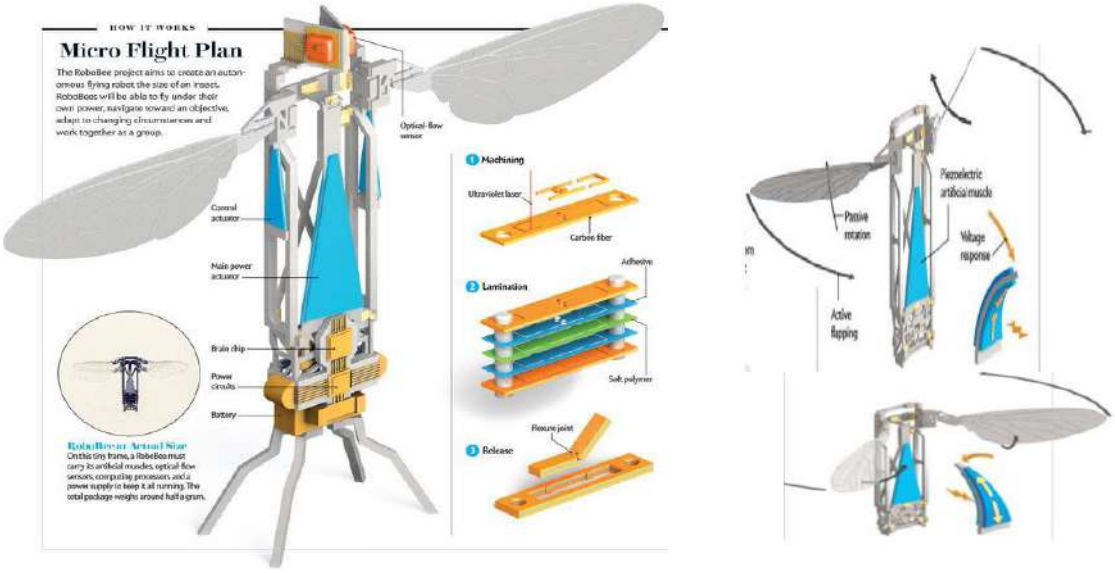


Figure.4 Les Robobees principe et constitution. [4]

Comme application médicale récente, on peut citer le Proteus, c'est un nano-robot destiné à la médecine. Ce robot (vu sa taille de l'ordre du quart de millimètre) peut être introduit dans des vaisseaux sanguins pour embarquer des équipements très spéciaux pour pratiquer des interventions chirurgicales (comme un scalpel ou une caméra), ou une dose très concentrée de médicaments, qu'il pourra injecter directement dans les tumeurs [4]. Ce robot peut se déplacer grâce à des flagelles animées par un moteur piézoélectrique.

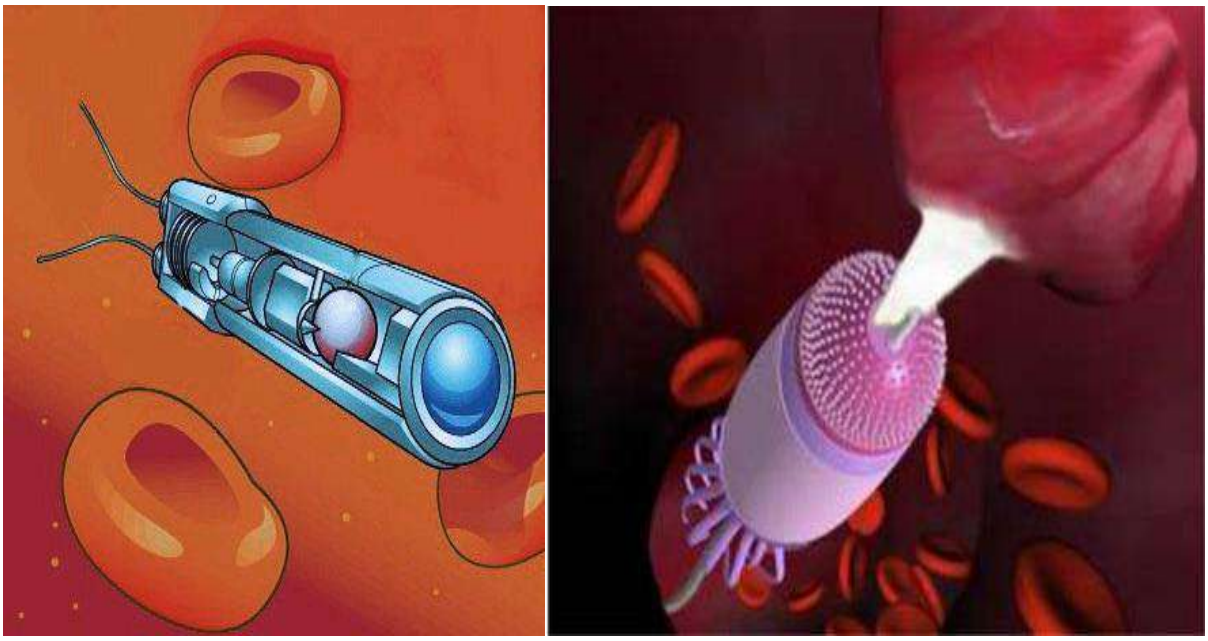


Figure.5 Le Proteus, vue éclatée (à gauche). Action du Proteus sur une tumeur ciblée [4]

d'une chaussure générant de l'énergie pendant la marche, par une équipe du Media Laboratory (MIT) illustré dans **la figure** suivante :

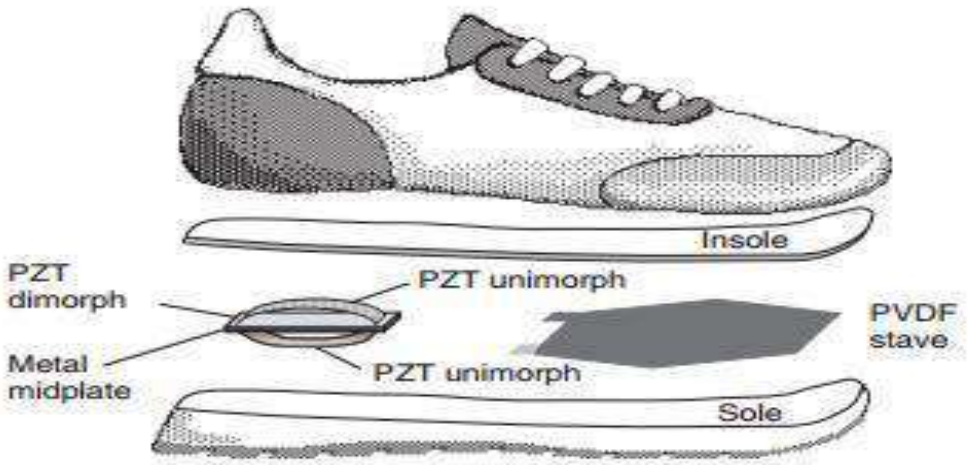


Figure.6 Chaussure piézoélectrique de MIT [5].

Le prototype de chaussure développé par Shenck et al. **[05]** contient deux générateurs piézoélectriques : une plaque de PVDF et un bimorphe en PZT. La puissance obtenue pour ce système fut de 1.3mW à 0.8Hz pour la plaque de PVDF et de 8.4mW à 1.1Hz pour le bimorphe en PZT**[05]**

Un autre dispositif intéressant pour récupérer de l'énergie lors de la marche est un prototype d'implant dans le genou proposé par S.R. Platt et al

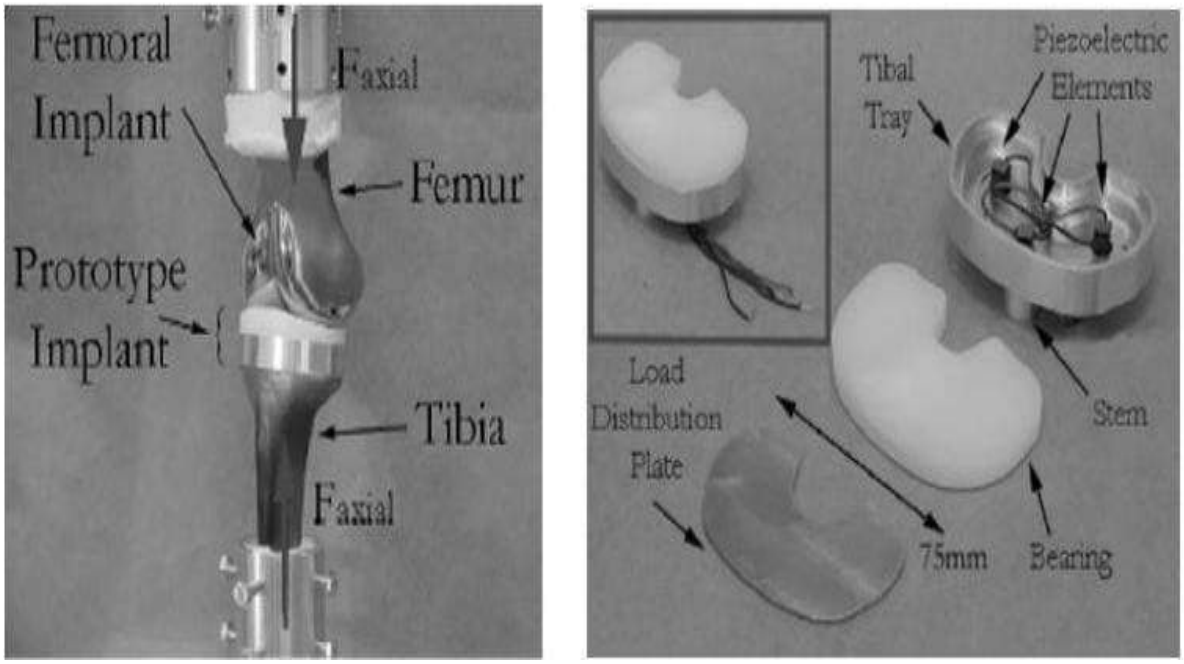


Figure I.7: Prototype d'implant dans le genou [05]

Dans ce dispositif, les éléments piézoélectriques sont du PZT. Ce prototype a produit seulement 4mW pour une force appliquée de 2600N. Cette force est beaucoup trop importante pour des conditions réelles, car elle correspond à 260kg. En conditions réelles, la puissance

récupérée sera beaucoup moins importante. Récupérer de l'énergie sur des implants dans le genou permet d'alimenter des capteurs placés dans l'implant, pour repérer par exemple une

éventuelle asymétrie. L'utilisation des batteries est difficilement envisageable puisque l'implant doit durer 20 ans.

Un dernier exemple de récupération d'énergie en régime quasi-statique est l'utilisation de polymères diélectriques. Cette méthode de récupération d'énergie utilise une transduction électrostatique pour créer de l'énergie. Nous pouvons citer l'exemple du système de C. Jean-Mistral **[05]**, qui a développé une structure placée derrière le genou, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le mouvement de la jambe étire ou compresse le polymère diélectrique, ce qui change sa capacité, et ce qui permet de générer de l'énergie avec le même principe que les générateurs électrostatiques. Pour une marche cadencée à 1 Hz, la structure récupère 100 µW sous une tension de polarisation de 200V, et 1.74 mW sous une tension de polarisation de 1000V

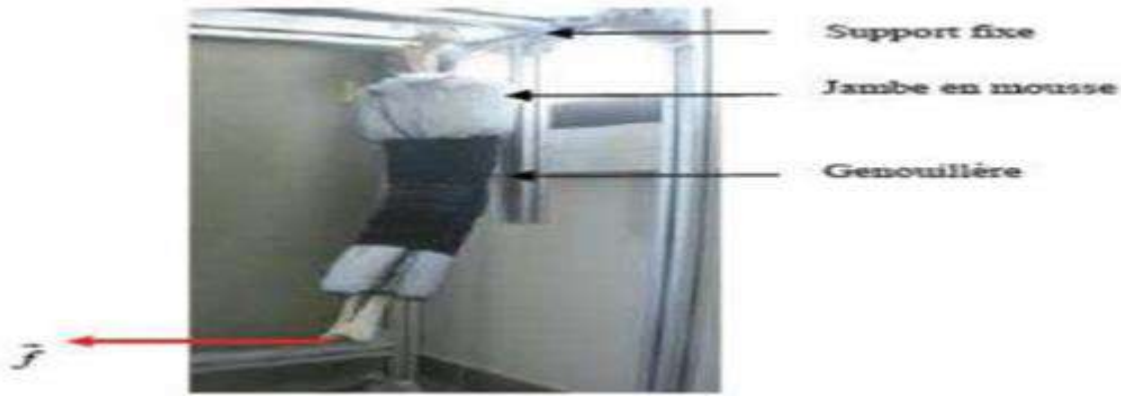


Figure.08 : Jambe et genouillère génératrice d'énergie pour les tests en situation [5].

CHAPITRE I

Etude théorique

1 :Introduction

Dans ce chapitre, nous discuterons de la théorie de la piézoélectricité et de la théorie des plaques

2 :La théorie de la piézoélectricité.

2.1 : Effets piézoélectriques

On peut définir la piézoélectricité comme la propriété que possèdent certains matériaux à se polariser sous l'effet de contraintes mécaniques et à se déformer sous l'effet d'un champ électrique Si une compression est appliquée à la place d'une traction, le signe de la polarité est inversé. De même, si les polarités du champ électrique appliqué changent de signe, le signe de la contrainte développée s'inverse aussi.[6]

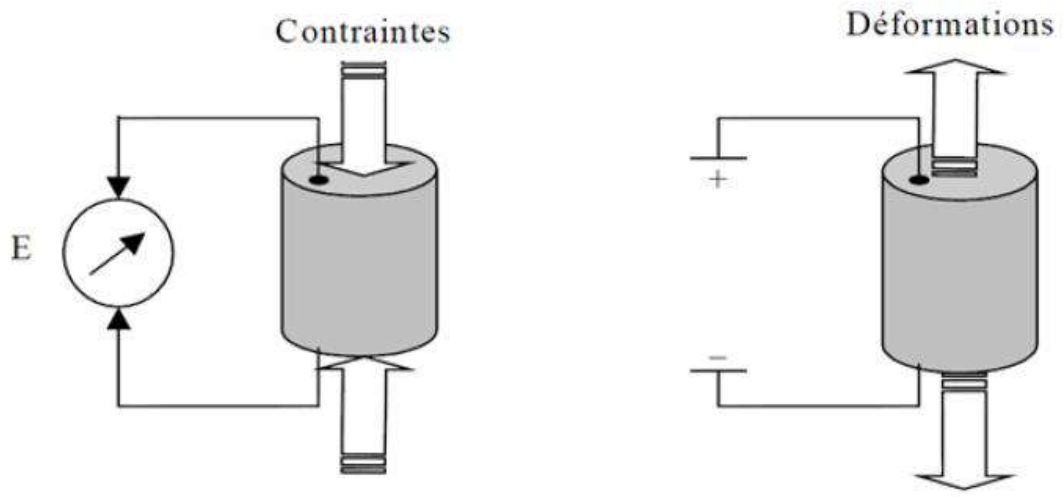
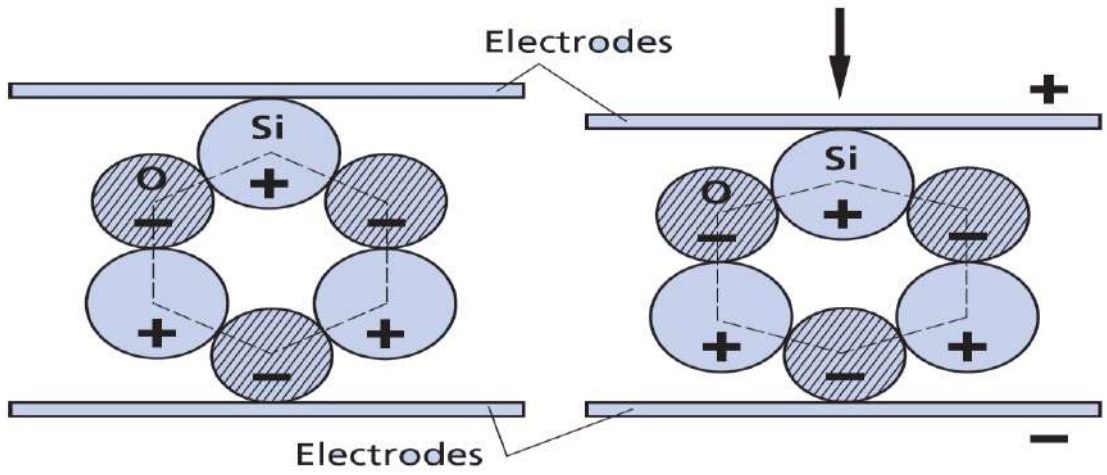


Fig.I.1 : Effets piézoélectriques direct et inverse.[6]

Seuls les matériaux non conducteurs peuvent être piézoélectriques. La piézoélectricité résulte de la création de dipôles internes au sein de chaque maille du cristal. Pour qu'il y ait apparition ou non de ces dipôles internes, les propriétés symétriques des cristaux sont fondamentales. En effet, tout cristal possédant un et un seul centre de symétrie ne peut être piézoélectrique.[6]

En l'absence de centre de symétrie ou en présence de plusieurs, la redistribution des charges internes de chaque maille due aux contraintes mécaniques externes peut aboutir à une polarisation. La polarisation se fait selon un axe privilégié qu'on appelle « axe polaire ».[6]



FigureI.2: Corps centrosymétriquc et corps non centros\métrique [6]

2.3 :Relations théoriques :

Relations qui reflètent le couplage entre les contraintes mécaniques et les constantes piézoélectriques, en tenant compte du fait que les pressions thermiques sont inexistantes

$\sigma_{ij}=Q_{ijKl}\varepsilon_{Kl}- e_{ijK}E_K$

$D_i=e_{iKl}\varepsilon_{Kl}+\bar{\varepsilon}_{iK}E_K$ (1.1)

Sous forme matricielle la relation (1. 1) peut être écrite de la façon suivante :

$\{\sigma\}=[Q]\{\varepsilon\}-[e]^t\{E\}$

(1.2)

$\{D\}=[e]\{\varepsilon\}+[\bar{\varepsilon}]\{E\}$ [4]

2.4 :Coefficient de couplage piézoélectrique

Le coefficient de couplage indique, pour un matériau piézoélectrique, la qualité du transfert d'énergie entre le signal électrique émis par les électrodes et les ondes se propageant dans le matériau. Il varie selon la forme de l'échantillon et le mode de vibration provoquée. La figure donne l'expression de ces coefficients d'après le standard IEEE

$K^2=\frac{Energie\ mécanique\ transformée}{Énergie\ électrique\ fournie}$ (1.3)

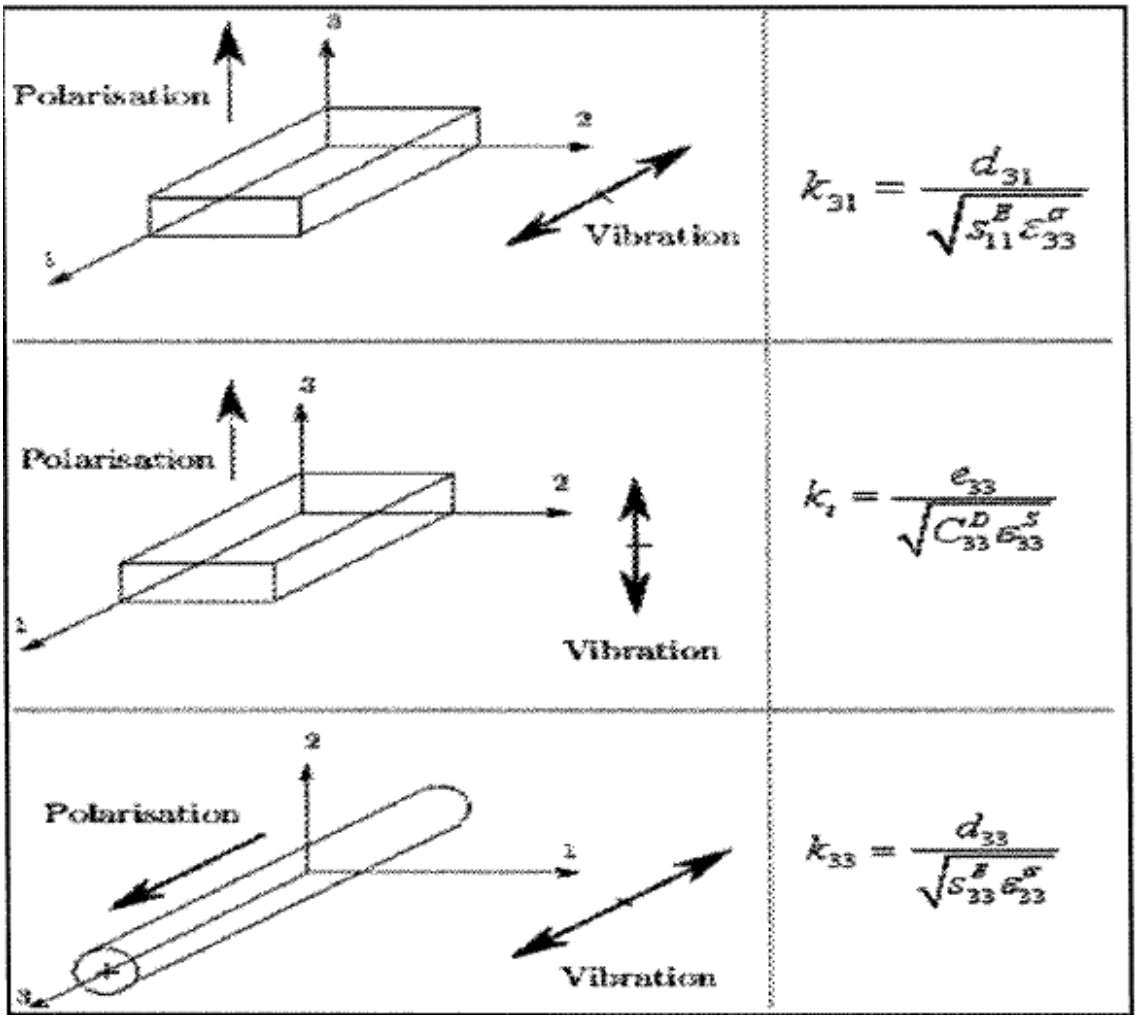


Figure.I.3: Coefficients de couplage piézoélectrique [6]

2.5 : Les matériaux piézoélectriques

On peut regrouper les matériaux piézoélectriques en quatre principales classes.

Les cristaux dont les plus répandus sont le quartz, le niobate de lithium ou le tantalate de lithium (LiTaOa). Ces cristaux ont une piézoélectricité naturelle, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas besoin d'intervention externe pour l'acquérir.

Les céramiques : ce sont souvent des solutions binaires ou ternaires possédant une structure pérovskite. La céramique la plus connue et la plus répandue est sans aucun doute la céramique PZT (plomb, zirconate, titanate).

Les polymères : certains polymères tel que le polyvinylidine difluoride (PVDF) et des copolymères tel que le P(VDF-TrFE) peuvent acquérir des propriétés piézoélectriques. Aujourd'hui, l'utilisation des polymères piézoélectriques est l'une des technologies les plus en croissance dans le monde avec plusieurs milliers de dollars de marché [6].

Les composites : ils sont obtenus par mélange de différents matériaux piézoélectriques afin de tirer avantage des propriétés de chacun.

Les trois dernières classes de matériaux doivent subir une polarisation pour acquérir la piézoélectricité. La Figure présente une section de céramique piézoélectrique, qui se décompose en grains, eux-mêmes divisés en domaines. A l'état vierge, les domaines sont orientés aléatoirement, et la contribution des polarisations naturelles de chacun est en moyenne nulle. On réoriente les axes des grains dans le même sens par application d'unchamp électrique intense à haute température pendant tout le cycle de chauffage et de retour à la température ambiante. Toutefois, il existe une température au-delà de laquelle le matériau perd sa propriété piézoélectrique. Cette température limite est appelée « Température de Curie ».

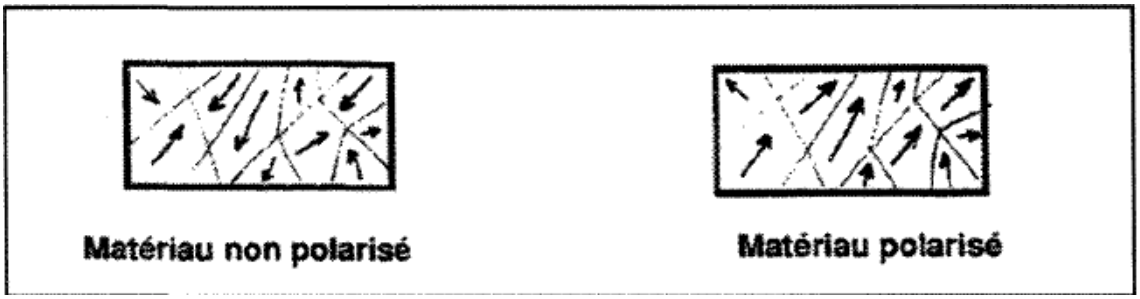


Figure.I.4: Orientation des grains dans le cristal [6]

Les avantages et les inconvénients de chacune des 4 classes de matériaux piézoélectriques sont résumés dans le tableau

	Avantages	**Inconvénients**
Cristaux	Résolution (aptitude à discriminer deux valeurs proches l'une de l'autre) très élevée	Leurs coûts de fabrication sont élevés, ils sont fragiles, difficiles à travailler et à adapter à une géométrie complexe
Céramiques	Ils sont usinables et faciles à transformer, offrent un très large éventail de performances	Ils doivent être polarisés pour acquérir la propriété piézoélectrique
Polymères	Immunité aux interférences électromagnétiques, résistance chimique, durabilité et bas prix	Ils doivent être polarisés pour acquérir la propriété piézoélectrique
Composites	Variables selon la composition	Variables selon la composition

Tableau.I.1: Avantages et inconvénients de chaque famille de matériaux[6]

D'autres propriétés peuvent être présentées comme avantages ou inconvénients selon l'application qu'on veut faire du matériau.

Les valeurs usuelles de certains paramètres sont présentées dans le tableau

Propriété	Unités	PVDF	PZT	$BaTi0_3$
Densité	$10^3 kg/m^3$	1,78	7,5	5,7
Permittivité relative	$\varepsilon / \varepsilon_0$	12	1,2	1,7
Constante d_{31}	$10^{-12} C/N$	23	110	78
Constante g_{31}	$10^{-3} Vm/N$	216	10	5
Constante k_{31}	% à1 kHz	12	30	21
Impédance Acoustique	$10^6 kg/m^2$-s	2,7	30	30

Tableau.I.2: Comparaison des matériaux piézoélectriques [6]

I.3. Théorie des plaques :

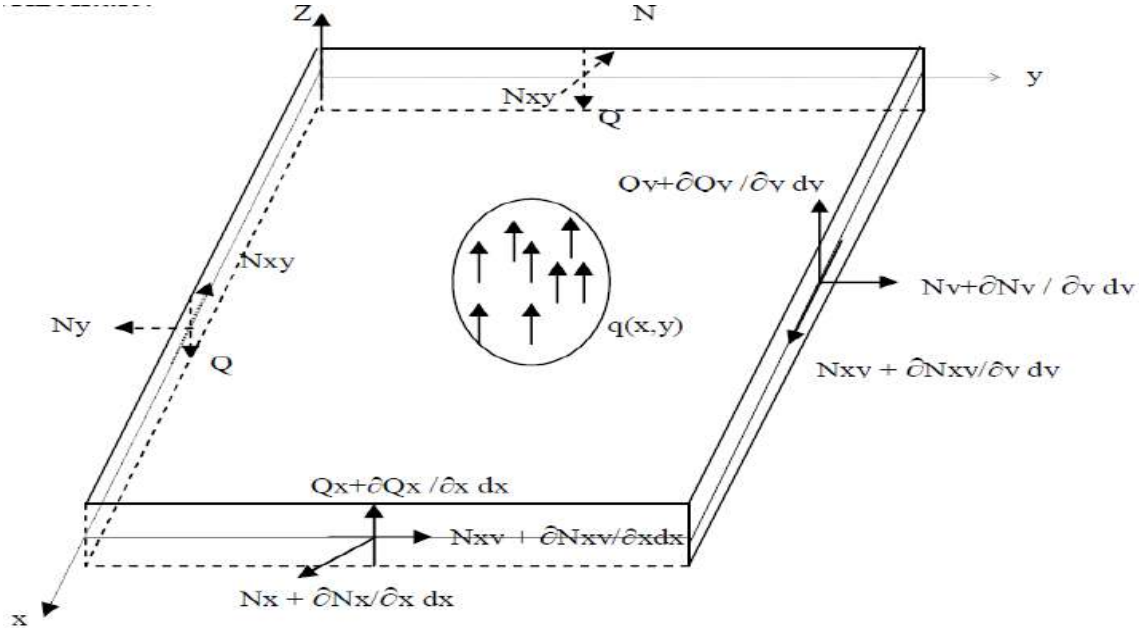
3.1. Les théories des plaques :

3.1.1 Les plaques minces :

3.1.1.1définitions :

Une plaque est un milieu continu ayant une dimension très petite par rapport aux deux autres.

Considérons un élément de plaque rectangulaire d'épaisseur h constante, de longueur dx et de largeur dy, les axes Ox et Oy sont choisis pour contenir la surface moyenne supposée initialement horizontale.[7]



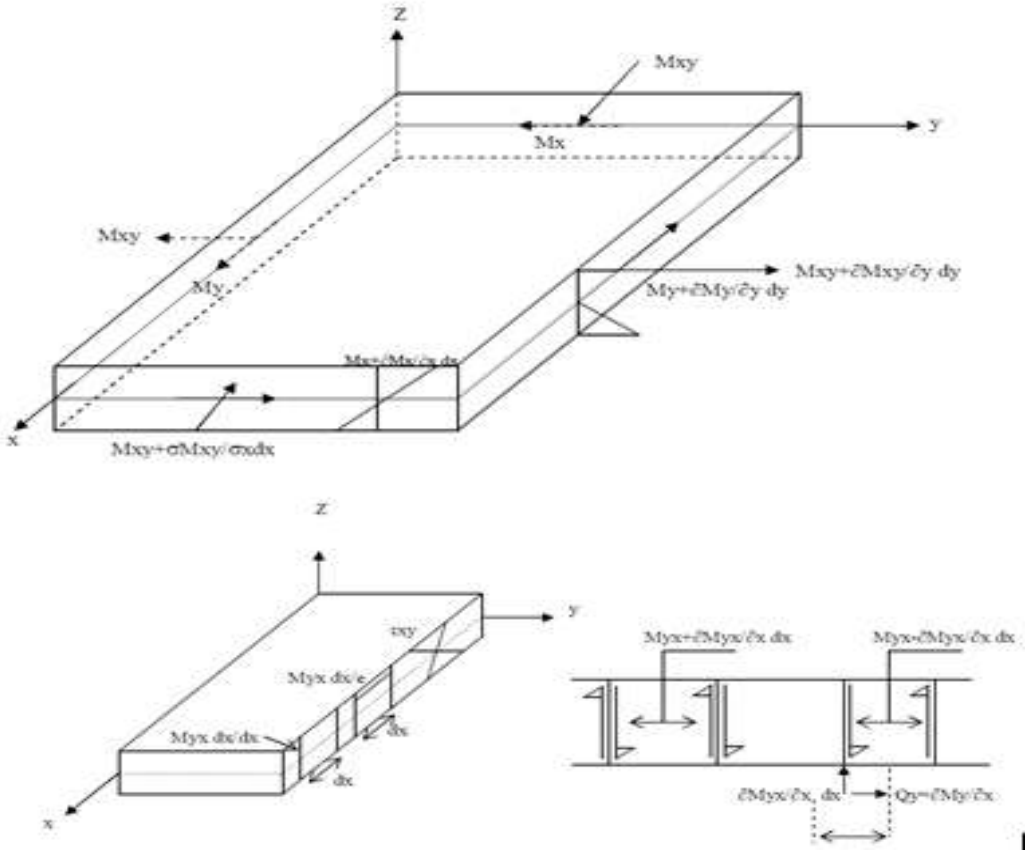
FigI.5 : Forces agissant sur l'élément de plaque[7]

Qx, Qy : les intensités des efforts tranchants

Nx, Ny : les intensités des efforts normaux

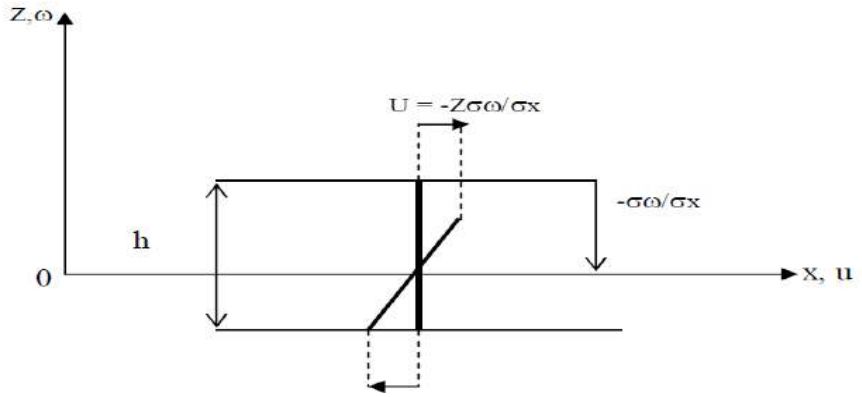
Nxy= Nyx : les intensités de l'effort de cisaillement

q = q(x, y) : l'effort extérieure transversal appliqué à la plaque par unité de surface



FigI.6 : moments agissant sur l'élément de plaque[7]

3.1.1.2 Cinématique de déformation :



FigI.7:déformations suivant x

U : le déplacement longitudinal dû aux efforts normaux suivant Ox :

Les hypothèses cinématiques adoptées pour les plaques minces par **Kirchhoff** généralisent à deux dimensions celles adoptées pour les poutres sans déformations à l'effort tranchant [7] :

1) la plaque est mince d'épaisseur h et possède un plan moyen. les faces extérieures de la plaque sont les plans Z = ± ½ h.

2) seul le déplacement transversal ω est considéré.

3) Les sections droites, initialement normales au plan moyen en restent planes et

normales à celui-ci, ce qui implique que la déformation en cisaillement transverse est négligé.

4) La contrainte σz dans la direction transversale est nulle. Elle doit en effet s'annuler sur les faces extérieures et du fait que la plaque est mince, il est naturel d'admettre qu'elle est nulle en tout z.

5) Les déplacements u et v dans le plan Oxy, résultent de deux effets :

- un champ de déplacement initial et uniforme selon l'épaisseur résultant d'un chargement de la plaque dans son plan (comportement en extension, ou membranaire),
- le champ de déplacement dû à la rotation de la section droite.

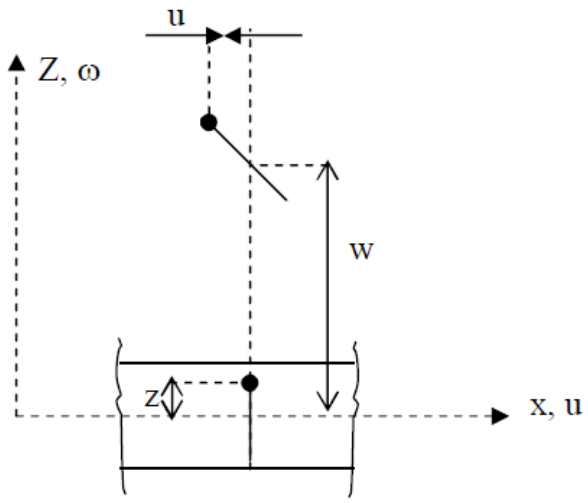
6) Les termes nom linéaires du déplacement sont négligés, en particulier, l'inertie de rotation est négligé.

Elles conduisent aux hypothèses sur les déplacements

$$u = uo(x, y) - Z\frac{\partial \omega}{\partial x} \tag{3.1}$$

$$\sigma = vo(x, y) - Z\frac{\partial \omega}{\partial y} \tag{3.2}$$

$$\omega = \omega(x, y) \tag{3.3}$$



FigI.8 .présentation de déplacements u,w

3.1.1.3 Expression des déformations :

Les déformations de la plaque mince ont pour expressions :

$$\varepsilon x = -Z\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} = -ZXx \tag{3.4}$$

$$\varepsilon y = -Z\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} = -Z\,Xy \tag{3.5}$$

$$\gamma xy = -2Z\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = -Z\ Xxy \tag{3.6}$$

$$\begin{cases} \varepsilon z = \dfrac{\partial \omega}{\partial Z} = 0 \\ \gamma xz = 2\varepsilon xz = 0 \\ \gamma yz = 2\varepsilon y\sigma z = 0 \end{cases} \tag{3.7}$$

3.1.1.4 Relations contraintes déformations:

Les contraintes dans le matériau linéaire et isotrope à partir de la loi hooke.

$$\begin{cases} \varepsilon_X = \dfrac{1}{E}[\sigma_X - \upsilon(\sigma_Y + \sigma_X)] \\ \varepsilon_Y = \dfrac{1}{E}[\sigma_y - \upsilon(\sigma_x + \sigma_z)] \\ \gamma_{xy} = 1/G\,\tau_{xy} \end{cases} \tag{3.8}$$

Avec(σ_z=0)

L'élasticité permet d'écrire :

$$\begin{cases} \sigma x = \dfrac{E}{1-\upsilon^2}(\varepsilon x + \upsilon \varepsilon y) \\ \sigma y = \dfrac{E}{1-\upsilon^2}(\varepsilon y + \upsilon \varepsilon x) \\ \tau xy = G\,\gamma xy \end{cases} \tag{3.9}$$

Avec la définition du module l'élasticité en cisaillement

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \tag{3.10}$$

On peut écrire $\sigma = H\varepsilon$ (3.11)

Avec la définition de la matrice uni colonne des contraintes :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma x \\ \sigma y \\ \tau xy \end{pmatrix} \tag{3.12}$$

Et l'expression de la matrice des coefficients classiques

$$H = \frac{E}{1-\upsilon^2}\begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\upsilon}{2} \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Définition des courbes :

On définit la matrice des courbes

$$\chi = \begin{bmatrix} -\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \\ -\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \\ -2\dfrac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \qquad (3.14)$$

Les deux premiers termes représentent les courbes principales de la plaque dans les directions x et y, et le troisième correspond à la courbure croisée engendrée par la torsion de la plaque. Les déformations de la plaque liées aux termes linéaires de flexion et les contraintes associées sont liées par :

$$\varepsilon = ZX \qquad (3.15)$$

Et $\sigma = H\varepsilon$

Relations moments – courbures :

Les moments de flexions par unité de longueur dans la plaque sont calculés par intégration des contraintes sur l'épaisseur.

$$M = \begin{bmatrix} Mx \\ My \\ Mxy \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{H/2} Z\sigma dz = \int_{-h/2}^{h/2} ZH\varepsilon dz \qquad (3.16)$$

On peut les écrire sous forme matricielle

$$M = H^* x \qquad (3.17)$$

Avec la matrice des coefficients élastique intégrés sur l'épaisseur

$$H^* = \frac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)} = \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \dfrac{1-\upsilon}{2} \end{bmatrix} \qquad (3.18)$$

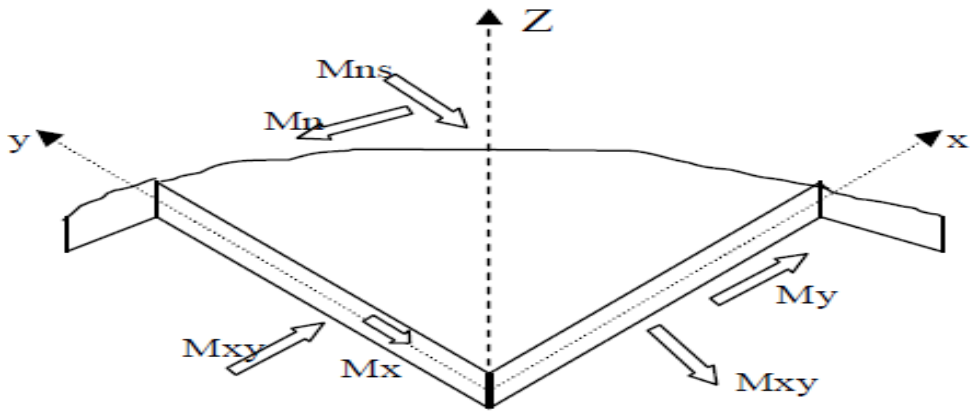
Alors on peut écrire:

$$\begin{Bmatrix} M_X \\ M_Y \\ M_{XY} \end{Bmatrix} = \frac{Eh^3}{12(1-\upsilon^2)} \begin{bmatrix} 1 & \upsilon & 0 \\ \upsilon & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\upsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (3.19)$$

Avec υ : coefficient de poisson

E : module d'Young du matériau constituant la plaque

3.1.1.7 Lois de changement de repère pour les moments



FigI.9.changement de repère pour les moments.[7]

Soit une plaque de contour Γ quelconque, les moments sur le contour Γ de la quelque sont Mn, Ms représentant respectivement :

Mn : Le moment de flexion dans le plan onz. définit tangentiellement au bord,

Ms : Le moment de flexion dans la direction perpendiculaire

Mns : le moment de torsion autour de la normale au contour

On peut remarquer au passage que les moments et courbes obeissent aux lois de transformation des tenseurs, c'est à dire lors d'une transformation d'axes de xy à ns par une[7] rotation α on trouve :

$Mn = Mx \cos^2\alpha + My \sin^2\alpha + 2Mxy \sin\alpha \cos\alpha = -D(Xn + \upsilon Xs)$ (3.20a)

$Ms = Mx \sin^2\alpha + My \cos^2\alpha - 2Mxy \sin\alpha \cos\alpha = -D(Xs + \upsilon Xn)$ (3.21b)

$Mns = (My-Mx)\sin\alpha \cos\alpha + Mxy (\cos^2\alpha - \sin^2\alpha) = -D(1-\upsilon) Xns$ (3.22c)

3.1.1.8 Calcul de l'énergie de déformation :

L'énergie de déformation de la plaque est calculée par intégration sur le volume de la densité d'énergie de déformation

$Uint = \int \varepsilon ij\ cijkl\ \varepsilon kl\ dv$ (3.23)

Si l'on adopte une loi de comportement de type matériau isotrope sous «état de contraintes planes » le tenseur des coéfficients élastiques s'écrit :

$$Cijkl = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\upsilon^2} & \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & \frac{E}{1-\upsilon^2} & \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & \frac{\upsilon E}{1-\upsilon^2} & \frac{E}{1-\upsilon^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\upsilon)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\upsilon)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\upsilon)} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

3.1.1.9 L'énergie cinétique :

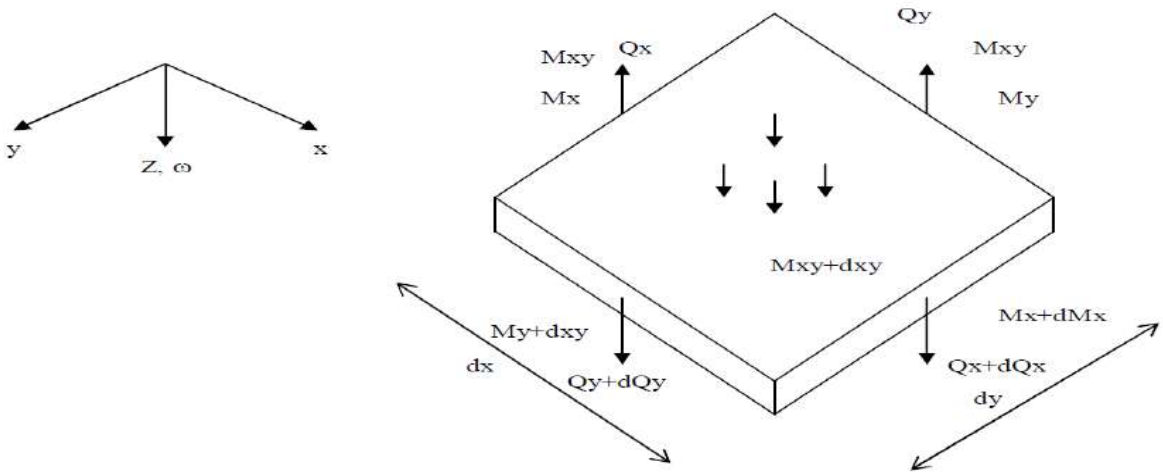
L'énergie cinétique Ty est calculée par intégration de l'énergie cinétique de l'élément de volume :

$T = \frac{1}{2} \int \rho(u^{\cdot 2} + v^{\cdot 2} + \omega^{\cdot 2})\, dv$

Ce qui donne l'expression de l'énergie cinétique suivante :

$$T = 1/2 \int_s m\left\{\dot{\omega}^2 + r^2\left[\left(\frac{\partial\dot{\omega}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\dot{\omega}}{\partial y}\right)^2\right]\right\} ds \qquad (3.25)$$

3.1.1.10 Équation de la plaque:



FigI.10. équilibre de l'élément de plaque

L'équilibre verticale de l'élément plaque (dx, dy) donne lieu à la relation

$$dQxdy + dQy.dx + (P - m\ddot{w})dxdy = 0 \qquad (3.26)$$

Soit :

$$\frac{\partial Q_x}{\partial \chi} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} - m\ddot{\omega} + P = 0 \qquad (3.27)$$

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + 2\frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + P - m\ddot{\omega} = 0 \qquad (3.28)$$

L'équation à la dérivée partielle vérifiée par le déplacement vertical

Soit encore en termes de l'opérateur Laplacien

$$\nabla^2 = \Delta = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \qquad (3.29)$$

3.2.2 Les plaques épaisses:

3.2.2.1 Introduction

La principale limitation de la théorie classique de love-kirchhoff et que l'on néglige les effets dus aux efforts tranchants et a l'inertie de rotation, or dans la pratique les plaques ont des épaisseurs significatives et il devient nécessaire de tenir compte de ces effets pour décrire leur comportement dynamique. D'autre part, la théorie classique ne peut rendre compte des problèmes de contact incluant des plaques et des problèmes de plaques laminées.

Ces limitations ont conduit plusieurs auteurs à proposer des modèles plus raffinés L'un des premiers fut Reissner, suivi par Mindlin et par d'autre. Ces nouvelles théories sont généralement obtenues à partir des équations de l'élasticité tridimensionnelle soit par intégration de ces équations sur l'épaisseur, C'est-à-dire le long des fibres de la plaque, soit par des hypothèses, sur les déplacements et les contraintes faites à l'intérieure de la plaque. Toutes ces théories découplent toujours les effets de flexion et de contrainte plane.[7]

3.2.2.2. La théorie de Mindlin :

Cette théories proposé par Mindlin, en 1951, prend en compte les déformation dues à l'effort tranchant et l'effet dû à l'inertie de rotation. Cette approche plus fine du problème des plaques repose également sur une autre cinématique de la déformation, et donc une autre expression des conditions aux limites.[7]

Pour les hypothèses de Mindlin, reprennent les points (1) et (4) celle de kirchhoof, les points 2 et 3 des précédentes hypothèses ne sont plus retenus afin de prendre en compte les deux nouveaux effets[7]

3.2.2.3. Champ de déplacement :

Dans la théorie des plaques de Reissner-Mindlin les composants des champs de déplacement sont définies comme :

$$U(x, y, z, t) = -Z\Psi x(x, y, t) \quad (3.30)$$

$$V(x, y, z, t) = -Z\Psi y(x, y, t) \quad (3.31)$$

$$W(x, y, z, t) = \omega(x, y, t) \quad (3.32)$$

Où t représente la variable temps, u et υ sont les déplacements dans le plan de la plaque, ω est le déplacement transverse et enfin Ψx, Ψy les rotations en flexion de normales transverses aux axes x et y.

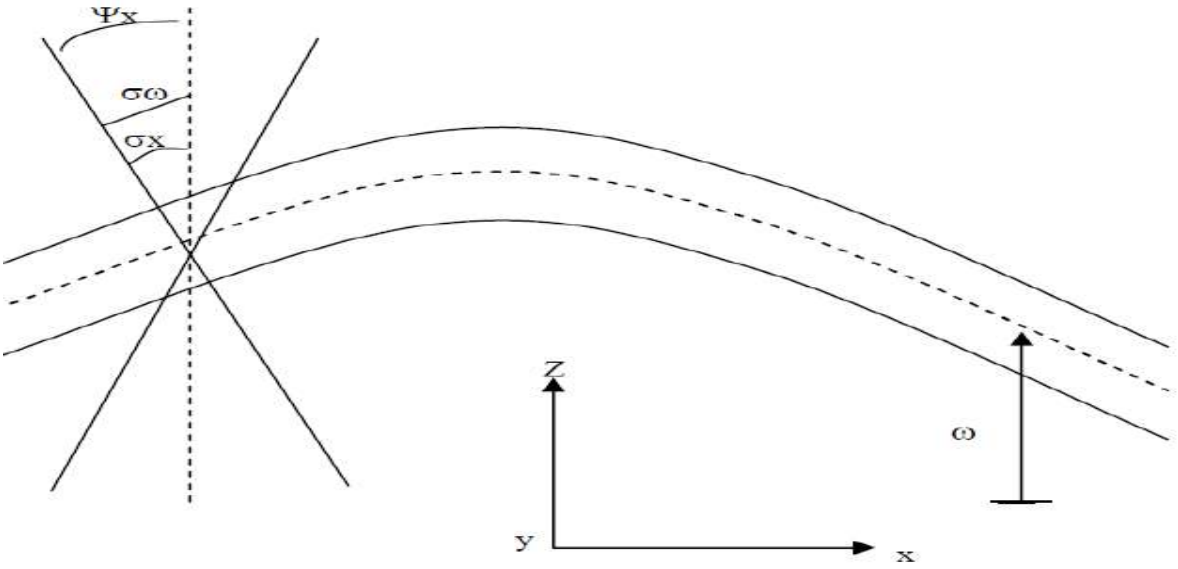


Fig I.10. Schéma du déplacement pour la théorie des plaques de Mindlin

3.2.2.4. Relations contraintes – déformations:

Les expressions linéaires des déformations sont

$$\begin{cases} \varepsilon_{xx} = \dfrac{\partial u}{\partial x} = -Z\dfrac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \varepsilon_{zz} = \dfrac{\partial v}{\partial y} = -Z\dfrac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \varepsilon_{yy} = \dfrac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \\ \tau_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \dfrac{\partial u}{\partial y} + \dfrac{\partial v}{\partial x} = -Z\left(\dfrac{\partial \psi_x}{\partial y} + \dfrac{\partial \psi_y}{\partial x}\right) \\ \tau_{xy} = 2\varepsilon_{xz} = \dfrac{\partial u}{\partial Z} + \dfrac{\partial \omega}{\partial x} = -\psi_x + \dfrac{\partial \omega}{\partial x} \\ \tau_{yz} = 2\varepsilon_{yz} = \dfrac{\partial v}{\partial Z} + \dfrac{\partial \omega}{\partial y} = -\psi_y + \dfrac{\partial \omega}{\partial y} \end{cases} \qquad (3.33)$$

3.1.2.5 Fonction d'énergies :

L'énergie de déformation due à au mouvements de flexion de la plaque est donnée en fonction des tensions de contraintes **s** et de déformation **e** :

$T = \frac{1}{2} \int \sigma \varepsilon dv$ *(3.34)*

En explicitant les champs de déformation et en intégrant sur l'épaisseur h de la plaque, on obtient finalement :

$$T = \frac{\rho h}{2}\int_A \left[\left(\frac{\partial \omega}{\partial t}\right)^2 + \frac{h^2}{12}\left\{\left(\frac{\partial \psi_x}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial \psi_y}{\partial t}\right)^2\right\}\right] dA \qquad (3.35)$$

3.1.2.6. Equation du mouvement :

On peut exprimer les moments en fonction de Ψx, Ψy et ω .

$$Mx = D\left(\frac{\partial \psi_x}{\partial t} + \upsilon\frac{\partial \psi_y}{\partial y}\right) \qquad (3.36)$$

$$My = D\left(\frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \upsilon\frac{\partial \psi_x}{\partial x}\right) \qquad (3.37)$$

$$Mxy = \frac{1-\upsilon}{2}D\left(\frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{\partial \psi x}{\psi_y}\right) \qquad (3.38)$$

Et les efforts tranchant :

$$Q_x = K^2 Gh\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} + \psi_x\right) \tag{3.39}$$

$$Q_y = K^2 Gh\left(\frac{\partial \omega}{\partial y} + \psi_y\right) \tag{3.40}$$

Reprenons maintenant les équations d'équilibre de l'élasticité tridimensionnelle

$$\sigma_{ij,j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \tag{3.41}$$

Ce sont les points importants de ce chapitre, et ils sont liés aux éléments finis que nous mentionnerons dans le prochain chapitre.

Chapitre II :LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

II LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

1. Introduction

L'analyse numérique des plaques peut se faire par différences finis, éléments finis ou éléments de frontières. Les avantages et potentialité de la méthode des éléments finis sont tels que les autres méthodes sont peu utilisées, sauf dans certains cas particuliers. La méthode des éléments finis est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges appliquées. Donc, elle est bien adaptée à l'analyse des structures tridimensionnelles à parois minces, puisqu'elle seule aujourd'hui est capable de résoudre ce type de problème et toute généralité. Elle est donc auxiliaire aux plus précieux pour l'ingénieu[8]

2.Principe de la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis est une méthode approchée de calcul numérique, permettant de déterminer l'équilibre élastique des structures continues à deux ou trois dimensions : structures planes, solides élastiques, plaques minces, membranes et coques.

Grâce au principe de d'Alembert, elle permet d'étudier les vibrations de ces structures. Elle peut également être étendue aux structures visco-élastiques ou plastiques.

La méthode des éléments finis consiste à déterminer les déplacements en un certain nombre de points de la structure; ces déplacements sont définis par des matrices colonnes qui sont les inconnues qu'il faut calculer. La méthode repose sur deux hypothèses.

La première hypothèse consiste à diviser, au moyen de lignes ou de surfaces imaginaire passant par les noeuds , la structure en un nombre fini d'éléments et à supposer que les élément ne sont mécaniquement assemblés entre eux qu'aux nœuds

La seconde hypothèse consiste à représenter le déplacement en un point de l'élément par une *fonction d'interpolation* prenant les valeurs lorsque le point M vient aux noeuds de l'élément.

Le théorème des travaux virtuels permet de déterminer quelles forces il faut appliquer aux nœuds pour assurer l'équilibre de connaissant les déplacements des noeuds, les forces extérieures appliquées à l'élément et les déformations éventuelles (dilatation thermique, retrait) imposées à l'élément. On obtient ainsi les matrices de rigidité généralisées des éléments. Il est donc possible de calculer les déplacements des noeuds.

La première hypothèse conduit à n'écrire que l'équilibre d'ensemble des éléments; localement, les équations de l'équilibre ne sont pas vérifiées, puisqu'on néglige les réactions mutuelles qui s'exercent le long de la frontière commune à deux éléments.[8]

La deuxième hypothèse peut donner lieu à des discontinuités du déplacement (ou de ses dérivées) interpolé à partir des valeurs aux noeuds lorsqu'on traverse la frontière commune à deux éléments.

Il est souhaitable de choisir des fonctions d'interpolation ne conduisant pas à des discontinuités du déplacement, mais ce n'est pas toujours possible.

Pour que la méthode des éléments finis converge vers la solution exacte lorsque le nombre des éléments tend vers l'infini, la plus grande dimension de chaque élément tendant vers zéro, il est nécessaire que les deux critères suivants soient respecté

- La fonction d'interpolation doit être choisie de façon à n'entraîner aucune déformation d'un élément non sollicité dont les déplacements des nœuds résultent d'un déplacement d'ensemble de l'élément.
- La fonction d'interpolation doit être choisie de façon à obtenir un état de déformation uniforme d'un élément non sollicité lorsque les déplacements des noeudssont compatibles avec cet état de déformation uniforme

Enfin, pour obtenir une bonne approximation, il faut choisir des éléments dont les différentes dimensions sont sensiblement égales : triangles voisins d'un triangle équilatéral, rectangles voisins d'un carré, etc.

La méthode des éléments finis peut être considérée comme un cas particulier de la méthode de Ritz pour la résolution approchée des problèmes d'élasticité. **La méthode de Ritz** consiste à représenter le déplacement par une combinaison linéaire de fonctions vérifiant les conditions aux limites, et à adopter pour solution approchée la combinaison linéaire qui rend minimale l'énergie potentielle totale.

Ce dernier aspect de la méthode des éléments finis a permis de l'appliquer à de nombreux problèmes de champ, lorsqu'une méthode variationnelle est possible, par exemple déterminer dans un domaine donné les valeurs numériques d'une fonction scalaire U(M) vérifiant une équation aux dérivées partielles linéaire du second ordre, et satisfaisant à des conditions aux limites linéaires sur la frontière du domaine. De tels problèmes, dont le problème de *Dirichlet et le problème de Neumann* ne sont que des cas particuliers, se rencontrent souvent[8]

Déformation

En un point M de l'élément, la déformation est définie par la matrice colonne

$$D(M) = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad \text{(II.1)}$$

Contrainte

Elle est définie par la matrice colonne [37]:

$C(M)=[\sigma_1 \sigma_2 \tau_3]^t$ (II.2)

Les fonctions d'élasticité plane montrent que la contrainte se déduit de la déformationD(M) par la relation :

C(M)=rD(M) (II.3)

Dans laquelle la matrice d'élasticité a pour expression, dans le cas de la contraint plane

$$r = \frac{E}{1-v^2}\begin{bmatrix} 1 & v & 0 \\ v & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-v}{2} \end{bmatrix} \quad \text{(II.4)}$$

Avec : E : module dYoung , v : coefficient de poisson

Chapitre III : Etude numérique

1 :Introduction au logiciel de modélisation et de calcul ANSYS

1.2 :Définition

ANSYS, est l'un des plus grands développeurs et fournisseurs de logiciels de simulation numérique au monde. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en oeuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles discrétisés.

1.3 :Principaux produits et capacités

- ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer Simulations mécaniques sur des structures. Ses principales capacités sont : (1) l'analyse statique, (2) l'analyse modale, (3) l'analyse harmonique (réponse forcée), (4) l'analyse temporelle ou transitoire (5) la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).[8]
- ANSYS Mechanical : Ce produit dispose les mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment une solution thermique, avec modélisation du rayonnement.
- 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.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006.
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA : Ces logiciels possèdent des solutions 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.
- ANSYS Electromagnétiques : Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- ANSYS Multiphysics : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.[8]

1.4 :Plateformes ou environnements

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

- ANSYS classique : Chronologiquement, c'est la première solution de ce logiciel qui est 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 se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS. Il est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

• ANSYS Workbench : Cette plateforme 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 pièce) 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 larésolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS

1.5 :Organisation de logiciel ANSYS

Il y a deux niveaux primaires dans le programme d'ANSYS : (a) Passage dans et hors d'ANSYS et de plate-forme : pour utiliser certaines commandes globales telles que le titre de travail changeant, etc. (b) Processeur de niveau : Ce niveau contient les processeurs (pré processeur, solution, post processeur, etc.) qui sont employés pour réaliser des analyses par éléments finis.[8]

Dans notre étude, nous nous appuierons sur ansys 2019, en optant pour la plateforme werkbench 2019, trois types de plaques sont proposées afin d'étudier l'influence des formes des électrodes sur la réponse des plaques. Ces dernières seront munies d'électrodes circulaires, carrées et en « Z » ou en zigzag. Elles prendront trois tailles grande, moyenne et petite ayant respectivement les dimensions suivantes :

L (longueur) = 100 mm, lg (largeur) = 100 mm et epa (épaisseur) = 10 mm (pour la grande taille)

L(longueur) = 50 mm, lg (largeur) = 50 mm et epa (épaisseur) = 5 mm (pour la moyenne).

L(longueur) = 25 mm, lg (largeur) = 25 mm et epa (épaisseur) = 2.5 mm (pour la petite).

Dans chaque cas étudié, la surface des électrodes représente 60% de la surface de la plaque. Les électrodes sont disposées de façon symétrique par rapport au plan moyen des plaques, a l'exception de la deuxième plaque en zigzag, ou l'électrode inferieur est inversée par rapport a l'électrode supérieur. Le matériaux utilisé est le PZT-5, une' étude comparative est menée par la suite pour définir quel type de plaque (ou quelle forme d'électrode) produis un déplacement ou une déformation significative.

Constante	PZT-5H
C_{11} $[10^{10}\ N/m^2]$	12.6
C_{12} $[10^{10}\ N/m^2]$	7.95
C_{13} $[10^{10}\ N/m^2]$	8.41
C_{33} $[10^{10}\ N/m^2]$	11.7
C_{44} $[10^{10}\ N/m^2]$	2.3
C_{66} $[10^{10}\ N/m^2]$	2.35
e_{31} $[\ C/m^2\ ]$	-6.5
e_{33} $[\ C/m^2\ ]$	23.3
e_{15} $[\ C/m^2\ ]$	17.0
ε_{11} $[nF/m]$	0.1503
ε_{22} $[nF/m]$	0.1503
ε_{33} $[nF/m]$	0.13
ρ $[kg/m^3]$	7500

Tab III.1.Propriétés du matériaux PZT-5H.[2]

Ces données seront introduites via l'interface de la figure III .1 :

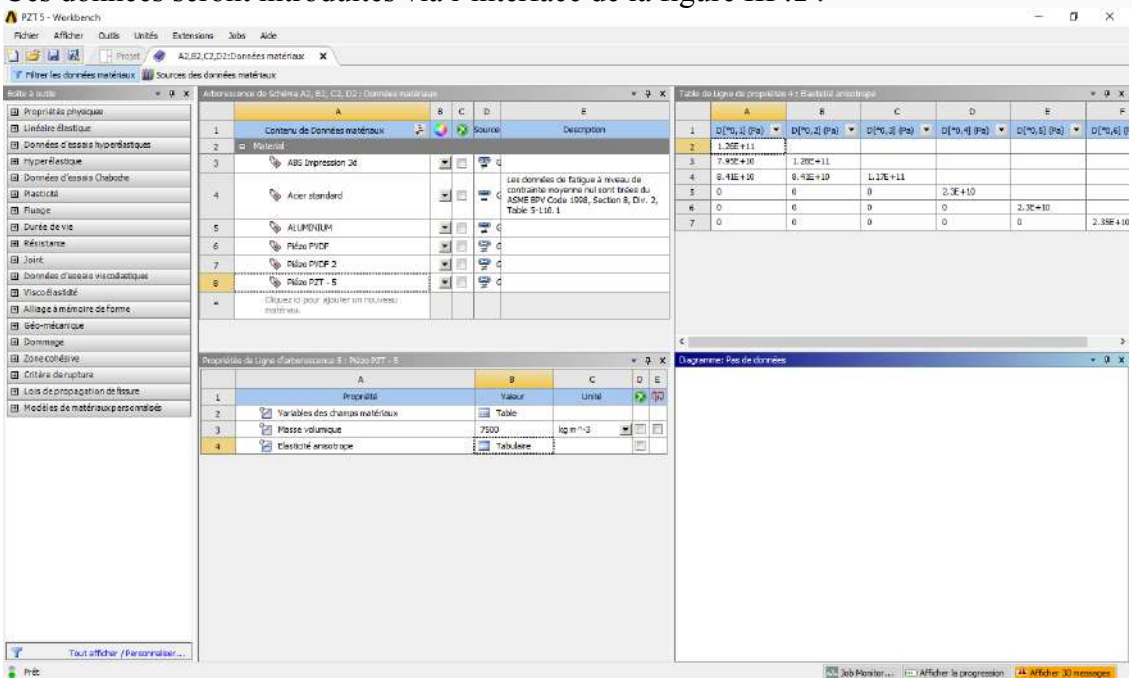


Fig..1 Les données du matériaux

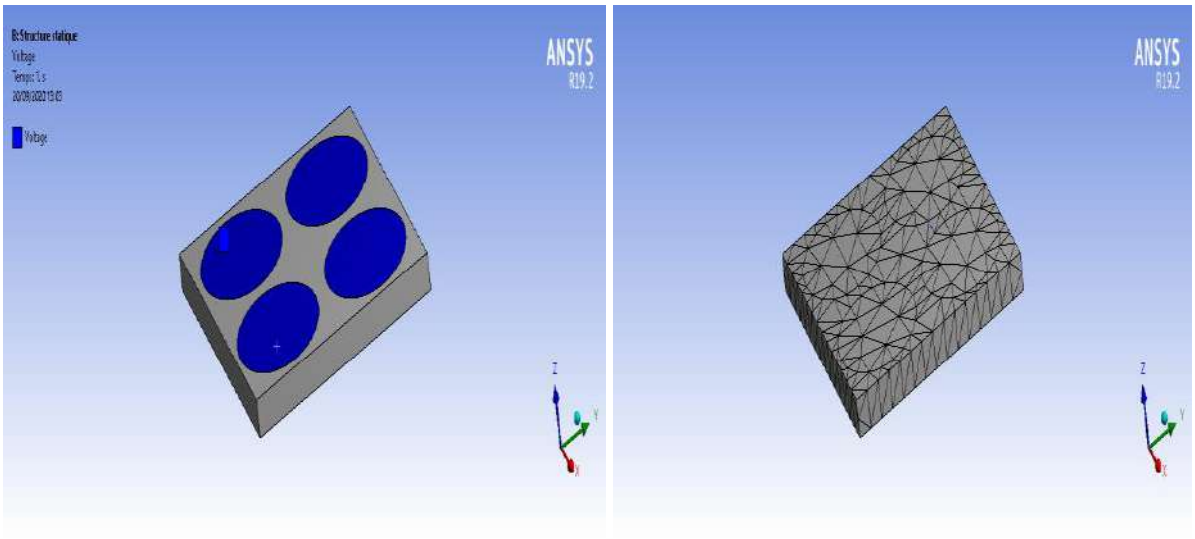
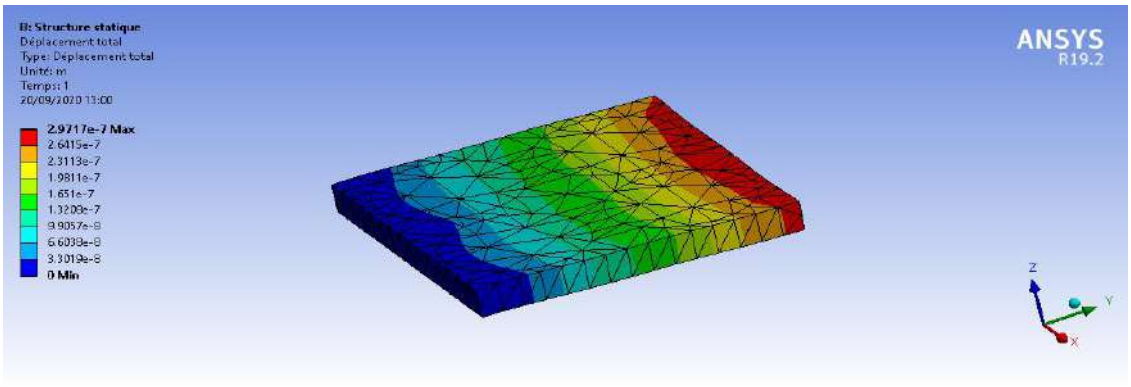


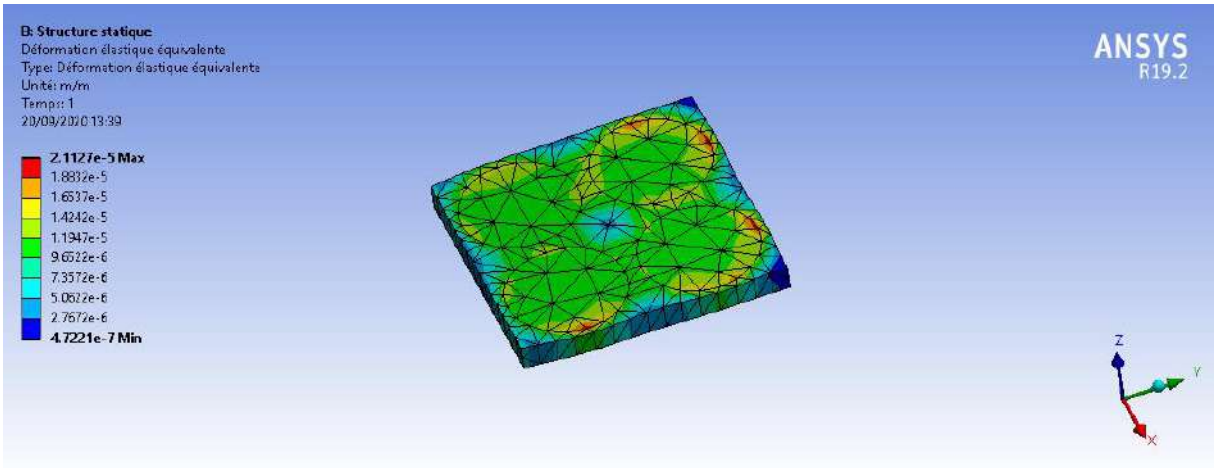
Figure 0-2 Géométrie et Maillage de la plaque e=10

Plaque en électrodes Circulaire

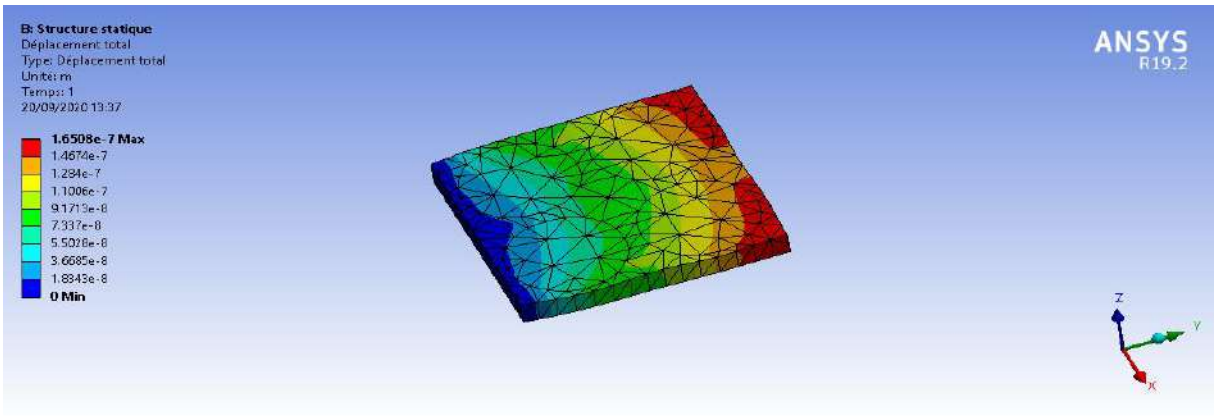
Les modèles de déplacement sont illustrés à la figure 0-3



a)



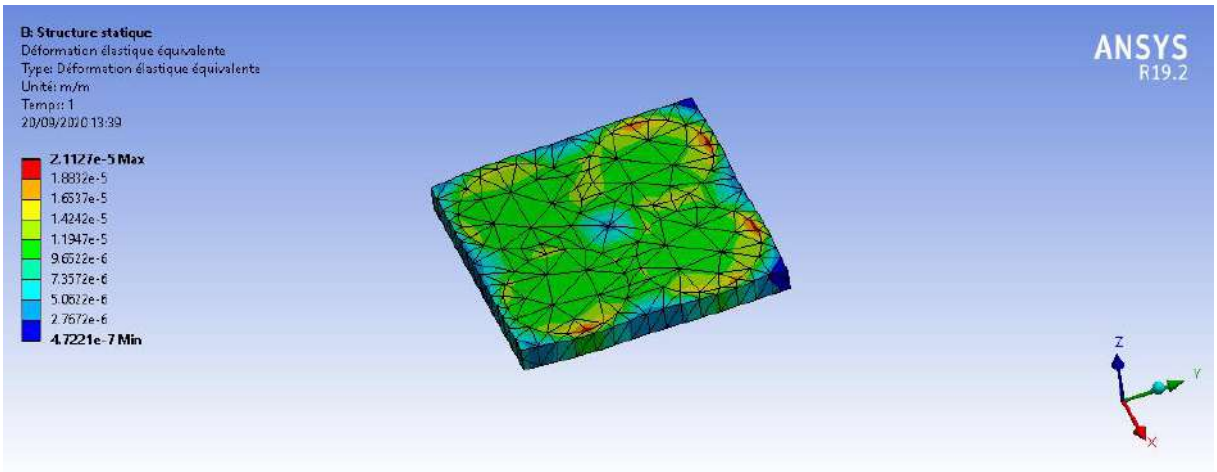
b)



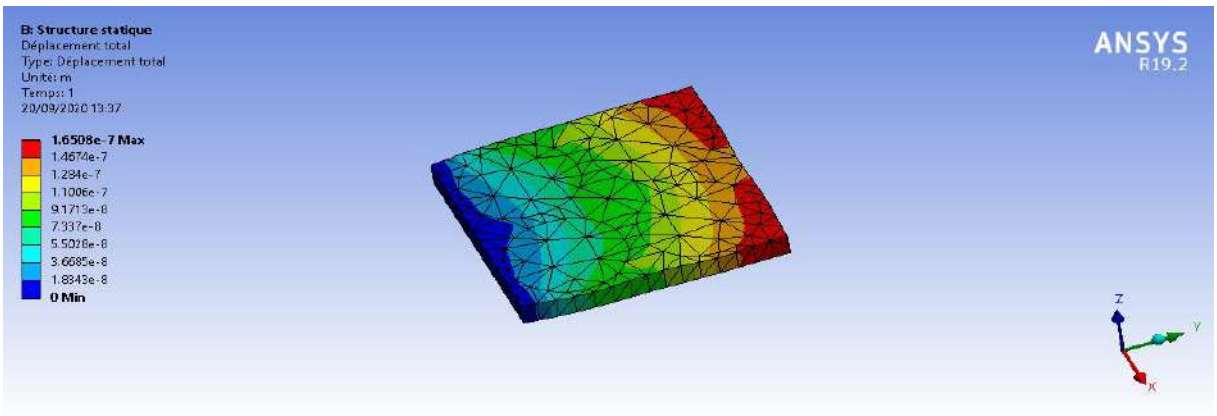
c)

Figure III.3 :a), b) et c) : Déplacement dans la plaque e=10

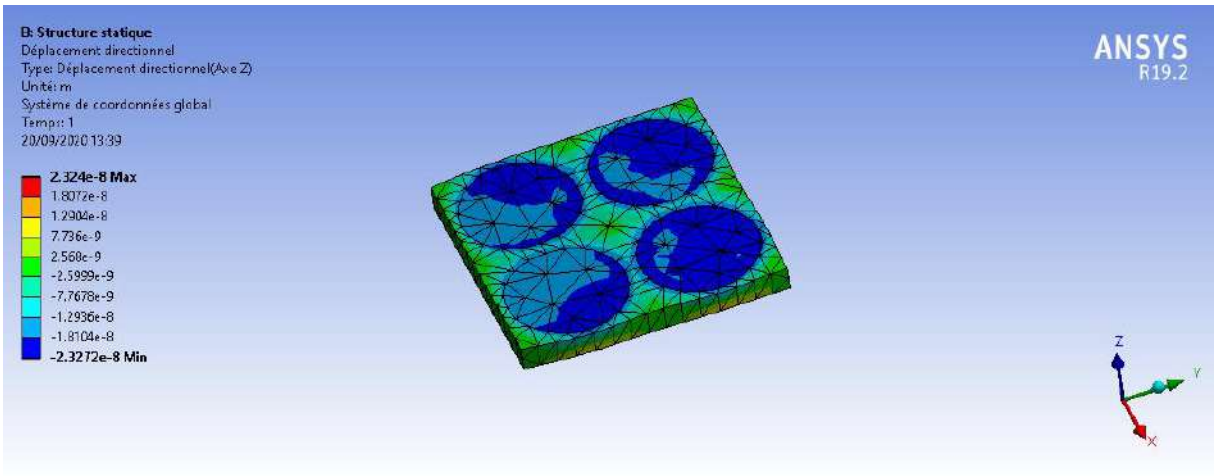
Pour la plaque moyenne munie d'électrodes circulaires



a)



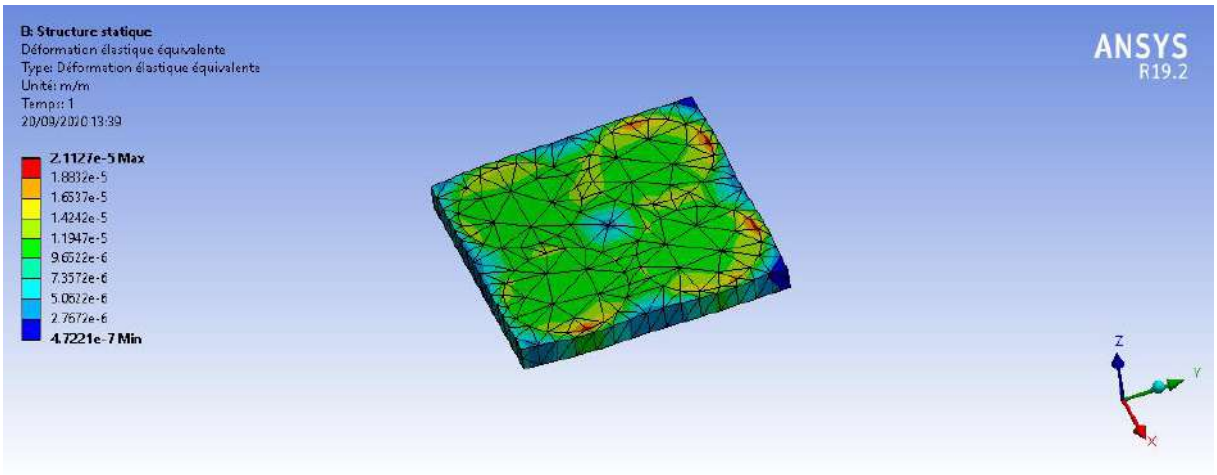
b)



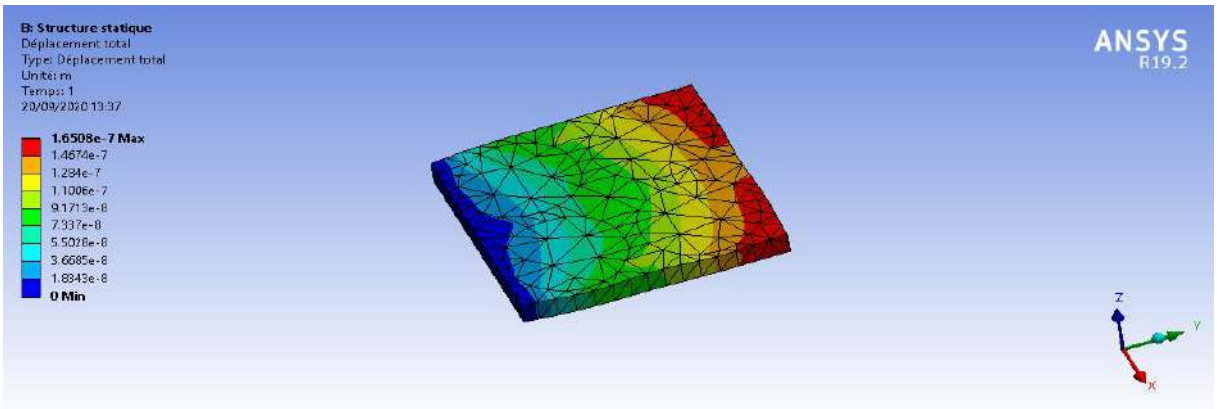
c)

Figure III.4 :a), b) et c) : Déplacement dans la plaque e=5

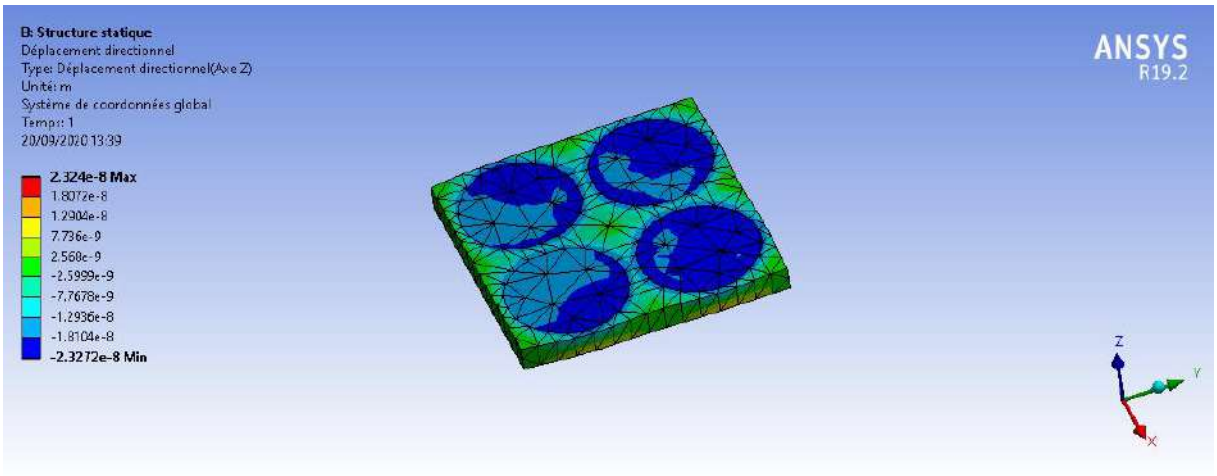
Pour plaque plus petite avec électrodes circulaires



a)



b)



c)

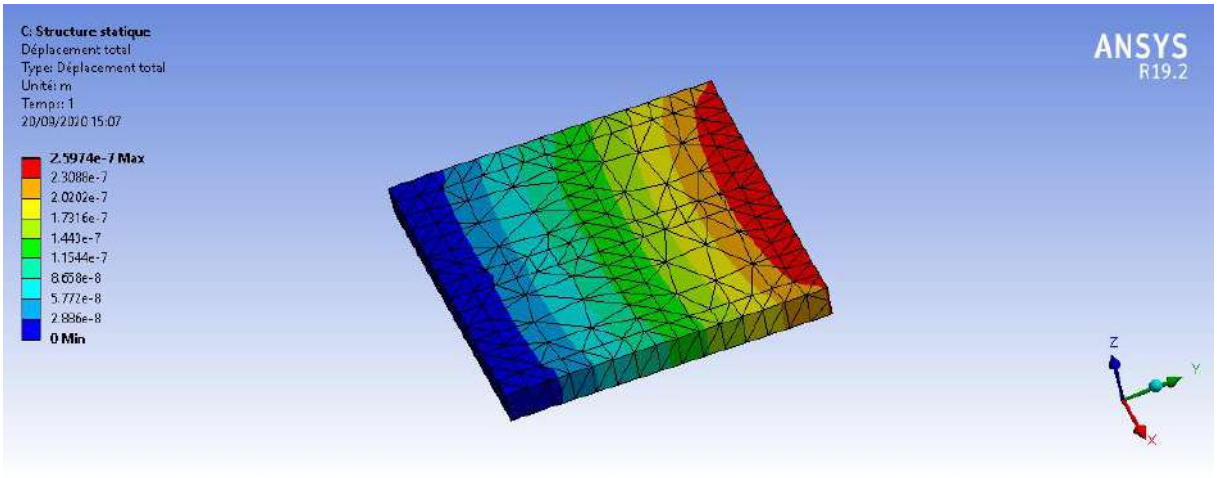
Figure III. 5 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque e=2.5

Noter que le déplacement aux deux extrémités de la plaque est approximativement égal, bien qu'il diminue à mesure que le volume diminue. Cependant, le déplacement Au niveau des électrodesest inférieur au premier

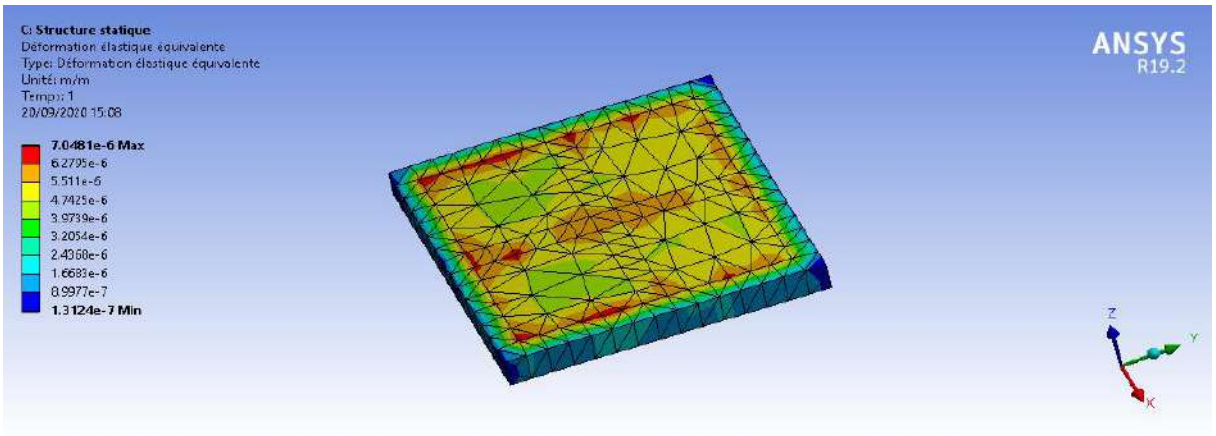
Plaque en électrodes carrées

Nous répétons l'étude comme les étapes précédentes, mais changeons la zone piézoélectrique, cette fois sous la forme d'un carré

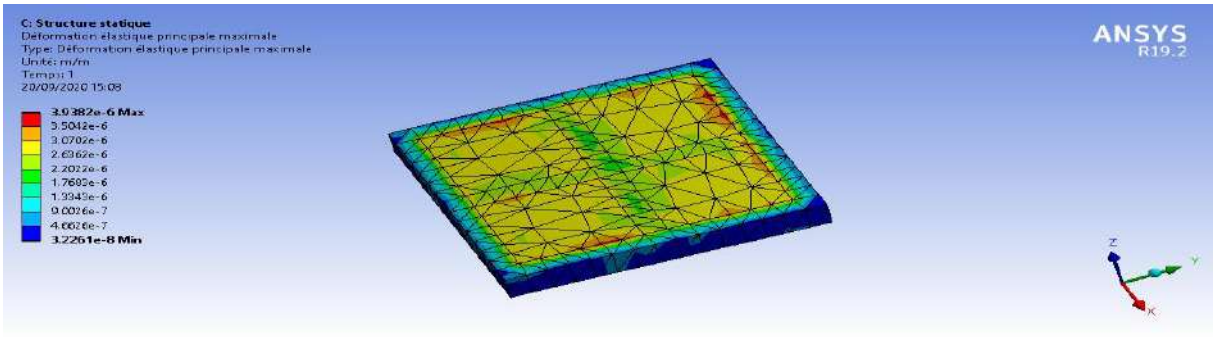
Pour une grande plaque équipée d'électrodes carrées



a)



b)

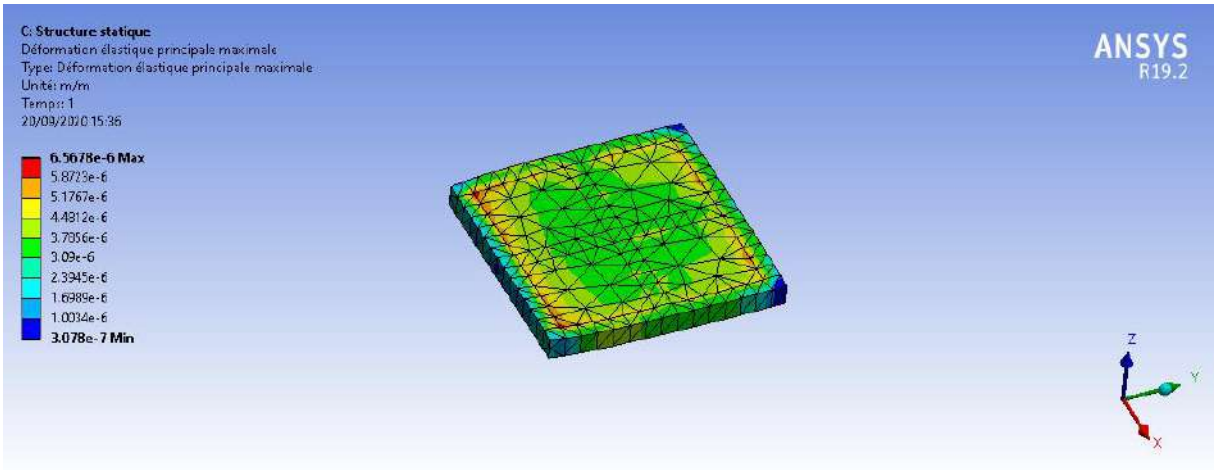


c)

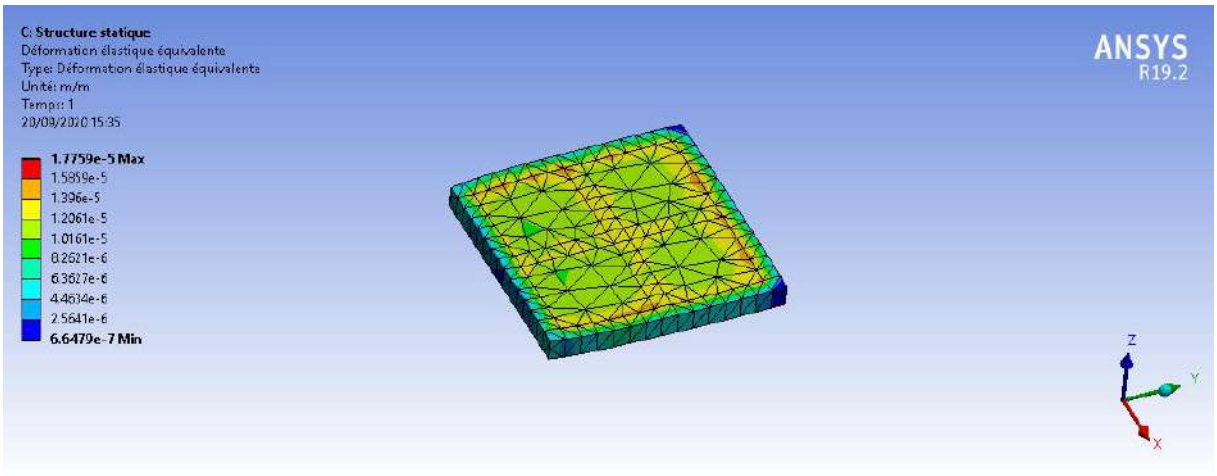
Figure III. 6 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surface Carré e=10

Les résultats sont proches du premier panneau avec une aire circulaire e = 10, mais toujours inférieure à elle

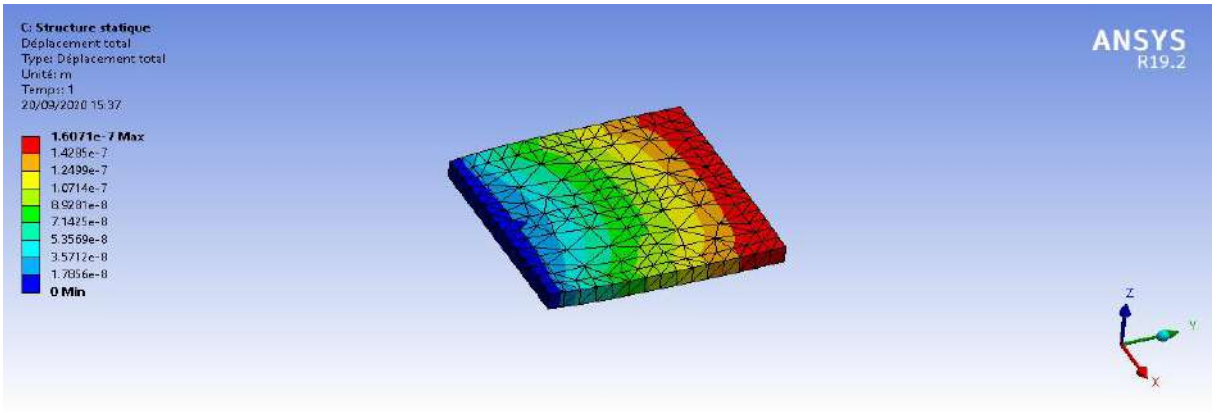
Pour la plaque moyenne équipée d'électrodes carrées



a)



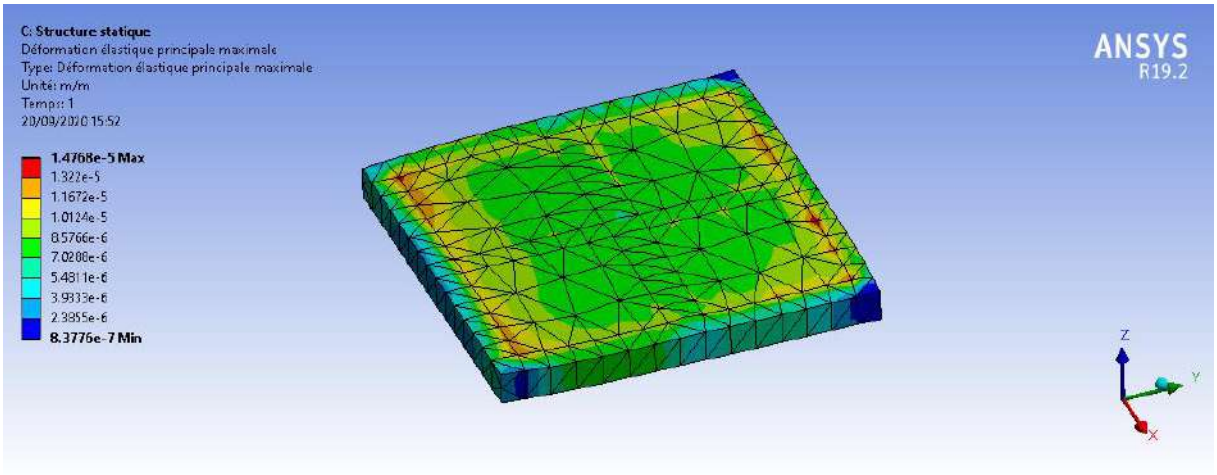
b)



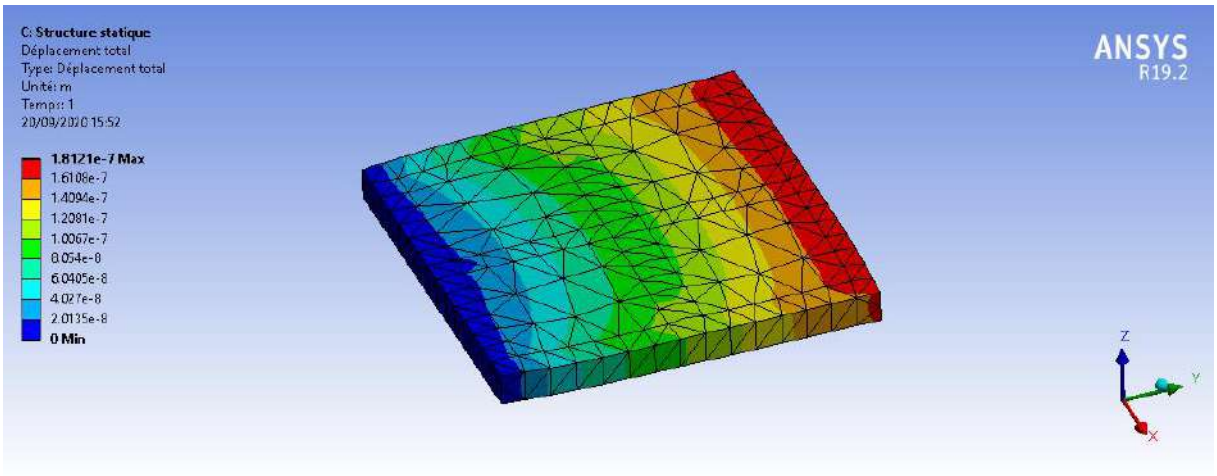
c)

Figure III. 7 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surfaceCarré e=5

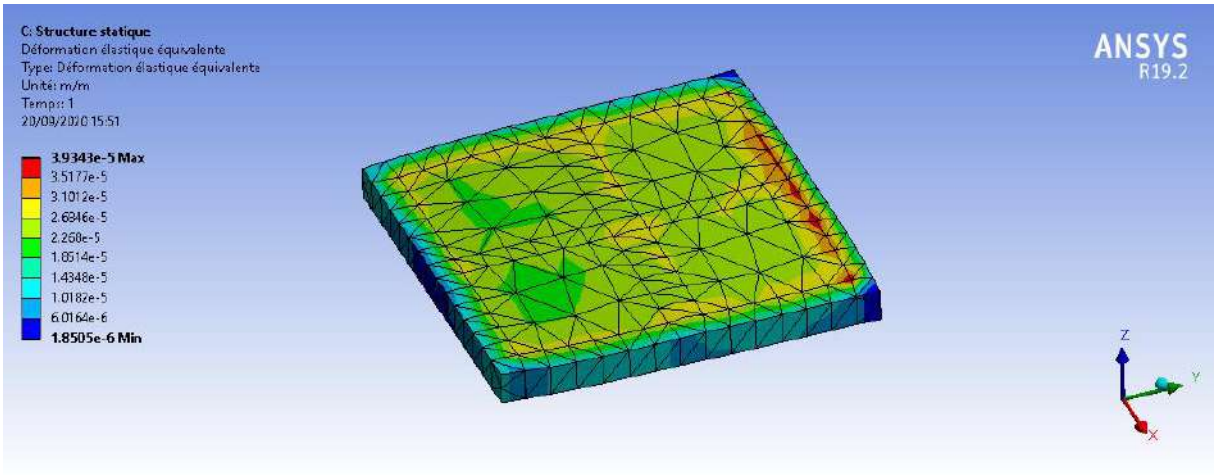
Pour une plaque plus petite avec des électrodes carrées



a)



b)



c)

Figure III. 8 : a), b) et c) Déplacement dans la plaque surfaceCarré e=2.5

Notez qu'une plaque avec une aire circulaire e = 2,5 donne de meilleurs résultats que cela

De ce qui précède, on note que la grande taille donne un meilleur déplacement que la petite taille

Et la charge d'électricité appliquée à la surface circulaire est meilleure que d'autres

Plaque en électrodes zigzag ou (Z)

Cette fois, nous étudions la plaque d'une manière différente. Cette fois, nous ne changeons pas la taille de la plaque, mais nous changeons la disposition entre la zone positive (supérieur) et la zone négative (inférieur). Ce sera en deux temps

1er cas, ou les électrodes sont en correspondance (symétrie par rapport au plan moyen)

2 ième cas, ou les électrodes sont en discordance (asymétrie par rapport au plan moyen).

1er cas

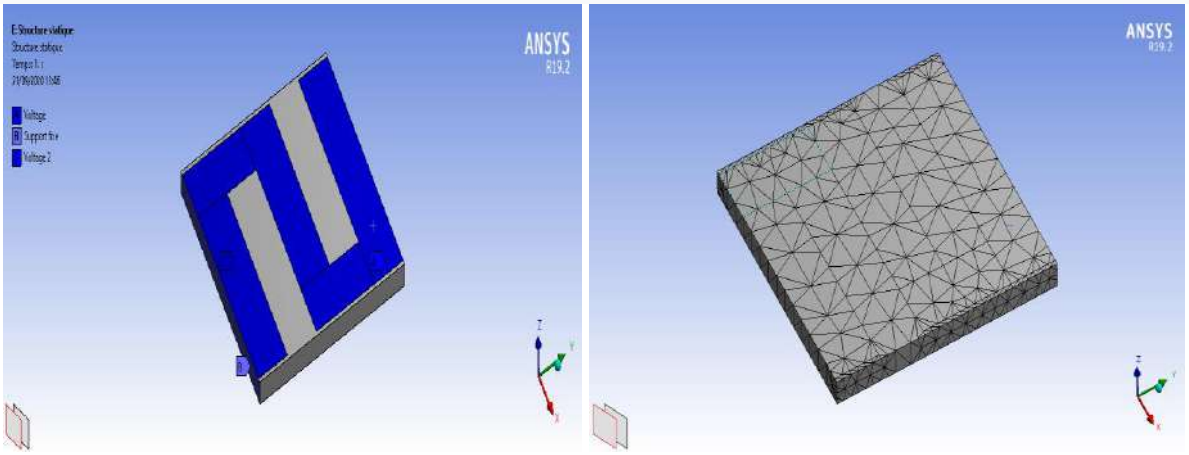
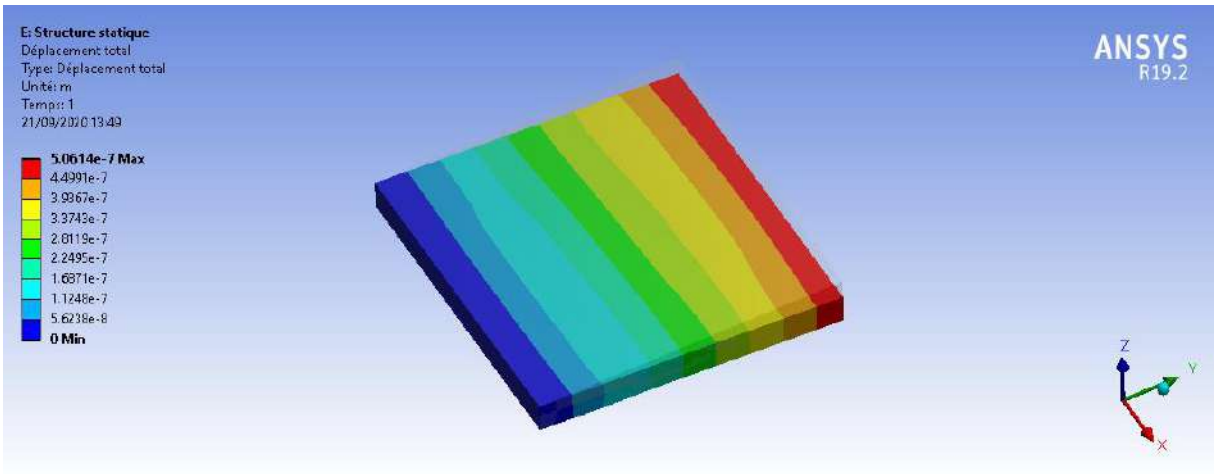
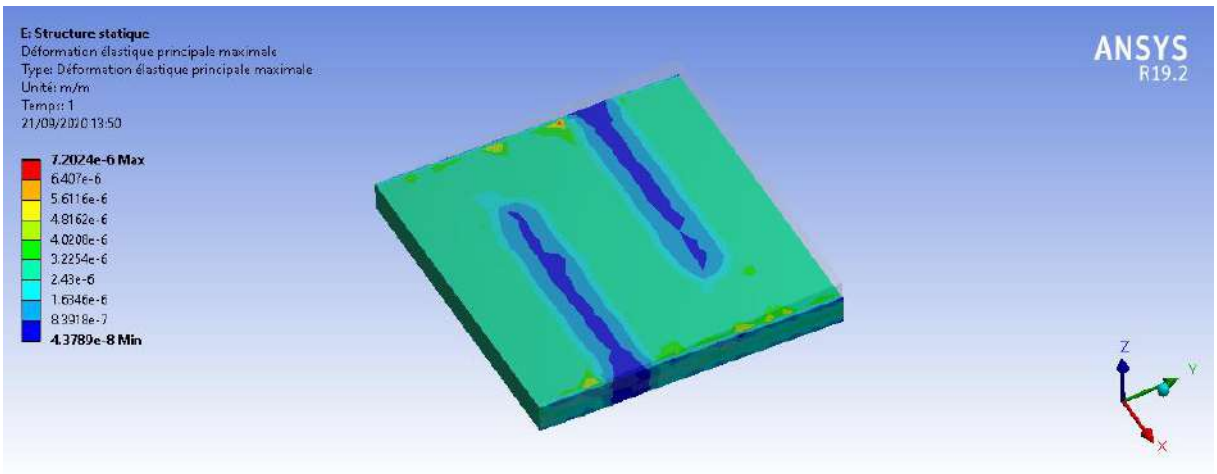


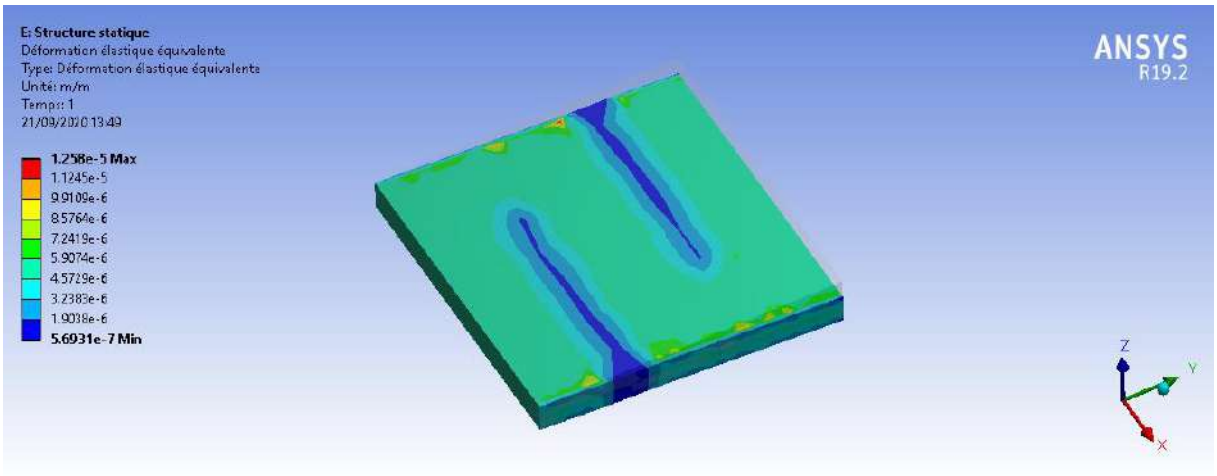
Figure III -9 Géométrie et Maillage de la plaque



a)



b)



c)

Figure 0-10 : a), b) et c) : Déplacement dans la Plaque en électrodes zigzag ou (Z)

Il a donné un bon déplacement

2 ième cas

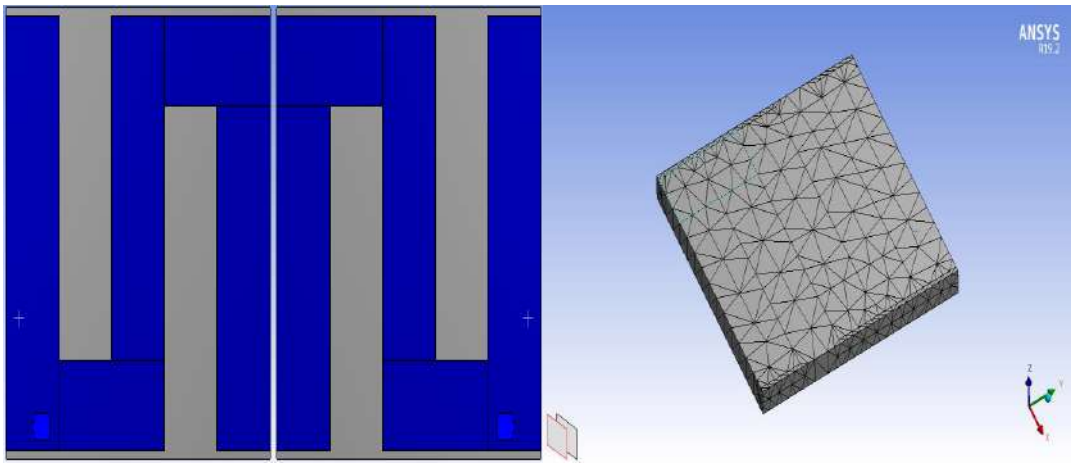
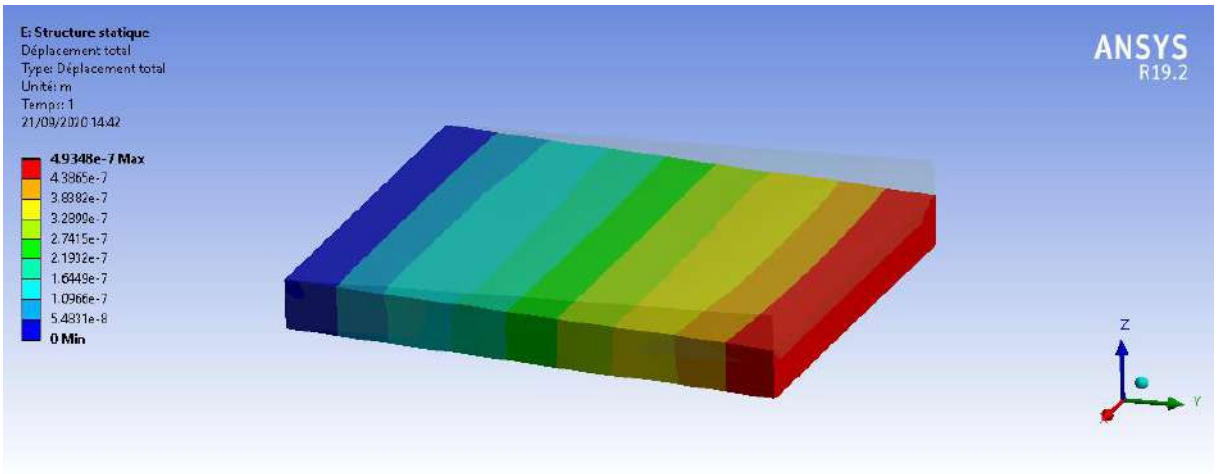
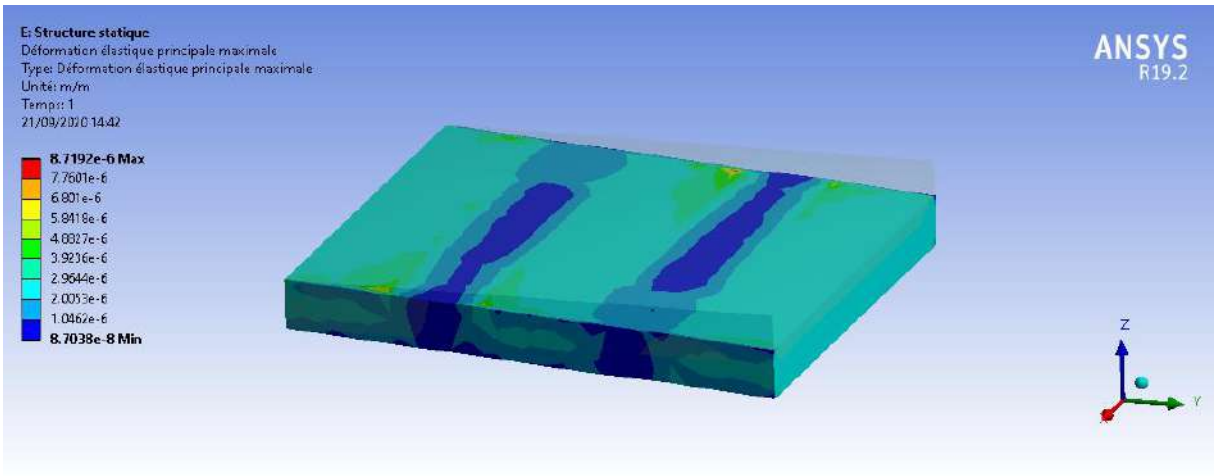


Figure III -11 Géométrie et Maillage de la plaque



a)



b)

Figure 0-12 : a)et b) : Déplacement dans la Plaque en électrodes zigzag ou (Z)

Cela a donné un meilleur déplacement

CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons présenté une étude sur les plaques à effet piézoélectrique et l'étendue de leur réponse à cette effet en termes de déformation et de déplacement. Après avoir présenté des

généralités sur la piézoélectricité, sa définition, certains domaines d'utilisation

Dans le chapitre 1, nous avons présenté la théorie piézoélectrique et ses lois, ainsi que la théorie des plaques et ses types, et les lois qui lui sont appliquées

En deuxième chapitre, on a présenté la méthode des éléments finis (MEF) et on a fournis les éléments essentiels a l'adaptation de cette méthodes au phénomène étudier, les différentes relations évoquées dans l'étude théorique sont discrétisées, en appliquant la MEF, afin d'obtenir les matrices élémentaires utiles a l'établissement des déformations et de déplacements.

Quant au chapitre 3, On a présenté Ansys Ainsi que certaines de ces fonctionnalités et comment travailler avec. Ensuite, nous avons étudié des plaques avec des dimensions différentes, de la plus grande à la moyenne et la plus petite, avec la prise en considération de différentes formes des électrodes, circulaires, carrées et en zigzag (Z). :

Les principales observations faites dans cette étude sont:

. La piézoélectricité est liée à la taille de la plaque

. Ce phénomène donne un petit déplacement, il est donc utilisé dans des champs limités

Dans cette étude, nous avons négligé l'effet du changement de la température, ainsi que l'amortissement structural. Une étude dynamique plus approfondie peut être envisagée pour enrichir ce travail.

Pour des futures recherches, on peut envisager l'application ainsi que le dimensionnement d'actionneurs à base de matériaux piézoélectriques formés par des poutres et des plaques étudiées dans ce travail.

.

REFERENCES

2 . A. Mahieddine, “Effets de la piézoélectricité et de l’amortissement structural dans le cas des poutres, des coques et des plaques. Contrôle actif. ”, Thèse de Doctorat de l’université de l’USTO Mohamed Boudiaf, Oran Avril (2011).

3. Lauric GARBUIO ‘’ Etude du ph´enom`ene de lubrification

´electroactive `a l’aide d’actionneurs piézoélectriques’’DOCTEUR DE L’INSTITUT NATIONAL

POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE(30 Juin 2006)

4 . A .Zemirlinem «
CONTRIBUTION A L’ANALYSE ET L’ETUDE DYNAMIQUE DES POUTRES, PLAQUES ET COQUES EN CONSIDERANT LES EFFETS DE L’AMORTISSEMENT STRUCTURAL, DE LA TEMPERATURE ET DE LA PIEZOELECTRICITE » ”, Thèse de Doctorat de l’université de
SAAD DAHLEB DE BLIDA1(2016)

5 N. Shenck and J. Paradiso, «Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics »,

IEEE Micro, vol. 21, no. 3, pp. 30–42, May/Jun 2001.

SAAD DAHLEB DE BLIDA1(2016)

6 . CLÉOPHACE AKITEGETSE ‘APPROCHE NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE POUR L'AMÉLIORATION D'UNE MÉTHODE DE MESURE DE LA FORCE D'ADHÉRENCE DE LA GLACE PAR L'UTILISATION DE FILMS PIÉZOÉLECTRIQUES ‘MEMOIRE PRESENTE A L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC (JUIN 2007)

7 . CHERIDI HOUDA ‘Analyse dynamique des plaques minces et épaisses: Application aux matériaux homogènes et non Homogènes’ DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE MECANIQUE Université MENTOURI –CONSTANTINE

8 . DERBANE Said ‘MODÉLISATION DES PLAQUES PAR LA MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS ‘diplôme de Magister Université Mohamed Khider – Biskra(19/02/2012)

Liens Internet utiles

[1]

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zo%C3%A9lectricit%C3%A9#:~:text=La%20pi%C3[1}.