

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité :

Electronique de Système Embarqué

THÈME

**Modélisation Et Simulation D'un Micro-accéléromètre
Triaxial à base De Technologie Du Silicium**

Préparé par :

BENKEIRA Fatima Ikram

Khachai Fayçal

Devant le Jury :

Nom et prénoms

Grade

Qualité

A.Ghalleb

MCB

President

Y.Belhadji

MCB

Examineur

R.Otmani

MAA

Encadreur

2018-2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَلَا تَقُولَنَّ لِشَيْءٍ إِنِّي فَاعِلٌ ذَٰلِكَ غَدًا ﴿٢٣﴾

إِلَّا أَن يَشَاءَ اللَّهُ ج

وَأذْكُرُ رَبَّكَ إِذَا نَسِيتَ

وَقُلْ عَسَىٰ أَن يَهْدِيَنِي رَبِّي لِأَقْرَبَ مِنْ هَٰذَا رَشْدًا

سورة الكهف الاية [23 * 24]

Dédicace

Je cherche au font de moi...

La réponse que je crois.

La source de ma joie : mes parents

Qu'il n y a aucune dédicace n'exprimera assez
Fort la profondeur de l'amour que j'ai par
Eux et ma reconnaissance pour leur
Sacrifice et leurs patiences.

A mes frères, a mes sœurs qui m'ont
Aidé beaucoup pendant mon
Parcours.

A toute mes grandes familles
A notre professeurs son exception surtout
Notre encadreur Mr Otmani.

A tous ceux qui me connaisse de prés et de loin, je dédie se modeste travail.



Faycal & Ikram Fatima

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté pour mener à bien ce travail.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur R.Otmani, qui, en tant qu'encadreur, s'est toujours montré à l'écoute et pour sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer et sans leurs conseils ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Je remercie vivement les membres de jury.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis.

Enfin nous remercierons tous les enseignants département de génie électrique et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin, trouvent ici l'expression de nos gratitude.

Khachai fayçal

Benkheira Ikram Fatima

Sommaire

Liste des constantes, symboles et sigles.....	8
Liste des figures	10
Liste des Tableaux	11
Introduction générale	12
Chapitre I : Généralités sur les capteurs et les microsystemes (MEMS)	14
I.1. Introduction	15
I.2. Généralités sur les capteurs	15
I.2.1. Définition	15
I.2.2. Le mesurande et la mesure.....	15
I.2.3 .Chaîne de mesure	16
I.2.4. Familles des grandeurs physiques	16
I.2.5. Etalonnage d'un capteur	17
I.2.6 .Classification des capteurs.....	17
I.2.7 Caractéristiques d'un capteur.....	18
I.2.8. Quelques types des capteurs	20
I.3. Les microsystemes électromécaniques (MEMS)	21
I.3.1.Définition.....	21
I.3.2. Les différents secteurs des MEMS	23
<i>Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive</i>	24
.II.1.Introduction	25
II.2.Approche de modélisation du microlevier « T-shape ».....	26
II.2.1.Généralité	26
II.2.2.Paramètres géométriques.....	27
II.2.3. Le moment fléchissant	28

II.2.4. La déflexion du microlevier	28
II.3.Comportement dynamique d'un microlevier	30
II.4.Les paramètres géométriques.	32
II.4.1.Calcul des paramètres de conception	33
II.4.2.Calcul de la flexion de la poutre sous l'effet d'une accélération.....	33
II.5.Résultats :	34
II.6.Accélération sur 3-axes.....	36
II.6.1.Intérêt : mesure sur 3-axes.....	36
II.6.2.Structure	36
II.6.3.Principe de fonctionnement.....	37
Chapitre III : Simulation par ANSYS d'un capteur 3 axes	39
III.1.Logiciel ANSYS	40
III.1.1.Présentation du logiciel ANSYS	40
III.1.2.Créer un système d'analyse Fluid Flow 2d	41
III.2.T-shape	43
III.2.1.Pour l'axe-x	43
III.2.2.Pour l'axe-y	44
III.2.3.Pour l'axe-z	45
III.3.Résultat des 3-axes	46
III.3.1.Déplacements	46
III.3.2.Contraintes	47
III.4. Résultat sur Matlab.....	49
III.4.1.Pour l'axe-x	49
III.4.2.Pour l'axe-y	50
III.4.3.Pour l'axe-z	51
III.5. Les contraintes normales et les contraintes de cisaillements.....	52
III.6.Placement des jauges :.....	55

III.7.Effet de la température :	59
III.7.1.Sur le modèle mécanique :	59
III.7.2.Sur le modèle électrique :.....	59
Conclusion générale.....	61
Les références bibliographiques	62

Liste des constantes et des symboles

MEMS:	Micro-Electro-Mechanical System.
RF MEMS:	Radio Frequency MEMS.
BioMEMS:	Biomedical MEMS.
FEM:	Finite Element Method.
DSP:	Densité Spectrale de Puissance.
CMOS:	Complementary Metal Oxide Semiconductor.
a :	l'accélération.
C :	capacité électrique.
ep :	épaisseur de la micro poutre.
\vec{F} :	la force appliquée par la masse.
FD :	la force d'amortissement.
FK :	la force de rappel du ressort.
Fext :	la force extérieure au système.
f _{res} :	la fréquence de résonance.
g :	la gravité.
h :	la distance verticale séparant la fibre neutre et le point considéré.
I :	Le moment quadratique d'inertie
I _b :	le moment d'inertie de la section du bras.
I _p :	le moment d'inertie de la section du plateau.
L :	inductance.
L _b :	longueur du bras.
L _p :	longueur du plateau.
L :	longueur de la micro poutre.

m :	masse.
M :	Le moment fléchissant
q_b :	force inertielle résultant de la masse du bras.
q_p :	force résultant de la masse du plateau.
q :	charge élémentaire.
r :	rayon de courbure.
R :	résistance électrique.
V :	tension électrique.
W_b :	largeur du bras.
W_p :	largeur du plateau.
W :	largeur de la micro poutre.
Z :	déplacement.
ρ :	résistivité électrique.
ρ_0 :	densité par unité de surface.
π_{11} :	coefficient de piézorésistivité longitudinale.
π_{12} :	coefficient de piézorésistivité transversale.
π_{44} :	coefficient de piézorésistivité de cisaillement.
σ_{max} :	contraint maximal
σ_{min} :	contraint minimal

Liste des figures

Fig.I.1 :Schéma représentant la relation entre le mesurande et la mesure	15
Fig.I.2 :Constitution d'une chaîne de mesure classique	16
Fig.I.3 :Courbe d'étalonnage d'un capteur	17
Fig.I.4 :Effet d'hystérésis.	19
Fig.I.5 :sensibilité d'un capteur linéaire.....	20
Fig.I.6 :Visualisation de l'échelle d'un MEMS	22
Fig.I.7 :Ordre de grandeur des microsystèmes	22
Fig.I.8 :Les quatre secteurs des MEMS	23
Fig.II.1 :Parties constituant un microsystème électromécanique.	27
Fig.II.2 :Schéma d'un de microlevier.	27
Fig.II.3 :Modèle statique du microlevier.....	28
Fig.II.4 :Rayon de courbure.....	29
Fig.II.5 :Modèle mécanique de second ordre de type :	30
Fig.II.6 :Dimensions de la structure.	32
Fig.II.7 :Modèle de chargement de la structure.	34
Fig.II.8 :Fléchissement Z pour une charge ponctuelle en fonction de la distance sous une accélération de 1g. .	34
Fig.II.9 :Moment M en fonction de la distance sous une accélération de 1g.	35
Fig.II.10 :Fléchissement théorique Z_{max} à l'extrémité libre en fonction de l'accélération.	35
Fig.II.11 :Accélération de modèle mécanique en fonction du temps.....	36
Fig.II.12 :Structure trois dimensions de l'accéléromètre à trois axes piézorésistif.....	37
Fig.II.13 :Ponts de Wheatstone pour les trois composantes d'accélération,.....	38
Fig.III. 1 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Ax.....	43
Fig.III.2 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Ax.	43
Fig.III.3 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Ax.	43
Fig.III.4 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Ay.....	44
Fig.III.5 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Ay.	44
Fig.III.6 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Ay.	44
Fig.III.7 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Az.....	45
Fig.III.8 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Az.....	45
Fig.III.9 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Az.	45
Fig.III.10 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Ax.....	46
Fig.III.11 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Ay.....	46
Fig.III.12 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Az.....	47
Fig.III.13 :La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par.....	47
Fig.III.14 : La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par.....	47
Fig.III.15 : La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par.....	48
Fig.III.16 :le déplacement en fonction de l'accélération suivant Ax.....	49
Fig.III.17 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Ax.....	50
Fig.III.18 :Le déplacement en fonction de l'accélération suivant Ay.....	50
Fig.III.19 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Ay.....	51
Fig.III.20 :Le déplacement en fonction de l'accélération suivant Az.....	51
Fig.III.21 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Az.....	52
Fig.III.22 :Contrainte normale (x) par l'accélération Ax de 10g.	52
Fig.III.23 :Contrainte de cisaillement (x) par l'accélération Ax de 10g.	53
Fig.III.24 :Contrainte normale (x) par l'accélération Ay de pour 10g.	53
Fig.III.25 :Contrainte de cisaillement (y) par l'accélération Ay de 10g.	53
Fig.III.26 :Contrainte normale (x) par l'accélération Az de 10g.	54

<i>Fig.III.27 :Contrainte de cisaillement (y) par l'accélération Az de 10g.</i>	<i>54</i>
<i>Fig.III.28 :L'alignement des piézorésistances.</i>	<i>55</i>
<i>Fig.III. 29 :Pont de Wheatstone complet pour calculer la tension de sortie des trois composantes d'accélération.</i>	<i>57</i>
<i>Fig.III.30 :l'effet de la température sur le microlevier.</i>	<i>59</i>
<i>Fig.III.31 :La variation de la résistance en fonction de la température.....</i>	<i>60</i>

Liste des Tableaux

<i>Tab.I.1 :Effets utilisés pour les capteurs passifs [3].</i>	<i>17</i>
<i>Tab.I.2 :Effets utilisés pour les capteurs actifs [3].</i>	<i>18</i>
<i>Tab.II.1 :Les spécifications d'accéléromètres pour deux types d'applications.</i>	<i>26</i>
<i>Tab.II.2 :Propriété des couches (layers) CMOS.....</i>	<i>31</i>
<i>Tab.II.3 :Dimensions de la structure.</i>	<i>33</i>
<i>Tab.II.4 :Dimensions de la structure proposée.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab.III.1 :Valeurs es déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération</i>	<i>48</i>
<i>Tab.III.2 :Valeurs des déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération</i>	<i>48</i>
<i>Tab.III.3 :Valeurs des déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération suivant l'axe z.....</i>	<i>49</i>
<i>Tab.III.4 :représente le coefficient dorkel.</i>	<i>60</i>

Introduction générale

Un MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) est composé d'éléments électroniques analogiques et numériques mais aussi d'éléments électromécaniques destinés à assurer des fonctions de capteurs ou d'actionneurs.

Les parties électronique et mécanique sont fabriquées en utilisant les procédés de fabrication des circuits intégrés (par exemple CMOS, Bipolaire, BICMOS) qui éliminent certaines parties du wafer ou ajoutent de nouvelles couches structurales pour former le dispositif mécanique.

L'association de la microélectronique sur silicium avec la technologie de micro usinage a rendu possible la réalisation de systèmes complets sur puce. La technologie des MEMS permet le développement de composants intelligents ; elle ajoute à la capacité de calcul de la microélectronique, l'aptitude de percevoir et de contrôler des micros capteurs et des micros actionneurs. Ces composants profitent à la fois d'une extrême miniaturisation et d'un rapport performance-coût très avantageux du fait de leur capacité à être produits en série par les procédés de fabrication collective.

Parmi les MEMS les plus utilisés on trouve les micros capteurs d'accélération. Principalement, on trouve les accéléromètres dans l'automobile et dans de nombreux domaines publics et industriels (caméscope, téléphone portable, système de navigation GPS, sismométrie, surveillance de machines, etc.). A chaque type d'application correspond un accéléromètre avec des performances dédiées. Bien souvent, la performance est liée au coût du capteur.

La majorité des accéléromètres détectent l'accélération suivant une direction. Cette donnée est souvent insuffisante pour avoir une information exacte sur le mouvement, car l'accélération est une grandeur vectorielle possédant donc trois composantes. Ainsi les accéléromètres triaxiaux sont nécessaires pour le contrôle de mouvement dans de nombreuses applications telles que l'automobile ou la robotique. L'accéléromètre intégré triaxial présente beaucoup d'avantages (en comparaison à la combinaison de trois accéléromètres mono-axe), entre autres : la diminution du coût et de la taille.

Le travail présenté dans ce mémoire décrit la conception, la modélisation et l'optimisation d'accéléromètres monolithiques CMOS uniaxial et triaxial à faible coût. Ce manuscrit est constitué de trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous dresserons un état de l'art sur les capteurs, les actionneurs et leurs caractéristiques. Nous établirons ensuite un bilan sur les microsystemes ainsi que les différents modes de transduction. Nous citerons ainsi quelques exemples d'application.

Dans le second chapitre, nous nous intéresserons à l'étude de la réponse mécanique et électrique d'un accéléromètre uniaxial. Nous procéderons ensuite à sa modélisation pour la mesure de l'accélération verticale. La structure proposée est composée d'une masse sismique attachée à un microlevier susceptible de fléchir sous l'action d'une accélération verticale appliquée. Des modèles seront proposés pour ce type d'accéléromètre. Ces modèles seront vérifiés par des simulations par éléments finis sous ANSYS. Ce logiciel nous permettra de donner les caractéristiques intrinsèques (sensibilité, linéarité,..) de l'accéléromètre ainsi constitué.

Une étude préliminaire d'un accéléromètre triaxial à détection piézorésistive est abordée dans le troisième chapitre. Une structure proposée est constituée d'une masse sismique lourde suspendue par quatre micro poutres longues. Ceci va permettre d'obtenir des sensibilités importantes. Cette structure sera étudiée et modélisée par la méthode des éléments finis sous ANSYS pour optimiser les localisations des jauges de contraintes et séparer chaque composante d'accélération par des circuits en pont de Wheatstone complets.

Finalement, on clôture par une conclusion générale et les perspectives de notre travail.

Chapitre I :
Généralités sur les capteurs et les
microsystèmes (MEMS)

I.1. Introduction

Dans de nombreux domaines comme l'industrie, la recherche scientifique, les services, les loisirs, etc... on a besoin de contrôler des paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité...). Le capteur est l'élément indispensable à la détection de ces grandeurs physiques [2].

I.2. Généralités sur les capteurs

I.2.1. Définition

Le capteur est un dispositif électronique qui transforme les grandeurs physiques ou chimiques non électriques en un signal électrique mesurable.

I.2.2. Le mesurande et la mesure

Le « mesurande » est la grandeur physique objet de la mesure (déplacement, température, pression, etc.) et il est représenté par m . Le capteur, qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une grandeur de sortie de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et appelée « mesure ».

$$s = F(m)$$

La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques décrivant la relation entre le mesurande et la mesure [3].

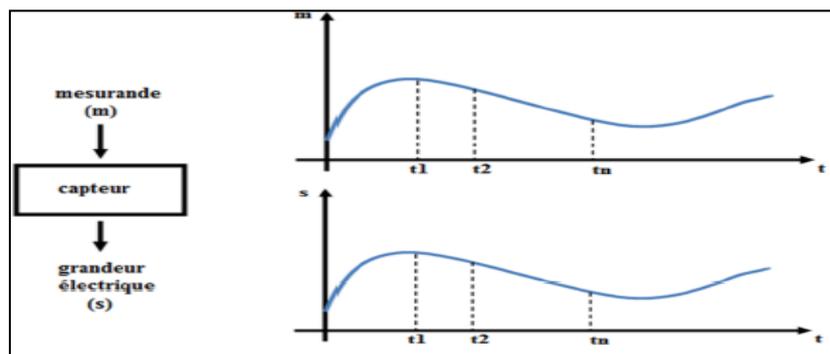


Fig.I.1 :Schéma représentant la relation entre le mesurande et la mesure [4].

I.2.3 .Chaîne de mesure

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents. La mesure d'un débit, par exemple, peut se faire en plusieurs étapes :

- i. Transformation du débit en une pression différentielle.
- ii. Transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane.
- iii. Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique).
- iv. Amplification et filtrage de la grandeur électrique.
- v. Discrétisation et quantification (numérisation).
- vi. Exploitation, etc.

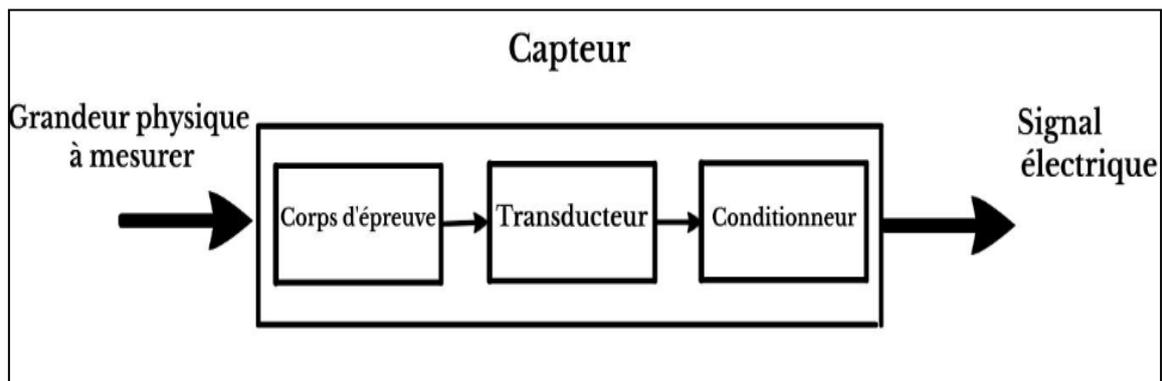


Fig.I.2 : Constitution d'une chaîne de mesure classique [5].

I.2.4. Familles des grandeurs physiques

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles que chaque capteur s'associera à l'une d'elles :

- i. Mécanique : déplacement, force, masse, pression, débit...
- ii. Thermique : température, capacité thermique, flux thermique.
- iii. Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique.
- iv. Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique.
- v. Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes.
- vi. Biochimique : gaz, sucre, hormone.

I.2.5. Etalonnage d'un capteur

L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique, la relation entre la mesurande et la grandeur électrique de sortie [8].

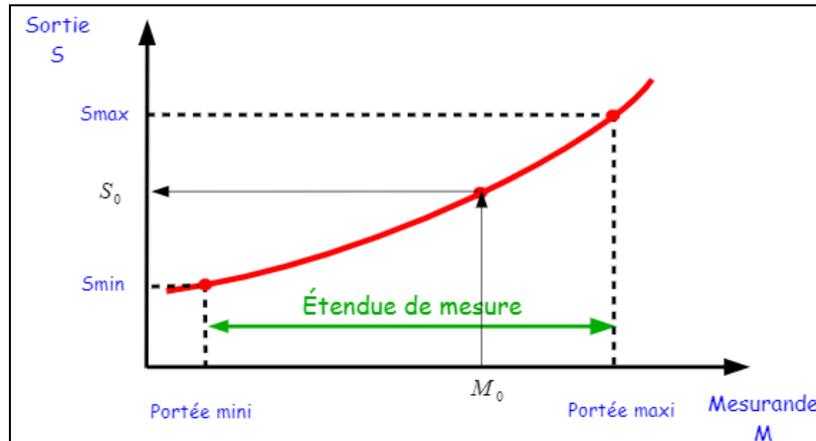


Fig.I.3 : Courbe d'étalonnage d'un capteur [12].

I.2.6 .Classification des capteurs

Si l'on s'intéresse aux phénomènes physiques mis en jeu dans les capteurs, on peut classer ces derniers en deux catégories. [7]

I.2.6.1.Capteurs passifs

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif [4]. Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Types de matériaux utilisés
Température	Résistivité	Métaux : platine, nickel, cuivre. Semi-conducteurs.
Très basse température	Constante diélectrique	Verres.
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteurs.
Déformation	Résistivité Perméabilité magnétique	Alliages de nickel, silicium dopé. Alliages ferromagnétiques.
Position (aimant)	Résistivité	Matériaux magnéto-résistants : bismuth, antimoine d'indium.
Humidité	Résistivité Constante diélectrique	Chlorure de lithium. Alumine ; polymères.
Niveau	Constante diélectrique	Liquides isolants.

Tab.I.1 : Effets utilisés pour les capteurs passifs [3].

I.2.6.2. Capteurs actifs

Dans ce cas, la sortie du capteur est équivalente à un générateur. C'est un dipôle actif qui peut être du type courant, tension ou charge. Les principes physiques mis en jeu sont présentés sur le tableau ci-dessous.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Tab.I.2 :Effets utilisés pour les capteurs actifs [3].

I.2.7 Caractéristiques d'un capteur

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application. [6]

I.2.7.1. Etendue de la mesure

Il définit la zone dans laquelle les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois familles.

a. Zone nominale d'emploi : Dans laquelle le mesurande peut évoluer sans modification des caractéristiques du capteur.

b. Zone de non-détérioration : C'est une zone définie par des valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnante, etc...) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

c. Zone de détérioration : Dans laquelle, le capteur peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques.

I.2.7.2. Le seuil

Le seuil d'un capteur est la valeur minimale du mesurande à partir de laquelle un capteur devient sensible. En dessous de cette valeur le capteur ne mesure rien.

I.2.7.3. Hystérésis

La figure ci-dessous illustre les caractéristiques de sortie d'un capteur présentant un effet d'hystérésis. L'hystérésis consiste au non coïncidence entre la courbe de charge et celle de décharge c'est-à-dire la mesure par valeurs croissantes et par valeur décroissantes.

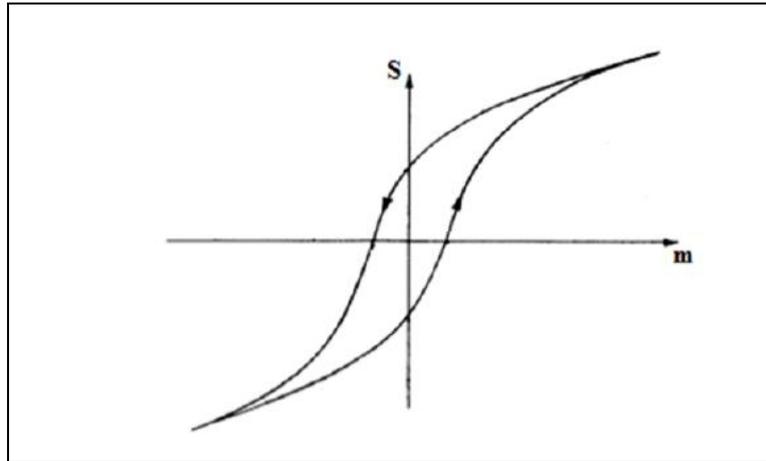


Fig.I.4 :Effet d'hystérésis.

I.2.7.4. Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur :

Elle donne la relation d'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée. Elle est donnée classiquement par une courbe en régime permanent. Elle ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

I.2.7.5. Temps de réponse

Le temps de réponse permet d'évaluer la manière dont un capteur réagit à une variation brusque du mesurande [10].

I.2.7.6. Sensibilité

Elle désigne la variation du signal de sortie par rapport à celle du signal d'entrée.

$$S = \frac{\Delta \text{ sortie}}{\Delta \text{ entrée}}$$

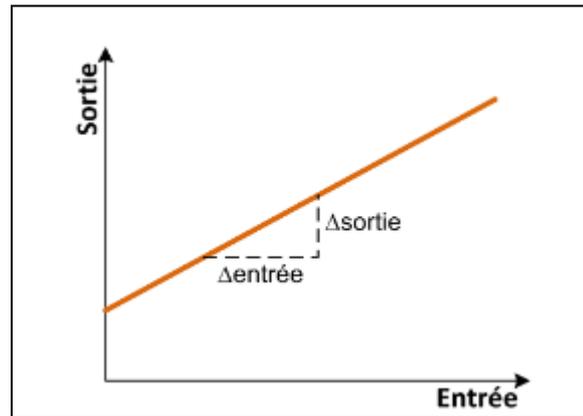


Fig.I.5 :sensibilité d'un capteur linéaire.

I.2.7.7. La fidélité

Elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs aléatoires sont faibles, ce qui se traduit par des résultats de mesure groupés autour de leur valeur moyenne. L'écart type, dont l'importance reflète la dispersion des résultats est souvent considéré comme l'erreur de fidélité et en permet une appréciation quantitative.

I.2.7.8. La justesse

Elle caractérise un appareil de mesure dont les erreurs systématiques sont faibles. La valeur la plus probable du mesurande déterminée par un tel appareil de mesure est très proche de la vraie valeur.

I.2.8. Quelques types des capteurs

Le monde qui nous entoure est composé d'innombrables types de capteurs. Ils peuvent revêtir des formes très variées et être conçues pour des usages bien divers.

I.2.8.1. Capteurs de pression

Un capteur de pression est un système qui permet de convertir une pression mécanique en une valeur électrique. [16]

I.2.8.2. Capteurs d'accélération

Un accéléromètre mesure une accélération selon une ou plusieurs directions. Cette accélération est mesurée de manière indirecte en mesurant soit le déplacement de la masse sismique du capteur, soit la force inertielle induite par l'accélération de la masse sismique du capteur [17].

I.2.8.3. Capteurs d'humidité

Le capteur d'humidité permet, comme son nom l'indique, de mesurer l'humidité ambiante. Une mesure utile en matière de météorologie, mais aussi dans le secteur de l'habitat. En effet, l'humidité dans une maison peut poser des problèmes. Un air trop humide, ou trop sec, peut être source de désagréments, voire engendrer des risques sur la santé.

Il existe des capteurs d'humidité (ou hygromètres) capacitifs et des sondes d'humidité (ou hygromètres) résistives [18].

I.2.8.4. Capteurs de température

De toutes les grandeurs physiques, la température est certainement l'une dont la mesure est la plus fréquente. La température détermine en effet de façon décisive les propriétés de la matière. Sa mesure n'est pas directe, mais à travers un phénomène associé tel que la variation de résistance d'un conducteur électrique, la dilatation d'un fluide ou l'émission d'un rayonnement thermique [4].

I.3. Les microsystèmes électromécaniques (MEMS)

I.3.1. Définition

Les MEMS, acronyme de Micro Electro Mechanical Systems, sont des dispositifs miniaturisés combinant plusieurs principes physiques. Ils intègrent généralement des éléments mécaniques couplés à de l'électronique et sont réalisés par des procédés de fabrication issus de la micro-électronique. Les MEMS exploitent, entre autres, des effets liés à l'électromagnétisme, la thermique et la fluïdique. Ils sont dans notre quotidien, au cœur de la téléphonie, de l'automobile, du médical, des chaînes de production ou des manettes de consoles de jeux. Leur taille est de l'ordre du millimètre carré et les éléments de leurs structures (mécaniques) sont à l'échelle du micron.

Utilisé en tant que capteur, un MEMS possède une partie mobile sensible à la variation d'une grandeur physique (vitesse, pression, direction ...). Cette variation est alors traduite en une grandeur électrique, analysée ensuite par la partie électronique du MEMS. Il possède parfois un micro-actionneur intégré qui, à partir d'un signal électrique, va agir sur la partie mécanique [22].



Fig.I.6 : Visualisation de l'échelle d'un MEMS [21].

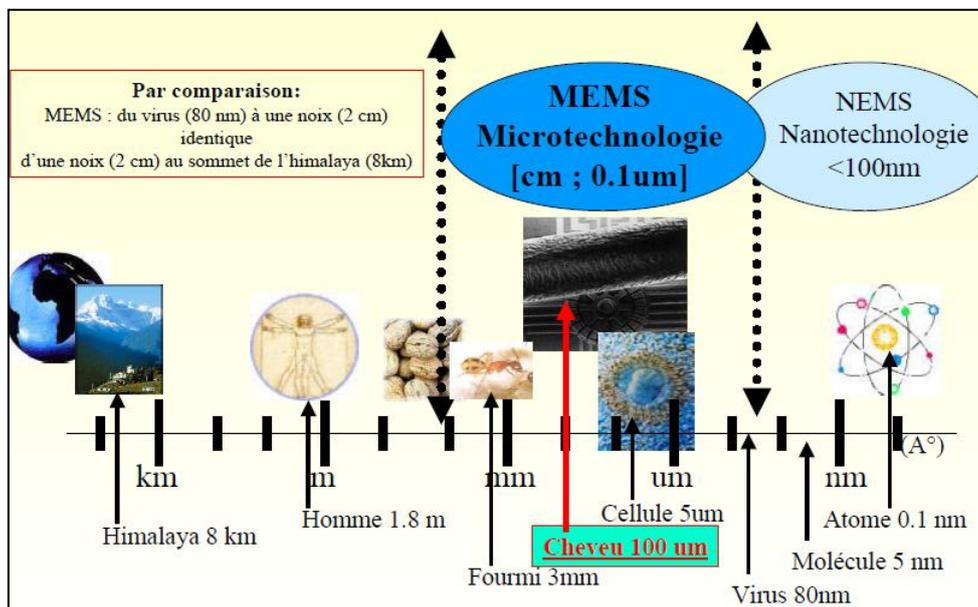


Fig.I.7 : Ordre de grandeur des microsystèmes [22].

I.3.2. Les différents secteurs des MEMS

Les avancées autour de la micro-technologie de réalisations des MEMS (basées sur le principe de la photolithographie) ont engendré une explosion des applications et une segmentation du domaine. On trouve quatre familles associées à leurs cadres applicatifs (figure 1.8) [22].

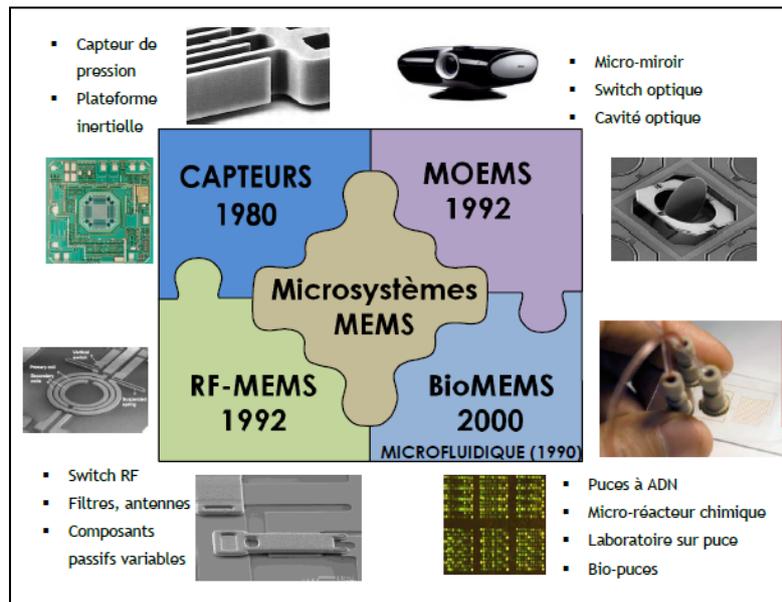


Fig.I.8 :Les quatre secteurs des MEMS [22].

Chapitre II :

Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

II.1.Introduction

Un accéléromètre mesure l'accélération subie par un objet, exprimée en « m/s^2 » ou en « g » qui est l'accélération de la pesanteur moyenne terrestre. $1g$ est l'accélération subie par un objet lorsqu'il est soumis à la seule force gravitationnelle terrestre; $0-2g$ correspond à l'accélération d'une personne se mettant en mouvement, $5-30g$ est l'accélération subie par un conducteur lors d'un accident de voiture, $10\ 000g$ est l'ordre de grandeur de l'accélération subie par une balle au départ d'un fusil ($1g = 9.8m.s^{-2}$).

Les accéléromètres fonctionnent par principe de mesure des forces exercées sur un corps donné. Ou encore par la mesure de la déformation que ces forces peuvent engendrées sur une structure. Il existe de différentes techniques pour mesurer l'accélération d'un corps et la transformer en un signal électrique (piézoélectricité, structure résonante, piézorésistivité, etc...). [24]

Les accéléromètres, comme tout les capteurs, sont définis par les paramètres suivants : sensibilité, résolution, plage de fonctionnement, bande passante, offset, choc maximum toléré. Ces paramètres déterminent les domaines d'applications associés à chaque type d'accéléromètre. Le tableau (II.1) donne les spécifications d'accéléromètres pour deux types d'applications distincts [25]:

- Les applications automobiles utilisent des accéléromètres pouvant mesurer des accélérations jusqu'à $50g$ avec des résolutions inférieures à $100mg$.
- La navigation nécessite des capteurs avec une meilleure résolution (de l'ordre du $micro-g$) pour des amplitudes d'accélération inférieures au g , une plus faible non linéarité et une sensibilité hors axe infime.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

Application	Automobile	Navigation
Amplitude des accélérations	± 50g (airbag) ± 2g (stabilisation véhicule)	± 1g
Fréquences fonctionnement	DC-400Hz	DC-100Hz
Résolution	< 100mg (airbag) < 10mg (stabilisation véhicule)	< 4μg
Sensibilité hors axe	< 5%	< 0.1%
Non linéarité	< 2%	< 0.1%
Choc maximum (pdt 1ms)	> 2000g	> 10g
Température fonctionnement	-40°C à 85°C	-40°C à 80°C
Coefficient d'offset dû à la température	< 60mg/°C	< 50μg/°C
Coefficient de sensibilité dû à la température	< 900ppm/°C	± 50ppm/°C

Tab.II.1 :Les spécifications d'accéléromètres pour deux types d'applications.

II.2.Approche de modélisation du microlevier « T-shape »

II.2.1.Généralité

Le micro-levier "T-Shape", est un transducteur électromécanique qui œuvre pour la transformation d'une grandeur mécanique (une force ou accélération) en grandeur électrique. Dans le cas général des transducteurs électromécaniques et comme le montre la figure (II.1), on peut distinguer trois parties:

- La partie mécanique représente le comportement mécanique de la structure à savoir les déformations et les contraintes en fonction des charges appliquées. Cette partie constitue le corps d'épreuve du capteur dont la réponse est fonction de la géométrie de la structure et aux matériaux qui la composent.
- La partie électromécanique traduit la transformation des déformations mécaniques en grandeurs électriques. Cette partie constitue le transducteur. En pratique, différents effets physiques sont utilisés : effet piézorésistif, effet piézoélectrique, etc...
- La partie électrique représente le conditionneur électronique du signal de sortie et les différents blocs de traitement. [4]

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

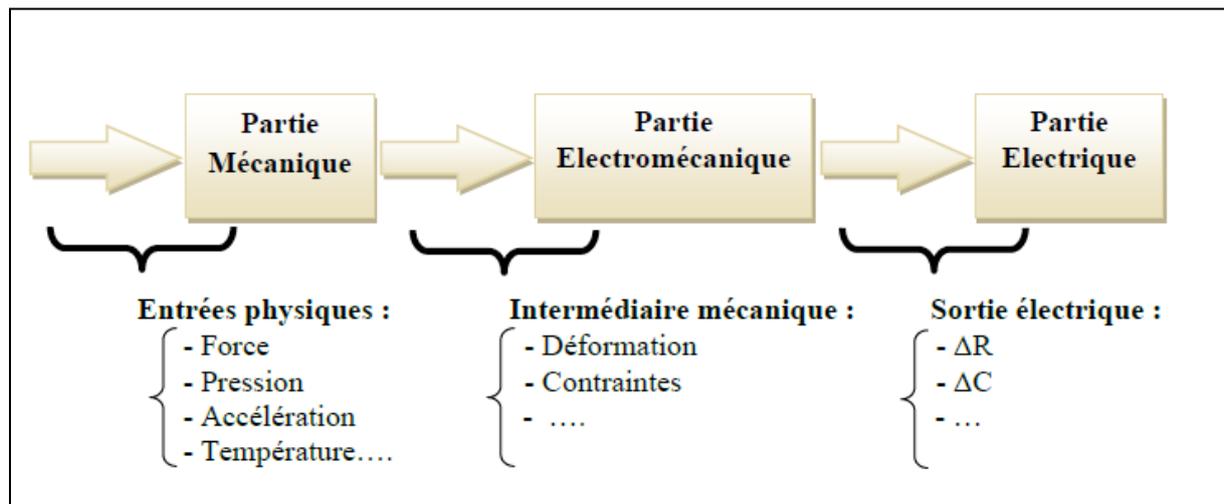


Fig.II.1 :Parties constituant un microsysteme électromécanique.

II.2.2.Paramètres géométriques

Le microlevier est une micro-poutre encastree à une extrémité et libre à l'autre. Nous supposons que la section de la micro-poutre est rectangulaire.

Nous définissons alors les paramètres géométriques caractérisant la micro-poutre comme suit:

- La longueur de structure suivant l'axe x noté L .
- La largeur l suivant l'axe y.
- L'épaisseur ep suivant l'axe z.

Ils ont présentés dans la figure (II.2).

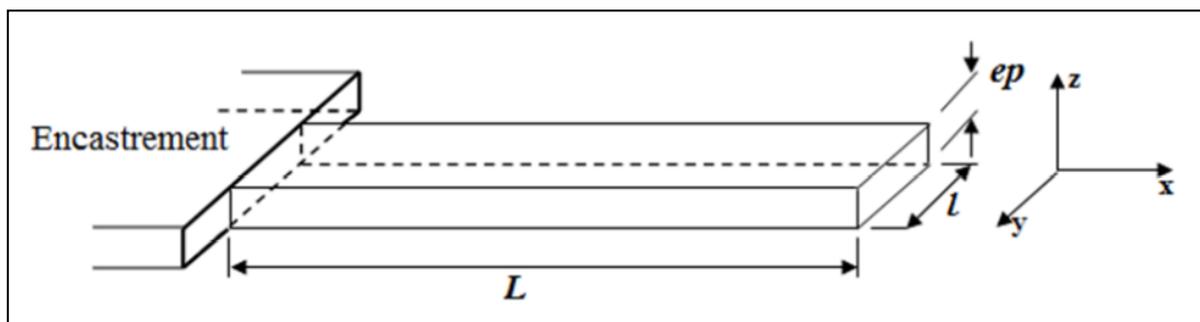


Fig.II.2 :Schéma d'un de microlevier.

Le moment quadratique d'inertie I (m^4) d'un microlevier de section homogène et symétrique est un paramètre de nature purement géométrique. Il est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{l \cdot ep^3}{12}$$

II.1

II.2.3. Le moment fléchissant

Dans le cas où la charge est ponctuelle et appliquée à l'extrémité libre du microlevier (Figure II.3), le moment fléchissant M peut s'écrire comme suit :

$$M(x) = F(L - x) \quad \text{II.2}$$

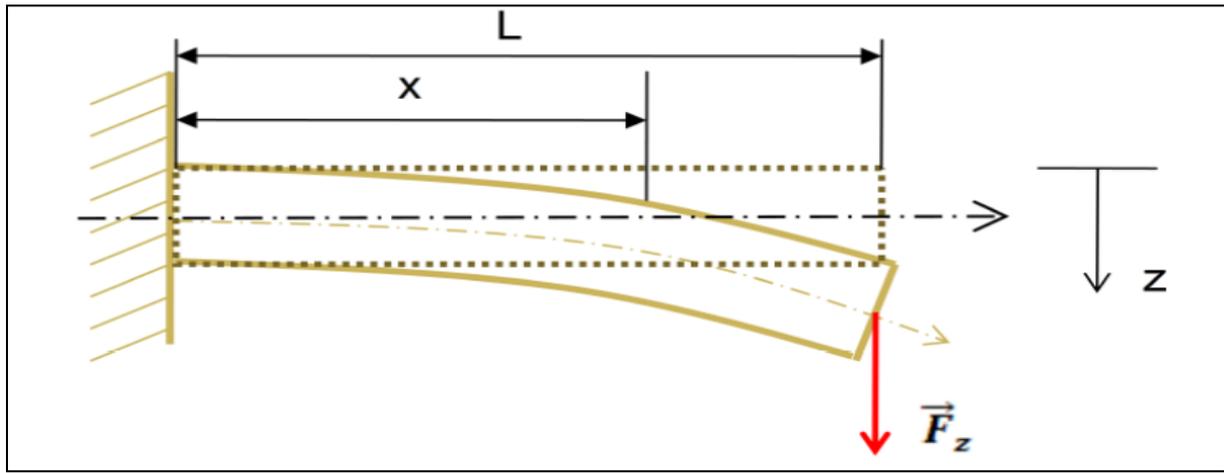


Fig.II.3 :Modèle statique du microlevier.

II.2.4. La déflexion du microlevier

En présence de la force ponctuelle \vec{F} agissant suivant la direction z et appliquée à l'extrémité libre du microlevier, ce dernier se déforme en chaque point. Cette déformation se traduit par une déflexion $z(x)$ (déplacement) et une pente θ en un point d'abscisse x .

Nous pouvons exprimer le rayon de courbure de la structure en un point x quelconque (Figure II.4) par :

$$\frac{1}{r} = \frac{M(x)}{E.I} \quad \text{II.3}$$

**Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial
à détection piézorésistive.**

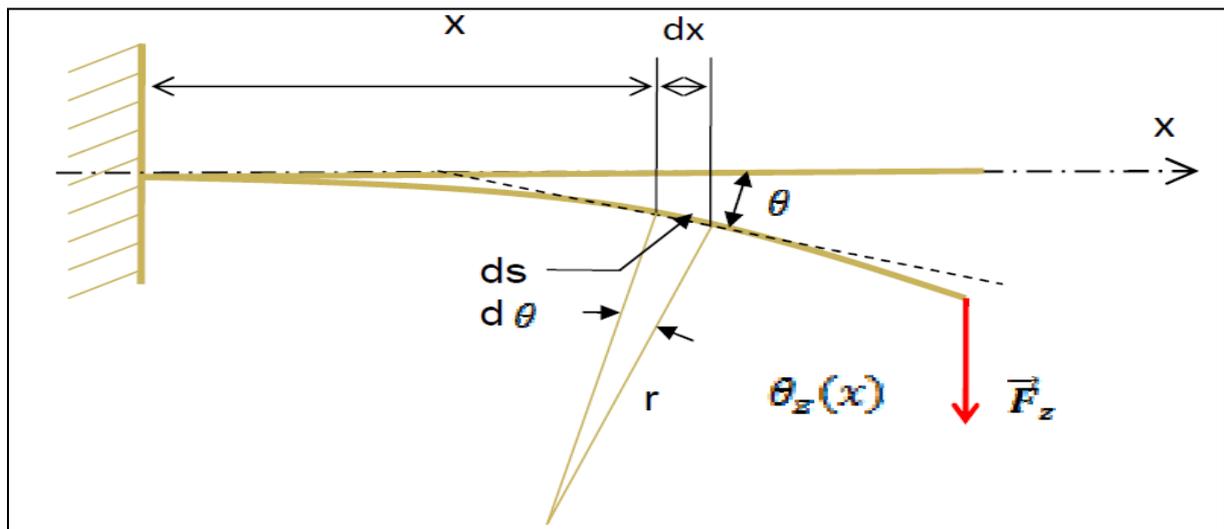


Fig.II.4 :Rayon de courbure.

En considérant les conditions particulières à l'encastrement (le fléchissement est nul), le fléchissement z à une distance x de l'encastrement est obtenu après une double intégration de l'expression du moment fléchissant M [25].

$$E.I. \frac{\partial^2 z(x)}{\partial x^2} = M(x) \quad \text{II. 4}$$

Où E (Pa) et I (m^4) représentent respectivement le module d'Young du matériau constituant la poutre et le moment d'inertie quadratique de la section homogène. [4]

On obtient, après une deuxième intégration de l'équation (II. 5), le résultat suivant :

$$Z(x) = \frac{1}{E.I.} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot F \cdot L \cdot x^2 - \frac{1}{6} \cdot F \cdot x^3 \right) \quad \text{II. 5}$$

La flexion maximale est alors en $x=L$:

$$Z(L) = \frac{F.L^3}{3.E.I} \quad \text{II. 6}$$

On reconnaît dans l'équation (II.7) la loi de comportement d'un ressort de raideur K où :

$$K = \frac{F}{Z(L)} = \frac{3.E.I}{L^3} \quad \text{II. 7}$$

II.3.Comportement dynamique d'un microlevier

En statique, le microlevier est assimilé à un simple ressort. En dynamique, en tenant compte de la masse du microlevier et d'éventuels phénomènes d'amortissement, on peut modéliser cette structure par le système mécanique du second ordre de type masse m , ressort K et amortisseur D représenté dans la figure (II. 5).

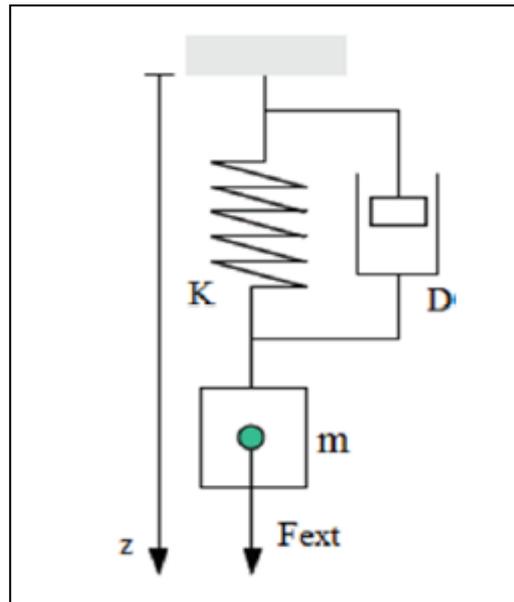


Fig.II.5 :Modèle mécanique de second ordre de type :

Masse-Ressort-Amortisseur.

La réponse d'un tel système est la solution de l'équation différentielle obtenu par application de la loi fondamentale de la mécanique sur un solide de masse m :

$$\sum(F) = m \frac{d^2z}{dt^2} \quad \text{II. 8}$$

Avec :

$$\sum(F) = F_{\text{ext}} + F_K + F_D \quad \text{II. 9}$$

Où : F_k est la force appliquée par le ressort sur le solide. Elle s'écrit :

$$F_k = -K (Z - Z_0) \quad \text{II.10}$$

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

Où Z_0 représente la longueur libre du ressort exprimé en mètres.

Et F_D est la force appliquée par l'amortisseur sur le solide. Dans le cas d'un frottement visqueux, elle s'écrit :

$$F_D = -D \frac{dz}{dt} \quad \text{II. 11}$$

D est appelé "le coefficient d'amortissement" du système et s'exprime en kg/s.

F_{ext} est une force extérieure au système.

L'équation (II. 9) devient alors :

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -K (Z-Z_0) -D \frac{dz}{dt} + F_{ext} \quad \text{II. 12}$$

Le tableau II.2 donne les épaisseurs t_i et les densités d_i des différentes couches d'un procédé standard CMOS :

Couche	Epaisseur	Module d'Young	Densité Massique
	t_i (μm)	E_i (GPa)	d_i (kg/m^3)
Oxyde de Champ	0,6	70	2500
Polysilicium	0,4	162	2300
Oxyde de Contact	0,6	90	2500
Métal 1	0,6	72	2700
Oxyde de Via	1	81	2500
Métal 2	1	74	2700
Passivation	1	131	3100

Tab.II.2 :Propriété des couches (layers) CMOS

Nous pouvons ainsi estimer la valeur de la masse par unité de surface comme :

$$\rho_s = \sum e p_i \cdot d_i \approx 13.8 \cdot 10^{-3} \text{ Kg}/\text{m}^2 \quad \text{II.13}$$

La raideur d'une poutre est à la fois fonction du module d'Young du matériau qui le compose et de la forme de sa section (moment d'inertie). Dans le cas d'une structure CMOS,

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

l'évaluation de ces paramètres n'est pas immédiate du fait de la superposition de couches de différents matériaux. Il est néanmoins possible de considérer une section homogène, équivalente à la section hétérogène, ayant les mêmes propriétés mécaniques au regard du fléchissement vertical de la poutre. [26]

Pour cela, la largeur de chaque couche de matériau est normalisée en considérant son module d'Young. Ainsi pour cette section équivalente on obtient :

$$E = E_{max} = 131 \text{ GPa} \quad \text{II.14}$$

II.4. Les paramètres géométriques.

Pour évaluer la sensibilité et la résolution de structures comme capteurs inertiels, considérons la structure de base en forme de T, que nous appellerons "T-Shape" présentée dans la figure (II.6). La masse d'épreuve est un plateau carré attaché en bout d'un bras.

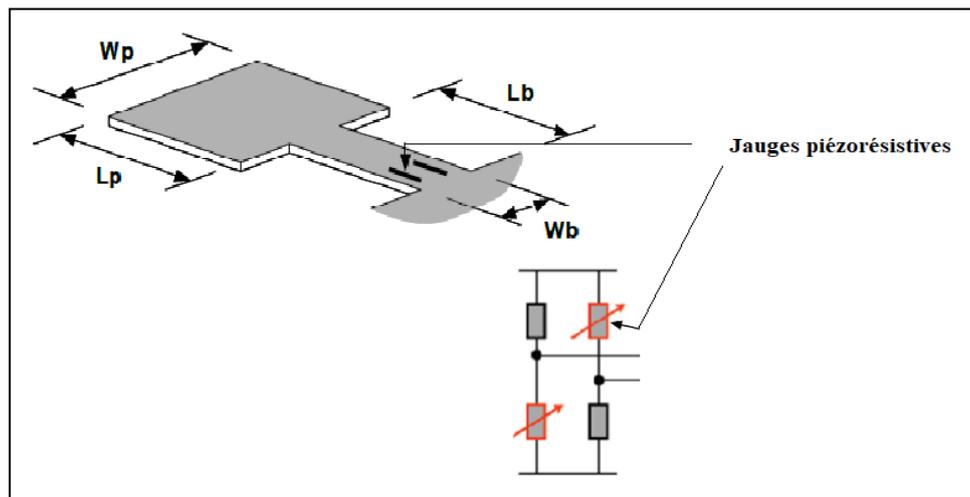


Fig.II.6 :Dimensions de la structure.

Avec :

L_b et L_p sont les longueurs, W_b et W_p sont les largeurs du bras et du plateau respectivement.

Le fléchissement de la structure est converti en signal électrique à l'aide de deux jauges en polysilicium connectées à deux autres résistances de même valeur formant un pont de Wheatstone.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

Le tableau (II.3) résume les dimensions de la structure de notre capteur. Nous considérerons un modèle simple alors la raideur sera calculée comme étant la raideur d'une poutre de longueur $L = L_b + \frac{L_p}{2}$ et de largeur W_b

	Structure de forme T
$L_b + W_b (\mu m)$	480x80
$L_p + W_p (\mu m)$	280x280
$ep (\mu m)$	5.2

Tab.II.3 :Dimensions de la structure.

II.4.1.Calcul des paramètres de conception

D'après l'équation (II.9) et les paramètres de conception du tableau (II.3), la masse sismique considérée d'après la loi $m=\rho_s.W_p$ est égale à $1.08\mu g$, ce qui offre à la structure une force par accélération de $F= m.a =10,6. 10^{-9}N/g$. La raideur que nous considérons vaut quant à elle :

$K = \frac{F}{Z(L)} = \frac{3.E.I}{L^3} = 0.89 N/m$. obtient alors pour une accélération de 1g, un fléchissement obtenu d'environ 11,9 nm, la sensibilité par rapport au fléchissement est donc de $11,9. 10^{-9} m/g$.

II.4.2.Calcul de la flexion de la poutre sous l'effet d'une accélération

Nous voulons déterminer, pour une structure homogène, l'expression du fléchissement Z en fonction du chargement de la poutre. Nous étudions, pour cela, le cas d'une structure uniformément chargée, décrite sur la figure (II.7).

Les charges q_b et q_p représentent la force inertielle résultant de la masse même de la structure :

$$q_b = W_b \cdot \rho_s \cdot a \tag{II.15}$$

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

$$q_p = W_p \cdot \rho_s \cdot a \quad \text{II.16}$$

où ρ_s (Kg/m^2) représente la masse équivalente (ou moyenne) par unité de surface de la structure ($\rho_s = \text{épaisseur} \cdot \text{densité}$) et a est l'accélération subie.

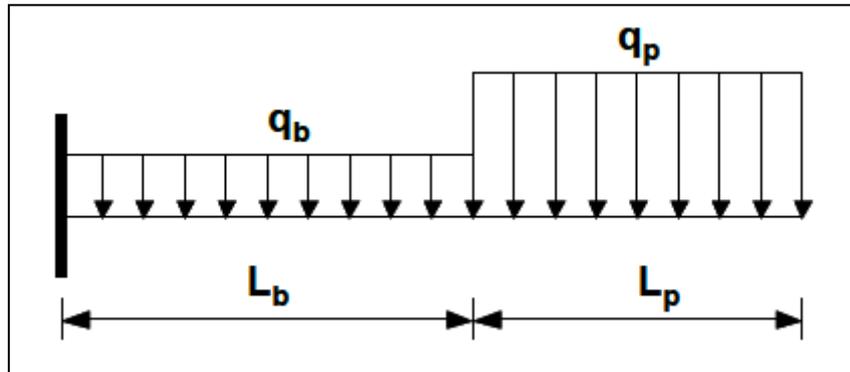


Fig.II.7 :Modèle de chargement de la structure.

II.5.Résultats :

La figure (II.8), nous donnent la variation du fléchissement pour une charge ponctuelle en fonction de la distance à l'encastrement de la structure calculée à partir de l'équation II. 5.

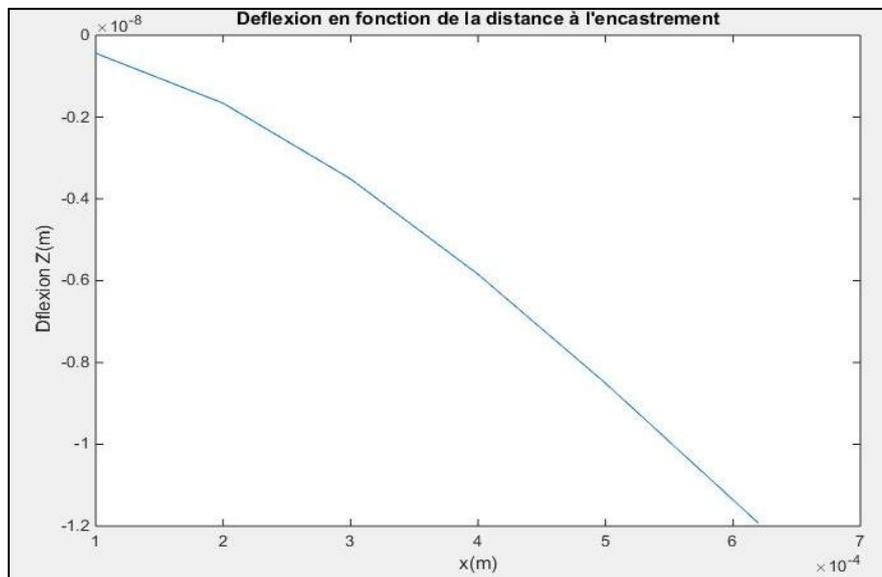


Fig.II.8 :Fléchissement Z pour une charge ponctuelle en fonction de la distance sous une accélération de 1g.

La figure (II.9) représente la variation du moment fléchissant en fonction de la distance à l'encastrement de la structure.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

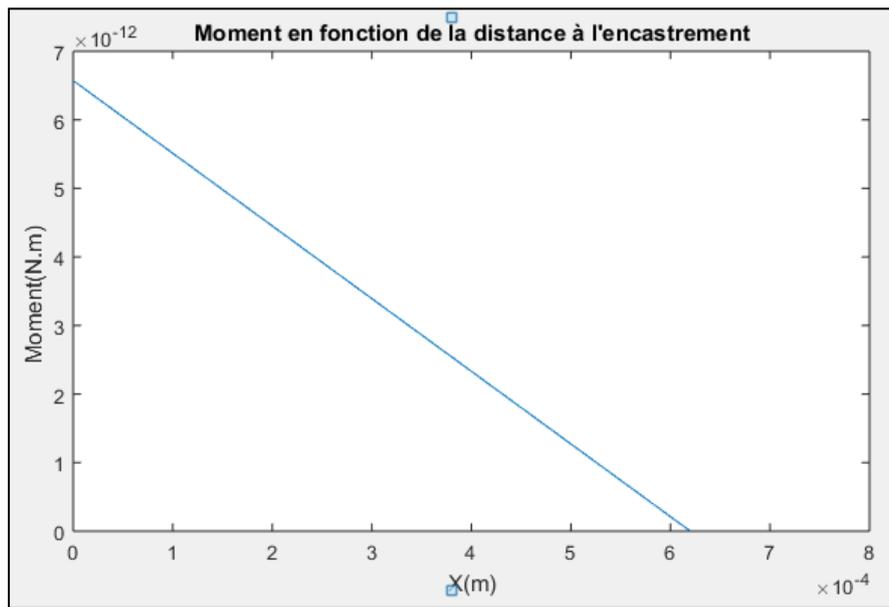


Fig.II.9 :Moment M en fonction de la distance sous une accélération de 1g.

$$Z_{plateau} = q_p \frac{2L_p^2}{45EI \left(\frac{W_p}{W_b} \right)} + \frac{1}{EI} \left(q_b \frac{L_b^4}{8} + q_p \frac{L_p L_b^3}{3} + q_p \frac{L_p^2 L_b^2}{2} + q_b \frac{L_p L_b^3}{12} + q_p \frac{L_b L_p^3}{4} \right) \quad (II.17)$$

La figure (II.10) représente la variation du fléchissement Z_{max} en fonction de l'accélération calculé à partir de l'équation (II.17).

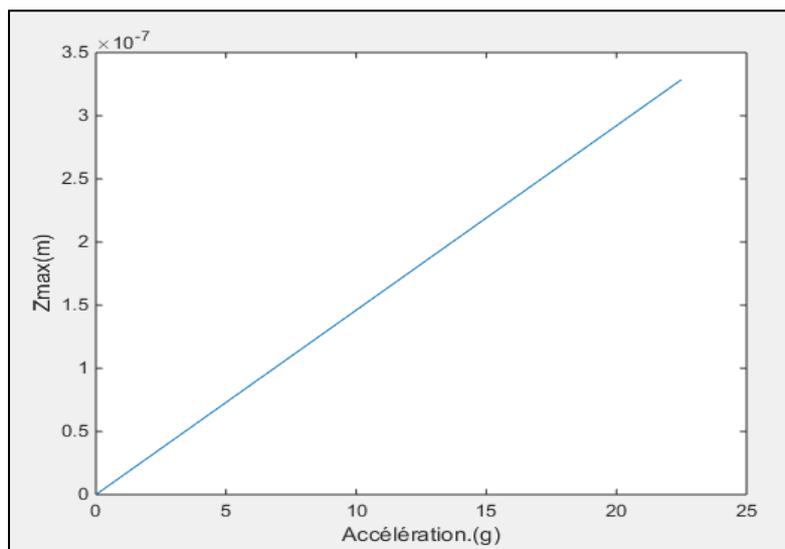


Fig.II.10 :Fléchissement théorique Z_{max} à l'extrémité libre en fonction de l'accélération.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

La figure (II.11) représente la variation de l'accélération en fonction de temps calculé à partir de l'équation (II.12).

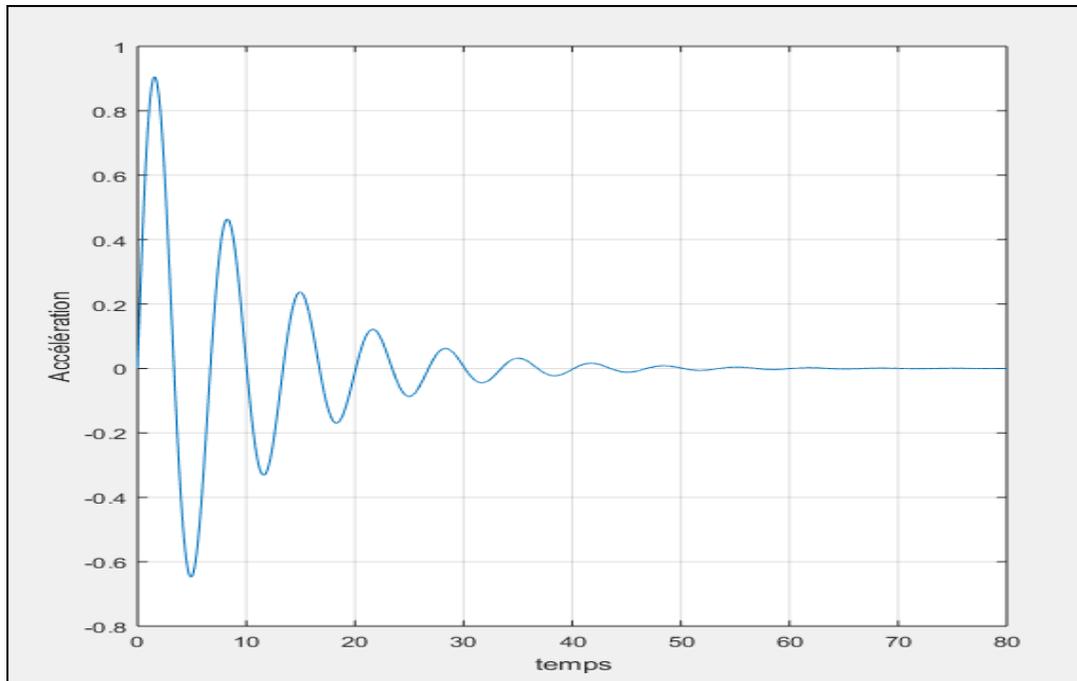


Fig.II.11 : Accélération de modèle mécanique en fonction du temps.

II.6. Accélération sur 3-axes

II.6.1. Intérêt : mesure sur 3-axes

Pour obtenir de bons résultats de la sensibilité, nous ne concentrons pas uniquement sur un seul axe, nous utilisons une structure qui nous aide à calculer la sensibilité sur les 3-axes.

II.6.2. Structure

Une configuration de flexion a été proposée afin de répondre à ces caractéristiques essentielles (figure II.12).

Un accéléromètre piézorésistif triaxial ayant des sensibilités uniformes le long des trois axes a été développé en utilisant la technologie MEMS. Ce capteur, constitué d'une masse sismique lourde et quatre longues micropoutres, permettent d'obtenir des sensibilités importantes.

Le tableau (II.4), donne les dimensions des paramètres de la structure proposée :

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

Les paramètres	La taille (longueur, largeur, épaisseur)
Masse sismique	845x845x400 μm^3
Micropoutres	975x80x10 μm^3
Blocs d'encastrement (ancres)	200x200x200 μm^3
La structure globale	1.5x1.5x0.5 mm^3

Tab.II.4 :Dimensions de la structure proposée.

II.6.3.Principe de fonctionnement

Lorsqu'une accélération externe est appliquée au capteur, la masse sismique est déplacée. La composante verticale (A_z) de l'accélération provoque un déplacement vertical de la masse. Le deuxième type de mouvement est causé par les accélérations transversales (A_x et A_y). La déviation de la masse sismique provoque une variation de la contrainte sur les quatre surfaces des micropoutres. Ceci peut être mesuré par des piézorésistances diffusées. Trois circuits en pont de Wheatstone ont été réalisés par l'interconnexion de douze piézorésistances de type p et n.

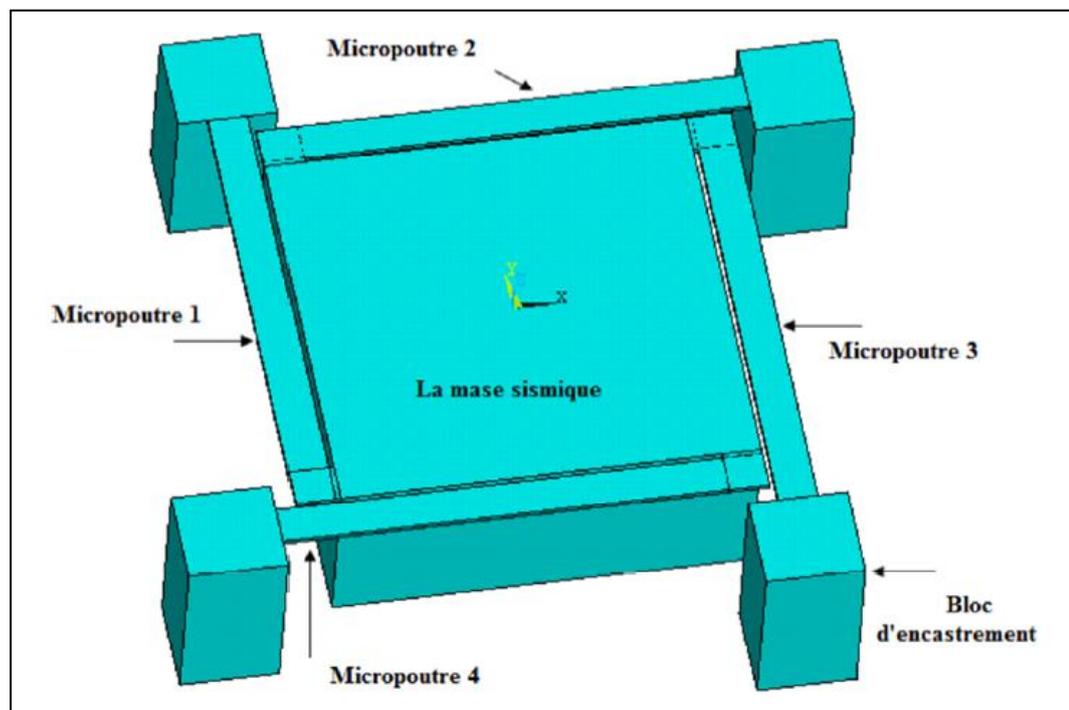


Fig.II.12 :Structure trois dimensions de l'accéléromètre à trois axes piézorésistif.

Chapitre II : Conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique uniaxial à détection piézorésistive.

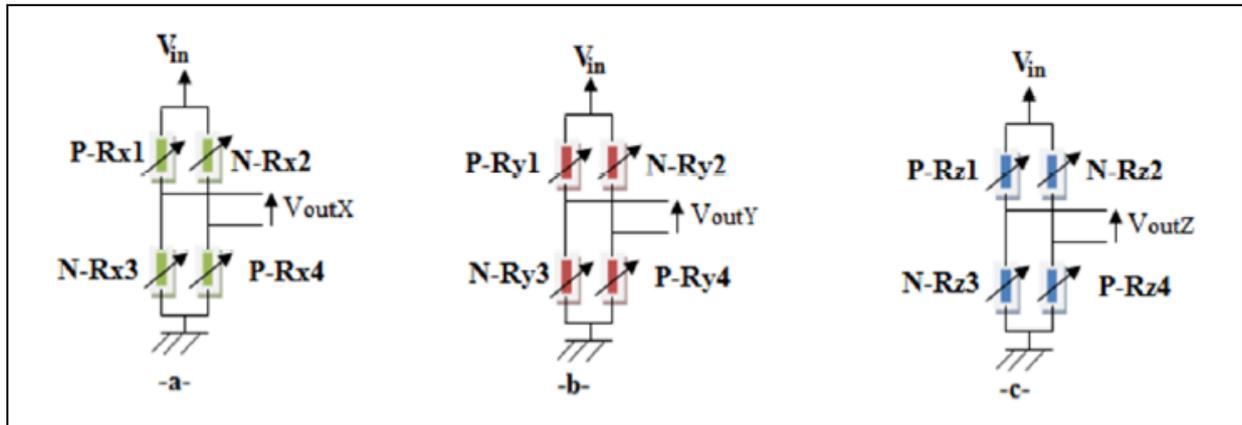


Fig.II.13 :Ponts de Wheatstone pour les trois composantes d'accélération,

(a) pour A_x , (b) pour A_y et (c) pour A_z .

Chapitre III :

Simulation par ANSYS d'un capteur 3 axes

III.1. Logiciel ANSYS

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM (Finite Element Method) leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. [27]

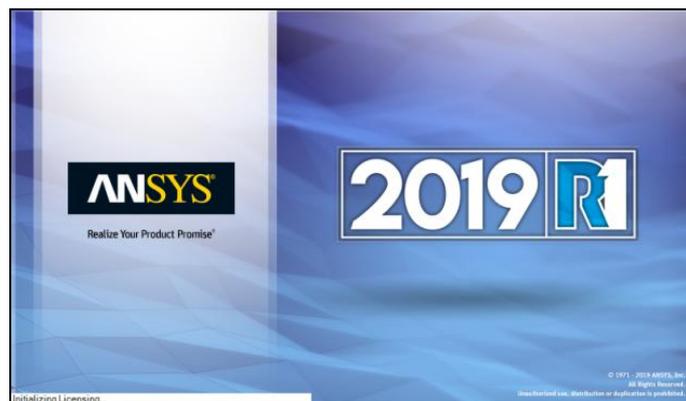
Ce produit permet d'effectuer des simulations multi physique. Ses principales capacités sont :

1. l'analyse statique.
2. l'analyse modale.
3. l'analyse temporelle ou transitoire.
4. la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations.
5. la simulation en matière de mécanique des fluides.
6. permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques. [28]

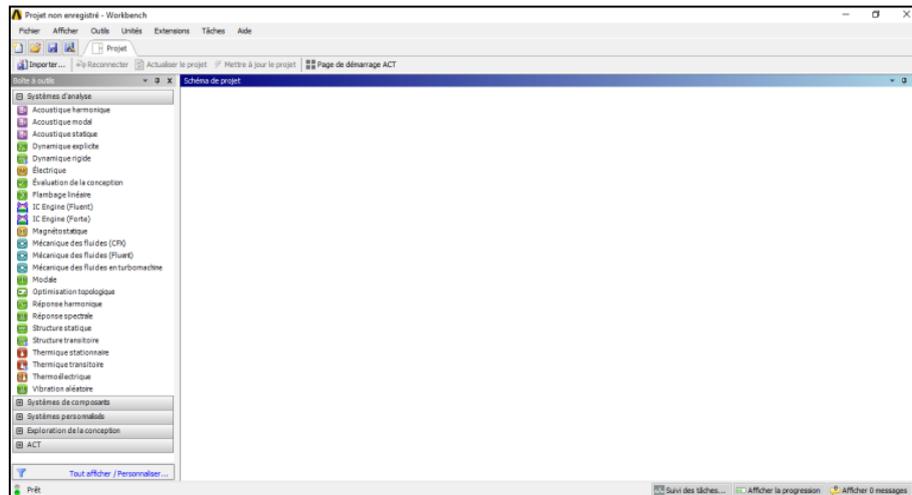
III.1.1. Présentation du logiciel ANSYS

Le Workbench permet de gérer les fichiers et le lancement des différents logiciels à partir d'une fenêtre unique. [29]

- Lancer ANSYS Workbench depuis le menu Démarrer de Windows.



➤ La fenêtre principale du Workbench s'affiche.



C'est à partir de là que vont être créés les fichiers, lancés les logiciels et gérées les interactions entre les différents logiciels utilisés pour la géométrie, le maillage, la simulation proprement dite et le post traitement. On verra aussi que le Workbench permet d'automatiser les procédures, de comparer les résultats de différentes simulations etc...

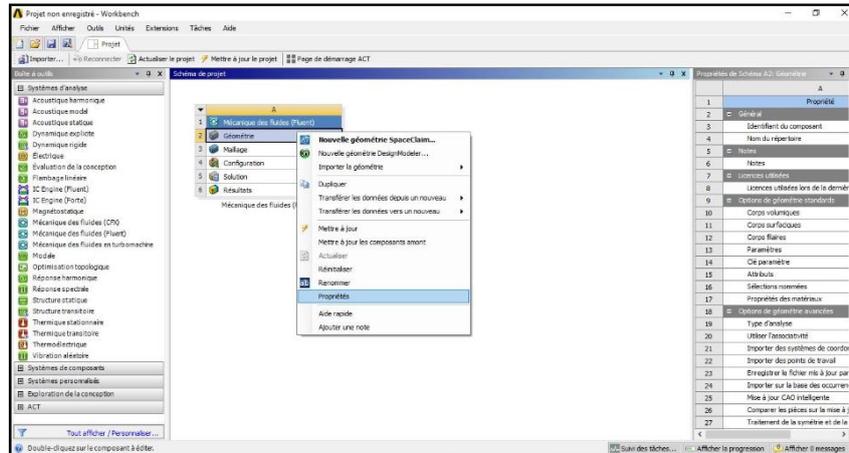
III.1.2. Créer un système d'analyse Fluid Flow 2d

Pour créer un « Analysis System », c'est-à-dire une chaîne de calcul pour une simulation Fluent :

- Sélectionner avec la souris Fluid Flow (FLUENT) dans le menu de gauche
- Faire glisser dans la fenêtre principale (Project Schematic).
- Renommer le système d'analyse en double cliquant sur le titre Fluid Flow (Fluent) .

Chapitre III : Simulation par ANSYS d'un capteur 3 axes

➤ Il faut préciser que l'on va travailler en 2d.



- Sélectionner la Case **2**  **Géométrie** dans le tableau du système.
- Faire un clic droit et sélectionner **Propriétés**.
- La fenêtre de propriétés apparaît à droite.
- Dans la case **Analysis Type**, changer **3d** en **2d**.
- Fermer la fenêtre de propriétés en cliquant sur **X** en haut à droite.

III.2.T-shape

En simulant la structure T-shape sur ANSYS et en appliquant une accélération de 1g, la micro-poutre va fléchir, cette déflexion est donnée dans les figures ci-dessous.

III.2.1.Pour l'axe-x

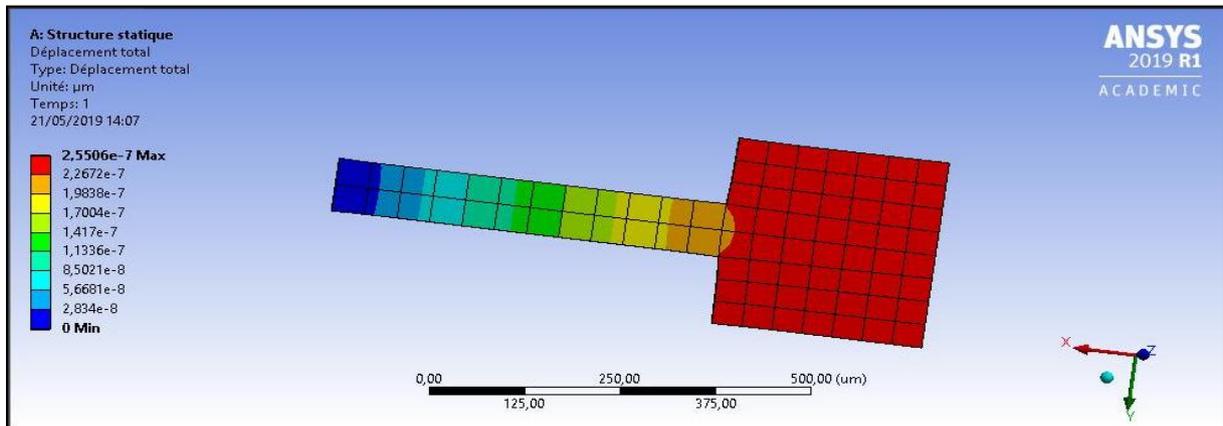


Fig.III. 1 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Ax.

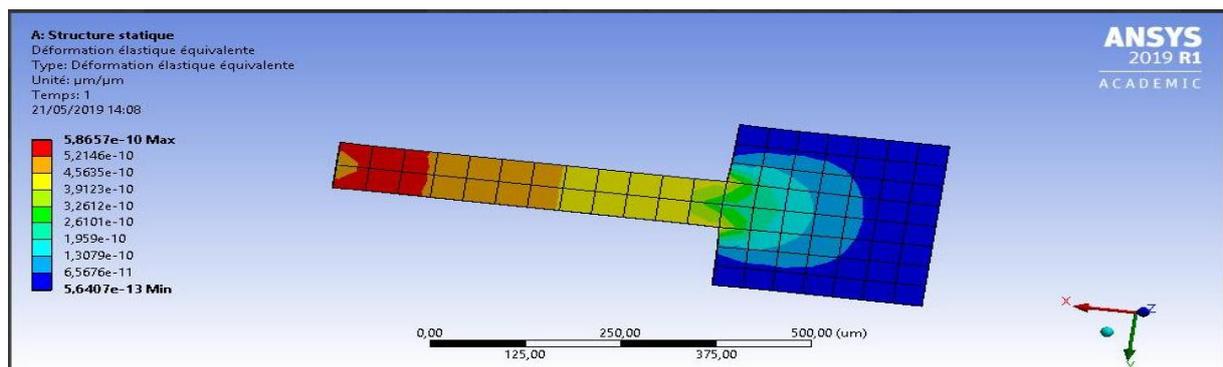


Fig.III.2 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Ax.

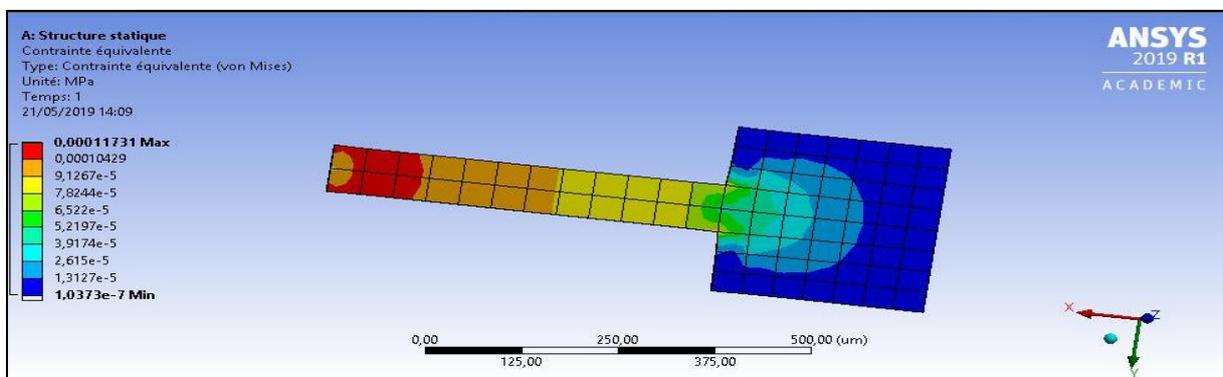


Fig.III.3 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Ax.

III.2.2. Pour l'axe-y

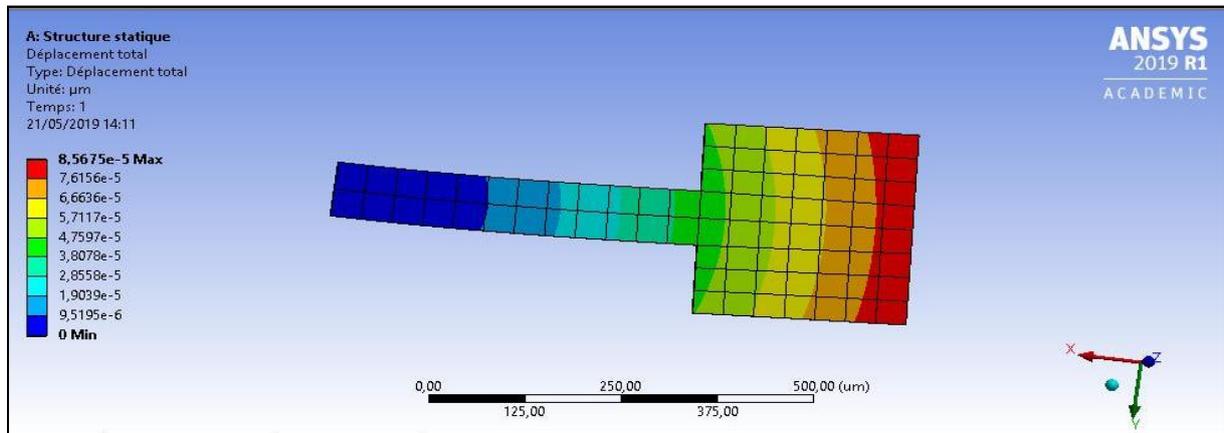


Fig.III.4 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Ay.

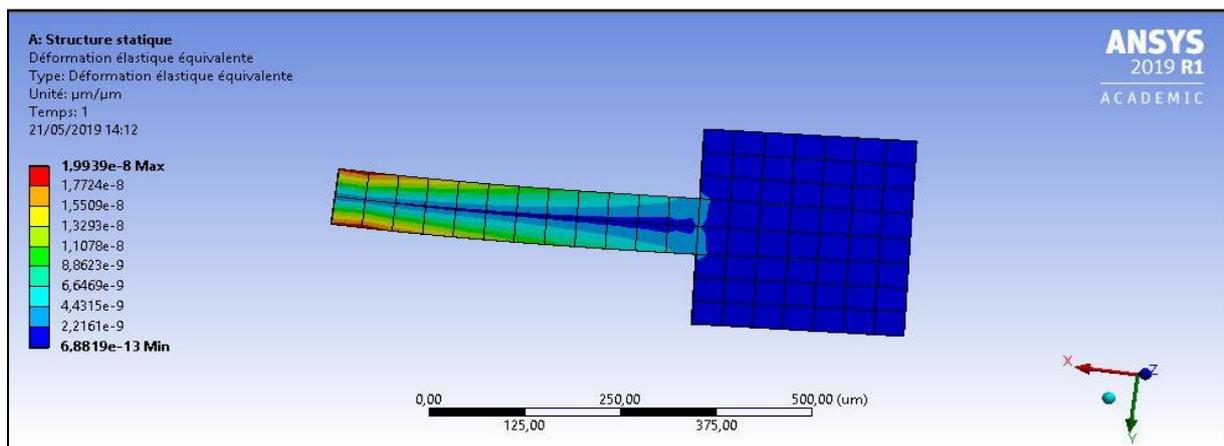


Fig.III.5 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Ay.

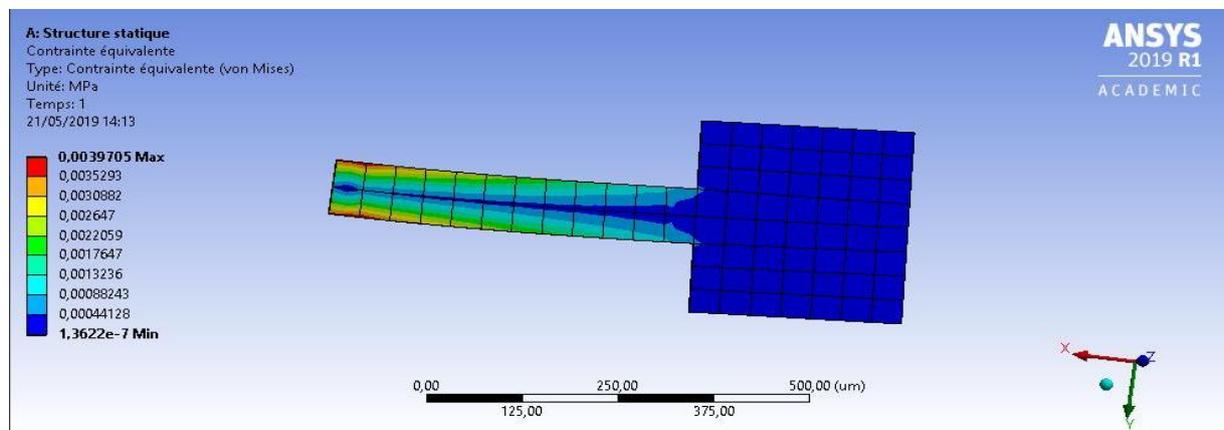


Fig.III.6 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Ay.

III.2.3. Pour l'axe-z

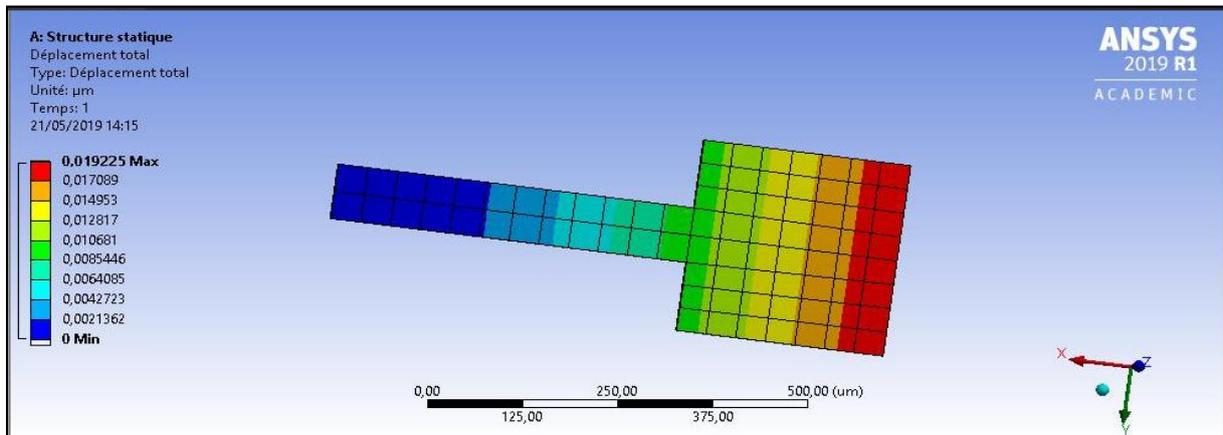


Fig.III.7 :Résultat du déplacement par l'accélération 1g suivant Az.

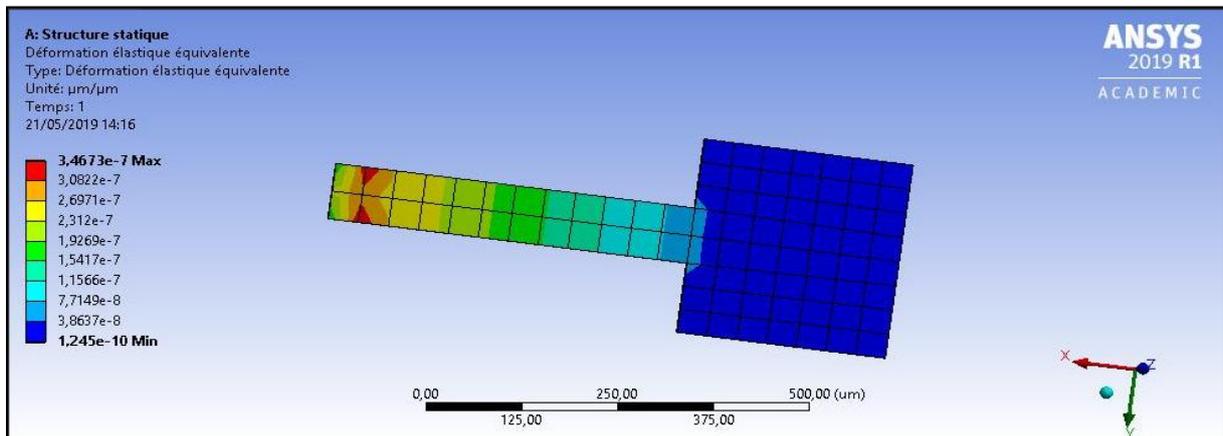


Fig.III.8 :Résultat de déformation par l'accélération 1g suivant Az.

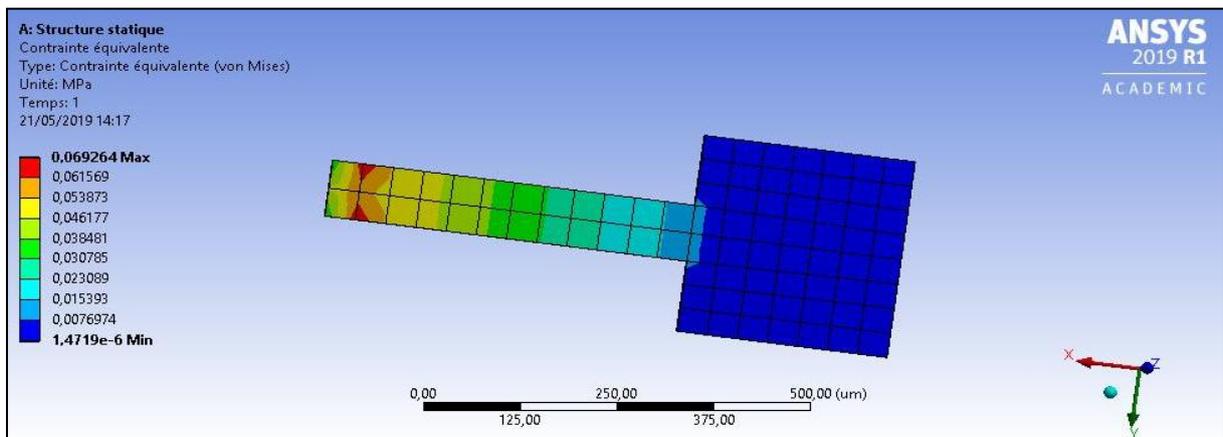


Fig.III.9 :Résultat du contrainte par l'accélération 1g suivant Az.

La structure T-Shape ne permet pas d'avoir une grande sensibilité suivant l'axe Ax. Pour cela, une autre structure doit être utilisée pour remédier à ce problème. C'est l'objet de la partie suivante.

III.3.Résultat des 3-axes

La connaissance de la distribution est très importante pour pouvoir placer judicieusement pour maximiser la sensibilité du capteur.

III.3.1.Déplacements

Les figures (III.1) et (III.2) et (III.3) illustrent le déplacement de la structure lorsqu'elle subit une accélération suivant Z.

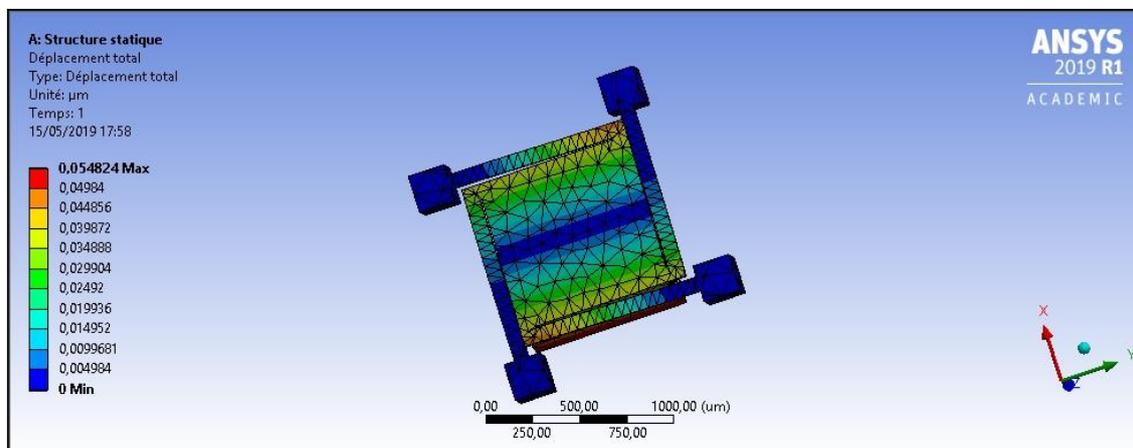


Fig.III.10 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Ax.

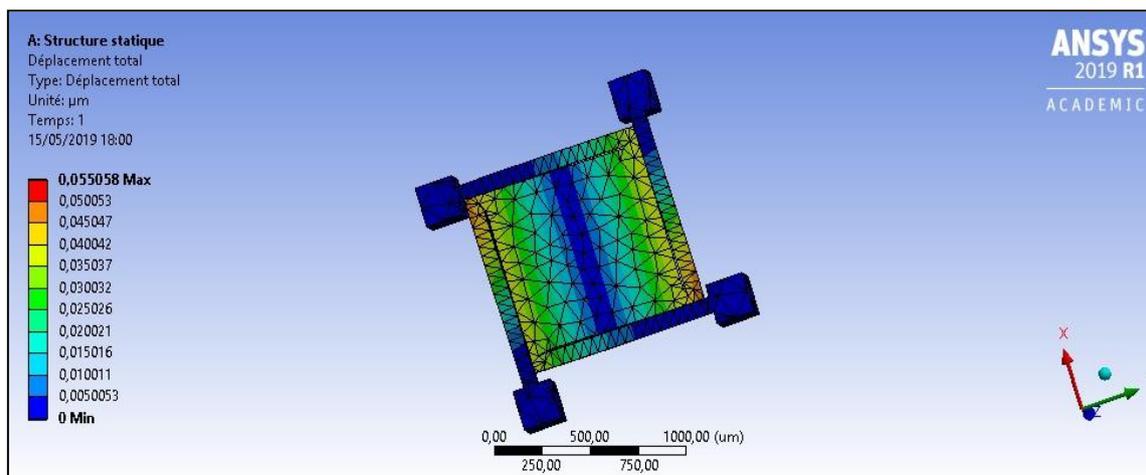


Fig.III.11 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Ay.

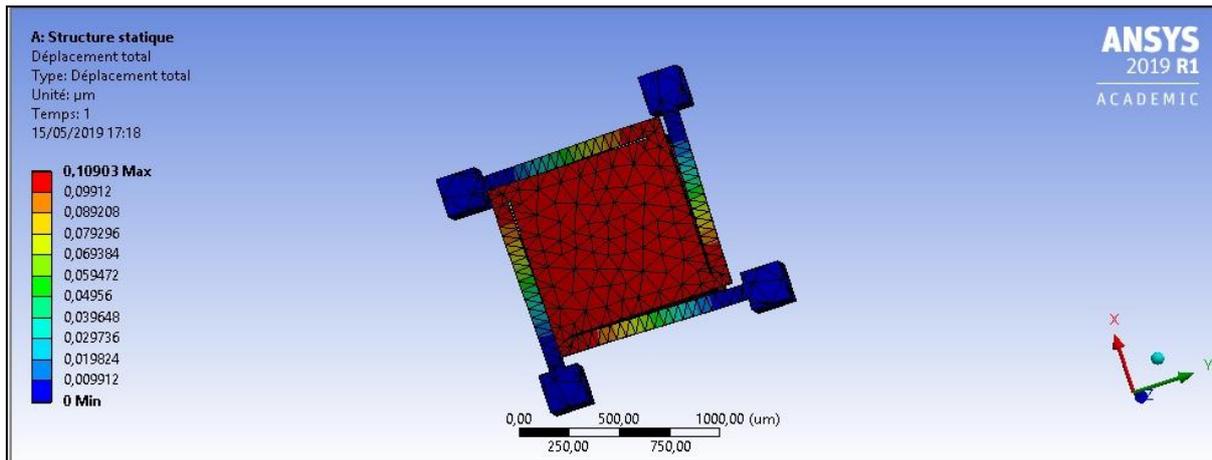


Fig.III.12 :Résultat du déplacement causé par l'accélération de 1g suivant Az.

III.3.2.Contraintes

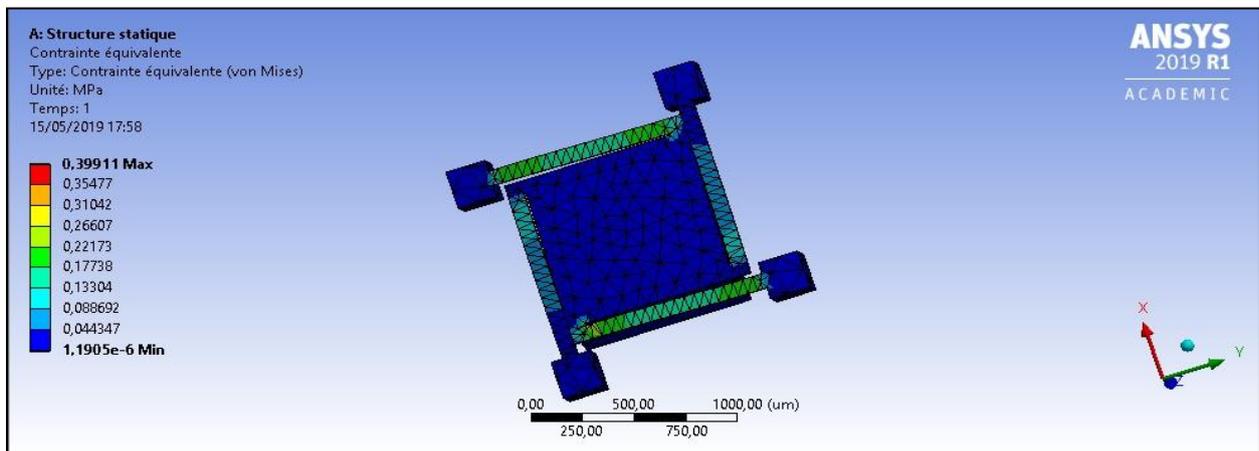


Fig.III.13 :La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par l'accélération Ax de 1g.

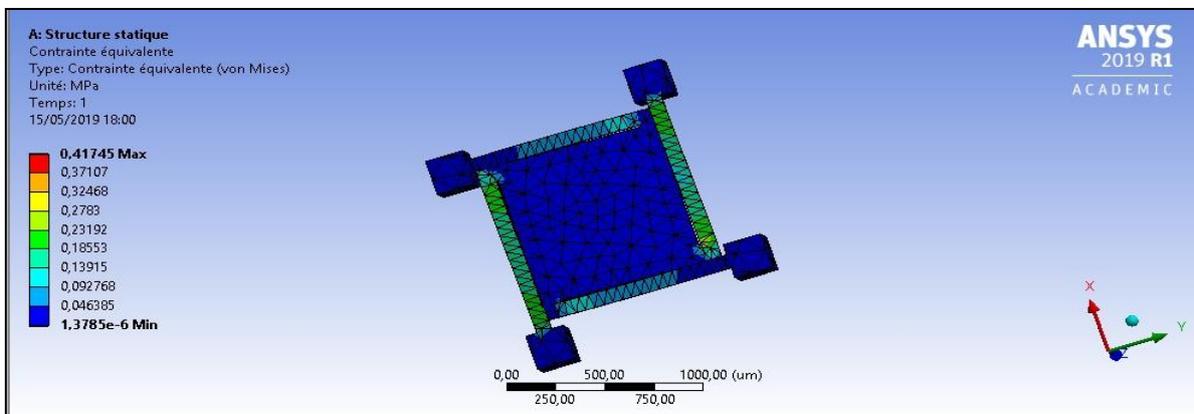


Fig.III.14 : La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par l'accélération Ay de 1g

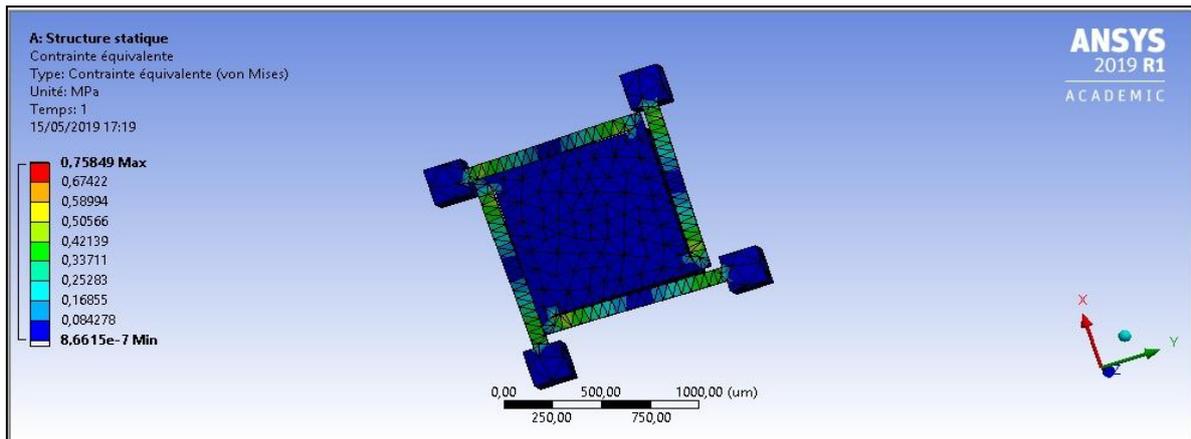


Fig.III.15 : La distribution des contraintes dans les micro-poutres causées par l'accélération A_z de 1g.

1. Pour l'axe_x

Accélération	0.1g	0.5g	1g	2g	4g	8g	16g	32g	64g
Déplacement (μm)	0.005482	0.027412	0.054824	0.10965	0.2193	0.43859	0.8771	1.7544	3.5088
Contrainte max (MPa)	0.039911	0.19956	0.39911	0.79822	1.5964	3.1929	6.3858	12.772	25.543

Tab.III.1 : Valeurs es déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération suivant l'axe_x

2. Pour l'axe_y

Accélération	0.1g	0.5g	1g	2g	4g	8g	16g	32g	64g
Déplacement (μm)	0.0055058	0.027529	0.055058	0.11012	0.22023	0.44046	0.88093	1.7619	3.5237
Contrainte max (MPa)	0.041745	0.20873	0.41745	0.8349	1.6698	3.3396	6.6792	13.358	26.717

Tab.III.2 : Valeurs des déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération suivant l'axe_y

3. Pour l'axe_z

Accélération	0.1g	0.5g	1g	2g	4g	8g	16g	32g	64g
Déplacement (μm)	0.010903	0.054516	0.10903	0.21806	0.43613	0.87226	1.7445	3.489	6.978
Contrainte max (MPa)	0.075849	0.37925	0.75849	1.517	3.034	6.068	12.136	24.272	48.544

Tab.III.3 : Valeurs des déplacements et des contraintes en fonction de l'accélération suivant l'axe_z.

III.4. Résultat sur Matlab

III.4.1. Pour l'axe-x

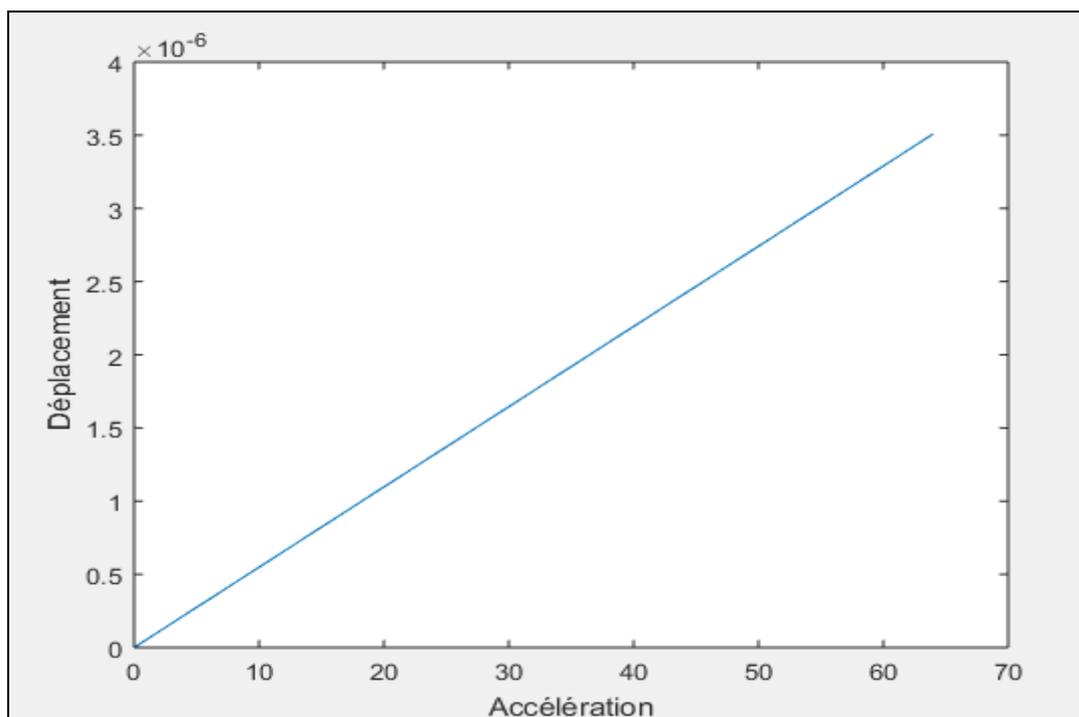


Fig.III.16 : le déplacement en fonction de l'accélération suivant Ax.

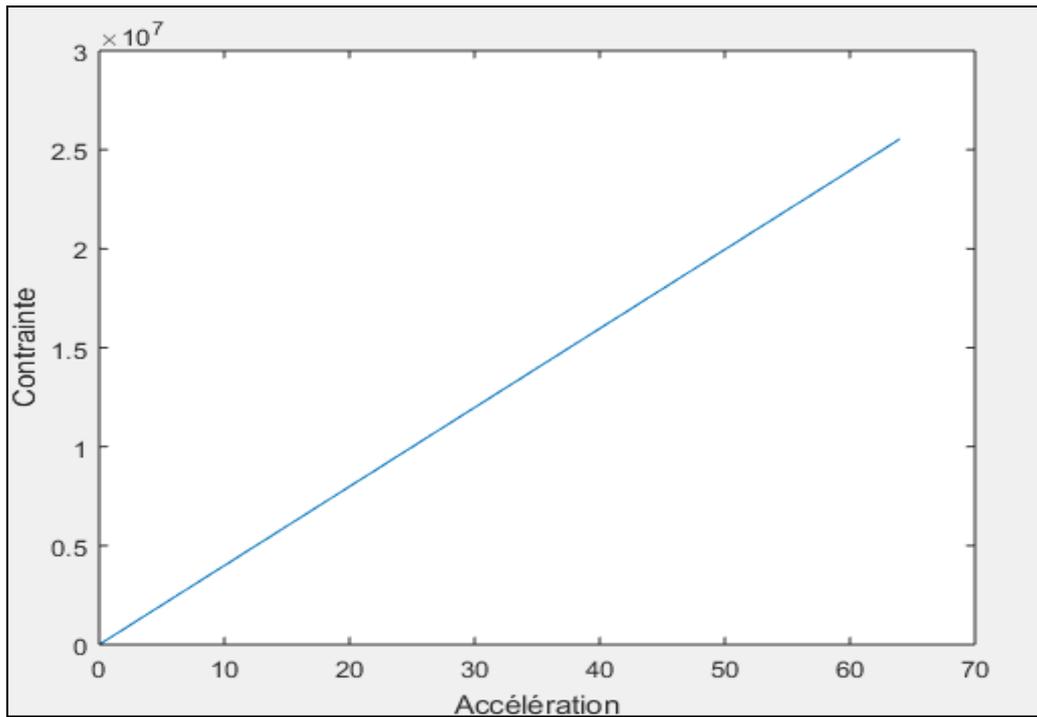


Fig.III.17 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Ax.

III.4.2.Pour l'axe-y

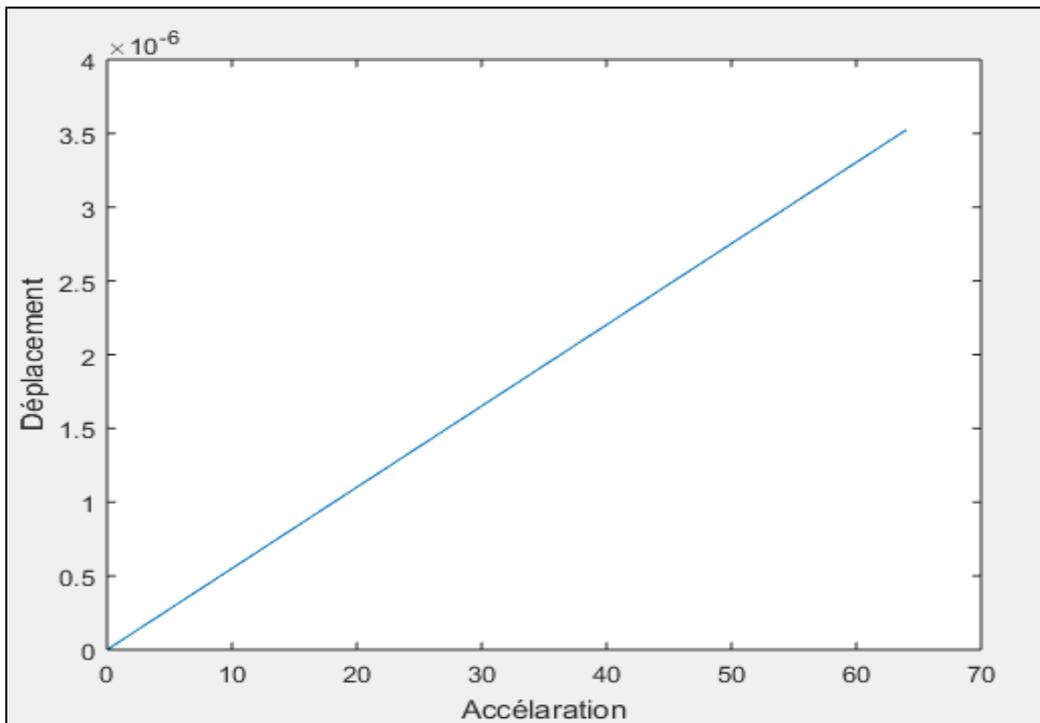


Fig.III.18 :Le déplacement en fonction de l'accélération suivant Ay.

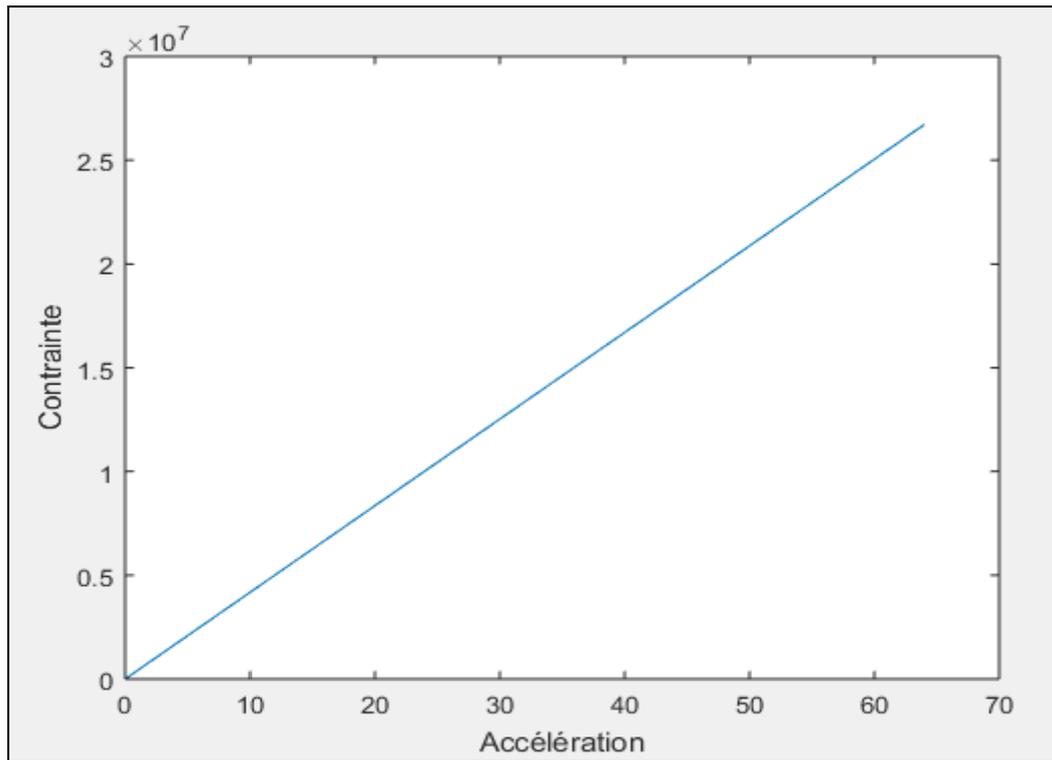


Fig.III.19 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Ay.

III.4.3.Pour l'axe-z

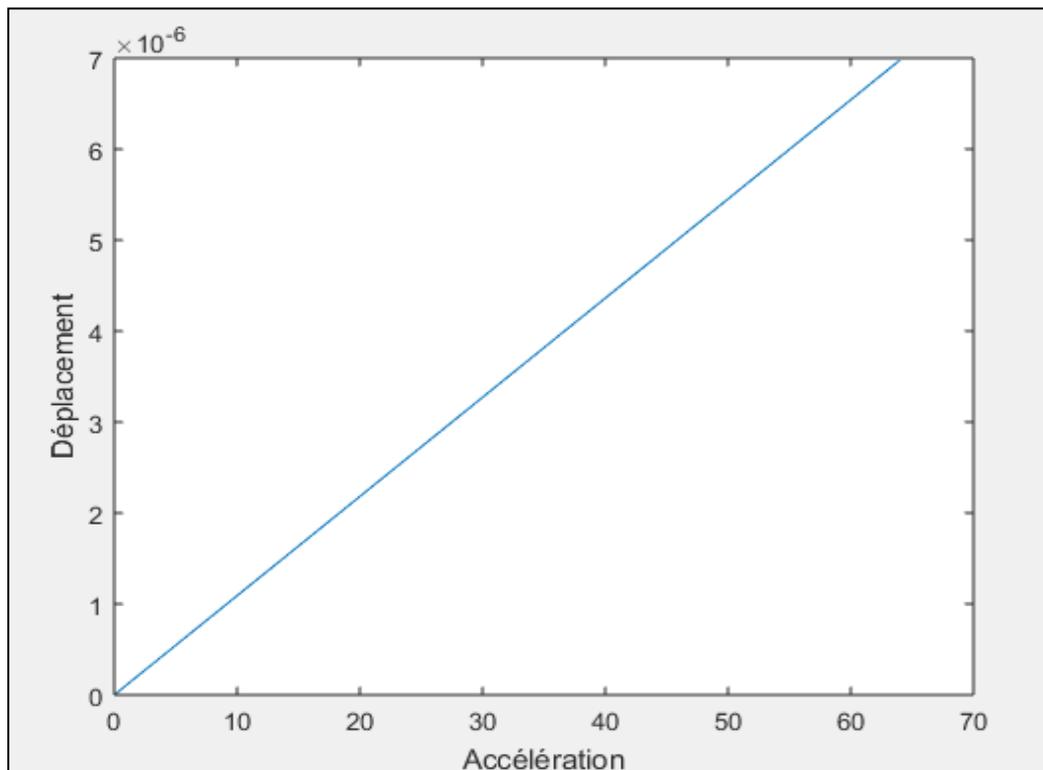


Fig.III.20 :Le déplacement en fonction de l'accélération suivant Az.

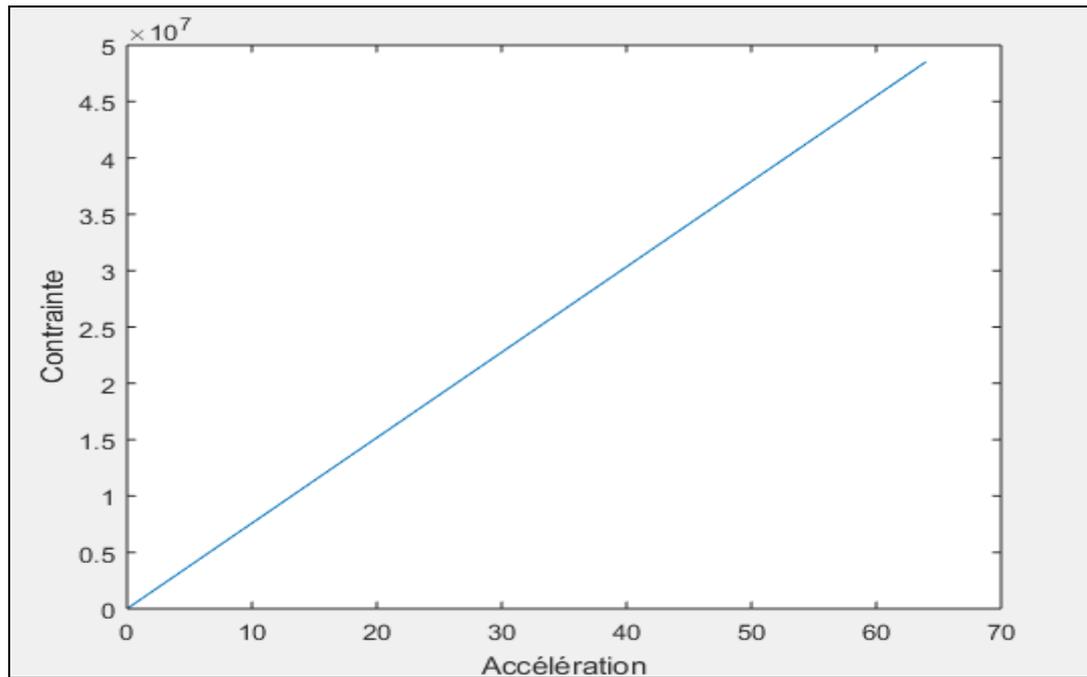


Fig.III.21 :La contrainte en fonction de l'accélération suivant Az.

III.5. Les contraintes normales et les contraintes de cisaillements

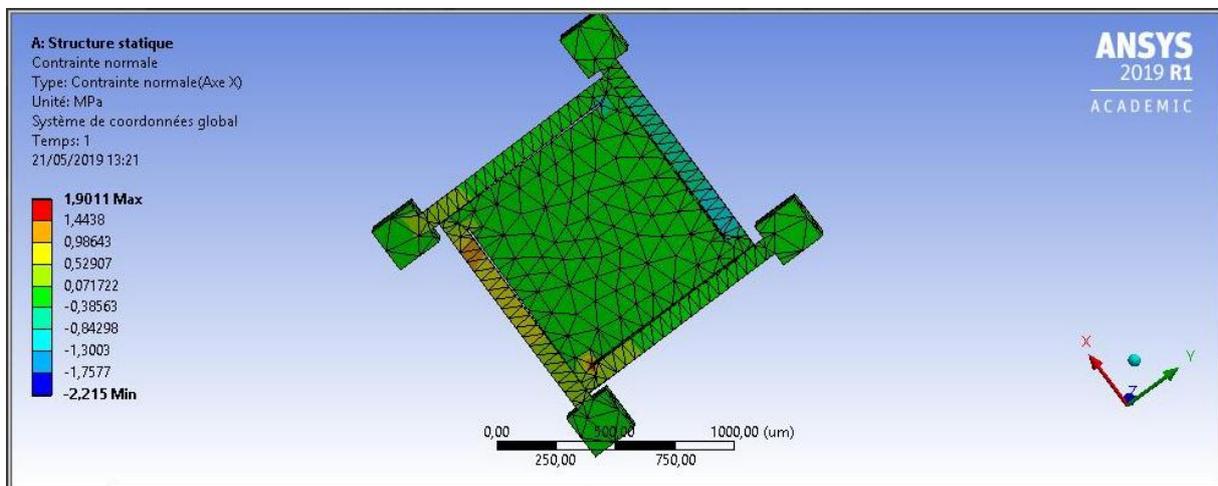


Fig.III.22 :Contrainte normale (x) par l'accélération Ax de 10g.

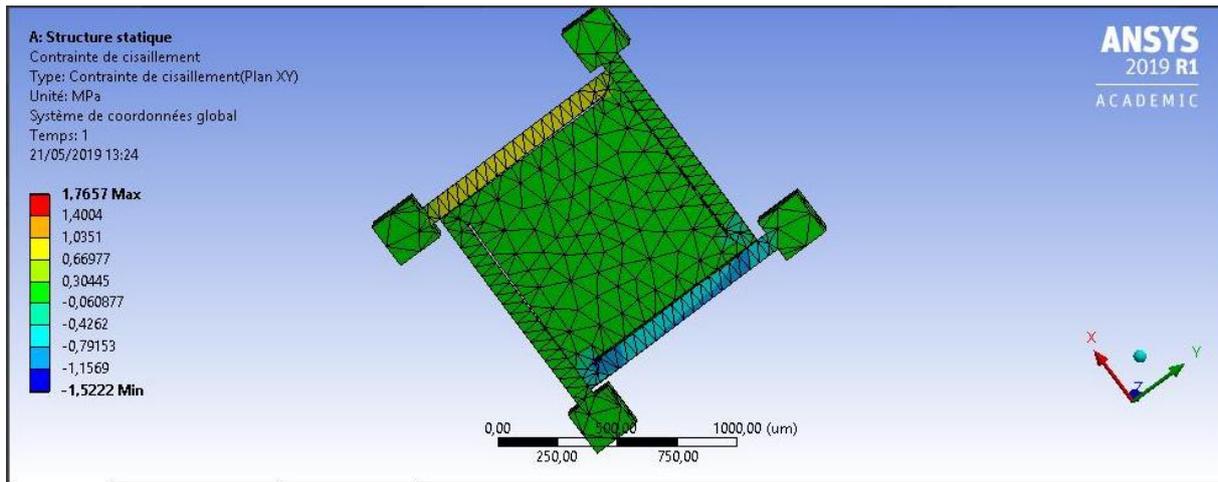


Fig.III.23 :Contrainte de cisaillement (x) par l'accélération Ax de 10g.

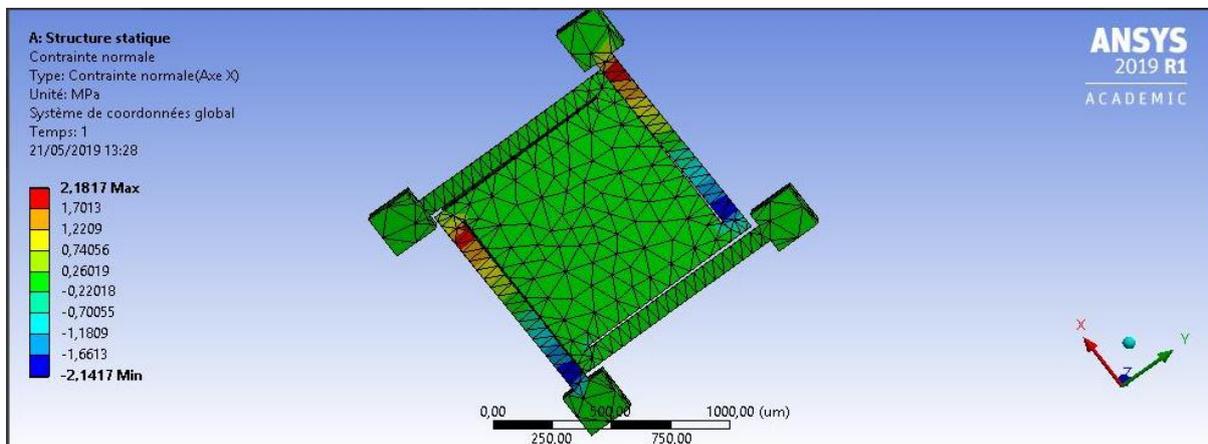


Fig.III.24 :Contrainte normale (x) par l'accélération Ay de pour 10g.

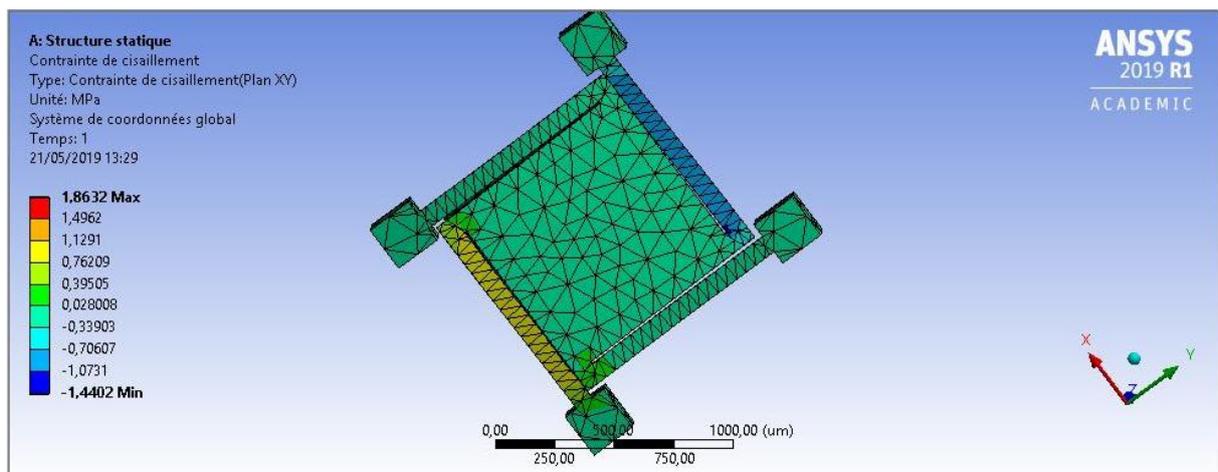


Fig.III.25 :Contrainte de cisaillement (y) par l'accélération Ay de 10g.

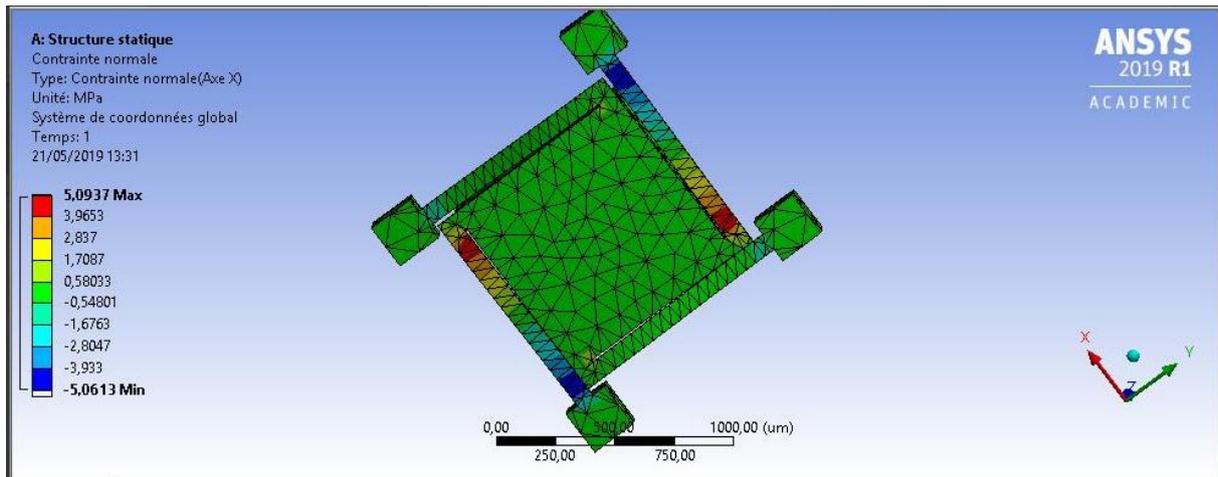


Fig.III.26 :Contrainte normale (x) par l'accélération Az de 10g.

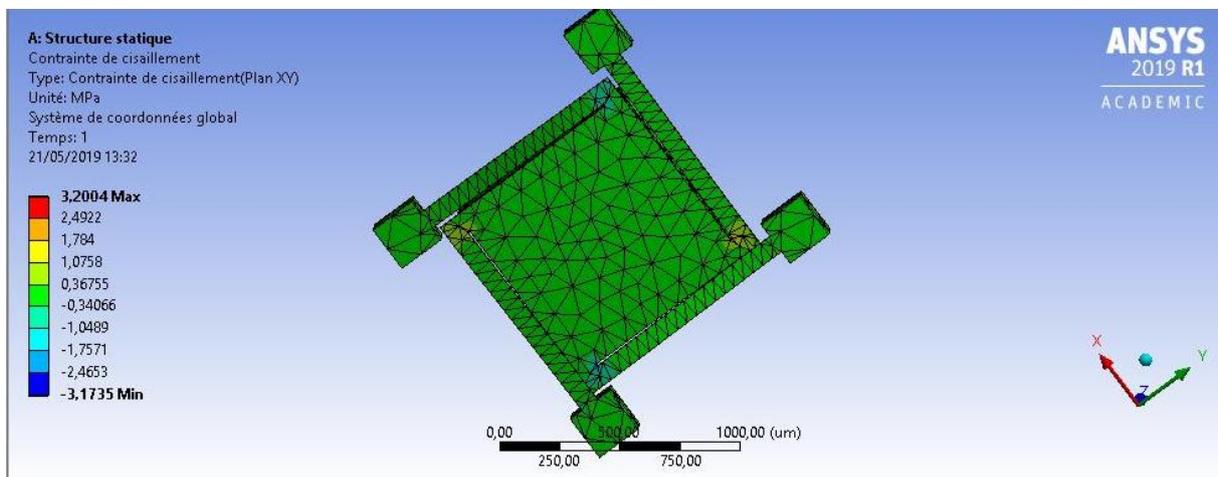


Fig.III.27 :Contrainte de cisaillement (y) par l'accélération Az de 10g.

III.6.Placement des jauges :

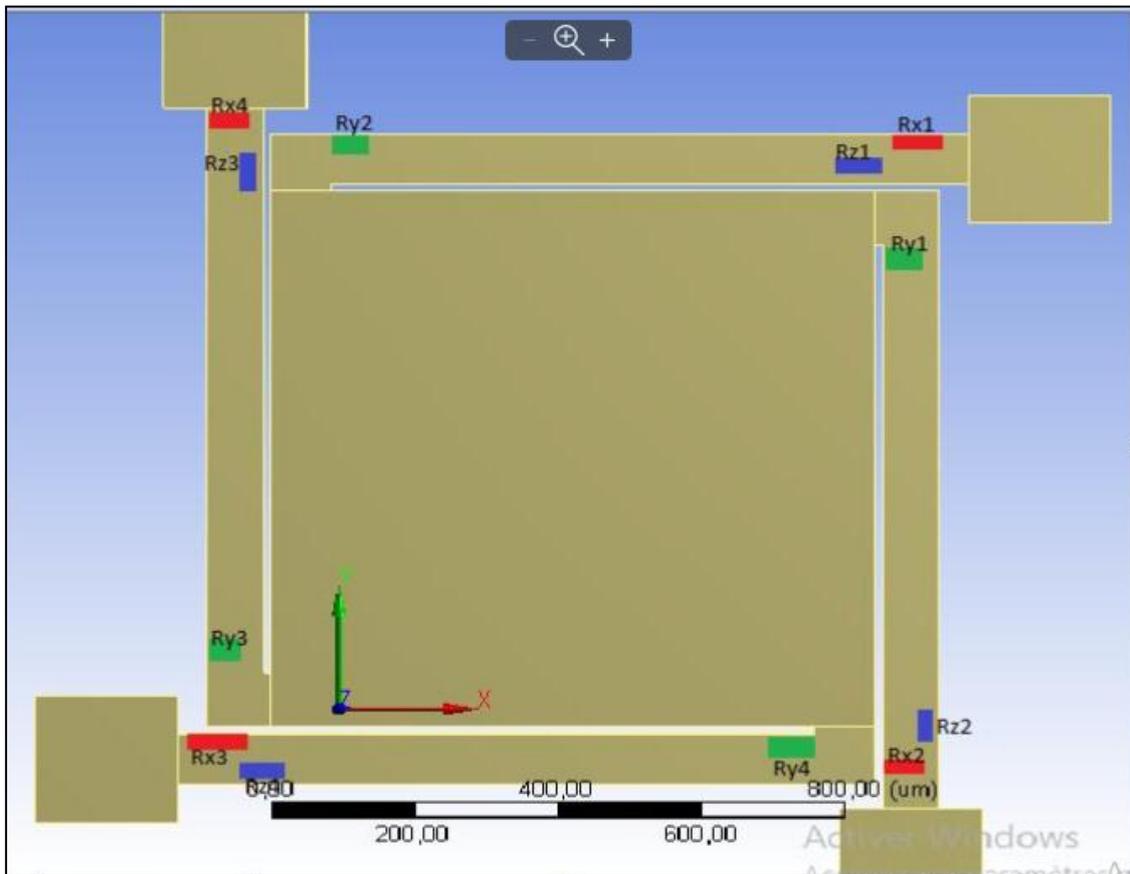


Fig.III.28 :L'alignement des piézorésistances.

Ces piézorésistances ont été alignées suivant la direction cristalline $\langle 110 \rangle$ du silicium (100). Dans le matériau de silicium, il y a seulement trois coefficients piézorésistifs indépendants π_{11} , π_{12} et π_{44} [27]. Le coefficient piézorésistif longitudinal π_l est défini dans le cas où la contrainte est parallèle au champ électrique et à la densité de courant. De même que le coefficient piézorésistif transversal π_t est défini dans le cas où la contrainte est perpendiculaire à ces derniers.

Tel que :

$$\pi_{11} = 71.6 \cdot 10^{-11}$$

$$\pi_{12} = -66.1 \cdot 10^{-11}$$

On a :

$$\begin{aligned} |\sigma_{xmax}| &= 1.9011 \text{ MPa} & |\sigma_{xmin}| &= -2.215 \text{ MPa} \\ |\sigma_{ymax}| &= 2.1817 \text{ MPa} & |\sigma_{ymin}| &= -2.1917 \text{ MPa} \\ |\sigma_{zmax}| &= 5.0937 \text{ MPa} & |\sigma_{zmin}| &= -5.0613 \text{ MPa} \end{aligned}$$

1. Pour x

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_1 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_4 = \sigma_{xmax} \pi_{11} = 0.001361$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_2 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_3 = \sigma_{xmin} \pi_{11} = -0.00158$$

2. Pour y

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_1 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_4 = \sigma_{ymax} \pi_{11} = 0.0015620$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_2 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_3 = \sigma_{ymin} \pi_{11} = -0.001569$$

3. Pour z

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_1 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_4 = \sigma_{zmax} \pi_{11} = 0.003647$$

$$\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_2 = \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_3 = \sigma_{zmax} \pi_{12} = -0.003366$$

D'après les valeurs ci-dessus on calcule la valeur de tension de sortie du pont de Wheatstone .Le résonnement est le même pour les trois axes. On se contente de le faire pour x et on en déduira les valeurs des autres directions.

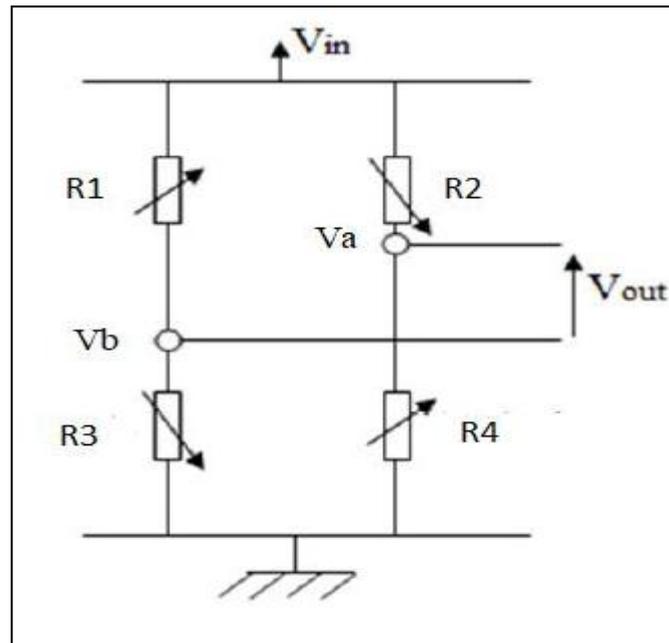


Fig.III. 29 :Pont de Wheatstone complet pour calculer la tension de sortie des trois composantes d'accélération.

$$V_{out} = V_a - V_b \quad \text{III.1}$$

Avec

$$V_a = \frac{R_4}{R_4 + R_2} V_{in} \quad \text{III.2}$$

$$V_b = \frac{R_3}{R_3 + R_1} V_{in} \quad \text{III.3}$$

A l'absence de l'accélération, le pont est équilibré et la tension de sortie est nulle.

Dans ce cas on a :

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$$

On suppose $R_0 = 1000 \Omega$

$$\frac{\Delta R_1}{R_0} = \frac{\Delta R_4}{R_0} = \frac{R_1 + R_0}{R_0} = \frac{R_4 + R_0}{R_0} \quad \text{III.4}$$

$$R_1 = R_4 = R_0 \left(1 + \frac{\Delta R_1}{R_0}\right);$$

$$R_1 = R_4 = 998.415 \Omega$$

$$\frac{\Delta R_2}{R_0} = \frac{\Delta R_3}{R_0} = \frac{R_2 + R_0}{R_0} = \frac{R_3 + R_0}{R_0} \quad \text{III.5}$$

$$R_2 = R_3 = R_0 \left(1 + \frac{\Delta R_2}{R_0}\right);$$

$$R_2 = R_3 = 1001.3 \Omega$$

D'après l'équation (III.2) et (III.3) on trouve :

$$V_a = 0.500 V_{in}$$

$$V_b = 0.499 V_{in}$$

$$V_{out x} = V_a - V_b = 0.001 V_{in}$$

Par analogie

$$V_{out y} = V_a - V_b = 0.001 V_{in}$$

$$V_{out z} = V_a - V_b = 0.002 V_{in}$$

Alors la sensibilité est égale :

$$S = \frac{V}{a} \quad \text{III.6}$$

Avec ;

$$V = \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ et } a : \text{l'accélération à } 10g$$

Pour l'axe-x :

$$S_x = \frac{0.001}{10} \approx 0.1 \text{ mV/g}$$

Pour l'axe-y :

$$S_y = \frac{0.001}{10} \approx 0.1 \text{ mV/g}$$

Pour l'axe-z :

$$S_z = \frac{0.002}{10} \approx 0.2 \text{ mV/g}$$

La sensibilité suivant les axes X et Y est identiques, tandis qu'elle est maximale suivant l'axes Z où la structure a plus de liberté à se déplacer sous l'effet d'une accélération a_z .

III.7.Effet de la température :

III.7.1.Sur le modèle mécanique :

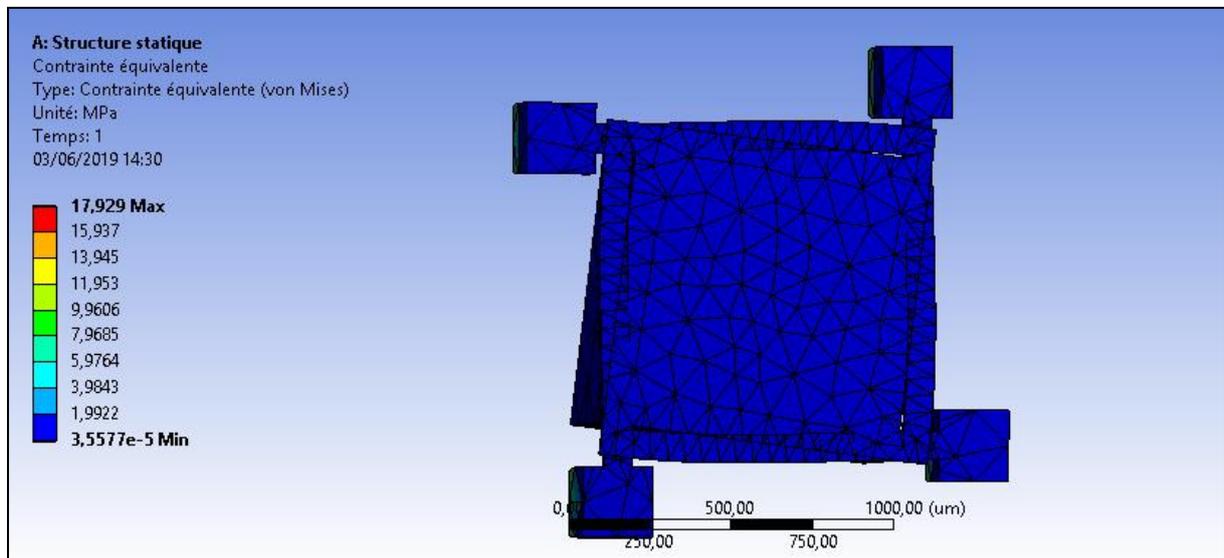


Fig.III.30 :l'effet de la température sur le microlevier.

III.7.2.Sur le modèle électrique :

$$R_0 = 1000 \Omega$$

$$T = [300,500]K$$

$$R = \frac{\rho l}{s} \quad \text{III.7}$$

$$\rho = \frac{1}{q \cdot \mu \cdot N} \quad \text{III.8}$$

$$R(T) = R_0[1 + \alpha(T + T_0) + \beta(T - T_0)^2] \quad \text{III.9}$$

N	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}
A	6.10^{-3}	$2,86.10^{-3}$	$2,9.10^{-3}$	$8,7.10^{-4}$	$9,8.10^{-4}$	$5,7.10^{-3}$
B	$15,9.10^{-5}$	$4,1.10^{-5}$	$8,5.10^{-6}$	$4,5.10^{-6}$	$6,6.10^{-7}$	$-2,1.10^{-6}$

Tab.III.4 :représente le coefficient dorkel.

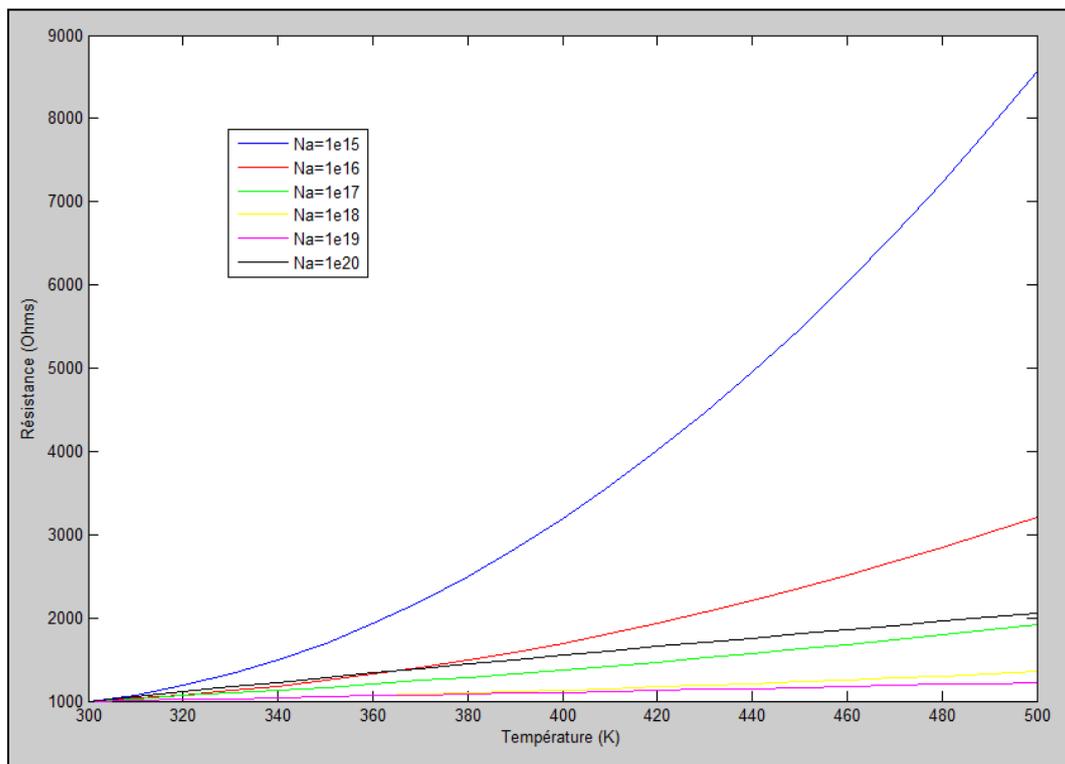


Fig.III.31 :La variation de la résistance en fonction de la température.

Nous avons mis en évidence l'effet de la température sur les paramètres physiques et géométriques du capteur. On remarque qu'il n'y a aucune contrainte sur la partie mécanique sauf dans les encastresments, alors que la température affecte seulement sur le modèle électrique. En connaissant la fonction $R=f(T)$, on peut compenser l'effet de la température dans le modèle globale du capteur.

Conclusion générale

Le but de ce travail été de faire l'étude d'un capteur d'accélération trois axes à base de silicium. Pour cela, nous avons d'abord commencé par rappeler certaines caractéristiques des capteurs conventionnels. Ces derniers qui sont devenus inappropriés si on veut les intégrer dans des systèmes embarqués qui demandent une grande autonomie en énergie et un minimum d'encombrement !

Pour cela, les capteurs conventionnels doivent être remplacés par des capteurs miniatures qui ne consomment pas beaucoup d'énergie et n'occupent pas trop de place. Un cahier de charge que les MEMS semblent pouvoir satisfaire, surtout qu'il est possible aujourd'hui de concevoir sur une même puce, et la partie capteur, et la partie électronique.

Nous avons donc proposé la conception d'un accéléromètre triaxial miniature à base de Silicium. En premier temps, nous avons proposé une structure « T-Shape » formée d'une poutre micro usinée et d'une masse sismique au bord. Cette structure, malgré sa simplicité, est capable de mesurer l'accélération avec une bonne sensibilité. Cependant, le problème reste l'incapacité de mesurer l'accélération d'un corps qui peut être accéléré suivant plusieurs directions. Pour régler ce problème, on peut associer trois accéléromètres « T-Shape » sur un même système, mais cela va encombrer le système en question, diminuer son autonomie, et augmenter son coût !

Pour cela, nous avons proposé une autre structure formée d'une masse sismique lourde suspendue par quatre micros poutres. Cette structure permet de mesurer l'accélération sur les trois axes principaux, et ainsi de mesurer la composante vectorielle principale de l'accélération sur n'importe quelle direction. Les éléments sensibles étant des micros jauges piézorésistives, la répartition des contraintes mécaniques sur la surface de la structure doit être connue avec bonne précision pour pouvoir déterminer l'emplacement idéal des jauges. L'interconnexion des jauges pour former les ponts de Wheatstone doit prendre en compte le fait que la sortie de chaque pont doit être sensible uniquement aux accélérations dans la direction suivant laquelle il est sensé mesurer. En plaçant judicieusement les seize jauges, nous avons pu mesurer indépendamment et séparément les accélérations suivant les trois axes principaux, ce qui nous a permis de connaître la valeur et la direction de n'importe quelle accélération que peut subir notre capteur.

Les références bibliographiques

- [1] G. Asch. Les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod/Bordas, Paris, 1982.
- [2] Albert Terras,... ; sous la dir. de Jean-Luc Azan, Précis de physique et électricité appliquées [Texte imprimé] : sections de technicien supérieur mécanique et automatismes industriels : [cours, exercices corrigés] /Bréal 2003.
- [3] Yves Granjon, Bruno Estibals, Serge Weber. "Électronique : Tout le cours en fiches", dunod, 2015.
- [4] YACOUBA SANAGO, conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement, Thèse de doctorat de l'école normal supérieure de COCHAN, soutenue le 10 décembre 2012.
- [5] Benichou ABDELKADER, conception et modélisation d'un accéléromètre microélectronique triaxial, Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en Microélectronique, Soutenu le 26 Juin 2012.
- [6] Olivier Français « Capteurs et électronique associée (partie II : acquisition des données) » 2000.
- [7] BOUGRIOU FAIDA, ETUDE THEORIQUE DES MATERIAUX A BANDES INTERDITES PHOTONIQUES BIDIMENSIONNELS : APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DU GUIDAGE OPTIQUE ET LA DETECTION, THESE Présentée en vue d'obtention du diplôme de Doctorat en sciences OPTION Electronique, 16 Décembre 2013
- [8] **BENMESSAOUD Mourad** «Conception et Modélisation des MEMS: Application aux Accéléromètres» Thèse de Doctorat – Université Mohamed Boudiaf- Sciences Sciences et de la Technologie d'Oran– 08/12/2014.
- [9] **Aboubacar Chaehoi** « Conception et Modélisation de MEMS monolithique CMOS en technologie FSBM : Application aux accéléromètres » Thèse de Doctorat – Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc – 2005.
- [10] **Laurent Latorre** « Evaluation des techniques microélectroniques contribuant à la réalisation de microsystèmes : application à la mesure du champ magnétique » Thèse de Doctorat- l'Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc.
- [11] <http://www.les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/capteurs.pdf>.

[12] <http://www.mytopschool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C044/32/Capteurs1/index.html?Introduction.html>

[13] http://uel.unisciel.fr/physique/transitoire/transitoire_ch03/co/apprendre_ch3_02.html

[14] <http://www-connexe.univ-brest.fr/lpo/instrumentation/01.htm>

[15] http://www-lagis.univ-lille1.fr/~bonnet/gsi/capteurs2_gsi.pdf

[16] http://gte.univ-littoral.fr/sections/documents-pdagogiques/chapitre-8-mesure/downloadFile/file/Les_capteurs.pdf?nocache=1289041293.82

[17] <https://docplayer.fr/10908822-Caracteristiques-d-un-capteur.html>

[18] <https://www.intellego.fr/soutien-scolaire-1ere-s/aide-scolaire-sciences-de-l-ingenieur/les-differents-types-de-capteurs-tpe-2010--comment-automatiser-une-barriere-peage-/43006>

[19] <https://www.dmesures.fr/fr/produits/pression-fr.html>

[20] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/humidite-capteur-humidite-16419/>

[21] [http://gatt.fr/CIRA/Cours/Instrum/CIRA2%20%205\)%20Capteurs%20de%20temperature.pdf](http://gatt.fr/CIRA/Cours/Instrum/CIRA2%20%205)%20Capteurs%20de%20temperature.pdf)

[22] <https://www.theautochannel.com/news/2009/10/06/480308.html>

[23] https://www.google.dz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjO2O698LbgAhWl5OAKHcxlBfkQFjACegQICBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.esiee.fr%2F~pfmweb%2Fpfm2%2FMEMS_c_quoi.pdf&usg=AOvVaw0DnjLBOK1r3JLq3LFAN_DJ

[24] Leila GHARBI ERNEZ , COURS DE MESURE ET INSTRUMENTATION, de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis , en Février 2005

[25] H. BUYSE, Capteurs de position et de déplacement, MECA2755 Automatisation Industrielle, de Université catholique de Louvain, en 2004

[26] AllianTech, Généralités sur les accéléromètres, Spécialiste de la mesure dynamique, en 2010.

[27] N.TIEN ANH, T. DUC TAN "A Tree-Axis Piezoresistive Accelerometer with Uniform Axial Sensitivities" Cau Giay, Ha Noi, Viet Nam, Copyright © 2011 IEEE.

[28] <http://www.cadfem-an.com/produits/ansys.html>

[29] <http://thesis.univ-biskra.dz/2294/6/Chapitre%2004.pdf>

[30] <http://y-plus.fr/mnmf/MNMF2017.pdf>

الملخص:

يتيح لنا تطوير تكنولوجيا الإلكترونيات الدقيقة اليوم تحقيق مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار المصغرة ذات التكلفة المنخفضة والحجم الصغير للغاية والاستهلاك المنخفض للطاقة. يجب أن يمر تصميم هذه المستشعرات من خلال دراسة مفصلة وصارمة لتحسين أدائها. لقد اقترحنا في هذه المذكرة إجراء دراسة حول مجسات التسارع الدقيقة القائمة على تقنية السيليكون. لقد أجرينا بحثًا ببيولوجيًا على أنواع مختلفة من هذه المستشعرات ، لنكون قادرين على اخذ الخيار الأفضل من حيث التصميم والخصائص البلورية للسيليكون. بعد ذلك ، قمنا بنمذجة ومحاكاة الاستجابة الميكانيكية لهيكل المستشعر ، والاستجابة الكهربائية الخاصة بها استنادًا إلى نماذج التحويل المقاومي للضغط. في النهاية ، ومن أجل تحسين خصائص مخرجات مستشعراتنا ، قمنا بدراسة تأثير درجة الحرارة على استجابتها الشاملة للحكم على أفضل تركيبة فيزيائية و كيميائية (تركيز المشبعات ، نوع السوميكونداكتر ، بنية المستشعر ، ...) التي تسمح بمناعة عالية ضد الانجراف الحراري.

الكلمات المفتاحية : MEMS , الانظمة الدقيقة , جهاز التسارع , piézorésistivité .

Abstract:

The development of microelectronics technology today allows us to realize a wide variety of miniaturized sensors of low cost, very small size and very low energy consumption. The design of such sensors must go through a detailed and rigorous study to optimize their performance.

We have proposed in this work to conduct a study on acceleration micro-sensors based on silicon technology. We have done a bibliographic research on the different types of these sensors, to be able to choose the best option in terms of architecture and crystallographic characteristics of Silicon.

Then, we modeled and simulated the mechanical response of the sensor structure, and the static electrical response of its transducer circuit based on piezoresistive gauges.

At the end, and in order to optimize the output characteristics of our sensor, we studied the effect of temperature on its overall response to judge the best physicochemical combination (concentration of doping, type of semiconductor, sensor architecture, ...) that allow a high immunity against thermal drift.

Key-words: MEMS, Microsystems, Accelerometer, piezoresistivity.

Résumé

Le développement de la technologie microélectronique nous permet aujourd'hui la réalisation d'une grande variété de capteurs miniaturisés de faible coût, de taille très réduite et d'une très faible consommation d'énergie. La conception de tels capteurs doit passer par une étude détaillée et rigoureuse pour optimiser leurs performances.

Nous nous sommes proposé dans ce mémoire de mener une étude sur les micro-capteurs d'accélération à base de technologie Silicium. Nous avons fait une recherche bibliographique sur les différents types de ces capteurs, pour pouvoir en choisir la meilleure option en termes d'architecture et de caractéristiques cristallographique du Silicium.

Ensuite, nous avons procédé à une modélisation et une simulation de la réponse mécanique de la structure du capteur, et de la réponse électrique statique de son circuit de transduction basé sur des jauges piézorésistive.

A la fin, et pour pouvoir optimiser les caractéristiques de sortie de notre capteur, nous avons étudié l'effet de la température sur sa réponse globale pour pouvoir juger de la meilleure combinaison physico-chimique (concentration du dopage, type du semi-conducteur, architecture du capteur, ...) qui permettent une grande immunité contre la dérive thermique.

Mots clés: MEMS, Microsystèmes, Accéléromètre, piézorésistivité.