

N° d'ordre :



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département d'Electronique



MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : AMOURA Azzeddine

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : Instrumentation et Maintenance Industrielle

Thème

ETUDE D'UN CAPTEUR DE FORCE
PIEZORESISTIF

Soutenue le : 09/06 /2015 devant le jury composé de :

H.Oudira

F.Saada Khelkhal

F.Kebaili

A.Kahlouche

M.C.B - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.A.A - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.C.B - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

M.C.B - Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Promotion : Juin 2015

REMERCIEMENTS

Grand merci à Dieu.

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur F. Saada khelkhal
mon encadreur à l'université de M'sila
, pour sa disponibilité et son suivi sérieux de ce travail, en plus ses idées qu'il m'a
prodiguées et pour la souplesse avec laquelle il m'a orienté.*

*Je remercie tout particulièrement, les, professeurs à l'université de
M'sila,*

*J'adresse ma gratitude aux jurés, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de
présider à la commission d'examen.*

Enfin je remercie vivement tous mes amis qui m'ont soutenus pour faire ce travail.

Je dédie mon travail à

-mes parents

-mes frères et sœurs

-mon encadreur

- aux jurés

-mes amis

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre 1 : Théorie de la piézorésistivité

I-1) Introduction.....	03
I-2) Origines physiques de la piezoresistivite.....	03
I-2-1) Réseau du silicium et zone de Brillouin.....	03
I-2-2) Structure de bandes de silicium.....	05
I-2-3) Effets de contraintes mécaniques.....	05
I-3) Physique de la piezoresistivite.....	03
I-4) Expression tensorielle de la piezoresistivite.....	07
I-5) Facteurs de jauge.....	13
I-5-1) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes triaxiales.....	13
I-5-2) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes planes.....	15
I-5-3) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes uniaxiales.....	15
I-5-4) Récapitulatif concernant les facteurs de jauge.....	16
I-6) Conclusion.....	16

Chapitre 2 : Les micropoutres : technologie de fabrication

II-1) Introduction.....	17
II-2) Les Structure de type MEMS.....	17
II- 3) Capteurs de force piezoresistifs.....	17
II-4) Fabrication des micrpoutres piezoresistives	18
II-4-1) Micro poutres à base silicium.....	18
II-4-1-1) Le micro-usinage en surface.....	18
II-4-1-2) Le micro-usinage en volume.....	20

II-4-1-3) Les différents types de micro-usinage en volume.....	22
II-4-1-3-a) Le micro-usinage en volume face avant.....	22
II-4-1-3-b) Le micro-usinage en volume face arrière.....	23
II-4-2) Micropoutres réalisées à partir de procédés alternatifs au Silicium.....	24
II-4-2-1) Micropoutres à base de polymères.....	24
II-4-2-2) Micropoutres à base de céramiques.....	26
II-4-2-3) Exemples de réalisation de capteurs de type micropoutre.....	27
II-5) Conclusion.....	31

Chapitre 3 : introduction au logiciel COMSOL

III-1) Introduction.....	32
III-2) Les éléments finis.....	32
III-2-1) Principe de la méthode.....	32
III-2-2) Etapes de base de la méthode des éléments finis.....	32
III-3) Présentation du logiciel COMSOL.....	33
III-3-1) L'interface de COMSOL.....	33
III-3-2) Modélisation à l'aide de l'interface graphique.....	34
III-3-3) Dessin de la Géométrie.....	34
III-3-4) Modélisation de la physique et des équations.....	35
III-4-1) Variable et expression.....	36
III-4-2) Expression des Variables.....	36
III-4-3) Choix des matériaux.....	36
III-4-5) Introduction des conditions aux limites.....	37
III-5) Création de maille ou maillage.....	38
III-6) Résolution du problème.....	39
III-6-1) Sélection du type d'analyse.....	39
III-6-2) Progression de la résolution.....	40
III-7) Conclusion.....	41

Chapitre 4 : résultats de la simulation d'un microlevier piézoressistif

IV-1) Introduction.....	42
IV-2) Principe de fonctionnement.....	42
IV-3) Structure simulée.....	42
IV-3 -1) Paramètres géométriques.....	42
IV-3 -2) Propriétés des matériaux.....	43
IV-4) Justification du choix du matériau du microlevier.....	44
IV-5) Etude du microlevier en SiO ₂	44
IV-5 -1) Influence de la longueur du microlevier sur le déplacement.....	47
IV-5 -2) Influence de l'épaisseur du microlevier et du piezoresistor.....	48
IV-5 -2 -1) Influence de l'épaisseur sur le déplacement.....	48
IV-5 -2 -2) Influence de l'épaisseur sur le stress maximum	49
IV-6) Etude de la sensibilité.....	50
IV-6 -1) Influence de la longueur du microlevier.....	50
IV-6 -2) Influence de l'épaisseur.....	51
IV-6 -3) Influence de la surface de la pointe de force.....	52
IV-6 -4) Influence de la longueur de piezorésistor.....	54
IV-7) Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Bibliographiques	57

Introduction générale

Introduction générale :[1]

Le domaine des capteurs est en pleine évolution suivant la progression fulgurante des technologies de fabrication des composants électroniques et plus particulièrement l'arrivée sur le marché industriel des microsystèmes à signaux mixtes analogiques - numériques, ainsi que l'émergence des technologies MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems).

Un capteur est un organe de recueil d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique une autre grandeur physique de nature différente (la plus part du temps électrique). Vu de l'extérieur, le capteur peut se modéliser comme un générateur (capteur actif) ou comme une impédance (capteur passif). Certains capteurs sont dits « composites » c'est à dire composés de deux parties ayant un rôle bien défini :

- Le corps d'épreuve : qui réagit sélectivement aux variations de la grandeur à mesurer.
- Le transducteur: lié au corps d'épreuve, qui traduit ses réactions en une grandeur physique exploitable.

Lorsque le corps d'épreuve et/ou l'élément sensible est en silicium, il peut être regroupé avec une électronique de prétraitement. Il s'agit alors de capteurs intégrés.

Les avantages d'une telle structure sont nombreux : fiabilité, coût, dimensions réduites, meilleur conditionnement du signal.

Avec les progrès technologiques, il devient possible de fabriquer des capteurs aux dimensions toujours plus réduites. La réduction des dimensions d'un capteur peut modifier radicalement ses propriétés physiques si bien que celui-ci doit être avant tout considéré comme un nouvel objet plutôt qu'une simple miniaturisation de son aine. Ce nouvel objet peut aussi bien ouvrir des performances accrues sur un paramètre physique recherché qu'offrir de nouvelles fonctionnalités via des effets physiques masqués auparavant dans les échelles de dimensions considérées.[2]

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et la simulation d'un capteur de force piezoresistif à structure micro poutre utilisé dans les structures MEMS.

Le mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le premier décrit la théorie de la piezoresistivité dans les semiconducteur, ses origines et ses applications.

Dans le deuxième chapitre, on expose la technologie de fabrication des capteurs à structure micro poutre basée sur des procédés microélectroniques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du logiciel COMSOL utilisé dans notre simulation.

Dans le chapitre quatre on va exposer nos résultats de simulation concernant le capteur de force.

En fin on terminera par une conclusion générale.

Chapitre I

Théorie de la

piézorésistivité

I-1) Introduction

La piézorésistivité est la variation de résistivité d'un corps sous l'action d'une modification des contraintes mécaniques qui lui sont appliquées [3]. Un effet important de la piézorésistivité dans les matériaux semiconducteurs a été pour la première fois découvert par C.S.Smith [4] en 1954. A partir de cette date, un effort considérable a été porté afin d'étudier ce phénomène dans les semi-conducteurs. En fait, l'effet de piézorésistivité d'un semiconducteur est due à la modification des bandes d'énergie induites par l'application d'une contrainte mécanique. Ceci modifie le processus de transport des porteurs, ainsi que leur mobilité.

Ce chapitre a pour but d'étudier les phénomènes de piézorésistivité du silicium.

I-2) Origines physiques de la piezoresistivite**I-2-1) Réseau du silicium et zone de Brillouin [3]**

Un cristal peut être représenté d'une part par un réseau direct dans l'espace réel, et d'autre part, par un réseau réciproque dans l'espace du vecteur d'onde k . Le réseau du silicium est une structure diamant qui est constituée de deux réseaux cubiques à faces centrées, imbriqués et décalés l'un de l'autre d'un quart de la diagonale principale. La figure I-1 montre le réseau du silicium qui peut être considéré comme un seul réseau cubique à faces centrées dont la maille élémentaire contient deux atomes du silicium: un atome situé aux noeuds du réseau cubique à faces centrées, l'autre se trouvant dans la direction $\langle 111 \rangle$ et à une distance d'un quart de la diagonale principale du premier atome. Il est connu que chaque réseau direct correspond à un réseau réciproque, par exemple le réseau direct de type cubique à faces centrées peut être représenté par un réseau réciproque de type cubique centré dans l'espace du vecteur d'onde k , et ceci est le cas du silicium. La zone de Brillouin est définie dans l'espace du vecteur d'onde k de manière suivante: Traçons les vecteurs à partir d'un point du réseau réciproque aux points de voisinage, la zone de Brillouin est la volume la plus petite formée par les plans qui sont perpendiculaires à ces vecteurs et à travers les mi-points de ces vecteurs. La figure I-2 montre la zone de Brillouin du silicium où le point Γ a un groupe symétrique O_h et un point X sur les axes cristallographiques possède un groupe C_{4v} .

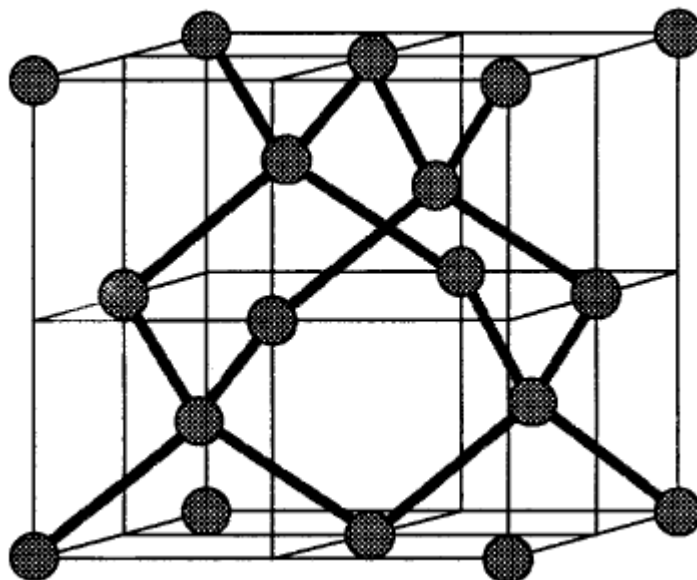


Figure (I-1) : réseau cristallin du silicium[3].

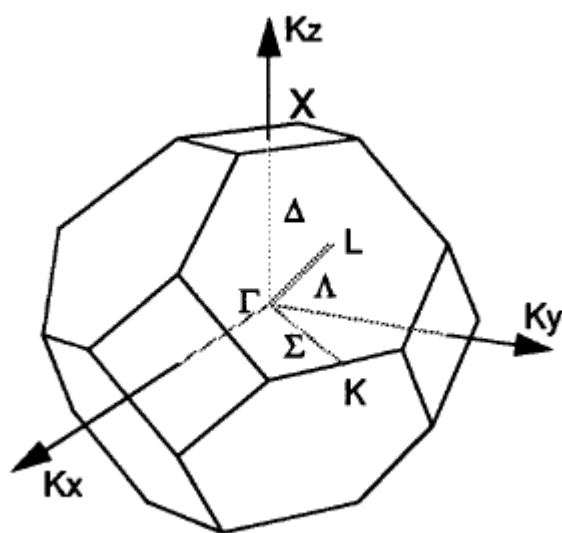


Figure (I-2) : la zone de Brillouin du silicium[3].

I-2-2) Structure de bandes de silicium:

Les états des électrons dans un cristal se classent dans une série de bandes permises séparées par des bandes interdites. Les électrons remplissent ces bandes permises selon la statistique de Femi-Dirac. Pour les semiconducteurs, il y a deux bandes importantes qui déterminent les propriétés électriques du matériau: la bande de conduction qui est la première bande quasi-vide, et la bande de valence la dernière bande quasi-pleine. Le bas de la bande de conduction et le sommet de la bande de valence sont des points d'extrémité dans l'espace du vecteur d'onde k .

I-2-3) Effets de contraintes mécaniques:

L'application d'une contrainte mécanique à un cristal modifie le réseau cristallin. La structure des bandes énergétiques doit donc se conformer à la symétrie du nouveau réseau. Par exemple, un réseau cubique à faces centrées sous une contrainte au long d'un axe de rotation de l'ordre quatre, tel qu'un axe $\langle 001 \rangle$, se transforme en un réseau tétragonal centré; un réseau tétragonal centré devient un réseau orthorhombique centré suite à une contrainte appliquée dans la direction de l'axe de rotation de l'ordre deux $\langle 100 \rangle$; à la présence d'une contrainte orientée dans la direction d'un autre axe de rotation de l'ordre deux $\langle 110 \rangle$, un réseau tétragonal centré se transforme en un réseau orthorhombique à faces centrées. La modification de la structure des bandes énergétiques due au changement de la structure de réseau peut être résolue par la théorie de perturbation [5].

I-3) Physique de la piézorésistivité

La piézorésistivité met en jeu des phénomènes complexes de conduction des semiconducteurs à tel point que les théories élaborées jusqu'à présent sont encore sujettes à controverses. En règle générale, la piézorésistivité est mieux comprise dans le cas des semiconducteurs dopés N (cas que nous allons considérer ici) que dans le cas des semi-conducteurs dopés P. La résistivité est reliée à la mobilité des porteurs et leur densité par la relation suivante [6]:

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n + q\mu_p p} \quad (I-1)$$

ou la mobilité est donnée :

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} = \frac{q\tau}{\hbar^2} \cdot \frac{\partial^2 E}{\partial k^2} \quad (I-2)$$

Dans cette relation τ est le temps de relaxation des porteurs en question, q la charge électrique et m^* la masses effectives. Cette dernière expression montre que la mobilité et donc la résistivité électrique sont liées à la courbure (dérivée seconde) des bandes d'énergie (E) dans l'espace des vecteurs d'onde (k) (voir figure I-3).

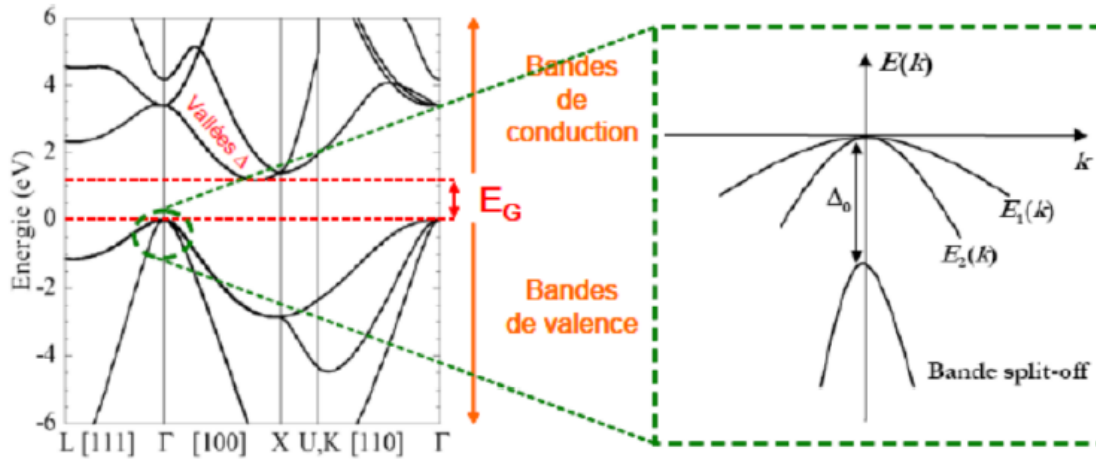


Figure (I-3) : Diagramme $E(k)$ du silicium monocristallin.

La figure (I-4) montre les surfaces de même énergie dans l'espace des vecteurs d'onde. Ces surfaces sont des ellipsoïdes dont la longueur des axes est proportionnelle à la courbure de l'énergie $E(k)$. Si nous considérons un électron (dopage de type N) se propageant selon la direction $[1\ 0\ 0]$, ce porteur de charge se déplacera de manière longitudinale par rapport à deux ellipsoïdes et de manière transversale par rapport à quatre autres de telle sorte que la résistivité puisse s'écrire comme il suit [6]:

$$\rho = \frac{1}{2.q\mu_l.n_l + 4.q\mu_t.n_t} \quad (I-3)$$

Où n_l et n_t représentent les densités d'électron dans les bandes longitudinales et transversales.

Si une contrainte uni-axiale est appliquée dans la direction $[1\ 0\ 0]$, le niveau des bandes d'énergie dans les directions $[1\ 0\ 0]$ et $[\bar{1}\ 0\ 0]$ augmente causant ainsi la délocalisation des électrons dans les autres bandes ($[0\ 1\ 0]$, $[0\ \bar{1}\ 0]$, $[0\ 0\ 1]$ et $[0\ 0\ \bar{1}]$). Cette délocalisation des

porteurs, en accord avec la dernière équation, provoque une diminution de la résistivité électrique.

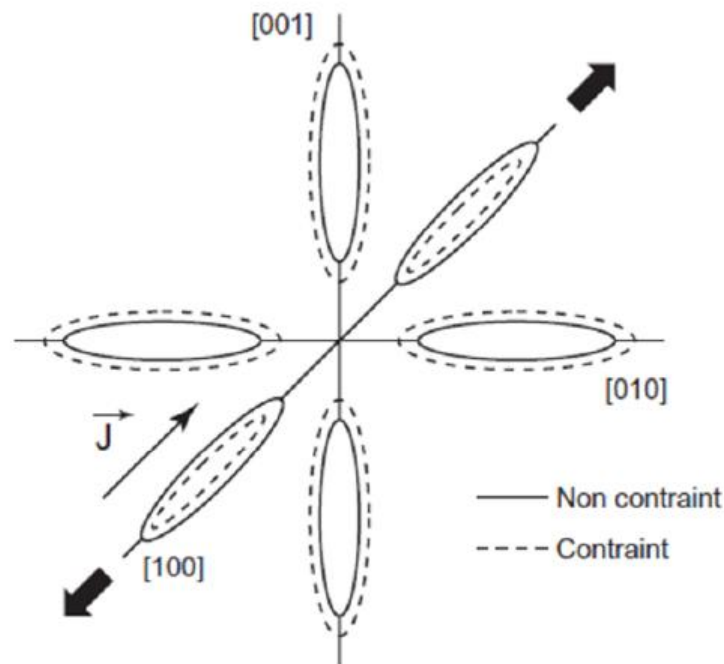


Figure (I-4) : Effet d'une contrainte uni-axiale sur les surfaces de même énergie[6].

I-4) Expression tensorielle de la piezoresistivite [7]

Dans un repère (oxyz) lié aux axes cristallographiques [100] d'un matériau semi-conducteur, la loi d'ohm généralisée s'écrit en notation tensorielle .

$$E_i = \rho_{ij} J_j + \pi_{ijkl} \rho_{ij} \sigma_{kl} J_j \quad (I-4)$$

Avec i, j et l variant de 1 à 3.

Où π_{ijkl} est le tenseur de piézorésistivité du matériau.

Sachant que :

- Les deux tenseurs de résistivité ρ_{ij} et des contraintes σ_{kl} sont des tenseurs symétriques
- Les matériaux semi-conducteurs cristallisant dans le système cubique tels que le Silicium et le Germanium ont une symétrie de leur structure cristalline ;

⇒ On peut alors passer à une écriture matricielle du tenseur de piézorésistivité du Silicium mono cristallin dont les coefficients deviennent alors les composantes de la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \quad (I-5)$$

Cette écriture permet, malgré cette contraction des indices, de retrouver dans le cas précis de ce type de symétrie cristalline, la signification physique des trois coefficients de piézorésistivité non nuls.

π_{11} : Il permet de relier la densité de courant et le champ électrique qui sont colinéaires à la contrainte s'exerçant parallèlement à eux.

π_{12} : La densité de courant et le champ électrique étant toujours colinéaires, cette composante détermine l'effet provoqué, sur la résistivité du matériau, par l'application d'une contrainte perpendiculaire aux lignes de champ.

π_{44} : Ce coefficient, quant à lui représente l'effet piézorésistif dû à l'exercice d'une contrainte de cisaillement quand le courant et le champ électrique sont perpendiculaire l'un à l'autre.

Par conséquent, avec cette écriture, les trois composantes du champ électrique s'écrivent :

$$E_1 = J_1 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3)] + \rho \pi_{44} (J_2 \sigma_6 + J_3 \sigma_5) \quad (I-6)$$

$$E_2 = J_1 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_2 + \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3)] + \rho \pi_{44} (J_1 \sigma_6 + J_3 \sigma_4) \quad (I-7)$$

$$E_3 = J_3 \rho [1 + \pi_{11} \sigma_2 + \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2)] + \rho \pi_{44} (J_2 \sigma_4 + J_1 \sigma_5) \quad (I-8)$$

Ces trois équations montrent que la différence de potentiel entre les bornes d'une résistance réalisée dans un monocristal de Silicium dépend non seulement des trois composantes du courant électrique qui la traverse, mais également des six composantes du tenseur des contraintes qui s'exercent sur elle. L'influence de chacune de ces composantes sera plus ou moins importante selon les valeurs que prendront les coefficients π_{11} , π_{12} et π_{44} . Leur connaissance permettrait donc de quantifier les variations des grandeurs électriques induites par ces contraintes.

La première détermination expérimentale des trois coefficients de piézorésistivité du Silicium et du Germanium mono cristallin a été effectuée par SMITH en 1954[8], sur des barreaux massifs et faiblement dopés. Les valeurs obtenues pour ces deux matériaux, et qui sont encore Actuellement utilisées, sont regroupées dans le tableau (I-1).

Matériau	Dopage(cm ⁻³)	$\pi_{11}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$	$\pi_{12}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$	$\pi_{44}(10^{-11}\text{Pa}^{-1})$
Si(P)	10 ¹⁵	6.6	-1.1	138.1
Si(N)	4.10 ¹⁴	-102.6	53.4	13.6

TAB (I-1) Valeurs des coefficients de piézorésistivité du Silicium mesurés à température ambiante par SMITH sur des barreaux massifs peu dopés de Silicium[8].

Il est remarquable que la valeur de coefficient π_{44} soit beaucoup plus forte que la valeur de π_{11} et π_{12} pour un Silicium de type P.

Pour des cristaux cubiques comme le Silicium et dans les configurations cristallographiques généralement utilisées, la variation de résistance peut se mettre sous la forme approchée suivante :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{12} \sigma_t + \pi_{44} \sigma_c \quad (I-9)$$

Avec

$$\pi_l = \pi_{11} - 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 m_1^2 + m_1^2 n_1^2 + n_1^2 l_1^2) \quad (I-10)$$

$$\pi_t = \pi_{12} + 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^2 l_2^2 + m_1^2 m_2^2 + n_1^2 n_2^2) \quad (I-11)$$

$$\pi_c = 2(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})(l_1^3 l_2 + m_1^3 m_2 + n_1^3 n_2) \quad (I-12)$$

Où l_i , m_i et n_i (pour i prenant les valeurs 1,2 et 3) sont les coefficients directeurs de la transformation d'axe permettant de couvrir n'importe quelle orientation cristallographique existante dans le cristal.

il est possible de prévoir un certain type de réponse électrique de la jauge, en choisissant l'orientation et l'emplacement adéquats. Nous avons regroupés, dans le tableau (I-2), pour les trois familles de plans principaux des matériaux cristallins à symétrie cubique. Les expressions Développées des trois coefficients π_l , π_t , π_c , pour un certain nombre de directions cristallographiques privilégiées, en fonction des coefficients fondamentaux du Silicium.

Plan	Direction	π_l	π_t	π_c
(100)	[100]	π_{11}	π_{12}	0
	[110]	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	$(\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$	0
(011)	[011]	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	π_{12}	0
	[100]	π_{11}	π_{12}	0
	[111]	$(\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})/3$	$(\pi_{12} + \pi_{11} - \pi_{44})/3$	$0.16(\pi_{11} - \pi_{12} - \pi_{44})$
(111)	qcque	$(\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$	$(5\pi_{12} + \pi_{11} - \pi_{44})/6$	0

Tab(I-2) Expressions développées des coefficients de piézorésistivité des cristaux à Symétrie cubique

π_l et π_t sont les coefficients de piézorésistivité associés aux directions parallèle et perpendiculaire au courant I , figure(I.5) .Ils dépendent fortement du matériau utilisé et de l'orientation cristallographique de la résistance.

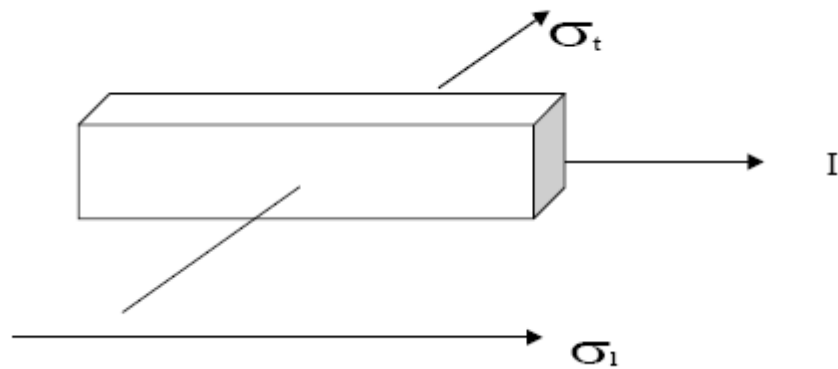


Figure (I-5) Représentation d'une résistance parallélépipédique parcourue par un Courant I et subissant une contrainte longitudinale

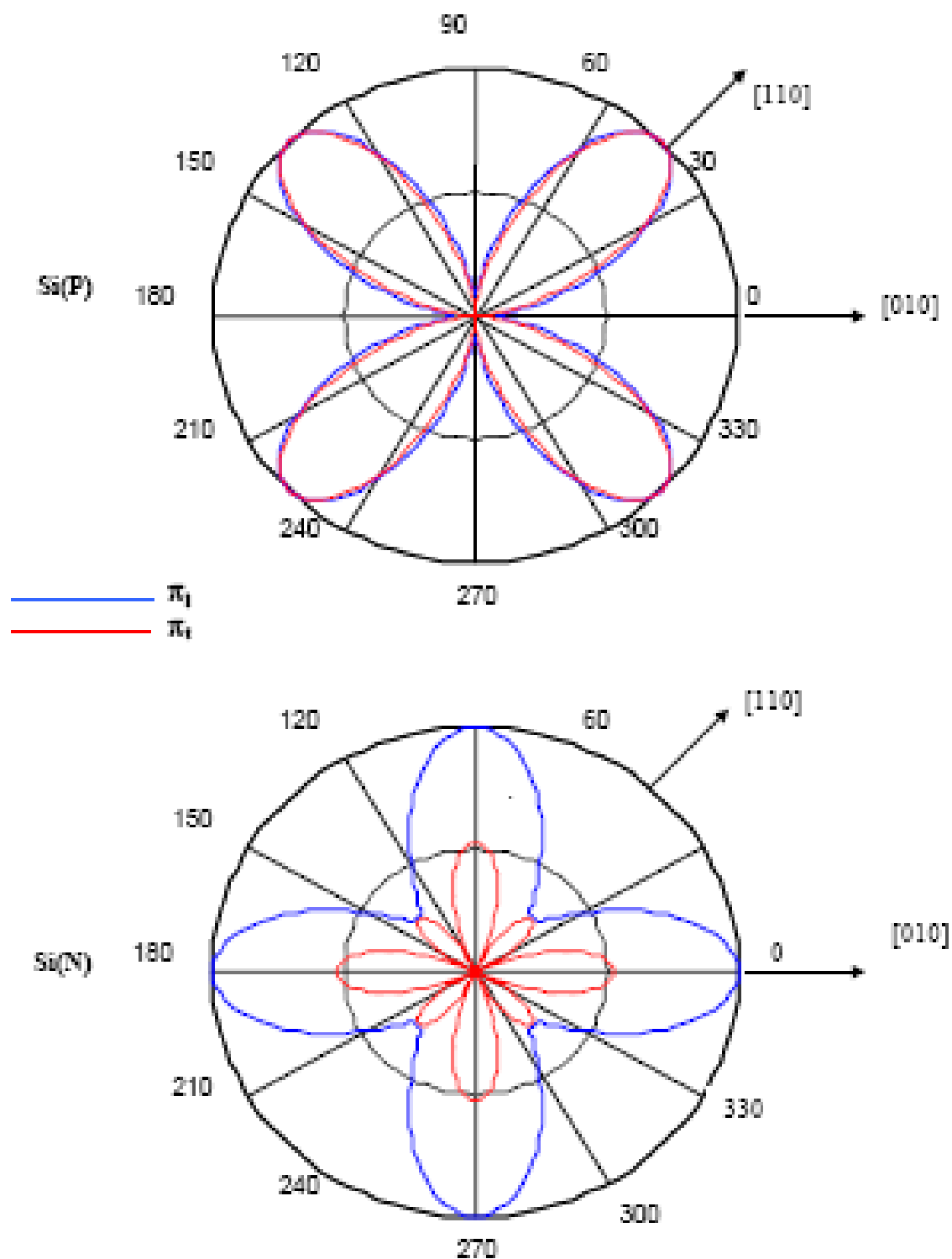


Figure (I-6) Courbes de variations dans un plan $[100]$, des coefficients de piézorésistivité longitudinal et transversal du Silicium en fonction de l'orientation cristallographique[8].

Il est clair que la meilleure orientation possible permettant d'obtenir pour une concentration en dopants et une position donnée de la jauge sur la membrane, un effet piézorésistif maximal est la direction [100] pour un Silicium dopé en atomes donneurs. Par ailleurs, dans ce même plan, une jauge réalisée en Silicium de type P aura une réponse optimisée pour une orientation cristallographique [110], avec les deux coefficients de piézorésistivité longitudinal et transversal presque égaux et opposés en signe.

I-5) Facteurs de jauge : [10]

I-5-1) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes triaxiales :

Alors que les coefficients piézorésistifs longitudinal et transversal expriment la variation de résistivité électrique en fonction des contraintes mécaniques, les facteurs de jauge (qui sont des facteurs sans unité) [6] l'expriment en fonction des déformations du conducteur en tenant compte des considérations géométriques. Les déformations suivant les différentes directions de l'espace étant liées, il convient de discerner trois cas suivant que les contraintes mécaniques sont triaxiales, planaires ou uni-axiales. La définition des facteurs de jauge s'appuie sur l'expression fondamentale donnant la résistance électrique R d'un conducteur en fonction de sa géométrie et de sa résistivité ρ comme le montre la figure suivante :

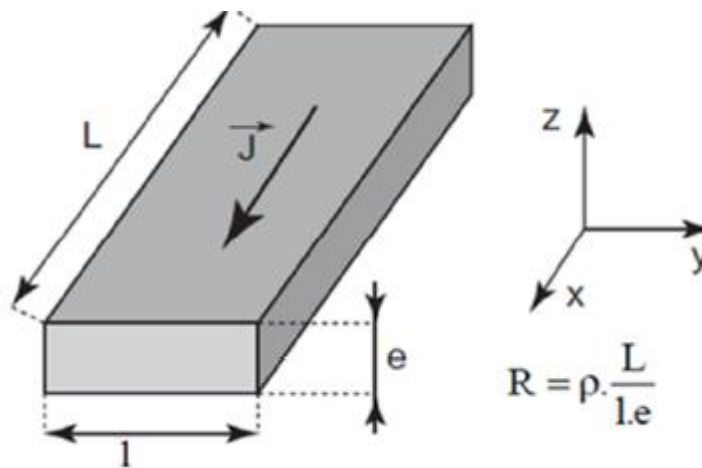


Figure (I-7) Système d'axes utilisé pour le calcul de résistance électrique des jauges de Contrainte.

Nous allons ici nous intéresser dans le cas où les contraintes mécaniques peuvent prendre des configurations quelconques, c'est-à dire avoir des composantes non nulles quelle que soit la

direction de l'espace. En considérant un matériau isotrope (cas du polysilicium), les déformations et les contraintes mécaniques sont liées par la relation vectorielle suivante :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (I-13)$$

Où E est le module d'Young et ν est le coefficient de Poisson du matériau isotrope considéré. Les contraintes mécaniques peuvent au même titre être exprimées en fonction des déformations comme ci-dessous :

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} = \frac{E}{(\nu+1)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (I-14)$$

En considérant le système d'axe représenté sur la figure (2.3), la variation de la résistance électrique de la jauge piézorésistive peut s'exprimer de la manière suivante en fonction des contraintes mécaniques et des déformations :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{e} = \pi_l \cdot \sigma_x + \pi_t \cdot (\sigma_y + \sigma_z) + \varepsilon_x - \varepsilon_y - \varepsilon_z \quad (I-15)$$

Soit encore en regroupant les termes relatifs aux déformations longitudinales et transversales :

$$\frac{\Delta R}{R} = G_{long} \varepsilon_x + G_{trans} (\varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (I-16)$$

Où G_{long} et G_{trans} sont les facteurs piézorésistifs longitudinal et transversal dans le cas de contraintes triaxiales. On peut montrer que ces facteurs de jauge sont tels que :

$$G_{long} = \frac{E \cdot [(1-\nu)\pi_l + 2\nu\pi_t]}{(\nu+1)(1-2\nu)} + 1 \quad (I-17)$$

$$G_{trans} = \frac{E \cdot [\nu\pi_l + \pi_t]}{(\nu+1)(1-2\nu)} - 1 \quad (I-18)$$

I-5-2) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes planes :

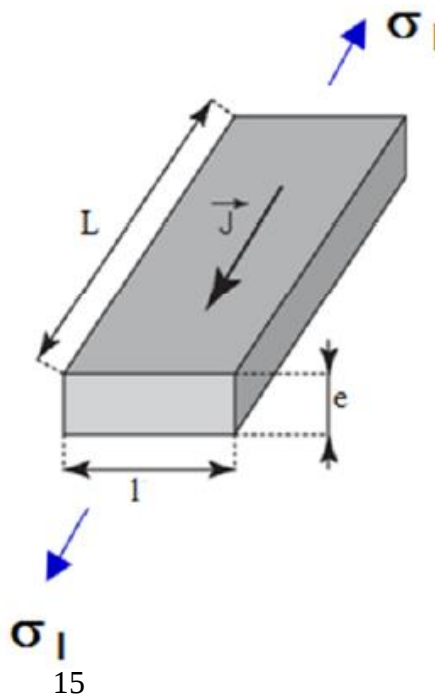
Le cas des contraintes planes implique que toutes les contraintes mécaniques ne faisant pas partie du plan considéré (ici le plan (0xy)) sont nulles soit encore : $\sigma_z = 0$. Notons que les contraintes transversales seront donc, dans ce cas, celles prenant forme suivant la direction y. Le raisonnement est exactement le même si nous substituons le plan (0xy) par le plans (0xz) et les contraintes transversales suivant l'axe y et par celles suivant l'axe z (la direction considérée étant toujours la direction x).

Les contraintes planes sont notablement utilisées dans la théorie des plaques afin d'obtenir des solutions analytiques décrivant le comportement mécanique de différentes structure, comme par exemple les membranes, dans le cas de petites déflexions.

I-5-3) Facteurs de jauge dans le cas des contraintes uniaxiales :

Dans le cas des contraintes uniaxiales, ces dernières sont non nulles dans une seule et unique direction de l'espace qui peut être, suivant les cas, longitudinal ou transversal par rapport à l'axe de la jauge piézorésistive. Notons que nous considérons ici la direction y comme étant la direction transversale. Le raisonnement est exactement le même si nous considérons la direction z. les contraintes étant uni-axiales, les déformations suivant les différentes directions de l'espace sont liées par la relation suivante :

$$\varepsilon_x = -\nu \varepsilon_y = -\nu \varepsilon_z \Leftrightarrow \frac{\Delta L}{L} = -\nu \frac{\Delta e}{e} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \quad (I-19)$$

Cas des contraintes longitudinales :

Dans le cas où les contraintes mécaniques sont longitudinales (dans la direction x), la variation relative de résistance électrique peut s'exprimer comme :

$$\begin{aligned}\frac{\Delta R}{R} &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta e}{e} \\ &= \frac{\Delta \rho}{\rho} + \varepsilon_l [1 + 2\nu] = [\pi_l \cdot E + 1 + 2\nu] \varepsilon_x\end{aligned}\quad (I-20)$$

I-5-4) Récapitulatif concernant les facteurs de jauge[10] :

Le tableau suivant énumère les expressions des différents facteurs de jauge piézorésistifs suivant la nature des contraintes mécaniques qui s'exercent :

Contraintes	Facteurs de jauge longitudinaux	Facteurs de jauge transversaux
Contraintes uni-axiales	$G_l = \pi_l \cdot E + 1 + 2\nu$	$G_t = \pi_t \cdot E - 1$
Contraintes planes	$G_{plong} = \frac{\pi_l + \nu \cdot \pi_t}{1 - \nu^2} \cdot E + \frac{1}{1 - \nu}$	$G_{ptrans} = \frac{\pi_t + \nu \cdot \pi_l}{1 - \nu^2} \cdot E + \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu}$
Contraintes triaxiales	$G_{long} = \frac{E \cdot [(1 - \nu)\pi_l + 2\nu\pi_t]}{(\nu + 1) \cdot (1 - 2\nu)} + 1$	$G_{trans} = \frac{E \cdot [\nu\pi_l + \pi_t]}{(\nu + 1) \cdot (1 - 2\nu)} - 1$

Les facteurs de jauge piézorésistifs uni-axiaux sont les facteurs de jauge les plus largement employés. Il n'est pas rare d'omettre l'adjectif « uni-axiaux » lorsque l'on se réfère à ceux-ci.

I-6) Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons à notre disposition différents outils permettant de connaître les coefficients piezoresistifs du silicium, pour une direction et un taux de dopage quelconque. Cela nous a permis de calculer le facteur de jauge de notre matériau, grandeur fondamentale dans l'élaboration de dispositifs de détection.

Chapitre 2

***Les micropoutres :
technologie de
fabrication***

II-1) Introduction :

Dans Ce chapitre on donne un aperçu des différentes technologies de fabrication des micro poutres utilisées dans les capteurs de force et de pression afin d'améliorer l'étude dédiée aux technologies des microsystèmes.

Il existe deux types de structure en silicium, celles obtenues par micro usinage de surface et celles obtenues par micro usinage de volume.

II-2) Les Structure de type MEMS [11]

le terme MEMS désigne tout dispositif intégrant des composants mécaniques et électriques de taille microscopique et servant a remplir une fonction détermine. Cette définition initiale s'est peu a peu étendue aux systèmes microscopiques ne comprenant pas spécialement de composants electromecaniques (dispositifs optiques et micro fluidiques notamment) [12]. En mode capteur, le système reçoit un stimulus et le traduit en signal électrique mesurable. Ce principe est illustre en figure (II-1) ou différents signaux d'entrée et méthodes de transduction sont énumérés.

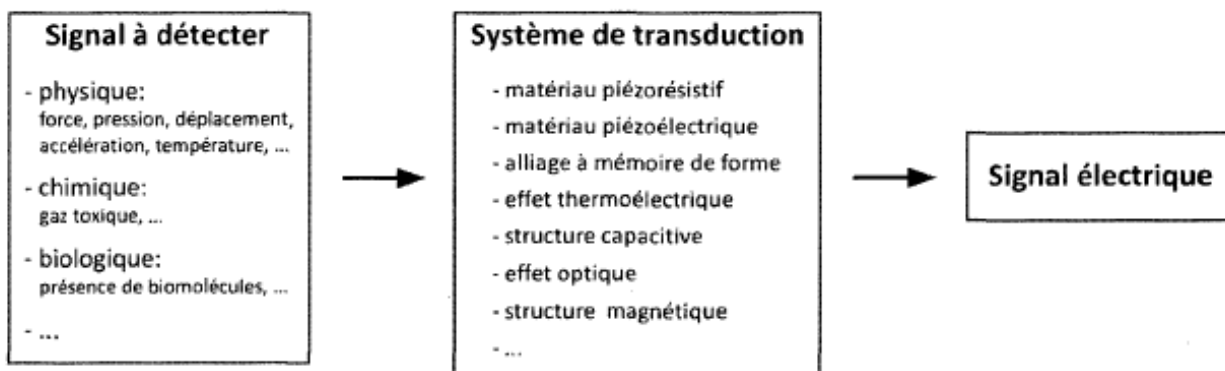


Figure (II-1) Capteur MEMS : différents types de transduction[11].

II- 3) Capteurs de force piezoresistifs

Dans le cadre d'une mesure de force, la force imposée sur les structures sensibles du capteur génère un champ de contraintes au sein de résistances piezoresistives. Ceci résulte en une variation de résistance, reflet de la force appliquée.

Différents matériaux montrent des caractéristiques piezoresistives, par exemple les métaux, le Carbone ou le Silicium dopé, Ce dernier est un excellent candidat vu sa haute réponse

piezoresistives et sa facilité d'intégration, les piezoresistances pouvant être créées par implantation. Les capteurs de force MEMS piezoresistifs rencontrés dans la littérature sont essentiellement de type membranaire, basés sur la déformation d'une membrane. La majorité des systèmes sont fabriqués en Silicium quoique d'autres matériaux soient aussi utilisés, comme du polyimide [13].

II-4) Fabrication des micropoutres piezoresistives [14]

II-4-1) Micro poutres à base silicium

La mise en forme du silicium s'articule autour de 2 méthodes :

- Le micro-usinage de surface où le MEMS est réalisé par différentes étapes de dépôts et de gravure de couches. Dans ce cas, le silicium est utilisé uniquement comme substrat, il ne sera pas attaqué ; et les matériaux utilisés pour les couches structurales (présentes en fin de procédé), et sacrificielles (couches de masquage ou servant de support gravées pendant le process) peuvent être de différentes natures (polymères, métaux, céramiques...).
- Le micro-usinage de volume où le MEMS est réalisé par gravure directe du silicium. En outre, différentes couches minces de « masquage » permettront des gravures localisées afin de réaliser les formes escomptées.[1]

II-4-1-1) Le micro-usinage en surface : [1]

Ce type de procédé est en fait dédié à l'usinage des couches minces déposées sur un substrat de silicium (poly-silicium, oxyde de silicium, nitrures...). Il est clair que le déplacement mécanique de la structure est utile pour le fonctionnement de tout actionneur qui nécessite quelques degrés de liberté. Pour cela, des couches sacrificielles (oxyde de silicium, polymère...) sont déposées entre les différentes couches minces puis dissoutes à la fin de la fabrication à l'aide d'un solvant sélectif. Des mouvements d'une couche par rapport à une autre deviennent alors possibles.

En utilisant cette technique, un transistor à porte à faux résonnante (Resonant Gate Transistor, RGT) a été réalisé en 1967 [8]. Ce sont les premiers dispositifs utilisant une couche sacrificielle pour suspendre leurs bras de levier.

Le micro-usinage de surface repose sur la présence de deux types de matériaux au-dessus du substrat : structurels et sacrificiels. Ces derniers sont dissous à la fin du procédé de fabrication libérant ainsi les couches structurelles. Les couches sacrificielles sont souvent des

oxydes ou des résines, des couches structurales du poly-silicium, des métaux ou des isolants non oxydés [15] tels que le nitrure de silicium figure (II-2)

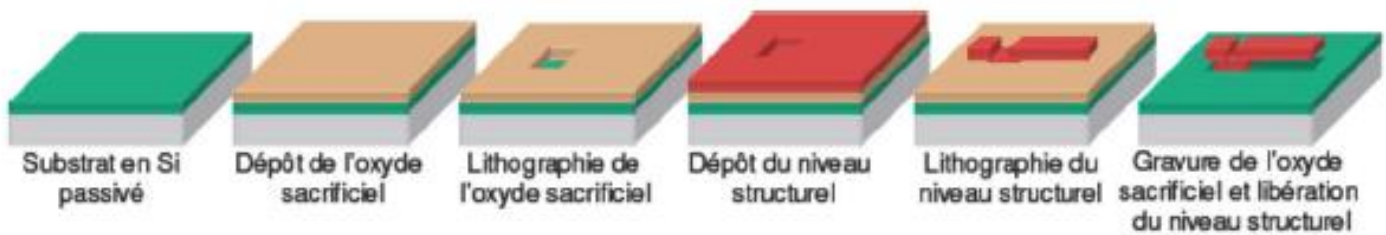


Figure (II-2) : Procédure de Micro-usinage de poutre en surface [15].

Le micro-usinage en surface est basé sur l'emploi de couches sacrificielles. Ces couches vont être gravées entièrement à la fin du processus par une étape de gravure sélective et isotrope. Le terme micro-usinage en surface vient par opposition à l'expression micro-usinage en volume car ici la gravure n'attaque pas le silicium du substrat (bulk). Pendant ce procédé les couches déposées vont être une succession de couches sacrificielles de dioxyde de silicium et de couches structurales de polysilicium.

Au cours du procédé les couches d'oxydes sacrificielles sont gravées de manière à définir les zones d'ancrage des structures en polysilicium sur le substrat ou sur le niveau inférieur. La figure (II-3) montre un schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface avant (a) et après (b) gravure des oxydes sacrificiels. On peut remarquer au passage la couche de nitrure sur tout le substrat, les trois couches structurales de polysilicium ainsi que les couches d'oxydes sacrificielles et les zones d'ancrage. La gravure des oxydes sacrificiels est généralement opérée par de l'acide fluorhydrique à 49%, suivie par une étape de séchage au CO_2 supercritique pour éviter les problèmes de collage [16].

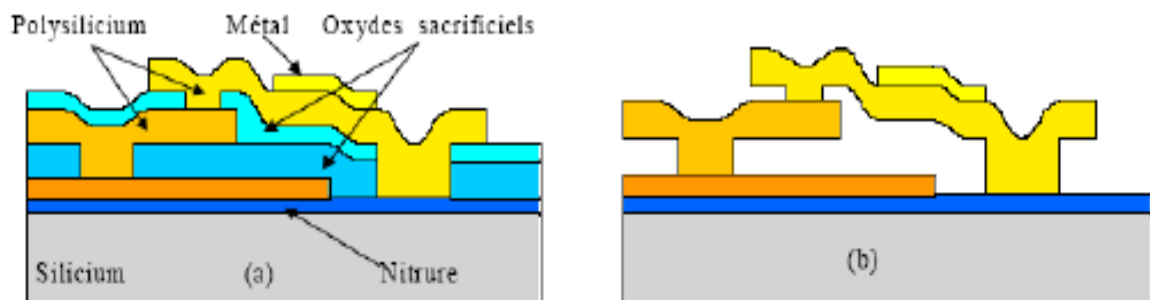


Figure (II-3) : Schéma en coupe d'une technologie de micro-usinage en surface. (a) avant et (b) après gravure des oxydes sacrificiels.

II-4-1-2) Le micro-usinage en volume :

Le micro usinage en volume permet d'obtenir les formes recherchées pour un MEMS en travaillant le substrat brut. Cela peut se faire avec de différentes manières (gravures sèches ou humides, etc.).

Dans le cas d'une gravure anisotrope fréquemment utilisée, la vitesse de gravure varie suivant l'orientation des plans attaqués et la sélectivité de la solution de gravure (KOH ; TMAH (hydroxyde de tétra-méthyle ammonium)...). Ces caractéristiques donnent sa forme finale à la topologie du substrat (figure II-4) [15].

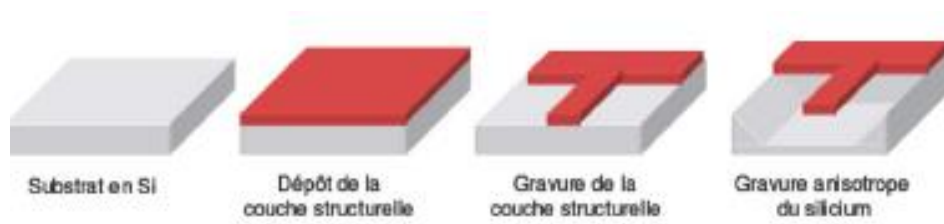


Figure (II-4) Micro-usinage en volume [16].

La gravure sèche est compatible avec les technologies que l'on trouve en microélectronique.

Il est alors possible que les parties suspendues renferment des lignes de différents conducteurs, comme le montre la figure (II-5).

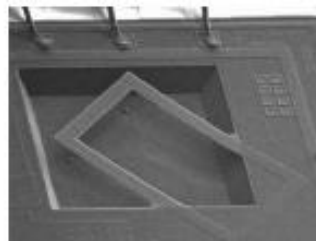


Figure (II-5) Capteur magnétique réalisé par micro-usinage en volume [16].

Le micro-usinage en volume est une technique qui permet l'obtention de microstructures suspendues par gravure chimique du substrat d'un circuit intégré. Le terme en volume est utilisé ici puisque l'attaque chimique forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées. Les structures suspendues étant obtenues après le post processus spécifique.

Dans le cas du micro-usinage en volume face avant, le post processus ne nécessite qu'une étape de gravure anisotrope.

La définition des zones à graver se fait simplement en empilant les ouvertures dans les différents oxydes au niveau layout de manière à laisser une zone où le matériau du substrat à nu.

➤ **La gravure anisotrope du silicium :**

La gravure anisotrope du silicium est une réaction chimique en phase liquide entre la solution de gravure et le silicium et dont la cinétique est commandée par l'orientation cristallographique des surfaces de contact. En effet, la vitesse de gravure est exprimée le plus souvent en $\mu\text{m.mn}^{-1}$ dépend de l'orientation cristallographique de la surface en contact avec la solution.

➤ **Intérêt de la gravure anisotrope :**

La fabrication des microstructures suspendues tient au fait par une simple ouverture vers le silicium du substrat. Il est possible d'obtenir une cavité sous structures suspendues (comme une gravure isotrope) mais également une cavité qui reste. La figure (II-6) montre la progression de la gravure anisotrope définie par un masque comportant deux ouvertures triangulaires.

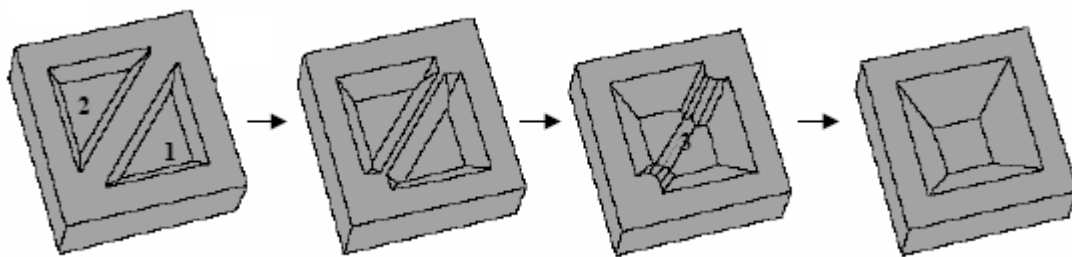


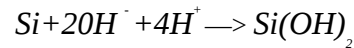
Figure (II-6) Schéma représentant l'avancée de la gravure anisotrope à partir d'ouvertures triangulaires [17].

On peut noter que la solution commence par consommer la cavité 1 tout en formant la cavité 2. L'effet de bord sur les parties convexes vient créer le plan 3 "rapides" permettant de libérer complètement la structure et d'obtenir une cavité en forme de pyramide inverse.

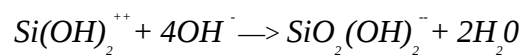
➤ **Les solutions de gravure anisotrope du silicium :**

Les solutions de gravure du silicium présentant un caractère anisotrope sont des hydroxydes KOH, NaOH, CeOH, RbOH, NH_4OH , TMAH.

Pour cette dernière, la réaction dérivante est alors l'oxydation du silicium par des hydroxydes pour former un silicate



Les silicates réagissent ensuite avec les hydroxydes pour former un complexe soluble dans l'eau:



Les solutions les plus souvent utilisées pour la gravure anisotrope du silicium sont l'hydroxyde de potassium (KOH) qui offre une très grande anisotropie mais a le défaut d'être peu sélectif envers l'aluminium ce qui pose des problèmes quand aux plots de connexions dans les technologies CMOS.

II-4-1-3) Les différents types de micro-usinage en volume :

II-4-1-3-a) Le micro-usinage en volume face avant :

Le micro-usinage en volume face avant compatible CMOS permet d'obtenir facilement des structures suspendues sans étapes de lithographies supplémentaires. La figure (II-7) montre les différentes structures qu'il est possible d'obtenir, une structure suspendue en forme de pont (a), de poutre (b) ou de membrane suspendue par des bras de support (c).

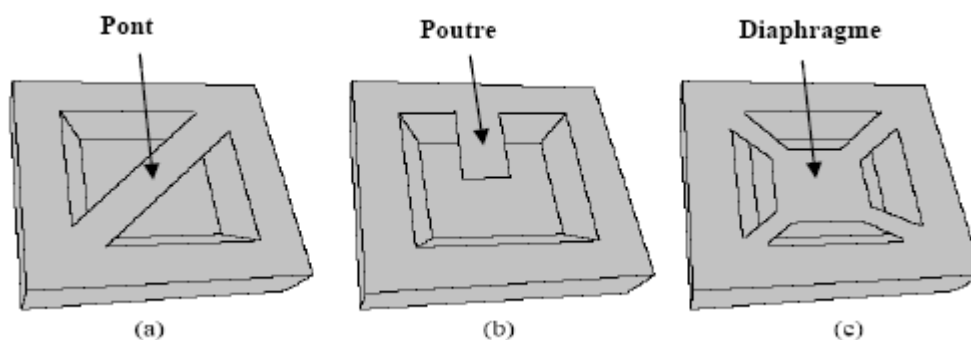


Figure (II-7) Schéma des différentes microstructures que l'on peut Obtenir par micro-usinage en volume face avant [17].

En opérant une gravure assez longue, il est possible aussi de traverser l'épaisseur du wafer de manière à transformer une masse suspendue à une membrane. La gravure s'opérant également par la face arrière du wafer (dans le cas d'une gravure au niveau puce). Néanmoins cette technique impose une taille assez grande de la structure suspendue (typiquement $800\mu\text{m}$ de côté).

II-4-1-3-b) Le micro-usinage en volume face arrière :

Le micro-usinage en volume face arrière nécessite une étape supplémentaire de lithographie de manière à créer un masque pour la gravure anisotrope. Cette étape de lithographie doit être alignée par rapport à la face avant, ce qui nécessite l'emploi d'un aligneur double face. De plus cette technique impose de travailler au niveau wafer et non pas au niveau puce comme c'était le cas pour le micro-usinage de surface en face avant. La figure (II-8) montre les structures qu'il est possible d'implémenter avec cette technique. La figure (II-8) (a) montre une membrane close obtenue par gravure en face arrière, cette technique est employée dans les capteurs de pressions ou la déflexion de la membrane suite à une différence de pression entre ses deux faces est mesurée. Notons aussi que la cavité formée sous la membrane peut être fermée par collage du dispositif sur une surface de silicium (wafer bonding) et mettre ainsi une référence de pression dans la cavité, on obtient un capteur de pression absolue. La figure (II-8) (b) montre une membrane close laquelle est attachée une masse suspendue pour des applications thermiques ou de capteurs inertiels.

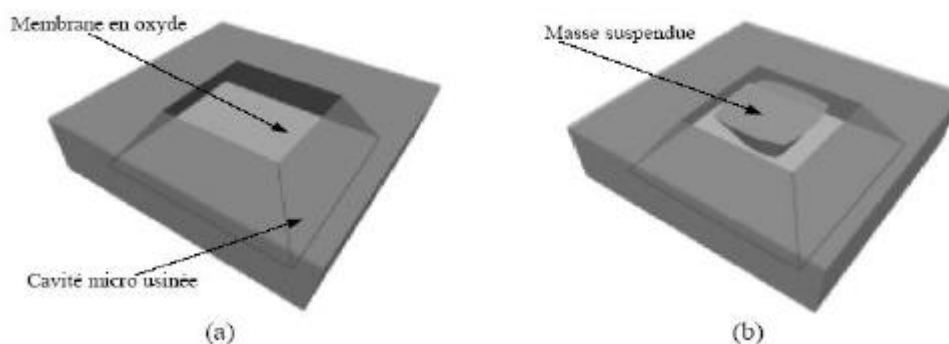


Figure (II-8) Schéma des différentes structures résultantes d'un micro-usinage en volume face arrière[17].

II-4-2) Micropoutres réalisées à partir de procédés alternatifs au Silicium [14]

Afin de répondre aux exigences du marché (performances des MEMS, matériaux ou coûts) différents procédés ont vu le jour. Ils permettent de réaliser des structures à base de matériaux autres que le silicium, entièrement libres ou « ancrés » sur des substrats de nature diverse. Les principales techniques alternatives au silicium utilisées pour la réalisation de micropoutres sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

II-4-2-1) Micropoutres à base de polymères

Les méthodes de micro-fabrication de polymères occupent aujourd'hui une place importante dans le domaine des technologies bas-coût alternatives aux technologies silicium.

Une des principales raisons du succès des matériaux polymères dans le domaine des MEMS, et plus particulièrement de microsystemes biologiques, réside dans la large gamme de technologies de fabrication et leur adaptabilité à une production de masse (procédés « roll to roll »). De plus, le panel de matériaux polymères disponibles permet la réalisation de microobjets biocompatibles (pour la plupart) offrant une gamme de propriétés chimiques et physiques étendue. Pour la réalisation de ces structures MEMS polymères, la méthode la plus courante utilise les techniques issues des procédés de la microélectronique en particulier la photolithographie. Cependant, de nouvelles méthodes alternatives voient le jour pour s'affranchir du besoin de photosensibilité de matériaux synthétiques. L'utilisation de moules, dans lesquels le polymère est coulé, est très répandue. D'autres techniques peuvent aussi être préférées, citons l'ablation laser, l'utilisation de masques mécaniques (stencil), le nanoimprint et tout récemment même la sérigraphie.

➤ Techniques utilisant des polymères photosensibles

La fabrication de micro-objets en matériaux polymères peut s'effectuer par des procédés s'apparentant aux procédés de micro-usinage de surface ou de volume avec un substrat silicium, verre ou autre. La libération partielle ou totale de la couche structurale polymère préalablement structurée par photolithographie pourra s'effectuer par les techniques de gravure en face arrière [18]. On optera, général pour la gravure par DRIE d'un substrat silicium.

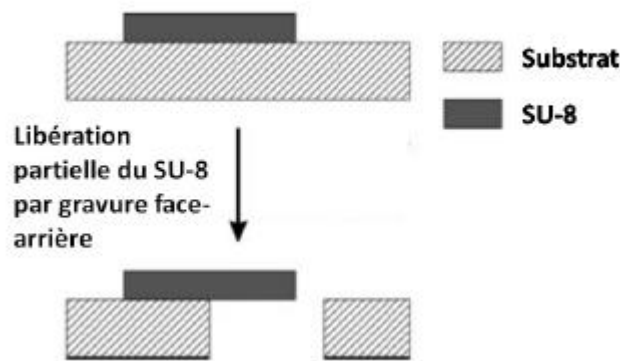


Figure (II-9) Réalisation d'une structure SU8 partiellement libérée par gravure face-arrière du silicium[18].

L'autre option concerne l'utilisation d'une couche sacrificielle, qui peut être de différente nature (Ti, SiO₂, Cu, Cr, films métalliques ou polymères...). Le matériau utilisé pour le film sacrificiel est choisi en fonction de la compatibilité de la solution de gravure qui lui est associée avec les autres éléments de la structure qu'on veut libérer. Ainsi pour la réalisation d'un micro-objet tel qu'une poutre, cette dernière pourra être réalisée soit sur un substrat et détaché partiellement (figure II-10 b)) soit réalisé à l'envers et libéré totalement du substrat. Il pourra alors être laminé sur un autre substrat. Parmi les résines pouvant être utilisées en guise de couche structurale ou sacrificielle, on choisira des résines thermoplastiques (PMMA, PLLA, PDMS, AZ...) ou thermodurcissables (SU-8). Des microstructures plus complexes que les micropoutres peuvent être ainsi être réalisées (figure II-11).

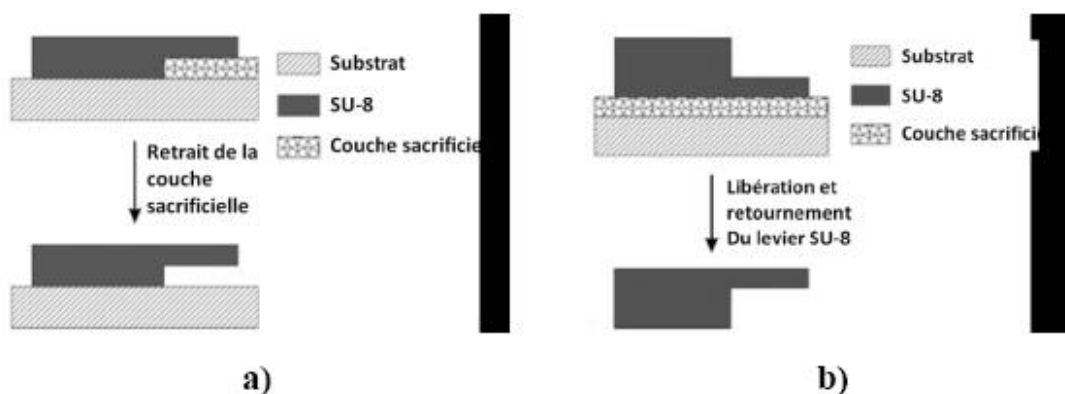


Figure (II-10) Réalisation d'une micropoutre SU-8 avec une couche sacrificielle a) par libération partielle d'une structure sur substrat b) par libération totale et retournement de la structure[18].

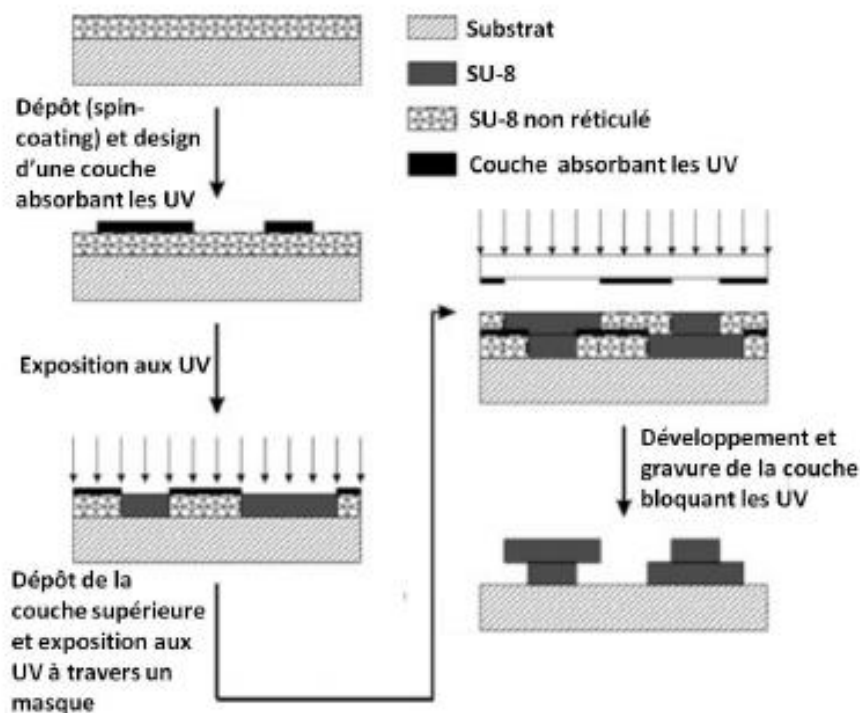


Figure (II-11) Procédé de réalisation de micro-objet par photolithographie et technique de la couche sacrificielle[18].

II-4-2-2) Micropoutres à base de céramiques

La technologie LTCC (Low Temperature Cofired Circuits) et la technologie hybride couches épaisses initialement utilisées pour la réalisation de circuits multi-couches en microélectronique ont été adaptées à la réalisation de structures libérées et en particulier de micropoutres. Que ce soit pour les structures réalisées en LTCC ou celles en couches sérigraphiées, on retrouve la technique de la couche sacrificielle pour réaliser les structures libérées.

Pour la partie LTCC, les structures libérées sont formées à l'aide de feuilles crues de vitro-céramiques sur lesquelles sont sérigraphiés des conducteurs ou composants passifs, avant pressage de l'ensemble puis co-cuisson. Pour la fabrication de MEMS à cette technologie LTCC [19], H.Birol a utilisé une couche sacrificielle à base de graphite pour la réalisation de structures libérées ou partiellement libérées tels que des canaux, des membranes ou des micro-leviers [20]. La couche sacrificielle se présente, ici, sous forme de pâte sérigraphiable

composée de poudre de carbone et d'un « véhicule organique », mélange de liant (éthyl-cellulose), de solvant (terpinéol) et de dispersant (acétylacétone). Les structures réalisées ont

été utilisées pour des applications microfluidiques [19] ou capteur de force [21] (structure micropoutre).

Pour la technologie couches épaisses, S.L. Kok [22] a aussi utilisé une couche sacrificielle à base de carbone pour la réalisation de structures libérées telles que des micropoutres, tout comme P. Ginet au laboratoire IMS [23] qui a développé le procédé breveté au Laboratoire et qui sera détaillé en fin de chapitre.

II-4-2-3) Exemples de réalisation de capteurs de type micropoutre

La littérature sur les capteurs de force de type micropoutre fait état de nombreuses publications sur le sujet. Les capteurs de force micropoutres en silicium constituent une référence parmi ces capteurs et sont aujourd'hui disponibles commercialement comme par exemple chez le fournisseur *Kronex*. E. Peiner et al. [24] ont utilisé des micropoutres en silicium pour la calibration de stylets d'instruments de type profilomètre mécanique. Ces poutres de quelques millimètres de long sont réalisées par micro-usinage de volume d'un substrat dopé. Elles intègrent une pointe de forme pyramidale en bout de poutre ainsi que, près de l'encastrement, des jauges de déformation implantées par diffusion de bore (Figure II-12). La procédure d'étalonnage mise en place consiste à appliquer différentes forces (inconnues) sur la micropoutre et à relever la déflexion de cette dernière ainsi que la tension de sortie de la piezorésistance qui lui est associée. Les résultats expérimentaux sont en bon accord avec ceux obtenus par simulations éléments finis. Les forces appliquées se situent dans les gammes 10-160 μ N et 1-200 μ N peuvent être calibrées avec des précisions allant respectivement de 50nN à 0,8 μ N et de 12nN à 1 μ N.

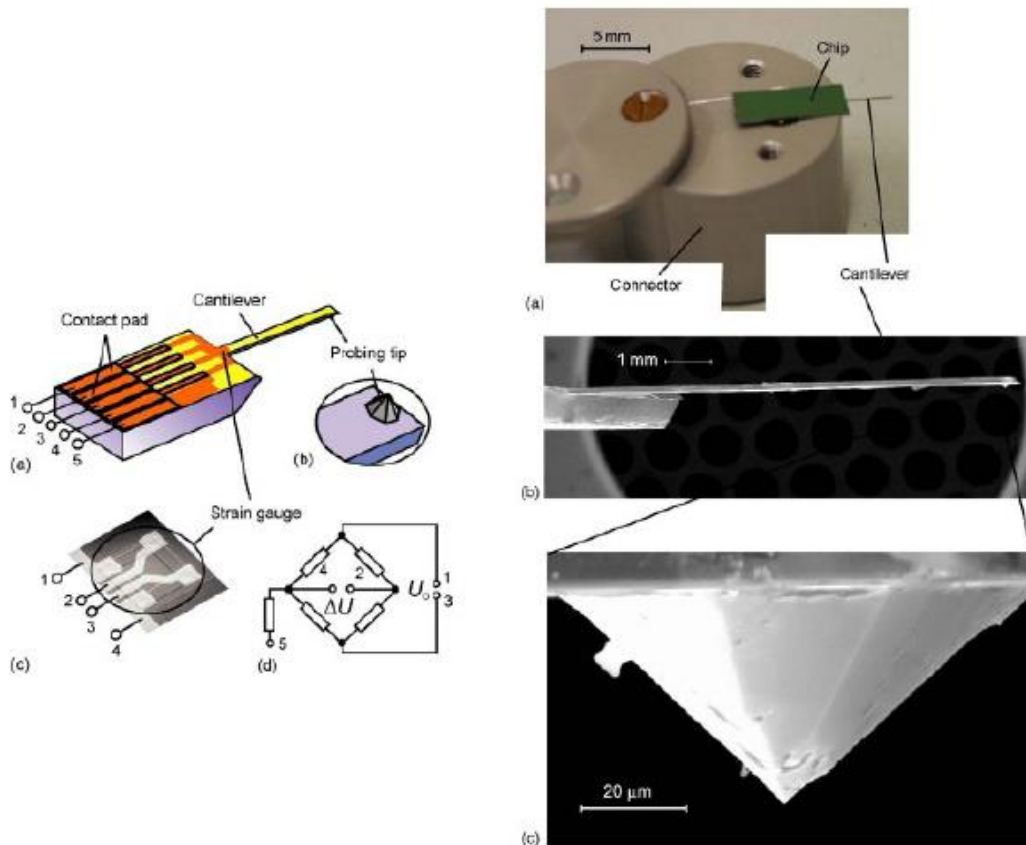


Figure (II-12) Schémas de principe et photos de la poutre silicium développée par Peiner et al pour la calibration de force [24]

Un autre secteur d'activité dans lequel les micropoutres en silicium sont particulièrement utilisées est celui de la microrobotique. Pérez et al. [25] ont développé un capteur de force de type micropoutre en silicium destinés au contrôle des forces exercées par des micromanipulateurs lors de la préhension d'objets pour le MEB entre autre. Ces poutres silicium de dimensions $3 \times 0,35 \times 0,1 \text{ mm}^3$ (Figure II-13) qui intègrent des piézorésistances de type p sont fabriquées avec le même procédé décrit précédemment (Peiner et al.).

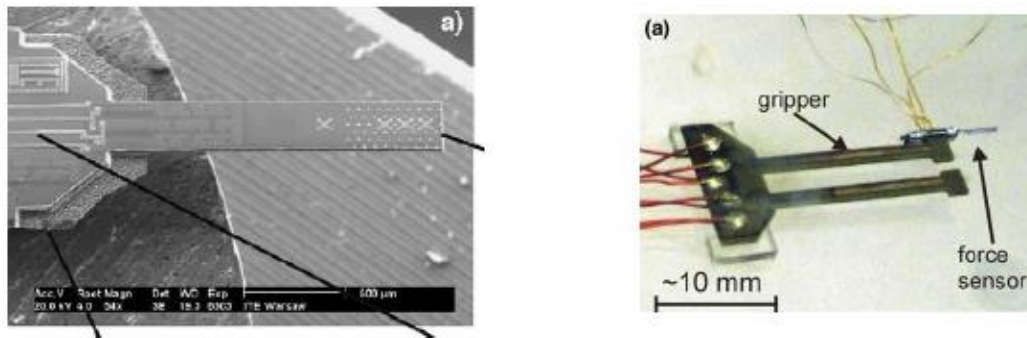


Figure (II-13) Poutre silicium fabriquée par Perez et al. (gauche) intégrée ensuite sur une micropince à base de céramiques piezoélectriques (droite)[25].

Cependant, depuis quelques décennies, des capteurs de type micropoutre fabriqués selon d'autres procédés de fabrication apportent une alternative aux micropoutres silicium.

Des micropoutres en polymères SU-8 ($215 \times 280 \mu\text{m} \times 1,5 \mu\text{m}^3$) et polyimide ($390 \times 130 \times 3 \mu\text{m}^3$) ont notamment été réalisées par Johansson et al. [26] et Ibbotson et al. [27] en utilisant dans les deux cas une couche sacrificielle métallique pour libérer les poutres (Figure II-14).

Ibbotson a utilisé un réseau de micropoutres polyimide avec des jauges de déformations piezorésistives en or (évacués et structurés par lift-off) pour la détection de contraintes surfaciques. Grâce au module d'Young faible du polyimide ($1,8 \text{ GPa}$), une grande sensibilité au changement de contrainte surfacique est obtenue ($2,1 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$).

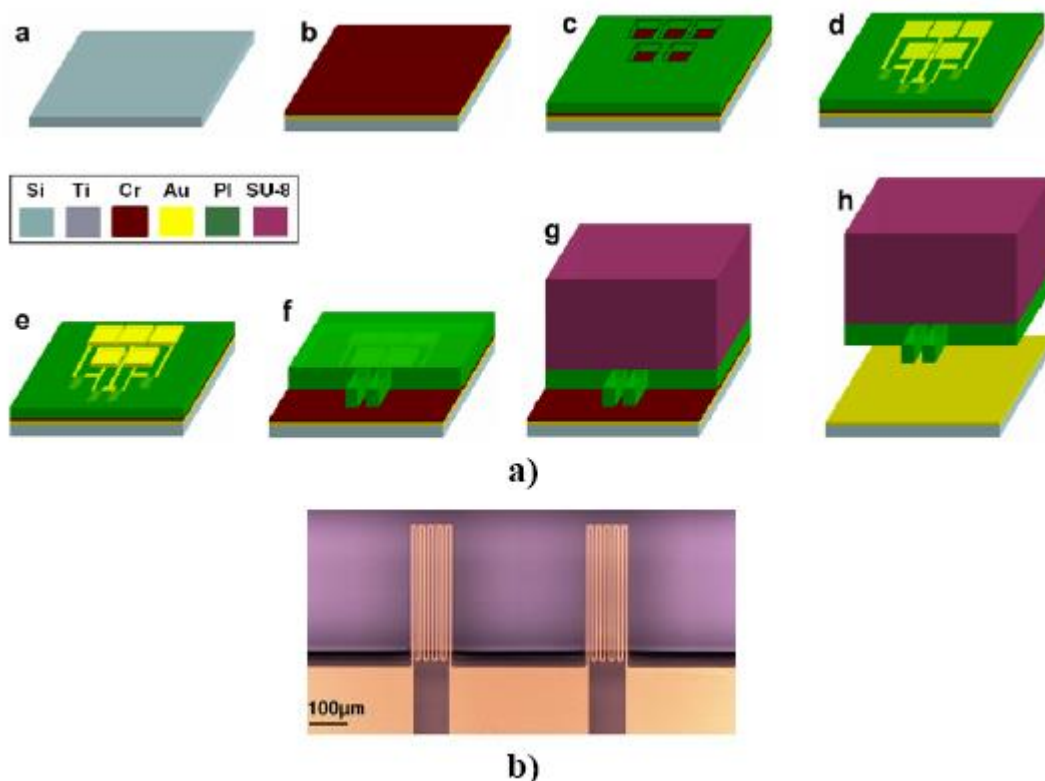


Figure (II-14) Poutres en polyimides (PI) fabriquées par Ibbotson et al [27].

Des micropoutres sans plot d'encastements ont été réalisées à partir de feuillets de céramiques LTCC par Birol et al [21]. Des forces minimales voisines de $20\mu\text{N}$ ont ainsi, pu être détectées à partir d'une micropoutre de dimension $15 \times 3 \times 0,13 \text{ mm}^3$ formée de 2 feuillets céramiques de $40\mu\text{m}$ d'épaisseur (Figure II-15).

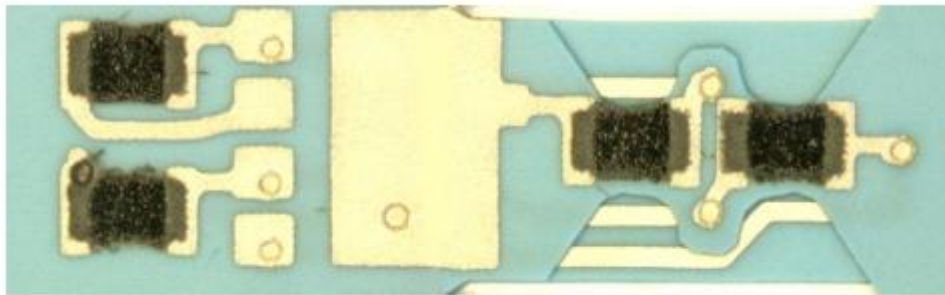


Figure (II-15) Capteur micropoutre structurée à partir de feuillets LTCC [21]

En 2011, une micropoutre originale à base de papier a été mise au point par X. Liu et al. [26] pour la mesure de force dans la gamme mN (Figure II-16). Cette poutre en papier, de dimensions $44,5 \times 7,7 \times 0,3 \text{ mm}^3$ intègre de même que la majorité des capteurs de force une jauge piezorésistive. Cette jauge est à base de carbone et a été sérigraphiée, tout comme les contacts en argent.

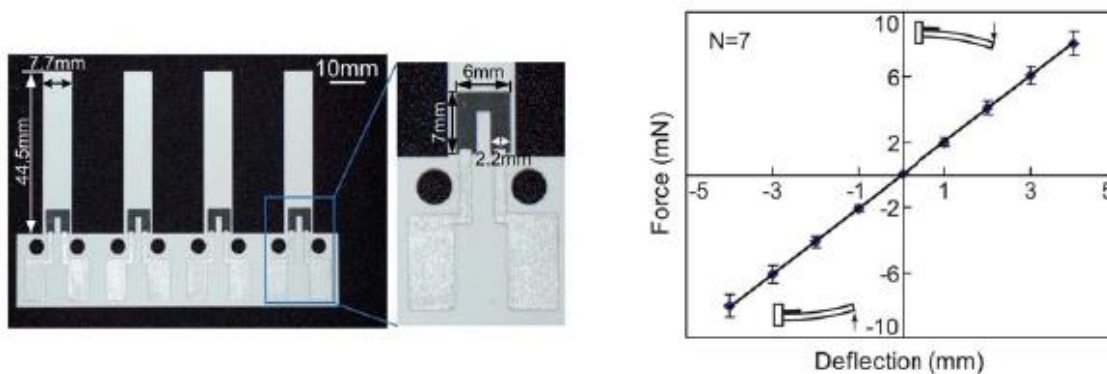


Figure (II-16) Photos et courbe de détection force (détection) du capteur de papier développé par Liu et al [26].

II-5) Conclusion :

Ce chapitre a permis de montrer brièvement les principes de fabrication des poutres de détection. Ces poutres peuvent être utilisées pour mesurer des effets de masse par application d'une force dans le cas d'un capteur de force (régime statique), ou pour mesurer des effets de masse liés à la sorption d'une espèce à détecter sur une couche sensible recouvrant la poutre dans le cas de la détection de gaz (régime statique ou dynamique).

Chapitre 3

Introduction au

logiciel COMSOL

III-1) Introduction [28]

Comsol Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, ainsi que multiple phénomènes physiques. Développé initialement comme une toolbox de MATLAB, il dispose aujourd'hui de son propre environnement graphique permettant à la fois le dessin des géométries et l'affichage de résultats en post-traitement. Sa spécificité est également de permettre de coupler différentes EDP, de manière à décrire des phénomènes multiphysiques, particulièrement adapté à la micro-électronique. Il est ainsi possible d'obtenir la déformation d'une membrane due à la pression dans un liquide par exemple. Ou encore l'élévation de température dans un conducteur due au passage d'un courant électrique.

III-2) Les éléments finis:**III-2-1) Principe de la méthode**

La méthode des éléments finis est fondamentalement un cas spécial des formulations intégrales. En effet, chacune des méthodes utilise une base de fonctions comme point de départ pour obtenir une solution approximative. La grande différence réside dans le choix de la base de fonctions, dans les formulations intégrales ces fonctions de base sont définies sur le domaine tout entier, tandis que la méthode des éléments finis se base sur l'une de ces formulations appliquée à des domaines locaux discrets qui sont habituellement simples, par rapport au domaine global. Ces domaines locaux discrets sont appelés éléments. C'est pourquoi le nom de la méthode. [28]

III-2-2) Etapes de base de la méthode des éléments finis

Le principe de la méthode des éléments finis est d'approximer un problème continu par un problème discret facile à résoudre, en remplaçant le domaine d'étude continu par un nombre d'éléments de forme géométrique simple, sur chacun de ces éléments, la fonction inconnue est approximée par une combinaison linéaire de fonctions simples qui sont généralement des polynômes. En appliquant l'une des formulations intégrales et finalement en résolvant le système d'équations ainsi obtenu, nous obtenons une solution approximative de la solution exacte du problème aux limites. Donc, la résolution d'un problème aux limites par la méthode des éléments finis est constituée des étapes suivantes :

1. Discrétisation du domaine continue en sous domaines ;
2. Construction de l'approximation nodale ;
3. Calcul des matrices élémentaires correspondant à la formulation intégrale ;
4. Assemblage des matrices élémentaires et prises en compte des conditions aux limites ;
5. Résolution du système d'équations.

III-3) Présentation du logiciel COMSOL

III-3-1) L'interface de COMSOL:

La fenêtre de démarrage de COMSOL est décomposée en trois volets : à gauche, on retrouve la bibliothèque de model où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh). La bibliothèque de model comporte aussi le type de problèmes et les paramètres de solveur (Study) et les options d'affichage et de post traitement des données (Results). La colonne directement à droite comporte les options relatives à ce qui est sélectionné dans Le bibliothèque de model, par exemple, les dimensions d'un objet qui vient d'être créé dans (Geometry). C'est aussi à cet endroit que les paramètres initiaux de la simulation et les modèles physiques nécessaires sont choisis. En haut à droite, la fenêtre d'affichage graphique (Graphics) permet de visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats. Au haut de cette fenêtre se retrouvent diverses options permettant de changer le grossissement de l'affichage, l'orientation d'un objet tridimensionnel, etc. Les options permettant de sélectionner des objets, des domaines, des frontières ou des points se retrouvent aussi au haut de cette fenêtre. Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permettant de visualiser les messages d'erreurs, le progrès des simulations, la liste des opérations effectuées lors du calcul de la solution ainsi que des résultats numériques calculés une fois la simulation terminée ;[29]

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL sont présentés à la figure

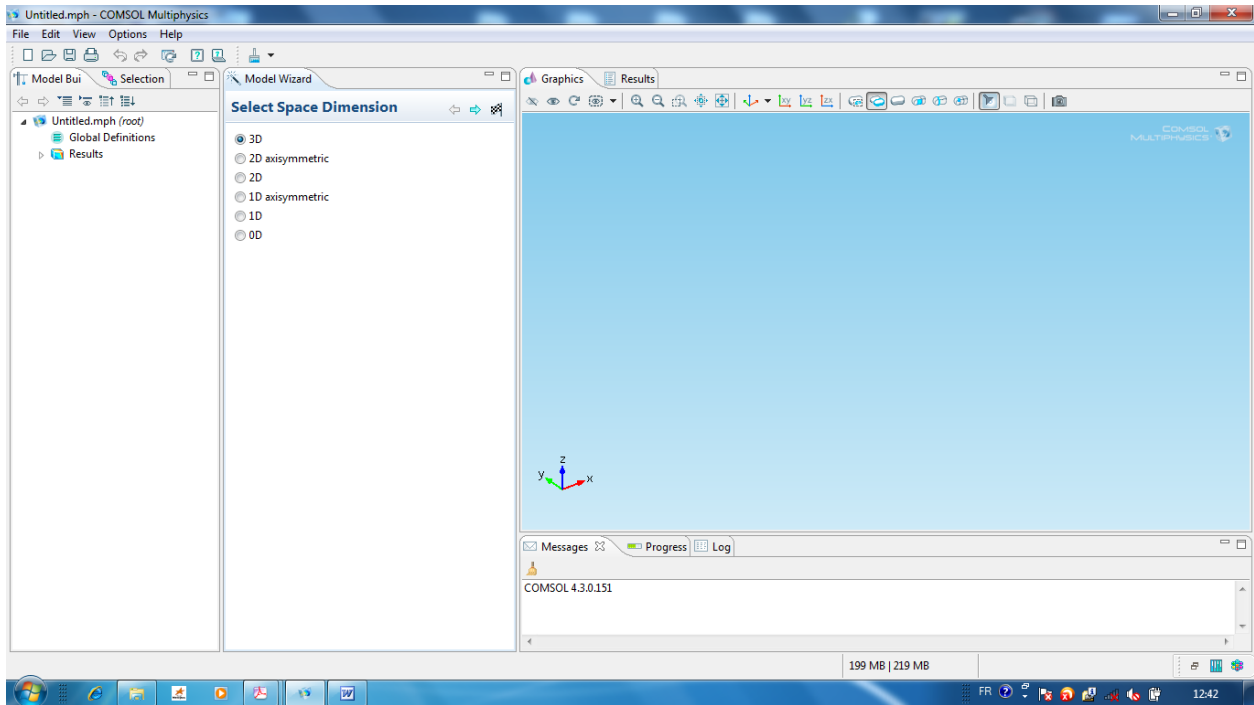


Figure (III-1) : interface graphique du COMSOL [29].

III-3-2) Modélisation à l'aide de l'interface graphique

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème. L'onglet Model builder permet de créer le domaine sur lequel on cherche à résoudre l'équation différentielle à l'aide de commandes classiques de dessin du logiciel (rectangles, lignes brisées, ellipses). On peut donc dessiner un large éventail de domaines différents. On définit ensuite le comportement des domaines en leur associant leurs propriétés. Ensuite, on impose des conditions sur certaines frontières, et éventuellement sur certains points. Cette opération est à refaire pour chaque modèle utilisé. Une fois la physique du problème posée, il faut effectuer le maillage de la géométrie. Il est possible de faire un raffinement local du maillage. Il ne reste ensuite plus qu'à simuler.

III-3-3) Dessin de la Géométrie

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système. Le mode Dessin 3D par défaut fournit une barre d'outils très variée et complète pour la création de différentes géométries.

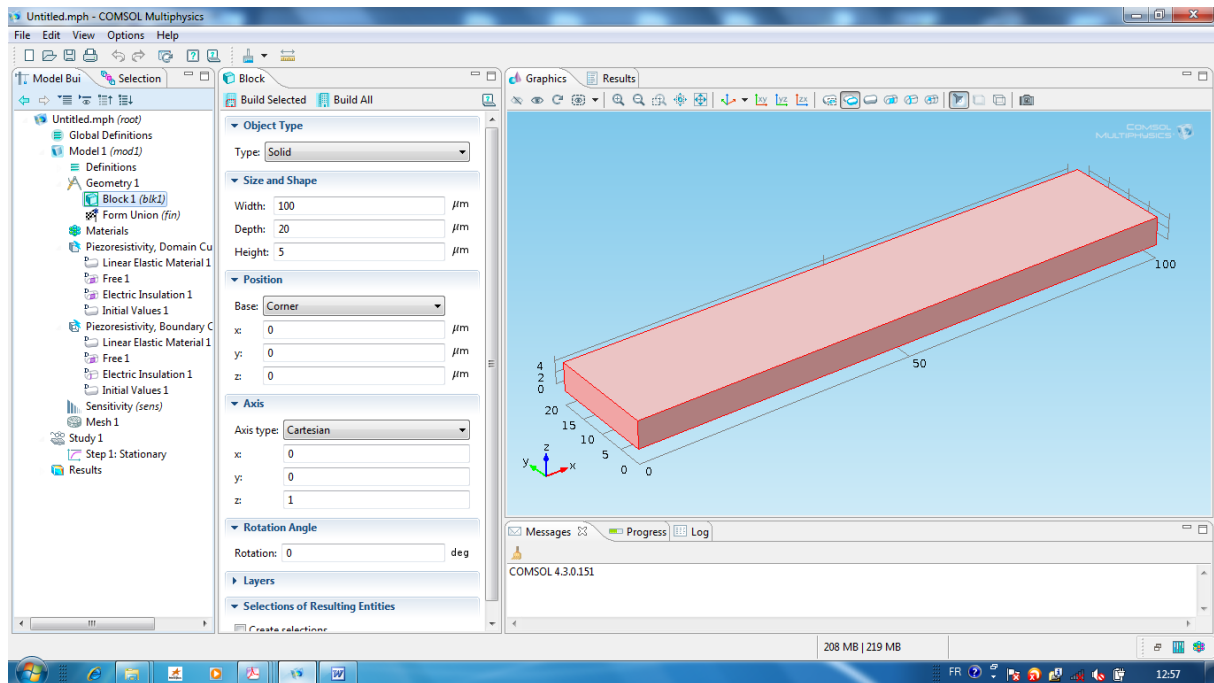
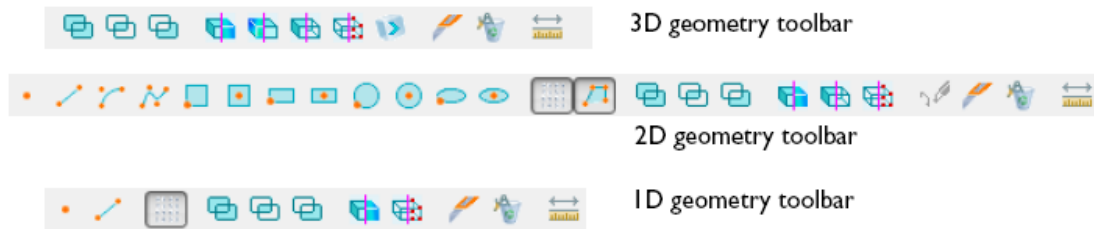


Figure (III-2) : Dessin de la géométrie [29].

III-3-4) Modélisation de la physique et des équations

Afin d'établir des modèles dans Comsol Multiphysics nous devons suivre une certaine hiérarchie notamment pour créer un nouveau modèle, spécifier la physique, adapter des équations prédéfinies, écrire nos propre PDEs, modeler la physique sur les géométries multiples, et même d'installer un modèle avec ses :

- Équations
- États de frontière et d'interface
- Propriétés matérielles
- Conditions initiales

III-4-1) Variable et expression

Pour spécifier un coefficient ou certaine propriété d'un matériau, nous pouvons entrer sa valeur ou une expression directement dans le champ d'édition correspondant. Une telle expression peut contenir:

- Valeurs numériques
- Fonctions mathématiques et logiques
- Coordonnées d'espace, le temps et les variables dépendantes ainsi que leurs dérivés.
- Variables du mode d'application, qui est prédéfinis spécifiquement pour chaque mode d'application
- Opérateurs et des Script et même des fonctions de MATLAB
- Ainsi que d'autres variables prédéfinies, des Constantes, expressions, variables de couplage, fonctions d'interpolation. Nous pouvons définir des constantes et des variables qui simplifie la spécification du modèle. Pour ajouter des constantes et des variables, on utilise les commandes appropriées

III-4-2) Expression des Variables

Ajouter des variables d'expression symbolique ou expressions en utilisant les boîtes de dialogue que vous ouvrez le sous-menu Expressions dans le menu Options. Les expressions sont globales. Avec des expressions aux limites, les expressions de sous-domaine et expressions de point, il est possible également de créer des expressions qui peuvent contenir d'autres variables et expressions.

III-4-3) Choix des matériaux

La Bibliothèque des Matériaux est une base de données extensible avec des propriétés pour une large collection de coefficient et de propriétés physique, mécanique, électromagnétique et thermiques regroupées selon le contexte dont le quel ils sont utilisé(physique, élastique, électrique, fluide, piézoélectrique, piezoresistif et thermique). Toute fois nous pouvons modifier ou bien ajouter d'autre coefficient. L'accès a cette bibliothèque est facile et nous pouvons transféré directement les propriété a l'application du modèle ouvert.

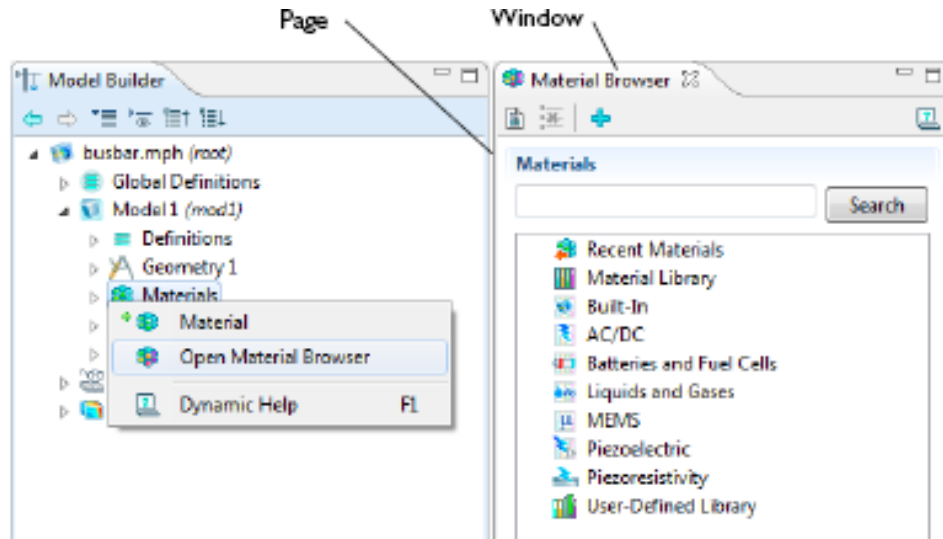


Figure (III-3) : collection et choix de matériaux [29].

III-4-5) Introduction des conditions aux limites

Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes. A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.

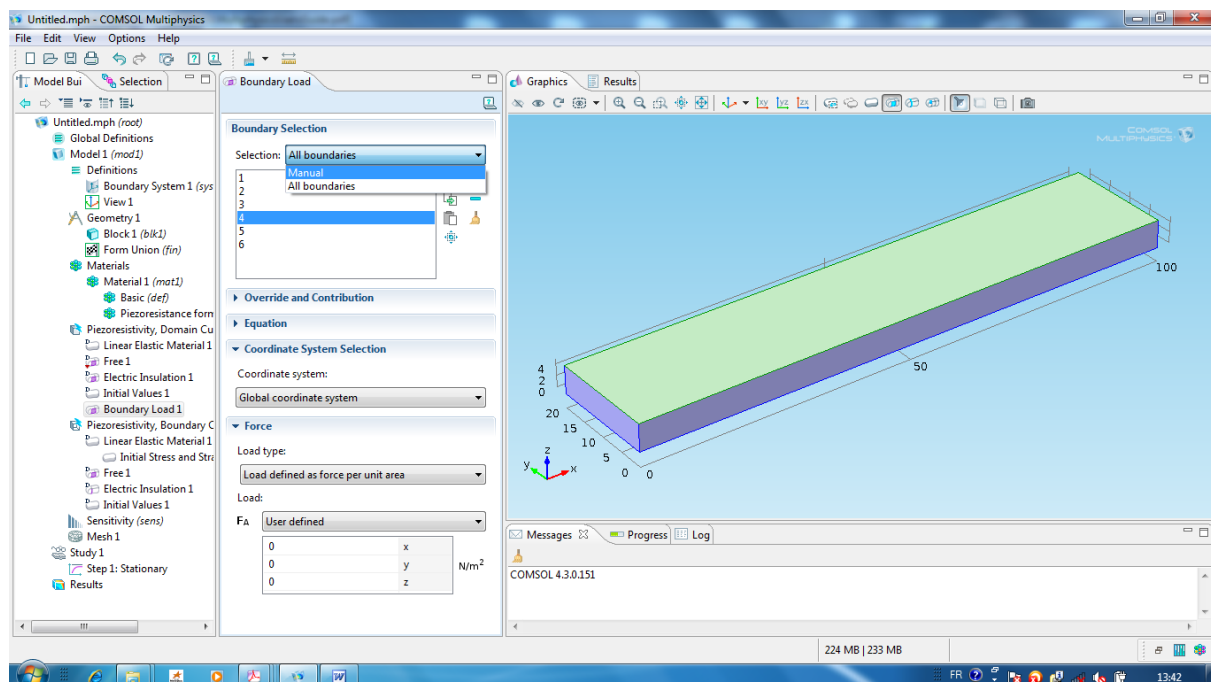


Figure (III-4) : Sélection des conditions aux limites [29].

III-5) Création de maille ou maillage

Un maillage est une partition du modèle de la géométrie en petites unités de formes simples. Nous pouvons créer un maillage libre dans Comsol Multiphysics en cliquant sur le bouton Initialiser Mesh sur la barre d'outils principale. Il peut être utilisé sur tous types de géométrie. Il crée des maillages non structurés qui n'ont pas de restrictions en termes de distribution des éléments.

➤ *Eléments de Maille*

Pour une géométrie 3D le générateur de maille divise les sous-domaines en éléments triangulaires ou quadrangulaires de maille. Si la frontière est courbée, ces éléments représentent seulement une approximation de la géométrie originale. Les côtés des triangles et des quadrangulaires s'appellent les bords de maille, et leurs coins sont des sommets de maille. Un bord de maille ne doit pas contenir des sommets de maille dans son intérieur. De même, les frontières définies dans la géométrie sont divisées (approximativement) dans des bords de Maille.

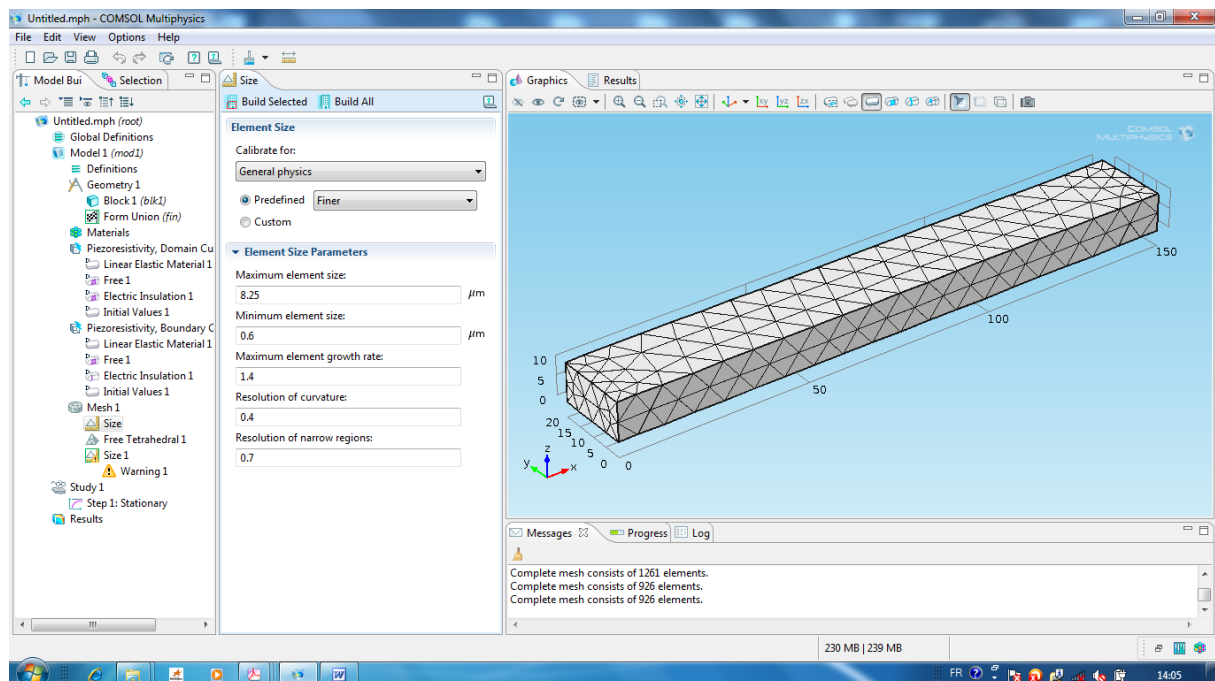


Figure (III-5) : création de mailles (maillage)[29].

Comsol Multiphysics peut non seulement faire un maillage de Delaunay triangulaire, mais aussi des maillages différents (plus réguliers comme le maillage de Poisson par exemple ou bien d'un maillage quadrangle selon la géométrie du domaine) plus préférable dans certains cas. De plus, on peut aussi obtenir des maillages adaptatifs ou anisotropiques où le nombre d'éléments est bien plus élevé au voisinage de singularités ou bien en des endroits où l'on a besoin de plus de précisions sur la solution.

III-6) Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est recommandé d'examiner les différents solveurs de Comsol Multiphysics ainsi que les paramètres pour choisir le meilleur pour une application donnée. De même, lors de la résolution d'un problème multiphysique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables. PDE tool inclut un ensemble de *solver* pour des problèmes à la base de PDE. Les types disponibles sont mentionnés ci-dessous :

- *Stationary solver* (pour la résolution de PDE Stationnaire linéaire ou non linéaire).
- *Time-dependent solver* (pour la résolution de PDE dépendante du Temps linéaire ou non linéaire).
- *Eigenvalue solver* (Pour la résolution de PDE par Valeurs Propres).
- *Parametric solver* (pour la résolution stationnaire de problèmes PDE -linéaire ou non linéaire- dépendant d'un Paramètre).
- *Adaptive solver* (Pour la résolution Stationnaire ou de valeurs propres de problèmes PDE linéaire ou non linéaire avec raffinement adaptatif de maillage).

III-6-1) Sélection du type d'analyse

Beaucoup de modes d'application suggèrent un ensemble de types d'analyse comme *propriété de mode d'application*. Les types d'analyse possibles varient avec le domaine d'application. Types que vous pouvez compter voir inclure stationnaire, eigenfrequency, coupure, dépendant du temps, et analyses paramétriques. Nous pouvons choisir le type d'analyse en choisissant la plupart des modes d'application dans le navigateur modèle. Pour changer le type d'analyse on ouvre la zone de dialogue de *propriétés de mode d'application* ou à partir de la liste d'analyse dans la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

Les types d'analyse souvent à installation de diverses équations en mode d'application, et le type suggèrent également un solutionneur de défaut. Pour dépasser ce défaut, allez à la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

Faire ainsi peut avoir comme conséquence un arrangement d'équation qui est incompatible avec le solveur que vous choisissez. Vous pouvez désactiver le choix automatique de solveur basé sur le type d'analyse en dégageant la boîte de contrôle choisie automatiquement de solveur sous la liste d'analyse dans la zone de dialogue de paramètres de solveur.

III-6-2) Progression de la résolution

Quand nous résolvons un problème il est utile de savoir ce qui vient après. Dans ce but Comsol Multiphysics fournit une fenêtre de progression. Elle apparaît quand on fait le maillage d'une géométrie, lors de la résolution d'un problème, ou en créant un rapport modèle.

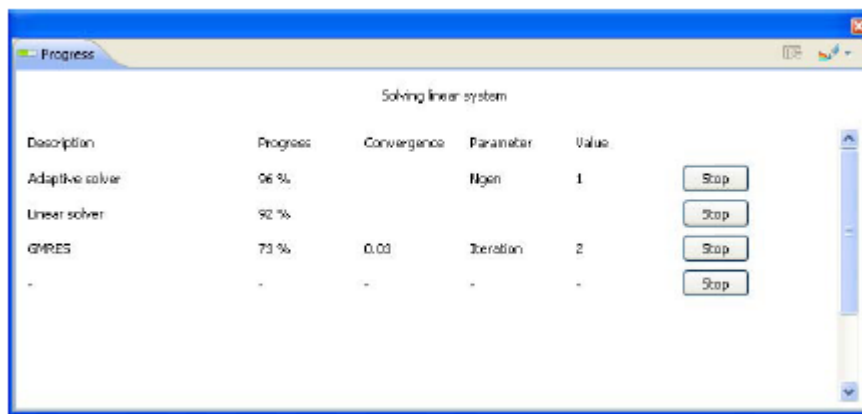


Figure (III-6): Progression de l'exécution [29].

Au dessus de la fenêtre de progression nous pouvons voir ce qui se produit à l'heure actuelle avec l'évaluation du temps restant.

Le champ de description montre le nom du solveur, le champ de progrès montre une évaluation du progrès du solveur, et le champ de convergence montre une évaluation de la convergence du solveur si disponible. Les champs de paramètre et de valeur contiennent l'information solveur-dépendante : le solveur adaptatif montre le nombre de génération adaptatif ; le solveur dépendant du temps montre le temps ; le solveur paramétrique montre la valeur de paramètre ; le solveur non linéaire et les solveurs de système linéaires itératifs montrent le nombre d'itération.

III-7) Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les étapes principales pour une simulation COMSOL. Ce logiciel multidisciplinaire apporte depuis longtemps une solution innovante et pluridisciplinaire à une meilleure compréhension de phénomènes physiques tel que la piézoélectricité. Ce logiciel combine, puissance et souplesse pour simuler des applications combinant un ou plusieurs phénomènes physique, avec des possibilités de couplage illimités

Chapitre 4
résultats de la simulation
d'un microlevier
piézoressistif

IV-1) Introduction

Nous nous proposons, dans ce chapitre, d'étudier les propriétés mécaniques et électriques du microlevier piézorésistif. En effet, il constitue un élément de base dans un grand nombre d'applications des microsystèmes MEMS. Le microlevier piézorésistif joue le rôle d'un capteur de force qui transforme généralement une déformation mécanique en un signal électrique. Dans ce chapitre, nous nous proposons de simuler le comportement mécanique du microlevier piézorésistif et d'en déduire sa électrique.

IV-2) Principe de fonctionnement

Un capteur de force à détection piézorésistive est un capteur composite. Un microlevier constitue le corps d'épreuve qui se déforme sous l'effet d'une force appliquée. Une jauge piézorésistive en surface du corps d'épreuve forme un conditionneur passif qui permet de détecter la déformation du microlevier qui sera transformé en variation de résistance.

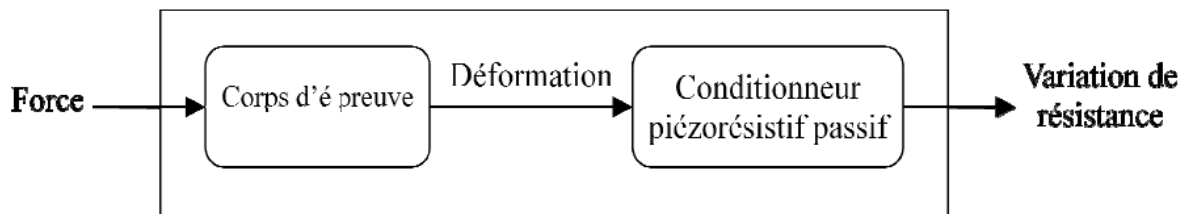


Figure (IV-1) : Structure d'un capteur de force piézorésistif.

IV-3) Structure simulée

IV-3 -1) Paramètres géométriques

Lorsque nous évoquons le terme de "microlevier", nous considérons en fait une micropoutre encastrée à une extrémité et libre à l'autre, nous considérerons que la section de la poutre est rectangulaire et constante. Les paramètres géométriques caractérisant le microlevier sont : la longueur de la structure (selon l'axe x) notée L, sa largeur l (selon l'axe y) et l'épaisseur e (selon l'axe z)

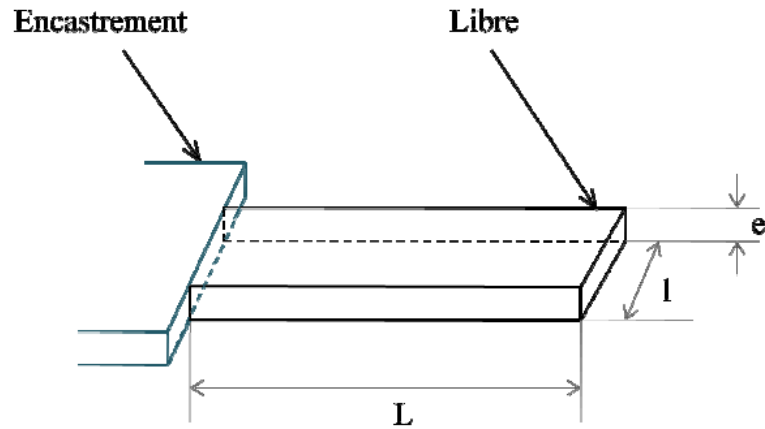
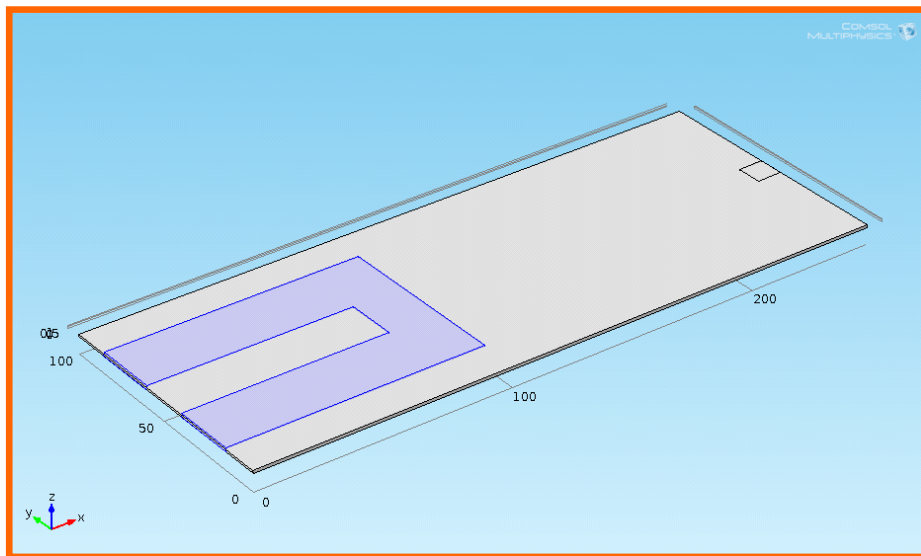


Figure (IV-2) : paramètres géométriques.

IV-3 -2) Propriétés des matériaux [30]

La structure simulée est constituée d'un microlevier de SiO₂ rectangulaire avec une double patte de Silicium piezo-resistif dont les propriétés sont regroupés dans le tableau suivant :



paramètres	matériels	
	Si	SiO ₂
Young Modulus (MPa)	1.30191×10^5	7.0×10^4
Coefficient de Poisson	0.278	0.17

IV-4) Justification du choix du matériau du microlevier

La figure 3 représente la courbe de déplacement maximum du microlevier pour plusieurs valeurs de la force appliquée allant de 25 μm à 250 μm , et ce pour deux différents types de matériaux à savoir le silicium et le SiO_2 .

A partir de cette courbe on peut remarquer que le microlevier en SiO_2 fournit un plus grand déplacement par rapport à celui en silicium. Ceci va justifier l'utilisation du SiO_2 comme matériau de la micro poutre pour notre capteur simulé.

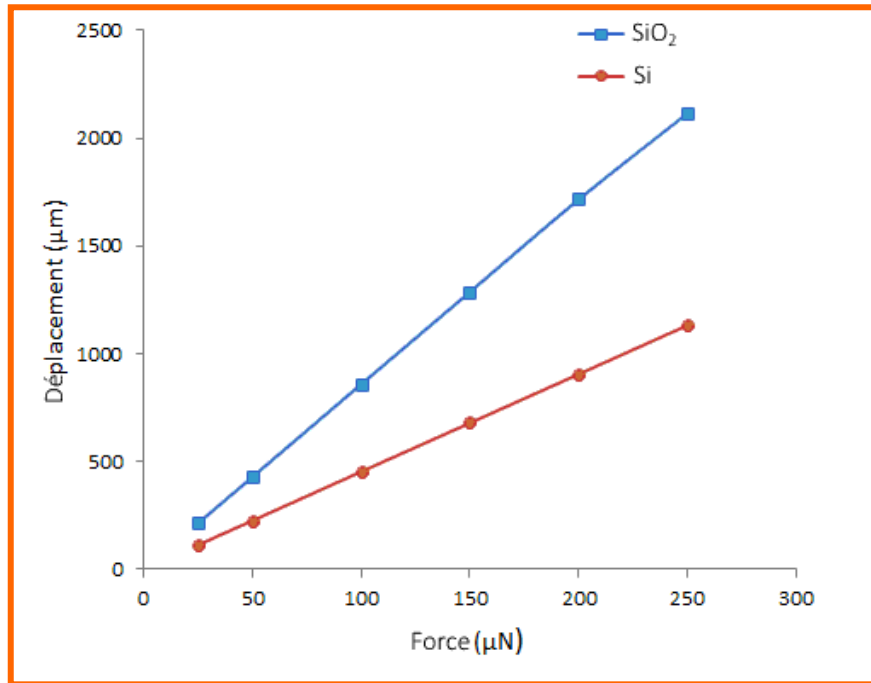
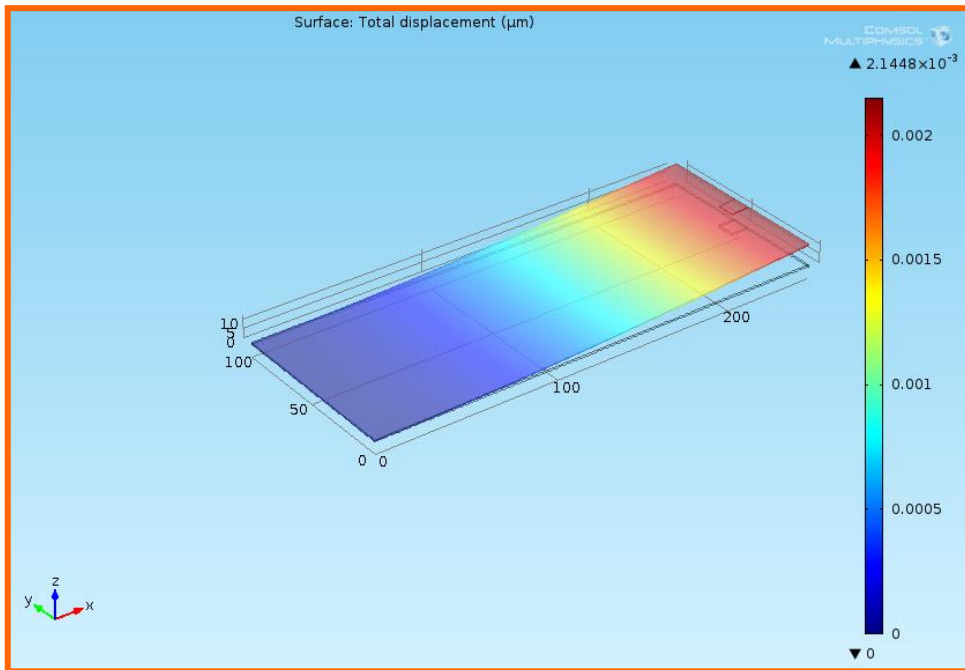


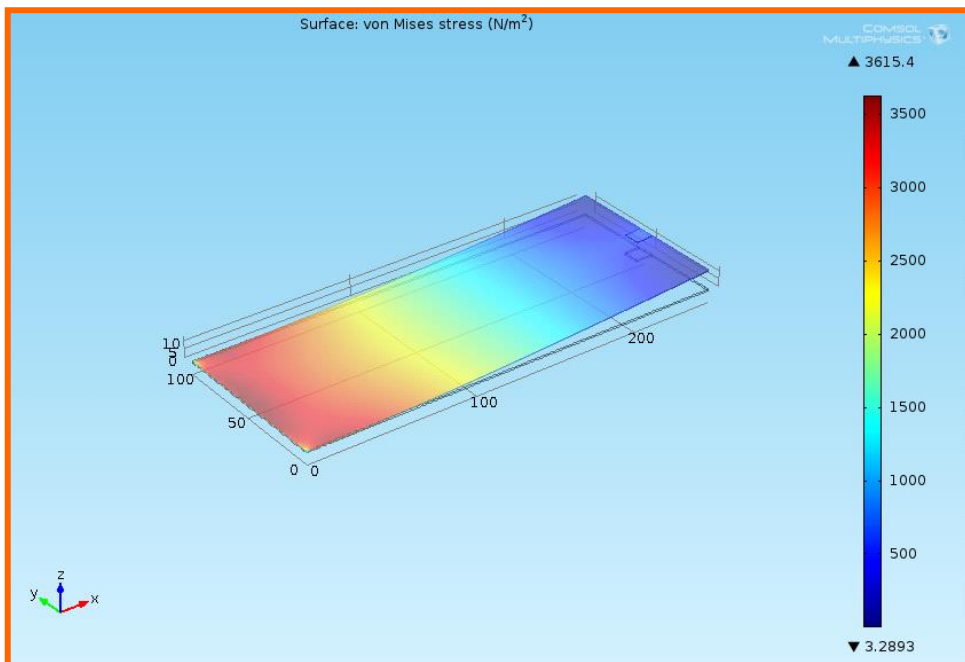
Figure (IV -3) : courbe de déplacement pour deux microleviers en Si et en SiO_2

IV-5) Etude du microlevier en SiO_2

Dans le paragraphe suivant nous étudions le cas d'un microlevier en SiO_2 .



a)



b)

**Figure (IV -4) a) déplacement maximum
b) stress**

La figure 4a) représente l'image 3D de notre microlevier avec la distribution en couleurs du déplacement subit dans les différents endroits du microlevier. On remarque que le déplacement maximum se situe à l'extrémité libre du microlevier, et pour une force de 250pN et une longueur de 250um le déplacement max est de l'ordre de 0.00124 um.

La figure 4b) représente l'image 3D du microlevier avec une distribution en couleur du stress exercé par une force F de l'ordre de 250pN sur les différentes parties de la structure. On peut remarquer ici que contrairement au déplacement l'image de stress montre une valeur maximale juste à l'encastrement, dans notre cas cette valeur est de l'ordre de 3615.4N/m².

Ces résultats nous amènent à choisir l'endroit de la piezoresistance au niveau de l'encastrement du microlevier. Figure 5 :

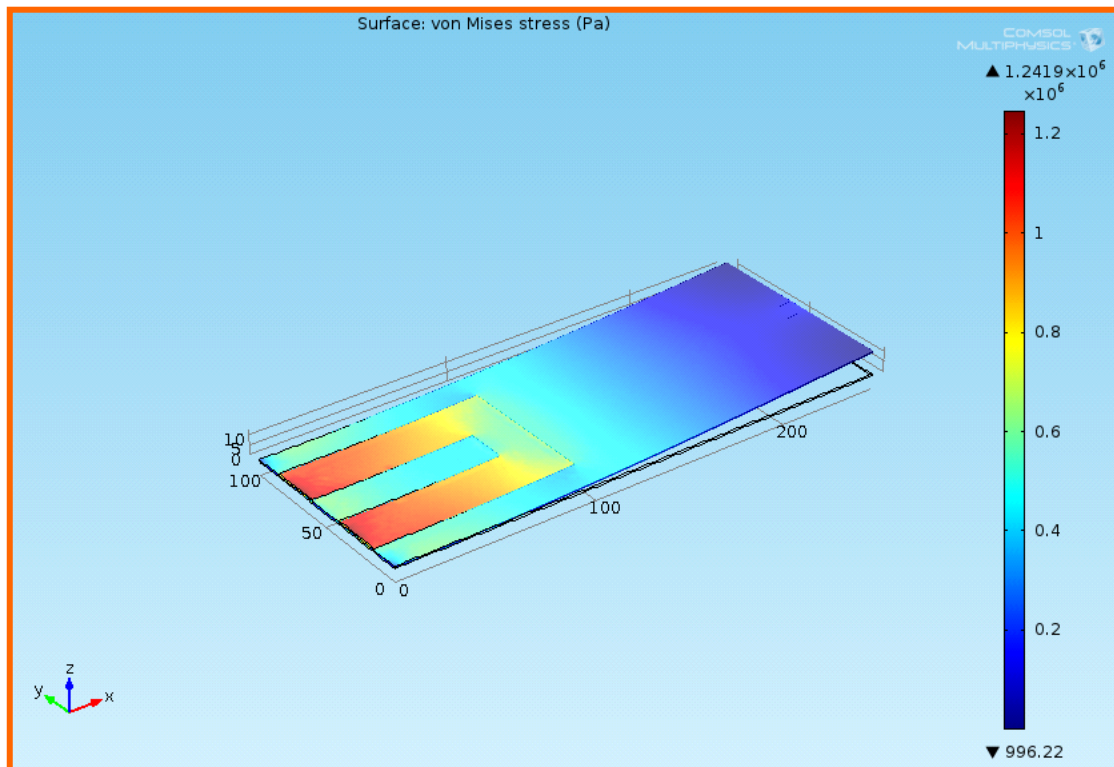


Figure (IV -5) : emplacement du piezoresistor

IV-5 -1) Influence de la longueur du microlevier sur le déplacement :

La figure 6 représente l'effet de la longueur du microlevier sur le déplacement maximum pour une force appliquée de 250pN.

On peut remarquer clairement que plus la longueur du microlevier augmente plus son déplacement max augmente aussi. Toutefois il faut faire un compromis avec la miniaturisation désirée dans la microélectronique et la micro fabrication.

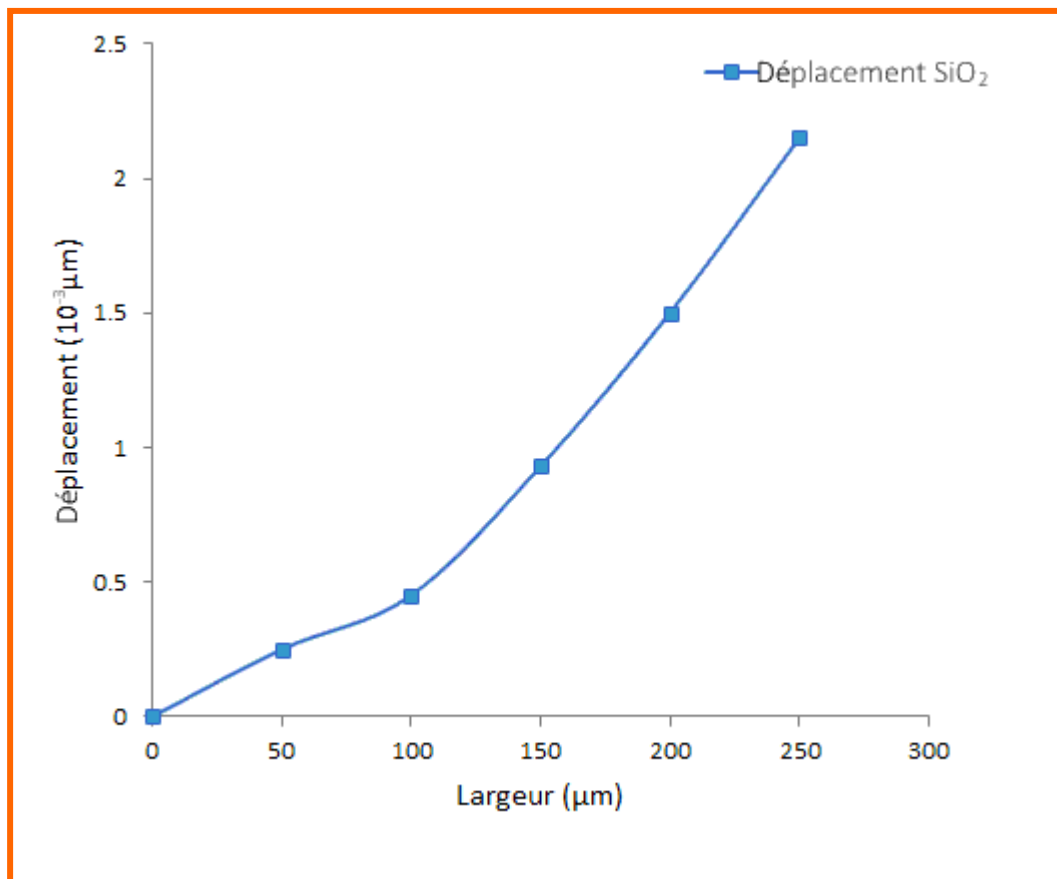


Figure (IV -6) : influence de la longueur du microlevier

IV-5 -2) Influence de l'épaisseur du microlevier et du piezoresistor**IV-5 -2 -1) Influence de l'épaisseur sur le déplacement**

La figure 7 représente la variation du déplacement maximum du microlevier en SiO₂ de longueur de 250μm en fonction de son épaisseur variant entre 1μm et 4μm, pour des valeurs de l'épaisseur du piezoresistor allant de 0.2μm jusqu'à 1μm.

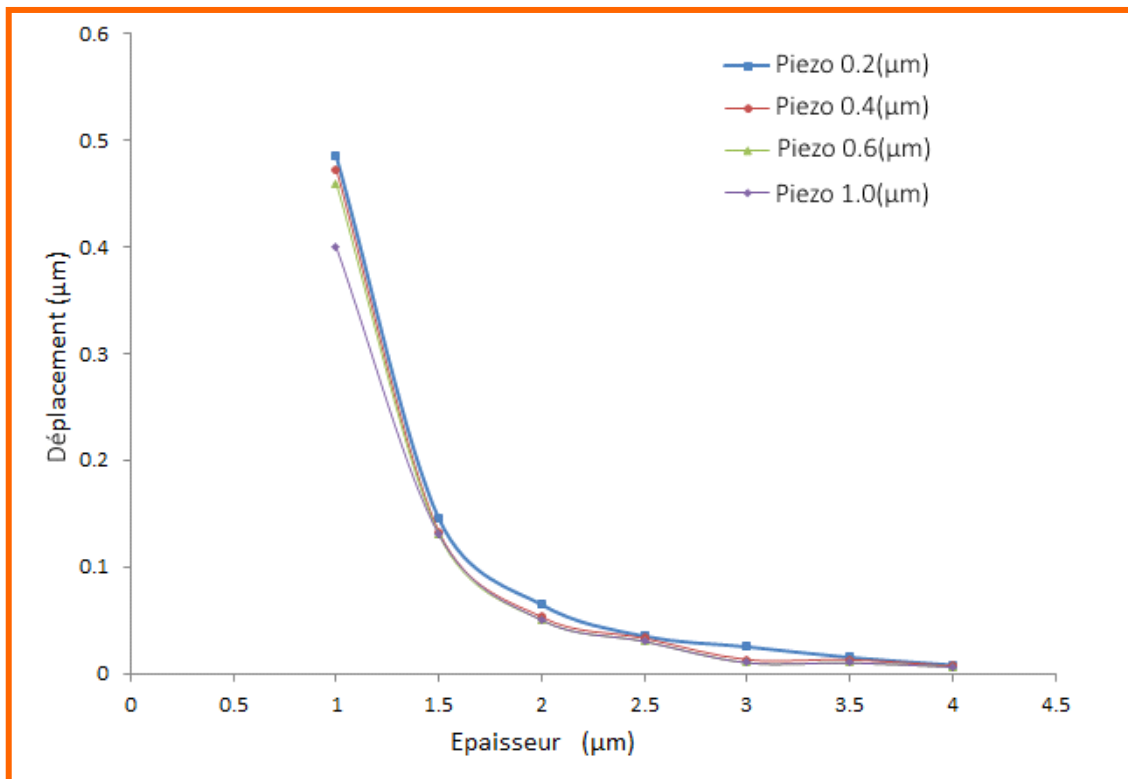


Figure (IV -7): influence des épaisseurs sur le déplacement

Sur cette figure on peut remarquer que le déplacement maximum du microlevier diminue pour une augmentation des deux épaisseurs, sa valeur optimale est atteinte pour les plus petites valeur des épaisseurs c'est-à-dire elle est de 0.48μm pour une épaisseur du microlevier de 1μm et une épaisseur du piezoresistor de 0.2μm.

IV-5 -2 -2) Influence de l'épaisseur sur le stress maximum

La figure 8 représente la variation du stress maximum du microlevier en SiO₂ de longueur de 250μm en fonction de son épaisseur variant entre 1μm et 4μm, pour des valeurs de l'épaisseur du piezoresistor allant de 0.2μm jusqu'à 1μm.

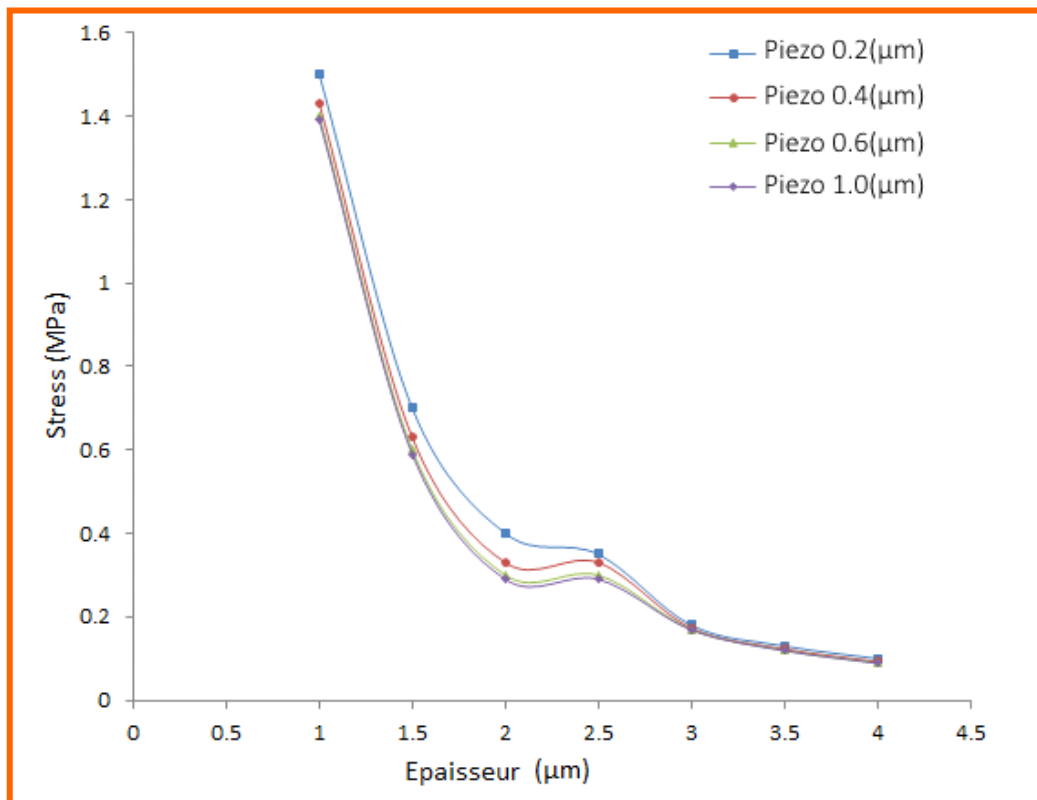


Figure (IV -8) : influence des épaisseurs sur le stress

Sur cette figure on peut remarquer un comportement similaire à celui du déplacement. Le maximum de stress obtenu est de valeur de 1.5Mpa et est obtenue pour des valeurs de l'épaisseur du microlevier de 1μm et une épaisseur du piezoresistif de 0.2 μm.

IV-6) Etude de la sensibilité**IV-6 -1) Influence de la longueur du microlevier**

La figure 9 représente la variation de la sensibilité du piezoresistor en fonction de la force appliquée variant entre 50pN et 250pN, pour des valeurs de la longueur du microlevier allant de 250 μm jusqu'à 400 μm .

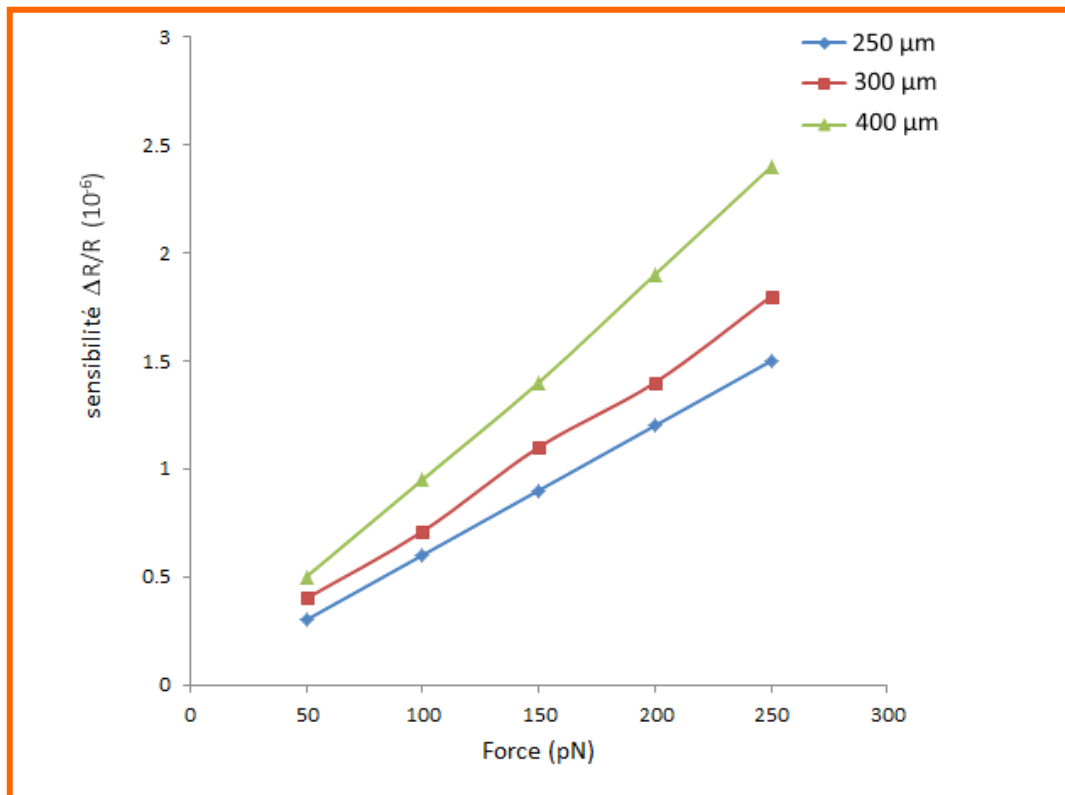


Figure (IV -9) : Influence de la longueur du microlevier

Sur cette figure on peut remarquer une variation linéaire de la sensibilité avec la force appliquée. D'autre part l'augmentation de la longueur du microlevier implique une augmentation de la sensibilité à cause de l'augmentation du déplacement.

IV-6 -2) Influence de l'épaisseur [30]

La figure10 représente la variation de la sensibilité du piezoresistor en Si en fonction de l'épaisseur du microlevier variant entre 1 μ m et 4 μ m, pour des valeurs son l'épaisseur du allant de 0.2 μ m jusqu'à 1 μ m.

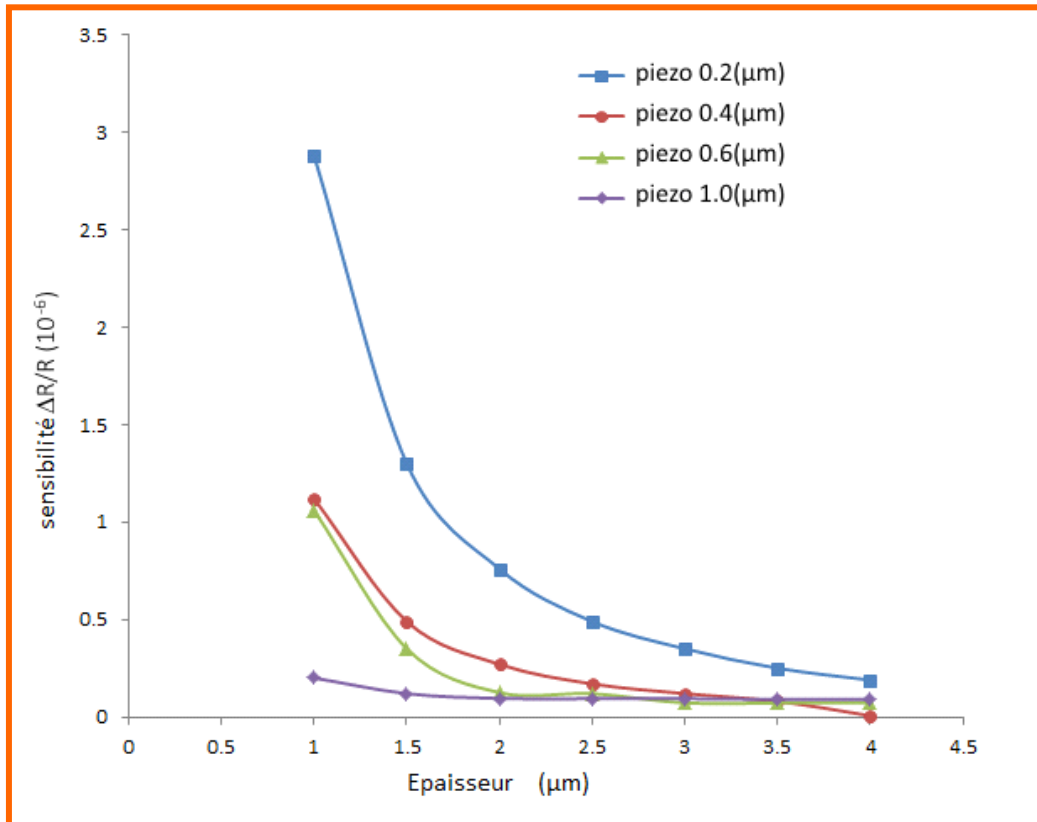


Figure (IV -10) : influence des épaisseurs sur la sensibilité

Cette figure montre une diminution de la sensibilité pour des valeurs élevée des deux épaisseurs. A partir de ces courbes on peut conclure que : pour avoir un maximum de sensibilité les épaisseurs du microlevier et du piezoresistor doivent être minime.

IV-6 -3) Influence de la surface de la pointe de force

La figure 11 représente l'image 3D du microlevier avec une distribution en couleur du stress exercé par une force F de l'ordre de 250Pn sur une surface de pointe variable, 10×10 ; 50×50 ; 100×60 , respectivement. On peut remarquer que : plus la surface de la pointe augmente plus le stress diffuse dans le piezoresistor, avec une diminution de sa valeur maximale.

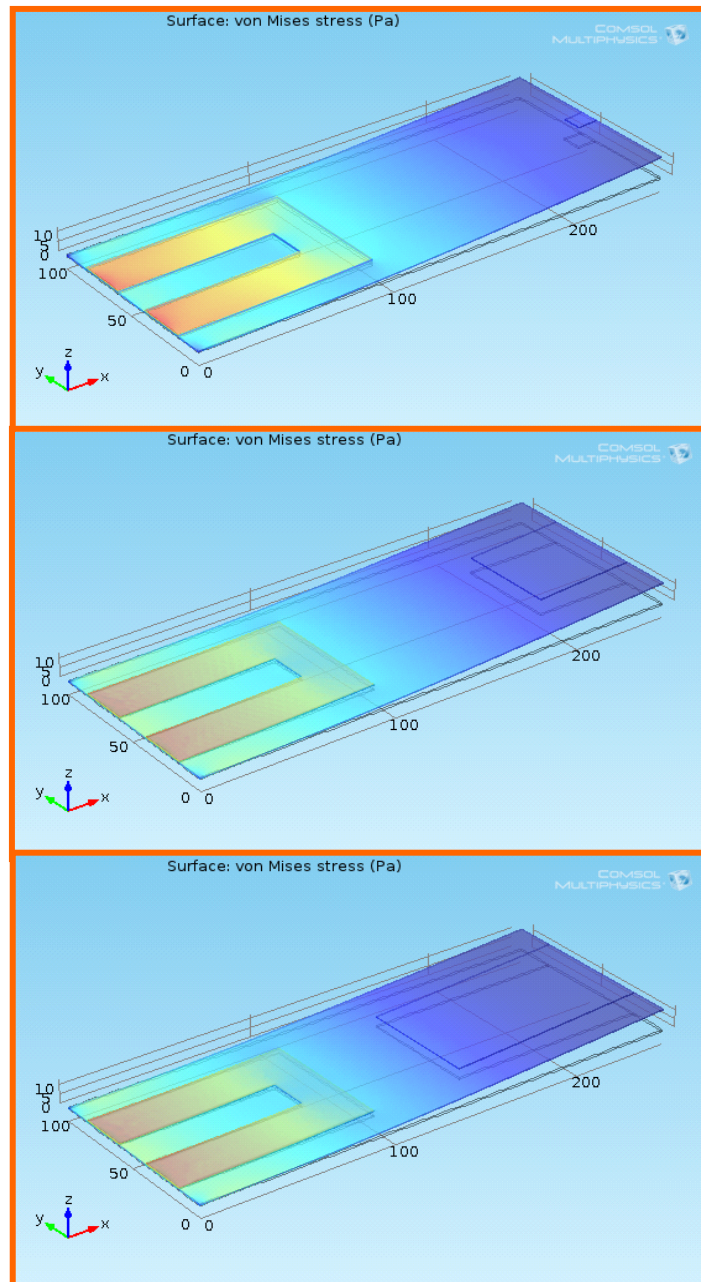


Figure (IV -11) : images 3D de l'influence de la surface de la pointe sur la sensibilité

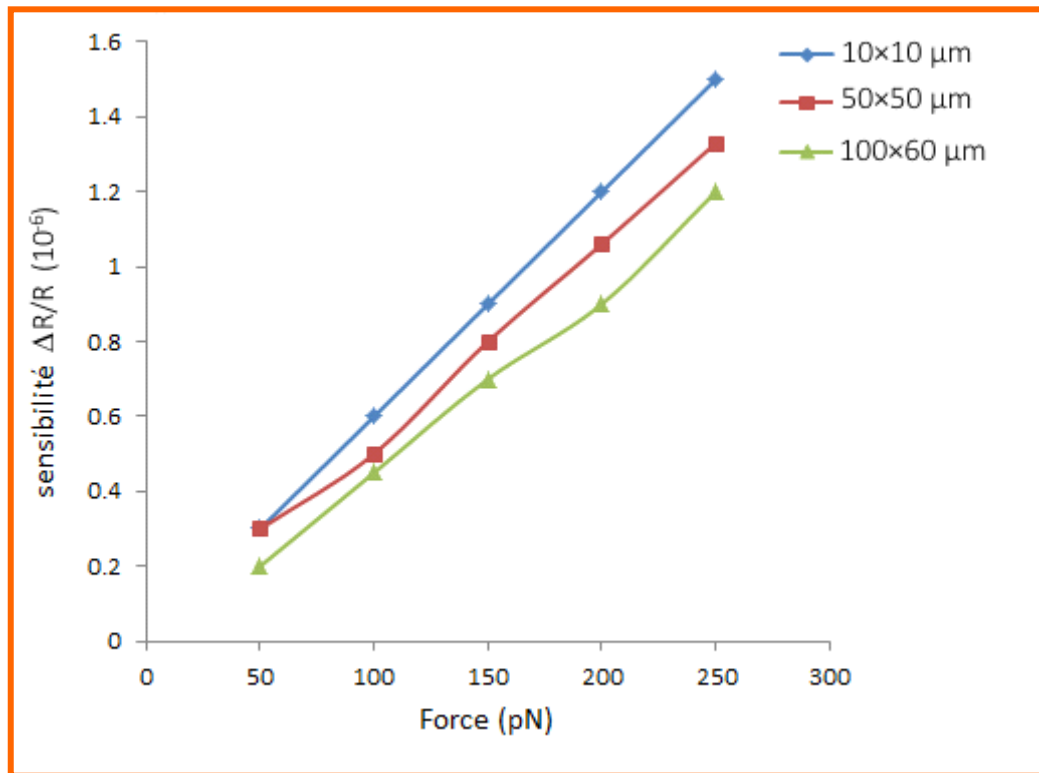


Figure (IV -12) : influence de la surface de pointe sur la sensibilité

Sur la figure 12 est présentée la variation de la sensibilité en fonction de la force exercée allant de 50um au 250um, et ce pour des valeur différentes de surface de la pointe.

On peut remarquer sur cette figure que plus la surface est grande la sensibilité diminue pour la même valeur de la force.

IV-6 -4) Influence de la longueur de piezorésistor:

La figure 13 représente la variation de la sensibilité du piezoresistor en Si en fonction la longueur 50um,100um et 150um :

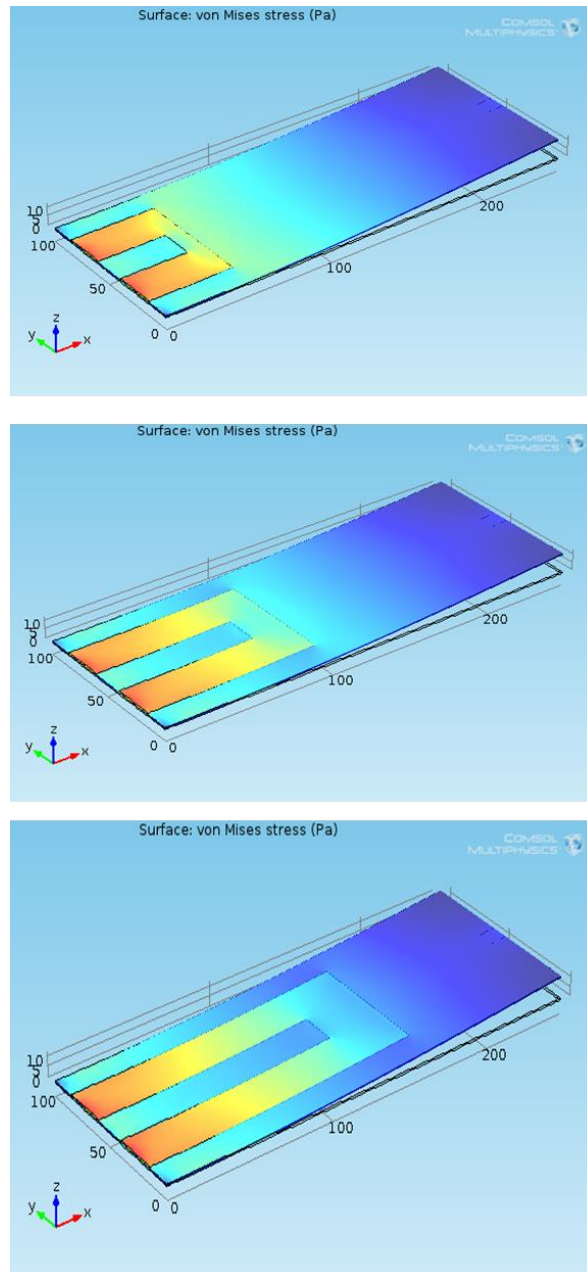


Figure (IV -13) : images 3D de l'influence de la longueur de piezorésistor

La figure 14 représente la variation de la sensibilité du piezoresistor en fonction de la longueur :

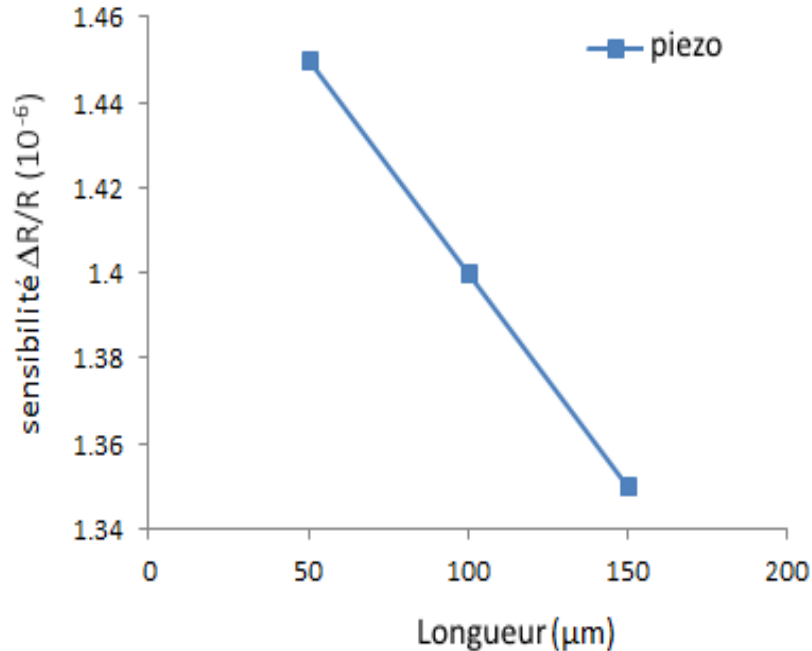


Figure (IV -14) : influence de la longueur de piezorésistor

A partir de ces courbe on peut conclure que : pour avoir un maximum de sensibilité la longueur du piezoresistor doivent être minime.

IV-7) Conclusion :

Pour conclusion : dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de notre structure piezoresistif avec le logiciel multiphysique COMSOL. Nous avons étudié dans ce chapitre l'effet des paramètres géométriques du microlevier sur les caractéristiques mécanique et électrique du capteur piezoresistif de force.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à l'étude et la simulation d'un capteur de force piezoresistif à structure microlevier utilisé dans les microsystèmes MEMS pour des applications diverses.

Notre simulation est basée sur la méthode des éléments finis utilisée dans le logiciel multiphysique COMSOL. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques d'un microlevier en SiO_2 avec son piézoresistor en Si sur les caractéristiques mécaniques et électriques du capteur. Nous avons étudié entre autre l'influence de l'épaisseur du microlevier et du piézoresistor sur la sensibilité le facteur le plus important dans les capteurs.

Bibliographie

- [1] : M. BENMESSAOUD «Conception et Modélisation des MEMS : Application aux Accéléromètres », These de doctorat, universite d’Oran 2014.
- [2] : S. Labarthe «CONCEPTION ET MODELISATION D'UN NANOCAPTEUR DE MASSE PAR DETECTION PIEZORESISTIVE ». Thèse de doctorat, université de Grenoble , 2010.
- [3] : Z. WANG «Modélisation de la Piézorésistivité du Silicium: Application à la Simulation de Dispositifs M.O.S. » Doctorat en electronique, université de Lille, 1994.
- [4] : C. S. Smith, «Piezoresistance effect in silicon and germanium», Phys. Rev., Vol. 94 No. 1 (1954) 42-49
- [5] : G. Bir et G. Pikus," Symmetry and strain-induced effects in semiconductors ", Wiley, New York (1974).
- [6] : W. Shockley et J. Bardeen, ' Energy bands and mobilities in monatomic semiconductors ', Phys. Rev., Vol. 77 (1950) 407-408.
- [7] : M. Ras lain, ‘Contribution à l’identification des paramètres de non idéalité dans les capteurs de pression piézorésistifs au Silicium’ Doctorat en Sciences, universite de constantine, 2009.
- [8] : C.S.Smith, ‘ Piezoresistance effects in Germanium and Silicon’ Physical Review , Vol.94, N°1 , p.42, April 1954.
- [10] : A. BENICHOU , ‘CONCEPTION ET MODELISATION D’UN ACCELEROMETRE MICROELECTRONIQUE TRIAXIAL’, Magister en Microélectronique, universite de Tlemcen, 2012.
- [11] : J. VERSTRAETEN, ‘CONCEPTION D'UN MICROCAPTEUR DE FORCE 3-AXES POUR TISSUS MOUS’, doctorat en genie electrique, université de SHERBROOKE, 2010
- [12] BOGUE, R. (2007) MEMS sensors : past, present and future, Sensor Review, vol. 27, p. 7-13
- [13] : ENGEL, J., ACK CHEN, LIU, C. (2003b) A polymer-based MEMS multi-modal sensory skin, Polymer Preprints, vol. 44, p. 534-535.

- [14] : R. Lakhmi, ‘Etude de micropoutres serigraphiées pour des applications capteurs’, doctorat en électronique, UNIVERSITÉ BORDEAUX I, 2011.
- [15]: T. Thundat, R.J. Warmack, G.Y. Chen, and D.P. Allison. Thermal and ambient-induced deflections of scanning force microscope cantilevers. *Applied Physics Letters*, 64:2894–2896, 1994.
- [16]: E. Peiner, A. Tibrewala, R. Bandorf, S. Biehl, H. Luthje, and L. Doering. Micro force sensor with piezoresistive amorphous carbon strain gauge. *Sensors and Actuators A*, 130-131:75-82, 2006.
- [17] : A. Greve, S. Keller, A.L. Vig, A. Kristensen, D. Larsson, K. Yvind, J.M. Hvam, M. Cerruti, A. Majumdar, and A. Boisen. Thermoplastic microcantilevers fabricated by nanoimprint lithography. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 20:015009, 2010.
- [18] : D. Bachmann, B. Schoberle, S. Kuhne, Y. Leiner, and C. Hierold. Fabrication and characterization of folded su-8 suspensions for mems applications. *Sensors and Actuators A*, 130-131:379-386, 2006.
- [19]: M. Gongora-Rubio, L.M. Sola-Laguna, P.J. Moffett, and J.J. Santiago-Avilés. The utilization of low temperature co-fired ceramics (ltcc-ml) technology for meso-scale ems, a simple thermistor based flow sensor. *Sensors and Actuators A*, 73:215–221, 1999.
- [20] : H. Birol, T. Maeder, and P. Ryser. Processing of graphite-based sacrificial layer for microfabrication of low temperature co-fired ceramics (ltcc). *Sensors and Actuators A*, 130-131:560-567, 2006.
- [21] : H. Birol, M. Boers, T. Maeder, G. Corradini, and P. Ryser. Design and processing of low-range piezoresistive ltcc force sensors. *XXIX International Conference of IMAPS Poland Chapter, Koszalin-Darlowko*, 2005.
- [22]: S.L. Kok, N.M. White, and N.R. Harris. Free-standing thick-film piezoelectric device. *Electronics Letters*, 44:280 – 281, 2008.
- [23] : C. Lucat, P. Ginet, F. Ménil, and H. Debéda. Préparation de microcomposants multicouches par la méthode de la couche épaisse sacrificielle. *WO07077397 CNRS Patent*, 2007.
- [24] : E. Peiner and L. Doering. Force calibration of stylus instruments using silicon microcantilevers. *Sensors and Actuators A*, 123-124:137-145, 2005.

- [25] : R. Perez, N. Chaillet, K. Domanski, P. Janus, and P. Grabiec. Fabrication, modeling and integration of a silicon technology for sensor in a piezoelectric micromanipulator. *Sensors and actuators A : Physical*, Vol. 128:pp 367–375, 2006.
- [26] : A. Johansson, M. Calleja, P.A. Rasmussen, and A. Boisen. Su-8 cantilever sensor system with integrated readout. *Sensors and Actuators A*, 123-124:111-115, 2005.
- [27] : R.H. Ibbotson, R.J. Dunn, V. Djakov, P.K. Ferrigno, and S.E. Huq. Polyimide microcantilever surface stress sensor using low-cost, rapidly-interchangeable, spring-loaded microprobe connections. *Microelectronic Engineering*, 85:1314-1317, 2008.
- [28] : SA. Kouras, ‘Etude et simulation d’un micro-capteur chimique à base de FET’ Magister en électronique, universite de Batna, 2011
- [29] : M. MELOUKA, ‘Simulation de l'effet d'insertion de turbulateurs au sein d'un écoulement de fluide dans une conduite, du point vu transfert de chaleur et perte de charge’, Master professionnél Genie mécanique, universite de Ourgla, 2014
- [30] : Rosminazuin Ab. Rahim, Badariah Bais, and Burhanuddin Yeop Majlis. ‘Design and Analysis of MEMS Piezoresistive SiO₂ Cantilever-based Sensor with Stress Concentration Region for Biosensing Applications’. Institute of Microengineering and Nanoelectronic Universiti Kebangsaan Malaysia.2008

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER EN ELECTRONIQUE

OPTION : IMI

Proposé et dirigé par :

Mr.saada khelkhal fayçal

Realisé par :

A. AMOURA

THEME

ETUDE D'UN CAPTEUR DE FORCE PIEZORESISTIF

Résumé

L'objectif du travail effectué dans ce mémoire est l'étude et la simulation d'un capteur de force. Notre capteur est constitué d'un microlevier en SiO_2 sur lequel est implanté une résistance variable en Si. Les caractéristiques mécaniques du microlevier à savoir le stress et le déplacement sont simulés par le logiciel COMSOL, d'autre part on étudier l'influence des paramètres géométriques sur la sensibilité $\Delta R/R$.

Mots clés : capteur de force, microlevier, piezoresistivité, sensibilité, COMSOL.