

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : INSTRUMENTATION ET MAINTENANCE INDUSTRIEL

THEME

**Etude et simulation d'un capteur de
pression capacitif**

Proposé et dirigé par :

➤ MR.SAADA KHALKHAL FAYCEL

Réalisé par :

LAOUF ISLAM

N° D'ordre: 2016/IMI09 /89/385

PROMOTION: JUIN 2016

Remerciements



Avant tout, je remercie **الله** le tout puissant,

Pour m'avoir assisté et armé de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électronique De M'sila sous la direction de du **Mr laadjal**. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude pour le soutien constant qu'il m'a apporté tout au long de mon travail et pour tous les principes qu'il n'a cessé de me transmettre, la rigueur scientifique, L'objectivité et sa confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ces années

Ainsi que ses conseils précieux,

Je remercie infiniment mon encadreur pour son attention, ces conseille et ça précieuse aide. **Mr. saada khalkhal faycel**

Mes sincères remerciements vont également aux membres de jury qui m'ont fait honneur de participer à l'examen de ce travail.

Je remercie mes enseignants de départements sciences de technologie de M'sila pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux du département d'électronique et IMI.

Je tiens à exprimer ma très grande gratitude, et ma profonde affection à mes chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien,

Durant toutes ces années d'études. Sans oublier mes frères

Et mes sœurs pour leurs encouragements, et leurs aides.

Je remercie également tous mes amis et camarades,

Pour leurs encouragements

Et leur précieux soutien.



Dédicaces



*A mon cher père, **Abdrazzak***

*A ma chère mère, **noura***

A mes grands-parents

A mes frères nidhal, rabeih

Et mes sœurs samah, soundous ,

A ma tante samah et son mari mounir,

Et leur filles nasrin et malek

A mes amis, Hamad, sohayb, Abdou, hamza, samir, bilel, djalol.wa



Introduction Générale

1

Chapitre I
caractéristiques métrologique des capteurs

I.1. Introduction	4
I.2. Généralités et définitions	4
I.2.1. Mesurande	4
I.2.2. Capteur	4
I.2.3. Chaîne de mesure	5
I.3. Types de grandeur physique	6
I.4. Etalonnage des capteurs	7
I.5. Classification des capteurs	7
I.5.1. Capteurs passifs	7
I.5.2. Capteurs actifs	8
I.6. Caractéristiques d'un capteur : définition métrologique	8
I.6.1. Etendue de la mesure	8
I.6.2. Seuil .	9
I.6.3. Hystérésis .	9
I.6.4. Résolution .	10
I.6.5. Caractéristique d'entrée-sortie d'un capteur .	10
I.6.6. Sensibilité .	10
I.6.7. Finesse .	10
I.6.8. Linéarité .	11
I.6.9. Rapidité .	11
I.6.10. Temps de réponse .	12
I.7. Caractéristiques statistiques d'un capteur .	12
I.7.1. Fidélité .	12

I.7.2. Justesse .	12
I.7.3. Précision .	13
I.7.4. Incertitude .	13
I.8. Différents types des capteurs .	13
I.8.1. Capteurs de pression .	13
I.8.2. Capteurs d'accélération .	13
I.8.3. Capteurs d'humidité .	14
I.8.4. Capteurs de position .	14
I.8.5. Capteurs de température .	14
I.9. Méthodes de détection .	14
I.9.1. Détection résistive .	14
I.9.2. Détection capacitive .	15
I.9.3. Détection inductive .	15
I.9.4. Détection piézoélectrique .	15
I.9.5. Détection piézorésistive .	15
I.10. Conclusion.	16

Chapitre II

le capteur de pression capacitive

II.1. Introduction .	18
II.2. Description d'un capteur de pression .	18
II.3. Evolution des principes de détection .	19
II.4. Capteur de pression piezoresistif .	20
II.4.1. Structure d'un capteur de pression piézorésistif.	20
II.4.2. Théorie de la piézorésistivité .	21
II.5. Capteur de pression capacitif.	22
II.5.1. Avantage des capteurs de pression capacitive .	22
II.5.2. Etat de l'art des capteurs de pression capacitif.	22

II.5.3. Principe des capteur de pression capacitif.	24
II.6. Propriétés mécaniques du silicium.	25
II.6.1. Tenseur des contraintes .	25
II.6.2. Tenseur des déformations .	26
II.6.3. Tenseurs d'élasticité - loi de Hooke .	26
II.6.4. Principe de fonctionnement.	27
II.7. Modélisation de la réponse en pression .	28
II.7.1. Calcul de la capacité .	28
II.8. Conclusion .	31

Chapitre III

technologies et fabrication

III.1. Introduction .	33
III.2. Les Structure de type MEMS .	33
III.3. la miniaturisation.	34
III.4. Les capteurs MEMS.	34
III.5. Les principes physiques du microsysteme .	35
III.6. Les principaux procédé de fabrication.	36
III.6.1. L'oxydation .	36
III.6.2 Le dépôt.	36
III.6.3 La lithographie .	37
III.6.4. La gravure .	38
III.7. Réalisation des membranes pour capteur de pression .	39
III.8. Le micro usinage en volume .	40
III.8.1. Le micro-usinage en volume face avant .	40
III.8.2. Le micro-usinage en volume face arrière.	41
III.9. Conclusion.	42

Chapitre IV

Simulation d'un capteur de pression capacitif par COMSOL

IV.1. Introduction	44
IV.2. Les éléments finis	44
IV.2 .1. Principe de la méthode	44
IV.2.2. Etapes de base de la méthode des éléments finis	44
IV.3. Présentation du logiciel COMSOL	45
IV.3.1. L'interface de COMSOL	45
IV.3.2. Modélisation à l'aide de l'interface graphique	46
IV.3.3. Dessin de la Géométrie	46
IV.3.4. Modélisation de la physique et des équations	47
IV.4.Variable et expression	47
IV.4.1.Expression des Variables	48
IV.4.2. Choix des matériaux	48
IV.4.3. Introduction des conditions aux limites	48
IV.5. Création de maille ou maillage	49
IV.6. Résolution du problème	50
IV.6.1. Sélection du type d'analyse	51
IV.6.2.Progression de la résolution	51
IV.7.Simulation d'un capteur de pression capacitif	52
IV.7.1. Structure simulée	52
IV.7.2.Choix du matériau de la membrane	53
IV.8.Influence des paramètres géométriques	54
IV.8.1.Influence de l'épaisseur du diélectrique	54
IV.8.2.Influence sur le déplacement	55
IV.8.3.Influence de l'épaisseur de la membrane	57
IV.8.4.Influence de la température	58
IV.8.5.Influence de la nature du diélectrique	59

IV.9.Conclusion	60
Conclusion Générale	62
Liste des références	63
Liste des figures	
Liste des tableaux	

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Parmi les capteurs les plus courants (température, pression et accélération), les capteurs de pression connaissent, depuis les années 80 un essor de plus en plus important. Ils représentaient déjà, en 1989 un chiffre d'affaires de 750 millions de dollars avec une progression de 20 % par an. Cet essor s'est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium, c'est-à-dire depuis l'utilisation des techniques issues de la micro-électronique[1]. Cette nouvelle filière a inévitablement favorisé un élargissement considérable de leurs domaines d'applications et par suite, a introduit de nouvelles motivations au niveau de leurs cahiers des charges aussi bien économiques que techniques. La pression est un paramètre important dans de nombreuses disciplines comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, etc. Aussi, les capteurs de pression se retrouvent dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de perception, de contrôle ou de mesure.

Dans les années 1990, l'avènement des technologies dites collectives, associé au traitement du silicium, a permis des réductions du coût de fabrication permettant ainsi une « démocratisation » de ces nouveaux produits (microélectronique)[2]. De plus, les qualités mécaniques du silicium et l'usinage collectif relativement simple, qu'il soit chimique (KOH ...) ou physique (gravure plasma, micro-forage), rendent aujourd'hui possible l'industrialisation de certaines microstructures tels que les microcapteurs et microsystèmes visant les marchés de grand volume et de faible coût [3]. La dualité faible taille et faible coût peut permettre de répondre à de nouveaux besoins dans plusieurs domaines notamment la médecine, l'automobile, l'industrie etc. Aujourd'hui, il est clairement établi que les technologies de miniaturisation apportent des avantages incontestables en terme de coût (fort volume), fiabilité (tenue aux chocs, bonne reproductibilité des processus industriels) et possibilité d'intégration (faible taille, excellente compatibilité avec les systèmes microélectroniques usuels).

Malgré l'évolution croissante du domaine des micros capteurs, des microsystèmes et l'avènement des capteurs intelligents « smart sensor », l'étude et la modélisation élémentaire de capteurs de pression restent toujours d'actualité, puisqu'ils sont et resteront toujours l'élément de base de la conception de tout microsystème. C'est pourquoi de nombreux travaux sont en cours afin de les optimiser et d'améliorer leurs performances [2].

Introduction Générale

L'objectif de ce mémoire est l'étude et la simulation d'un capteur de pression capacitif à membrane au silicium.

Dans le premier chapitre, nous dresserons un état de l'art sur les capteurs : classification des capteurs, caractéristiques métrologiques des capteurs et les différents types de capteurs.

Le deuxième chapitre, donne un aperçu général sur les capteurs de pression capacitif et piézorésistif au silicium.

Dans le troisième chapitre, nous nous intéresserons aux techniques de fabrication des micros capteurs à partir des procédés de fabrication utilisés dans la microélectronique.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons nos résultats de simulation. L'outil de simulation utilisé est le logiciel COMSOL Multi physiques, que nous décrivons dans ce chapitre. A partir du modèle établi sous COMSOL, nous déterminons la déflexion de la membrane au silicium de forme carré, et la réponse capacitive à la pression en étudiant l'influence des paramètres géométriques.

Chapitre I

*caractéristiques métrologique
des capteurs*

I.1. Introduction [4]

Dans ce chapitre le principe de fonctionnement ainsi que les principales caractéristiques métrologique des capteurs seront présentés de façon générale.

Lorsqu'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur (généralement électrique), on fait appel à ce que l'on nomme classiquement « capteur ». Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

I.2. Généralités et définitions :**I.2.1. Mesurande :**

C'est la grandeur physique que l'on souhaite mesurer.

I.2.2. Capteur :

Le capteur est le premier élément de la chaîne de mesure. Il transforme les grandeurs physiques ou chimiques non électriques en un signal électrique.

La grandeur à mesurer est appelée mesurande « m ». Le rôle du capteur est donc de convertir « m » en une grandeur électrique qu'on appellera la mesure « s » [5] et qui peut être une impédance (on parle dans ce cas de capteurs passifs) ou une charge, un courant ou une différence de potentiel (ddp) (on parle ici de capteurs actifs).

On parle aussi de transducteur. Il permet de transformer la grandeur physique d'entrée (le mesurande) en une autre grandeur physique de sortie ou en un signal électrique.

La fonction $s = F(m)$ dépend souvent d'autres grandeurs physiques propres à l'environnement (température, humidité, etc.). Ces grandeurs sont appelées grandeurs d'influence.

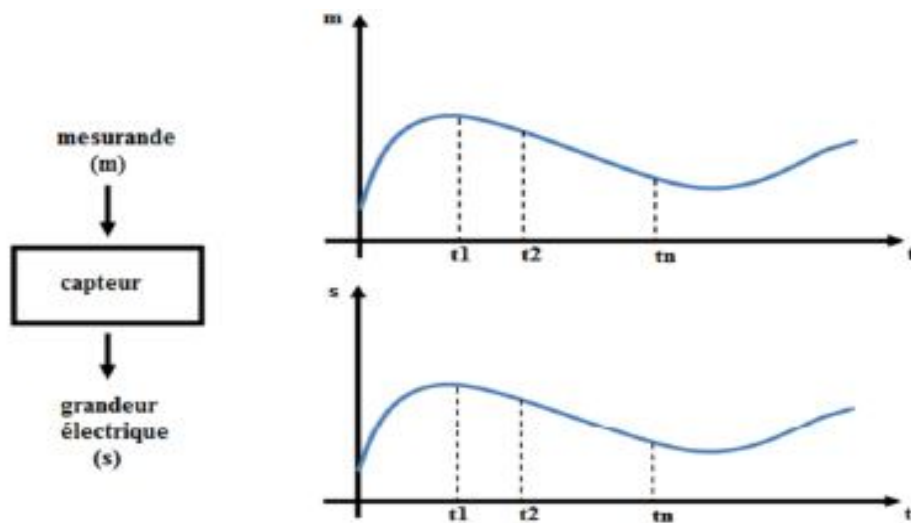


Figure I. 1: Principe d'un capteur [6].

Généralement, on obtient une grandeur de sortie du type électrique. Elle peut être soit :

- Une charge,
- Une tension,
- Un courant,
- Une impédance (R, L, C).

En général, le signal délivré par le capteur n'est pas directement utilisable et a besoin d'être amplifié et adapté. L'ensemble des circuits et appareils qui assure ces opérations est appelé chaîne de mesure et du traitement du signal.

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 : [4][6]

- Transformation du débit en une pression différentielle,
- Transformation de la pression différentielle en la déformation mécanique d'une membrane,

- Transformation de la déformation mécanique en une grandeur électrique (à l'aide d'un piézo-électrique) via un circuit électronique associé.

L'ensemble de ces étapes constitue la chaîne de mesure.

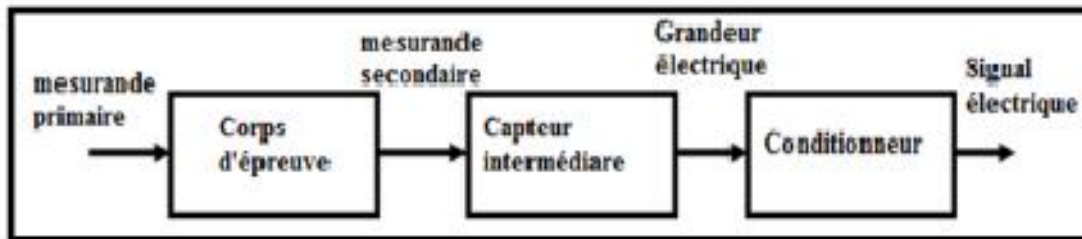


Figure I. 2: Constitution d'une chaîne de mesure classique [6].

Dans la plupart des cas, la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

I.3. Types de grandeur physique [6]:

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles . Chaque capteur s'associera à l'une de ces 6 familles :

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

I.4. Etalonnage des capteurs :

L'étalonnage est l'opération qui établit la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Cette relation peut dépendre non seulement du mesurande mais aussi des grandeurs d'influence. S'il n'y a pas de grandeurs d'influence, l'étalonnage est simple, sinon il est multiple.

I.5. Classification des capteurs :

On peut classer les capteurs en deux grandes familles en fonction de la caractéristique électrique de la grandeur de sortie. Cette classification influe sur le conditionneur qui lui est associé.

[4]

I.5.1. Capteurs passifs :

Le capteur se comporte en sortie comme un dipôle passif qui peut être résistif, capacitif ou inductif.

Le tableau ci-dessous résume, en fonction du mesurande, les effets utilisés pour réaliser la mesure.

Mesurande	Effet utilisé (grandeur de sortie)	Matériaux
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre, semi-conducteurs
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux optique	Résistivité	Semi-conducteurs
Déformation	Résistivité Perméabilité	Alliages nickel Alliages ferromagnétiques
Position	Résistivité	Magnétorésistances : Bismuth, antimoine d'indium
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau I. 1: Effets utilisés pour les capteurs passifs[6].

I.5.2. 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 I.2.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité (thermocouple)	Tension
Flux optique	Photoémission Pyroélectricité	Courant Charge
Force, pression, accélération	Piézoélectricité	Charge
Position	Effet Hall	Tension
Vitesse	induction	Tension

Tableau I. 2: Effets utilisés pour les capteurs actifs[6].

I.6. Caractéristiques d'un capteur : définition métrologique[4] :

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, nous sommes amenés à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

I.6.1. Etendue de la mesure :

Elle 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 :

Zone 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.6.2. Seuil :

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

I.6.3. 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.

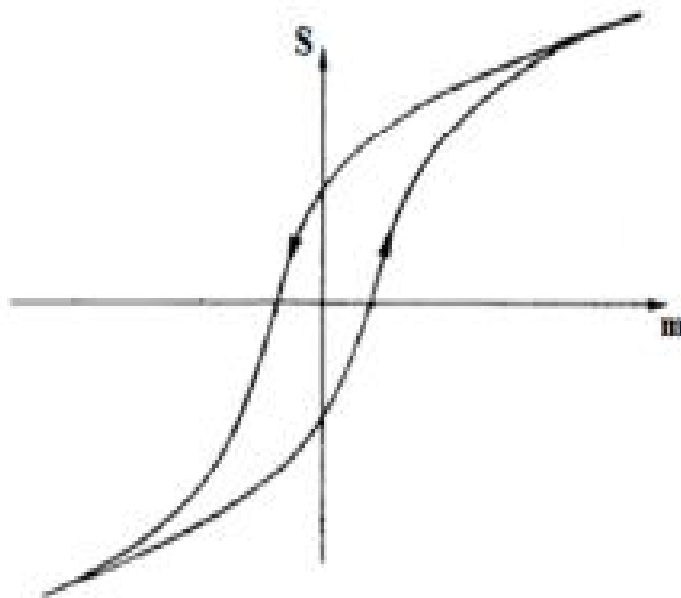


Figure I. 3: Effet d'hystérésis.[6]

I.6.4. Résolution :

Elle correspond à la plus petite variation du mesurande que le capteur est susceptible de déceler.

I.6.5. 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.6.6. Sensibilité :

Elle détermine l'évolution de la grandeur de sortie en fonction de la grandeur d'entrée en un point donné. C'est la pente de la tangente à la courbe issue de la caractéristique du capteur.

Dans le cas d'un capteur linéaire, la sensibilité du capteur est constante :

$$\text{Sensibilité} = \frac{\Delta(\text{grandeur de sortie})}{\Delta(\text{mesurande})} \quad \mathbf{I.1}$$

Il faut noter que la sensibilité d'un capteur peut être fonction du conditionneur auquel il est associé.

I.6.7. Finesse :

C'est la qualité d'un capteur à ne pas venir modifier, par sa présence, la grandeur à mesurer. Cela permet d'évaluer l'influence du capteur sur la mesure. On la définit non seulement vis à vis du capteur mais aussi vis à vis de l'environnement d'utilisation du capteur.

Par exemple, dans le cas d'une mesure thermique, on cherchera un capteur à faible capacité calorifique vis à vis des grandeurs l'environnant. La finesse et la sensibilité sont en général antagonistes. Il peut y avoir un compromis à faire. Pour un capteur d'induction B, un capteur à forte perméabilité sera très sensible, par contre sa présence aura tendance à perturber les lignes de champ et la mesure de l'induction ne sera pas celle sans capteur, d'où une mauvaise finesse. Mais cette

erreur peut être évaluée en vue d'une correction post-mesure et ainsi faire abstraction de la présence du capteur.

I.6.8. Linéarité :

Zone dans laquelle la sensibilité du capteur est indépendante de la valeur du mesurande. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur, par exemple par la méthode des moindres carrés. On définit à partir de cette droite l'écart de linéarité qui exprime en % l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite approchant la courbe.

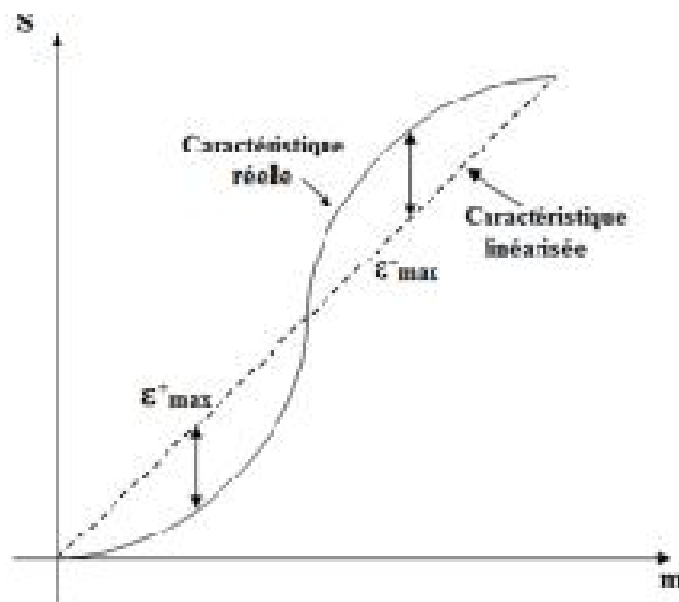


Figure I. 4: Exemple de linéarisation de caractéristiques[4].

I.6.9. Rapidité :

C'est la qualité d'un capteur à suivre les variations du mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :

- Bande passante du capteur. (à -3 dB par exemple).
- Fréquence de résonance du capteur.

- Temps de réponse (à x%) à un échelon du mesurande.

I.6.10. Temps de réponse :

C'est l'aptitude d'un capteur à répondre aux variations du mesurande avec le temps. Si on prend, par exemple, notre thermomètre affichant 20°C et on le place dans un four à 100°C, il prendra un certain temps τ pour afficher 100°C : τ est appelé temps de réponse.

I.7. Caractéristiques statistiques d'un capteur :

Ces paramètres permettent de prendre en compte la notion d'erreurs accidentelles qui peuvent survenir sur un capteur.

Rappel : soit n mesures effectuées sur un mesurande, on définit à partir de ces n mesures :

$$\langle m \rangle = \frac{\sum_i m_i}{n} \quad \text{I.2}$$

1. La valeur moyenne :
2. L'écart type (dispersion des résultats autour de la valeur moyenne)

$$\sigma = \sqrt{\frac{(m_i - \langle m \rangle)^2}{n^2}} \quad \text{I.3}$$

I.7.1. Fidélité :

Elle définit la qualité d'un capteur à délivrer une mesure répétitive sans erreurs. L'erreur de fidélité correspond à l'écart type obtenu sur une série de mesures correspondant à un mesurande constant.

I.7.2. Justesse :

C'est l'aptitude d'un capteur à délivrer une réponse proche de la valeur vraie et ceci indépendamment de la notion de fidélité. Elle est liée à la valeur moyenne obtenue sur un grand nombre de mesures par rapport à la valeur réelle.

I.7.3. Précision :

Elle définit l'écart en % que l'on peut obtenir entre la valeur réelle et la valeur obtenue en sortie du capteur. Ainsi un capteur précis aura à la fois une bonne fidélité et une bonne justesse.

I.7.4. Incertitude :

C'est la marge d'erreur ΔR entre la valeur donnée par l'appareil de mesure et la vraie valeur du mesurande. L'erreur relative donne une meilleure appréciation sur l'incertitude d'un appareil de mesure.

I.8. Différents types des capteurs[4] :

Il existe dans l'industrie une panoplie de capteurs qui peuvent être classés suivant leurs natures (actifs ou passifs) ou suivant le phénomène physique qui est à l'origine de leurs fonctionnements. On cite à titre d'exemple quelques types des capteurs les plus utilisés.

I.8.1. Capteurs de pression :

Dans tous les cas, les capteurs de pression peuvent se ramener au schéma synoptique ci-dessous. Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer a pour rôle de transformer celle-ci en grandeur physique mesurable.

I.8.2. Capteurs d'accélération :

Un accéléromètre est un capteur qui, fixé à un mobile, permet de mesurer l'accélération de ce dernier. Le principe de tous les accéléromètres est basé sur la loi fondamentale de la dynamique

$$\vec{F} = m \cdot \vec{\gamma} \quad \text{I.4}$$

Plus précisément, il consiste en l'égalité entre la force d'inertie de la masse sismique du capteur et une force de rappel appliquée à cette masse.

I.8.3. Capteurs d'humidité :

La mesure d'humidité est difficile à mettre en oeuvre. L'humidité dans l'air est mesurée généralement comme la fraction maximum d'eau qui peut être absorbée à une certaine température. Les techniques de détection les plus utilisées sont la détection résistive et la détection capacitive.

I.8.4. Capteurs de position :

Les capteurs de position sont des capteurs de contact. Ils peuvent être équipés d'un galet, d'une tige souple et d'une bille. L'information donnée par ce type de capteur est de type tout ou rien et peut être électrique ou pneumatique.

I.8.5. 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.

I.9. Méthodes de détection :

La méthode de transduction est la technique qui permet d'associer à la grandeur physique captée, une grandeur électrique proportionnelle à la grandeur qu'on veut mesurer. Parmi les méthodes de détection les plus utilisées on trouve :

I.9.1. Détection résistive :

Les capteurs résistifs sont plus utilisés pour la mesure de la température (thermistances), de pression (jauge de contrainte) ou de déplacement (capteurs potentiométrique). Ils sont basés sur la variation de la résistivité du corps d'épreuve. S

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad \mathbf{I.5}$$

I.9.2. Détection capacitive :

Les dispositifs capacitifs sont souvent utilisés comme des capteurs de déplacement dans lesquels la variation de la distance entre les deux armatures (d) fait varier la valeur de la capacité. Ils peuvent être aussi utilisés comme des capteurs de pression ou d'accélération. La valeur de la capacité est aussi fonction du type de diélectrique ϵ_r entre les armatures (capteurs d'humidité).

Les capteurs à détection capacitive sont généralement constitués d'un condensateur dont l'une des armatures est fixe et l'autre armature susceptible de se déplacer ou de se déformer sous l'action de la variation du mesurande.

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad \text{I.6}$$

I.9.3. Détection inductive :

Utilisant leurs propriétés magnétiques, ils sont plus utilisés comme des capteurs de proximité (capteurs à courant de Foucault, etc.).

I.9.4. Détection piézoélectrique :

Les matériaux piézoélectriques, parce qu'ils permettent de convertir une contrainte mécanique en polarisation électrique donc en tension. Ils sont candidats naturels pour les applications basées sur la détection de pressions.

I.9.5. Détection piézorésistive :

Les matériaux piézorésistifs (métaux et semiconducteurs) possèdent la particularité de convertir une contrainte mécanique en une variation de résistance. Ceci leur permet d'être utilisées dans les capteurs de pression ou d'accélération. Ce type de capteurs est caractérisé par une

excellente linéarité et une faible impédance de sortie. Leur sensibilité à la température est par contre problématique.

I.10. Conclusion

Les capteurs sont les premiers éléments rencontrés dans une chaîne de mesure. Ils transforment les grandeurs physiques ou chimiques d'un processus ou d'une installation en signaux électriques. dans ce chapitre Nous avons abordé quelques-uns des principes qui permettent de mettre correctement en oeuvre les capteurs. Notre propos vise surtout à donner au lecteur un guide assez général.

Chapitre II

le capteur de pression capacitif

II.1. Introduction :

La pression est un paramètre important dans de nombreuses disciplines comme la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides, la biophysique, etc. Aussi, les capteurs de pression se retrouvent dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de perception, de contrôle ou de mesure. Dans ce chapitre nous présentons une étude détaillée des capteurs de pression de type capacitif à membrane de silicium.

II.2. Description d'un capteur de pression [7] :

Le capteur est constitué de trois blocs figure II.1 :

- Un corps d'épreuve
- Un élément de transduction ou élément sensible ou transducteur
- Module électronique de conditionnement

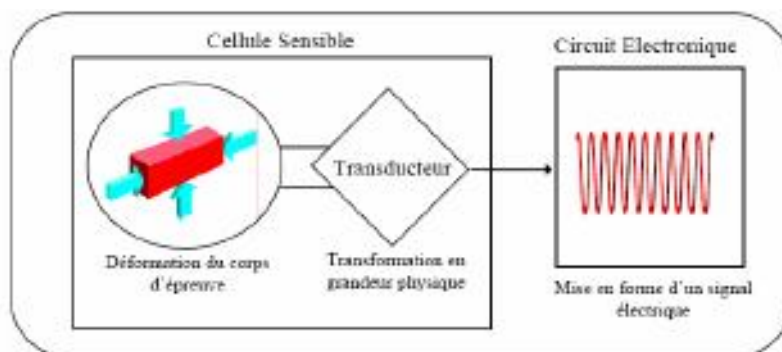


Figure II. 1: les trois blocs du capteur [7]

Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui, soumis aux variations de la grandeur à mesurer (mesurande), a pour rôle de la transformer en une grandeur physique mesurable.

Pour les capteurs de pression cette grandeur est généralement une déformation. Les corps d'épreuve les plus utilisés sont les plaques, les poutres et les membranes.

Le transducteur est l'élément sensible qui, lié au corps d'épreuve, traduit les réactions de ce dernier en signal électrique.

Le module électronique est le module de traitement du signal en vue d'une éventuelle exploitation.

Le capteur est construit pour exploiter une propriété de la matière, décrite par une loi physique, permettant de connaître la correspondance entre la grandeur électrique à la sortie du capteur et la grandeur physique à mesurer.

II.3. Evolution des principes de détection [1] :

La conception d'un capteur de pression passe par des choix techniques et technologiques lesquels sont généralement guidés par l'application même du capteur. Aussi, la diversification des applications a conduit à une évolution des techniques utilisées.

Avant les années 70 ; Pour la plupart des capteurs existants sur le marché dans cette période, la partie détection faisait appel à l'électromécanique et utilisait des techniques dont les performances étaient relativement modestes mais acceptables par rapport à l'application qui leur était destinée. Parmi ces techniques on peut citer :

- le tube de Bourdon,
- le tube vrillé,
- le tube borgne,
- la capsule manométrique,
- les pistons,
- les membranes encastrées et les membranes ondulées,

Il faut noter que ces techniques sont encore utilisées de nos jours, malgré leur grande taille et leur coût unitaire élevé.

A partir des années 70 ; Suivant les domaines d'applications, des impératifs de taille et de production de masse à faible coût ont induit une évolution de l'électromécanique vers la microélectronique.

Cette filière a apporté des avantages autant techniques qu'économiques en permettant la fabrication collective de dispositifs de détection de petite taille, de bonne stabilité, et ayant la possibilité d'avoir le traitement de signal associé [8]. Les « nouveaux » capteurs sont donc principalement basés soit sur la déformation d'un substrat (capteurs GaAlAs) soit sur celle d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu.

II.4. Capteur de pression piezoresistif :

II.4.1. Structure d'un capteur de pression piézorésistif[9] :

La plupart des capteurs de pression piézorésistif sont réalisés par micro usinage du silicium par un agent chimique anisotropique . Un capteur de pression piézorésistif est un dispositif composé d'une membrane micro usinée dans une plaquette de silicium orientée <100> constituant le corps d'épreuve qui se déforme sous l'effet d'une pression appliquée. Des jauges piézorésistives en polysilicium implantées en surface du corps d'épreuve, connectées en pont de Wheatstone, forment un conditionneur passif. Ces jauges transforment la déformation en une variation de résistance (Figure II.2).

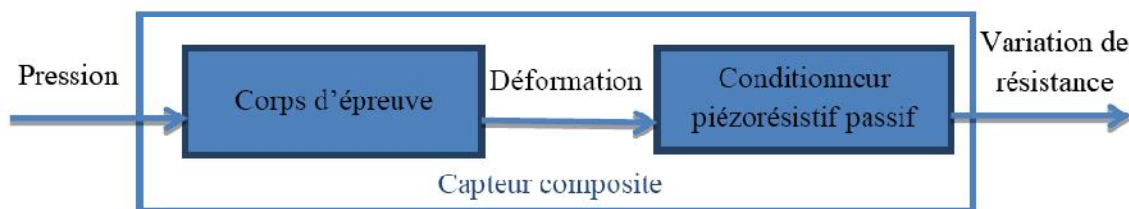


Figure II. 2: structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane [10]

Pour avoir une sensibilité élevée le conditionneur du capteur peut être constitué de deux jauges longitudinales et deux jauges transversales disposées en bordure de membrane et interconnectées en pont de Wheatstone [10] par des pistes d'aluminium (figure II.3). La tension de sortie du pont de Wheatstone alimenté en tension ou en courant constant est proportionnelle à la pression appliquée, aux facteurs de jauges du polysilicium, et à la tension ou au courant d'alimentation.

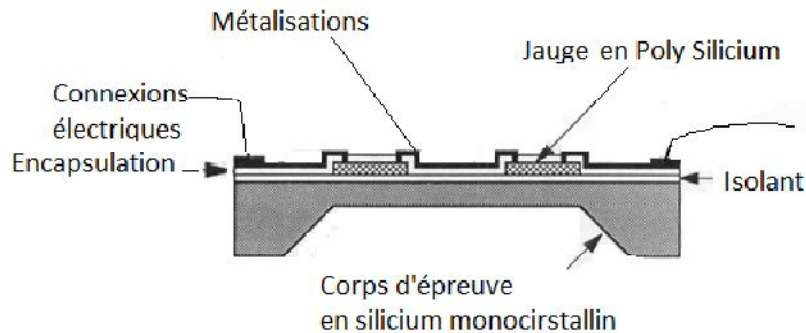
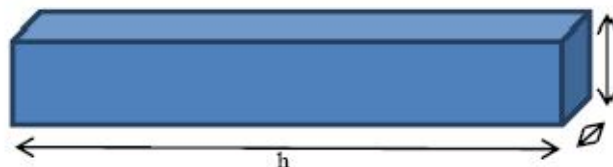


Figure II. 3: Schéma de principe d'un capteur de pression piézorésistif [7]

II.4.2. Théorie de la piézorésistivité :

Soit une résistance R de forme parallélépipédique de longueur L et de section,

Constituée d'un matériau homogène de résistivité ρ_0 . Sa valeur au repos est donnée par [11]:



$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{S} \quad \text{II.1}$$

Figure II. 4: Résistance R de forme parallélépipédique [11]

Soit la variation de sa résistance lorsqu'il est soumis à une contrainte axiale $\square\square$.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} \quad \text{II.2}$$

Les deux derniers termes de la relation (1.20) représentent les changements dimensionnels de la jauge ; ils sont prépondérants dans le cas des métaux. Le premier terme représente une variation de résistivité qui est très largement dominant dans le cas des semi-conducteurs : C'est l'effet piézorésistif [12]

II.5. Capteur de pression capacitif[9] :

II.5.1. Avantage des capteurs de pression capacitive :

De nos jours, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basée sur le principe de détection de type *piézorésistif*. Cela signifie que la détection de la pression se fait par la mesure d'une variation de résistance [1-5] à [1-7]. L'évolution des jauges métalliques déposées vers celles en polysilicium ou encore en silicium dopé, directement implantées dans le corps d'épreuve, a permis à ces composants d'atteindre de très bonnes performances et donc de monopoliser le marché.

En dépit de leurs avantages (bonne précision, faible nonlinéarité, électronique associée simple et pas nécessairement à proximité), ces composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire. C'est pourquoi, des efforts de recherche ont été effectués sur des *structures*

capacitives dont les avantages potentiels sont une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température.

II.5.2. Etat de l'art des capteurs de pression capacitif [7] :

Malgré leurs défauts, les capteurs de pression au silicium restent parmi les microsystèmes les plus vendus dans le monde. Ceci est lié d'une part aux différentes techniques qui ont été développées pour corriger leurs défauts tels que les dérives thermiques et d'autre part à la simplicité de mise en oeuvre de ce type de détection.

Plusieurs travaux de recherches ont été effectués afin d'améliorer leurs performances et de les adapter aux nouvelles exigences industrielles. On cite, dans ce qui suit, quelques travaux de recherche sur les capteurs de pression capacitifs, depuis les deux dernières décennies :

_ En 1982, les travaux de Wise [13] ont été effectués afin d'optimiser les performances des capteurs de pression au silicium. Il a déterminé la déflexion de la membrane en fonction de la température, par la méthode des différences finies, sans tenir compte des autres dimensions du capteur et en supposant que les coefficients de dilatation thermique du silicium et du pyrex sont

constants. Il en a déduit la sensibilité thermique du capteur de pression capacitif dans un intervalle réduit de température -30 à 70 °C.

_ En **1985**, Benmoussa [14] a réalisé et conçu un capteur de pression capacitif à partir d'un processus technologique de fabrication des transistors MOS. Il a déterminé la réponse de membrane fine de silicium encastrée totalement soumise à une pression uniforme et constant.

_ Blasquez a effectué une étude de la réponse en régime statique des capteurs de pression capacitifs dont l'élément sensible est une membrane rectangulaire ou carrée de silicium dans l'hypothèse des faibles déformations. Il a montré les limites des capteurs de pression capacitifs et leurs aptitudes, ils ont caractérisés par une haute sensibilité à la pression, une remarquable basse sensibilité à la température et peuvent fonctionner dans des gammes de température assez élevées.

_ en **1991**, dans les travaux de Kudoh, un capteur de pression capacitif d'une nouvelle génération implantant avec un circuit intégré CMOS a été développé. Tel que le circuit électronique est un convertisseur Capacité - Fréquence dont la fréquence d'oscillation change en fonction de la capacité.

_ En **1995**, Elgamel a simulé les performances du capteur de pression capacitif due à la pression constante et uniforme et aux variations de température. Il a été présenté une technique simple et efficace, capable de représenter la relation entre la déflexion de la membrane et le changement de la capacité avec une pression statique et uniforme.

Malheureusement, nous n'avons vu pas le comportement thermique dans ce travail, Il a été étudié ce modèle à température ambiante et constante.

_ Dans les travaux de Eaton [15] effectués en **2000**, une application des micros capteurs de pression capacitifs a été développé. Il a présenté une solution analytique d'une membrane circulaire pour les grandes perturbations. Les résultats obtenus ont permis la validation des résultats expérimentaux ainsi que des modèles de simulation établis par la méthode des éléments finis. Malgré l'évolution croissante du domaine des micros capteurs, des microsystemes et l'avènement des capteurs intelligents « smart sensor », l'étude et la modélisation élémentaire des capteurs de pression restent toujours d'actualité. C'est pourquoi de nombreux travaux sont en cours afin de les optimiser et d'améliorer leurs performances.

En 2005, Les travaux d'Al-bahri consistaient en la détermination de l'influence de la température sur le comportement statique et dynamique du capteur de pression capacitif réalisé à partir de la filière silicium/verre, dans une large gamme de température (-20°C à +150°C) et pour différentes caractéristiques géométriques.

De récentes études ayant pour objet de corriger la non linéarité d'un capteur de pression, en utilisant une nouvelle technique de fabrication, ont été menées par Qing en 2007. Dans le domaine des hautes températures et en vue d'une application dans un environnement rude, Li a mis au point un capteur capacitif interdigital à jauges de contraintes. Le capteur de pression capacitif à jauges de contraintes inter digitées opère en développant une capacité entre les différents conducteurs inter digités. Les travaux de Chen en 2008 ont été concentrés sur la conception structurelle et l'optimisation de la micro capteur de pression pour améliorer la sensibilité et la linéarité pour l'optimisation des paramètres du capteur de pression.

A partir de ces travaux, il en ressort qu'il y a certaines problèmes qui subsistent dans l'étude des capteurs de pression capacitifs, et que leur domaine d'application suscite toujours l'intérêt des chercheurs, qui veulent aboutir à des dispositifs de plus en plus performants.

II.5.3. Principe des capteurs de pression capacitif [16] :

Le principe de base d'un capteur de pression capacitif est basé sur la variation d'une capacité en fonction de la pression appliquée (figure II.5). Ce second type est caractérisé par une haute sensibilité, une faible consommation électrique et une grande résolution par rapport au premier, cependant, il présente une réponse non linéaire, une dérive en température et une faible variation par rapport à la capacité d'offset.

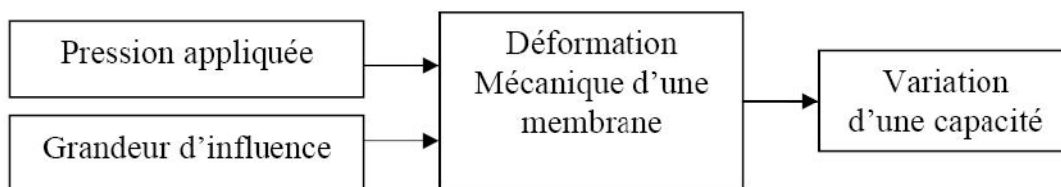


Figure II. 5: Principe de fonctionnement d'un capteur de pression

II.6. Propriétés mécaniques du silicium [7] :

L'intérêt du silicium dans le domaine des capteurs de pression est double. Il permet d'une part la fabrication simultanée d'un grand nombre de capteurs à faible coût unitaire et d'autre part, l'intégration sur une même puce de la cellule sensible et des circuits électroniques. On peut citer quelques définitions en mécanique ou en élasticité

II.6.1. Tenseur des contraintes :

Une contrainte mécanique représente une force par unité de surface. Elle est exprimée en Pascal ou N/m² dans le Système International. Pour représenter l'état général de contrainte en un point donné d'un matériau, on utilise le formalisme tensoriel. Le tenseur de contrainte, noté σ_{ij} , est de rang 2 et s'écrit dans une base des axes cristallographiques :

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad \text{II.3}$$

Les contraintes de type ij sont appelées contraintes normales alors que les contraintes de type ij avec $i \neq j$ sont des contraintes tangentielles. L'état général de contrainte autour d'un point M, représenté par un élément cubique infinitésimal est donné sur cette figure :

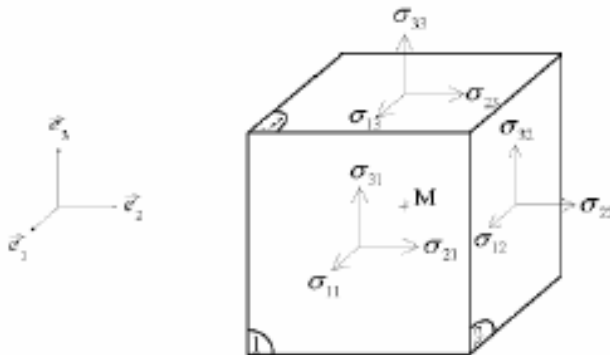


Figure II. 6: Définition des composantes du tenseur des contraintes mécaniques.

Il est possible de montrer qu'à l'équilibre, le tenseur des contraintes σ_{ij} est symétrique, c'est-à-dire $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$. Il possède donc six composantes indépendantes.

II.6.2. Tenseur des déformations :

Sous l'effet d'une contrainte mécanique, un matériau se déforme. Cette déformation ne se fait pas uniquement dans la direction de la contrainte. En effet, lorsque l'on tire sur un matériau élastique, il s'allonge dans la direction de la force, mais on observe également une variation de sa section. En outre la déformation dépend des propriétés mécaniques du matériau. Selon la direction suivant laquelle la contrainte est appliquée, les déformations induites sont généralement différentes, on parle alors d'anisotropie des propriétés mécaniques d'un matériau. Les cristaux d'une façon générale, et le silicium en particulier, présentent ainsi des propriétés mécaniques fortement anisotropes [17].

Les déformations représentent les variations de géométrie d'un segment donné suivant toute

les directions. Elles s'expriment sans unité et sont représentées par un tenseur symétrique de rang 2 (et possèdent par conséquent six composantes indépendantes) :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

Les déformations ne dépendent donc pas seulement de l'intensité et du type de contrainte, mais également des propriétés mécaniques du matériau qui se déforme.

II.6.3. Tenseurs d'élasticité - loi de Hooke :

Dans le cadre de la théorie de l'élasticité linéaire, la déformation dépend linéairement des contraintes mécaniques, les différents coefficients qui relient cette déformation à la contrainte sont appelés modules d'élasticité (ou rigidités) ou compliances du matériau [17].

On a les relations appelées **loi de Hooke**:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \text{ et } \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{II.5}$$

Où C_{ijkl} sont les coefficients du tenseur d'élasticité, appelés modules d'élasticité ou de rigidités, et S_{ijkl} les coefficients du tenseur inverse, appelés compliances élastiques.

	$S_{11} [GPa^{-1}]$	$S_{12} [GPa^{-1}]$	$S_{44} [GPa^{-1}]$	$C_{11} [GPa]$	$C_{12} [GPa]$	$C_{44} [GPa]$
Si	0.00768	-0.00214	0.0126	165.7	63.9	79.6

Tableau II. 1: Valeurs numériques des constantes élastiques du silicium [16].

On peut définir les principales propriétés mécaniques d'un matériau :

Le **module de Young** E est la constante qui relie la contrainte mécanique d'un matériau et la déformation élastique. Un matériau dont le module de Young est très élevé est dit rigide [16].

Le **coefficient de Poisson** permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{II.6}$$

L'intérêt de ces coefficients est de pouvoir obtenir une représentation quantitative de l'anisotropie des propriétés mécaniques du matériau.

Matériau	Si	SiO ₂	Pyrex	Poly Si	Nitride Si
Module d'Young (GPa)	$E_{100}=131$ $E_{110}=168$	75	60	140	270
Coefficient de Poisson	0.27	0.17	0.25	0.28	0.3

Tableau II.2 : Principales propriétés mécaniques du silicium et du pyrex 7740 [16, 17].

II.6.4. Principe de fonctionnement [18] :

Les capteurs étudiés comportent une armature plane fixe et une armature plane déformable. En l'absence de pression différentielle entre les deux faces de la membrane, les armatures sont parallèles (Fig. II.7). La capacité au repos $C(0)$ est alors donnée par la relation :

$$C(0) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad \text{II.7}$$

Où : ϵ_0 et ϵ_r représentent respectivement la permittivité du vide ($8,86 \times 10^{-12}$ F/m) et la permittivité relative du gaz « emprisonné » dans la cavité. A est la surface de l'armature fixe et d est la distance interarmatures.

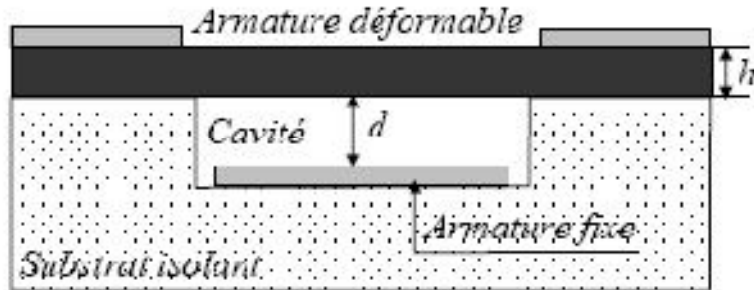


Figure II. 7: Capteur de pression capacitif au repos

II.7. Modélisation de la réponse en pression :

II.7.1. Calcul de la capacité :

Lorsqu'on applique une pression P_{ext} supérieure à la pression P_{in} contenue dans la cavité, l'armature déformable fléchit (Fig. II.8).

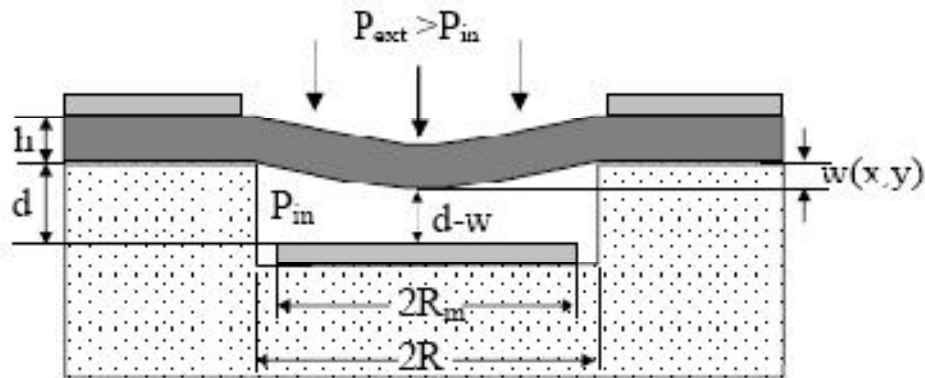


Figure II. 8: Capteur en fonctionnement ($P_{ext} > P_{in}$)

La distance séparant les deux électrodes varie en tous points. La relation liant la capacité à la pression appliquée devient

$$C(P_{ext} - P_{in}) = \epsilon_0 \epsilon_r \iint \frac{\partial A}{d-w(x,y)} \quad \text{II.8}$$

où dA représente un élément de surface de l'armature fixe et $w(x,y)$ la déflexion de la membrane en tout point d'un repère cartésien dont le centre est le centre de la membrane.

Pour une membrane circulaire de rayon R et dans le cas des faibles déflexions ($w \ll h$), la déflexion w est donnée en coordonnées cylindriques par

$$W(r) = \frac{12P(1-\nu^2)R^4}{64Eh^3} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 \quad \text{II.9}$$

où

$P = [P_{ext} - P_{in}]$ est la pression hydrostatique différentielle appliquée entre les deux faces de la membrane, E le module de Young (130 GPa pour le silicium), ν le coefficient de poisson (0,28), et h l'épaisseur de la membrane.

On voit que la déflexion $w(r)$ peut se décomposer en deux parties: une partie $w(0)$ indépendante des coordonnées et une autre, $w_N(r)$ indépendante de la pression :

$$w(r) = w(0)w_N(r) \quad \text{II.10}$$

avec $w_N(r)$ la déflexion normalisée :

$$w_N(r) = \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 \quad \text{II.11}$$

et $w(0)$ la déflexion au centre de la membrane :

$$w(0) = \frac{3(1-\nu^2) S^2}{16\pi^2 E h^3} P \quad \text{II.12}$$

où S est la surface de la membrane.

L'équation (II.12) montre que la déflexion au centre est directement proportionnelle à la pression. La réponse du capteur à la pression P s'écrit alors par :

$$C(P) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^{R_m} \int_0^{2\pi} \frac{1}{d-w(r)} dr d\theta = \varepsilon_0 \varepsilon_r I_1 \quad \text{II.13}$$

où

R_m représente la rayon de l'armature fixe.

En développement l'intégrale (II.13) on obtient :

$$I_1 = \frac{c(0)}{2\varepsilon_0\varepsilon_r\gamma^2} \sqrt{\frac{d}{W(0)}} \ln \left[\frac{\frac{d}{W(0)} + \gamma^2 \sqrt{\frac{d}{W(0)} + \gamma^2 - 1}}{\frac{d}{W(0)} - \gamma^2 \sqrt{\frac{d}{W(0)} + \gamma^2 - 1}} \right] \quad \text{II.14}$$

Où

$$\gamma = \frac{R_m}{R} = \sqrt{\frac{A}{S}} \quad \text{II.15}$$

Dans le régime quasi linéaire ($w(0) \ll d$), on peut développer l'équation (II.16) en série de Taylor. L'intégrale est alors approchée par :

$$I_1 \approx \frac{C(0)}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \left[1 + \frac{W(0)}{d} \varphi_\gamma \right] \quad \text{II.16}$$

où

$$\varphi_\gamma = \frac{1 - (1 - \gamma^2)^3}{3\gamma^2} \quad \text{II.17}$$

Une déflexion efficace peut alors être définie comme :

$$W_{eff} = \varphi_\gamma W(0) \quad \text{II.18}$$

Pour $\gamma = 1$, la relation (II.19) peut se simplifier par :

$$I_1 \approx \frac{C(0)}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \left[1 + \frac{W(0)}{3d} \right] \quad \text{II.19}$$

La réponse du capteur approchée alors peut se mettre sous la forme suivante :

$$C_L(P) \approx C(0) \left[1 + \frac{W(0)}{3d} \right] \approx C(0) \left[1 + \frac{W_{eff}}{d} \right] \quad \text{II.20}$$

la relation devient :

$$C_L(P) \approx C(0) \left[1 + \frac{(1-\nu^2) R^4 P}{16E h^3 d} \right] \quad \text{II.21}$$

II.8.Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude des capteurs de pression capacitifs. Au début, nous avons présenté des généralités sur les capteurs de pression les plus utilisés comme les capteurs piezoresistifs et les capteurs capacitifs, puis nous avons détaillé les capteurs de pression de type capacitif qui demande entre autre la connaissance du comportement mécanique du corps d'épreuve en fonction de la pression.

Chapitre III

technologies et fabrication

III.1. Introduction :

Dans le domaine de la mesure de pression l'effort de recherche actuel des industriels et des laboratoires porte sur le développement de microtransducteurs à hautes performances intégrés sur Silicium. En effet certaines applications particulières comme les systèmes embarqués de contrôle de vol en aéronautique et la recherche pétrolière demandent des capteurs avec des précisions pleine échelle de 10^{-4} pouvant fonctionner à des températures supérieures à 200°C dans des milieux chimiquement agressifs [19]. Le développement de tels capteurs même s'il repose sur des architectures différentes (résonnantes, capacitives, piézorésistives) nécessite l'étude et la maîtrise de différentes étapes technologiques compatibles issues de la microélectronique.

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

III.2. Les Structure de type MEMS [20] :

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

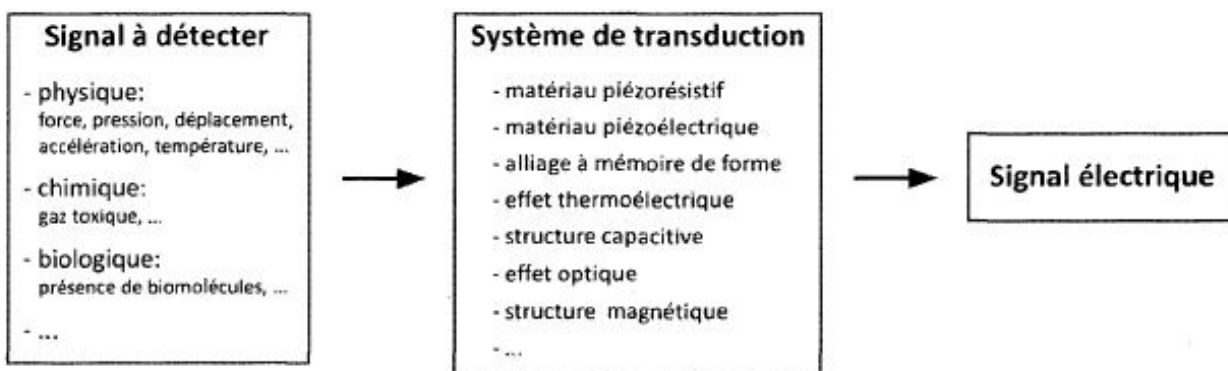


Figure III.1 : Capteur MEMS : différents types de transduction.

III.3. la miniaturisation :

L'utilisation de microsystèmes s'est développée du fait de leur faible encombrement parallèlement à une forte sensibilité et une grande précision liées à la miniaturisation. Les critères de poids, taille et volume ont permis leur généralisation dans des objets qui se devaient légers et/ou petits (automobile, avionique). Embarqués dans un véhicule, ils ne déprécient pas les efforts de poids et de consommation énergétique réalisés pour satisfaire les normes environnementales dans les domaines du transport. Les disques durs ont vu leur taille diminuer en même temps que leur densité de stockage augmentait, conséquences de la diminution de la taille des têtes de lecture-écriture. La miniaturisation des systèmes MEMS comme dans le domaine des capteurs s'est répercutée par l'ajout de fonctions qui n'auraient pas été possibles sans les critères d'encombrement, de coût de production et de consommation énergétique à l'usage.

La miniaturisation accompagne les progrès technologiques depuis l'invention du transistor (fin des années 1940) suivie par l'arrivée du circuit intégré une dizaine d'années plus tard. La diminution progressive du volume des composants a permis la mobilité des objets, leur portabilité en même temps que l'augmentation de leur capacité. Dans un volume d'encombrement donné et un poids raisonné, la miniaturisation permet aux fabricants une concentration de fonctions d'usage ; elle autorise aussi leurs combinaisons, leurs multiplications et donc la diversité d'utilisations d'un même objet. La miniaturisation a eu des conséquences sur les recherches et les applications devenues imaginables par les dimensions. Citons par exemple le médical avec les micro-caméras endoscopiques ou les laboratoires sur puce, la sécurité automobile avec les capteurs d'accélération ou de pression, la téléphonie mobile et toutes ses fonctions associées, etc.

III.4. Les capteurs MEMS [21] :

Les capteurs MEMS mettent en lien direct une déformation mécanique avec une variation électrique. On trouve par exemple des capteurs de pression (de type capacitif et piezorésistif) pour la surveillance de pneumatiques ou encore des chauffe-eaux, des capteurs d'accélération (de type capacitif) dans les airbags, la téléphonie portable, ou les manettes de consoles de jeux.

III.5. Les principes physiques du microsystème :

Le principe de conception d'un microsystème ne diffère pas fondamentalement de celui d'un macro-système puisque les lois physiques et les équations qui les décrivent restent principalement les mêmes. Cependant, au regard des lois d'échelle, l'importance des effets physiques dans ces équations changent en lien avec la taille du système. En effet les rapports entre les différentes forces en jeu sont modifiés avec les réductions des dimensions : les forces de gravité sont proportionnelles au volume des objets, diminuer les dimensions diminue le poids dans des proportions au cube ; une pression s'exerçant sur une surface, la force résultante diminue avec les dimensions dans des proportions au carré. On peut aussi évoquer la capillarité dont l'impact sur un système à dimensions réduites a un impact prédominant.

La microélectronique s'intéresse à l'étude et à la fabrication de composants électroniques à l'échelle sub-micrométrique. Hors une adaptation aux dimensions, l'architecture micro-électronique n'a pas de différences fondamentales avec l'électronique. La différence est dans la conception puisque l'électronique nécessaire au capteur est directement intégrée au capteur. Les technologies de production permettent de fabriquer des composants à partir de matériaux semi-conducteurs comme le silicium, les fonctions électroniques sont intégrées directement en surface de ce substrat (figure III.2).

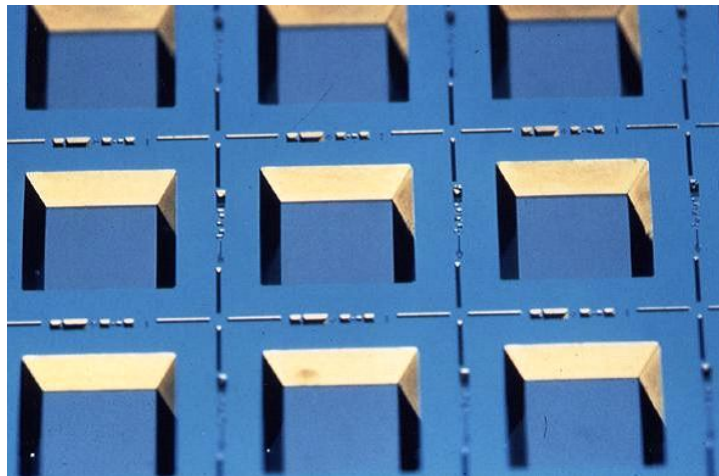


Figure III. 2 : Visualisation de la cavité réalisée pour obtenir une membrane en silicium[21]

III.6. Les principaux procédés de fabrication [22] :

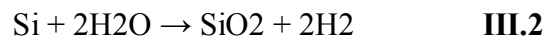
III.6.1. L'oxydation :

L'oxydation thermique est un procédé permettant la croissance d'un oxyde de silicium, le dioxyde de silicium (SiO₂), grâce à une réaction d'oxydation du substrat en silicium (Si) à une température située entre 900 et 1100°C. Il existe principalement deux types d'oxydation :

➤ l'oxydation sèche qui utilise le dioxygène en mettant en oeuvre la réaction chimique :



➤ l'oxydation humide qui utilise de la vapeur d'eau :



En général, l'oxydation sèche est plus lente mais donne un oxyde de meilleure qualité tandis que l'oxydation humide plus rapide donne un oxyde avec plus de défauts électriques. La réaction d'oxydation s'effectue dans des fours prévus à cet effet. En microélectronique, le dioxyde de silicium ainsi obtenu est utilisé par exemple en tant que masque d'implantation ou de diffusion de dopants, d'isolation électrique entre différentes couches conductrices, de couches actives dans les transistors MOS (oxyde de grille). Pour la fabrication des microsystèmes, le SiO₂ sert souvent de couches sacrificielles, terme que l'on définira ultérieurement.

III.6.2 Le dépôt :

Dans le cas, par exemple, où l'on veut créer une couche de SiO₂ lorsque le matériau du substrat ou la couche sous-jacente n'est pas du silicium, l'oxydation thermique n'est plus possible et il faut alors réaliser un dépôt de cette couche de SiO₂. En général, ce dépôt se fait soit par réaction chimique en phase vapeur (*CVD, Chemical Vapor Déposition*) pour les oxydes, les nitrures de silicium (les isolants) et le polysilicium soit par pulvérisation cathodique et évaporation (*PVD, Physical Vapor Déposition*) pour les métaux.

1) *CVD (« Chemical Vapor Déposition »)*

Les techniques CVD ont pour but de former une couche à la surface d'une autre grâce à un précurseur dont la nature a été changée par plusieurs réactions chimiques. Il existe deux types de dépôt CVD :

➤ **LPCVD (*Low Pressure CVD*)** : un dépôt chimique est réalisé en phase vapeur et basse pression (~100 mtor) dans une enceinte à quartz élevée à des températures allant de 400 800°C. On injecte dans cette enceinte les gaz qui réagissent et synthétisent le matériau à déposer. La pression, la température et le type de gaz utilisé sont des paramètres importants pour ce type de dépôt car la morphologie du matériau déposé, liée à ses propriétés électriques, en dépend.

➤ **PECVD (*Plasma Enhanced CVD*)** : les réactions s'effectuent dans une enceinte métallique dans laquelle un des gaz réactifs est excité en plasma par l'apport d'énergie sous forme électromagnétique (générateur radiofréquence en général). Grâce à l'énergie liée à ce plasma, les réactions chimiques sont favorisées et peuvent être réalisées à basse température.

PVD (« Physical Vapor Déposition »)

Les techniques PVD sont utilisées, en général, pour le dépôt de métaux tels que l'aluminium. Les dépôts PVD peuvent se faire par :

➤ **évaporation** : cette technique consiste à chauffer un matériau (la source) soit par effet Joule, soit par induction ou par bombardement électronique afin de le vaporiser et de le déposer sur un substrat. En effet, lorsque le matériau à déposer est chauffé, l'énergie d'agitation thermique est plus importante que l'énergie de liaison entre atomes, qui sont alors arrachés et s'échappent dans toutes les directions. Si le vide est suffisant, le libre parcours moyen des espèces arrachées devient plus grand que la distance source substrat et donc les atomes se déposent sur le substrat.

➤ **pulvérisation cathodique** : c'est un procédé à froid et à basse pression. Un potentiel important (de 500 à 5000 V) est appliqué à la source, matériau à déposer, placée dans une enceinte où une faible pression d'argon est maintenue. La différence de potentiel transforme alors les atomes d'argon en ions argon Ar⁺, les électrons sont alors attirés vers l'anode et les ions Ar⁺ vers la source. Les ions accélérés par la différence de potentiel vont heurter la source d'où des atomes et des électrons sont éjectés. Les atomes alors éjectés de la source se déposent sur le substrat.

III.6.3 La lithographie :

La lithographie, ou parfois appelée la photolithographie, permet de reproduire un motif sur une couche mince de résine photosensible par l'intermédiaire d'un masque. Pour cela, une fine couche de résine photosensible est déposée sur le substrat et est exposée à la lumière ultraviolette

(UV) à travers un masque constitué d'une plaque de quartz sur laquelle sont dessinés les motifs en chrome à transférer. L'exposition à la lumière UV, appelée aussi insolation, permet de fragiliser ou de durcir les zones de résine insolées par la lumière. On

parle alors de résine positive lorsque les zones exposées à la lumière sont fragilisées ou de résine négative lorsqu'elles sont durcies. Ainsi, il devient possible de retirer la couche de résine par voie chimique grâce à la solution du révélateur, qui va dissoudre les parties de la résine les plus fragiles, préalablement définies par le masque mais aussi par le type de résine utilisé. De cette façon, la zone définie par le masque sert de base à la réalisation de structures 3D.

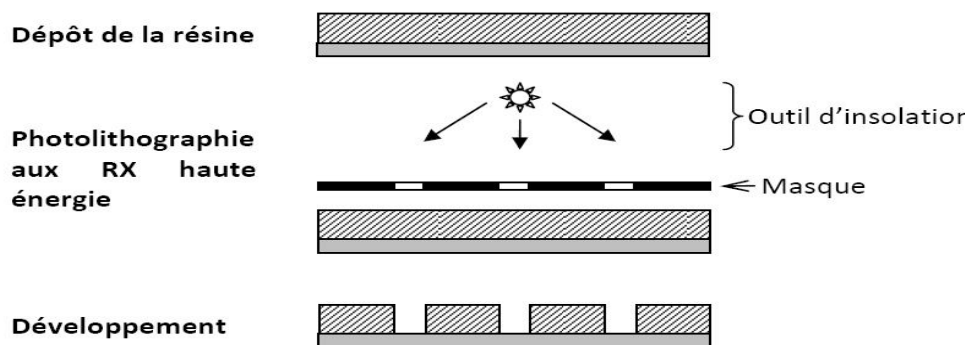


Figure III.3 : La Technique de la photolithographie[23]

III.6.4. La gravure :

La gravure a pour but d'enlever de la matière. Pour ce faire, il existe principalement deux techniques de gravure :

- la gravure humide : les couches sont gravées de manière chimique à l'aide de liquides ;
- la gravure sèche : la gravure des couches se fait au moyen de plasmas.

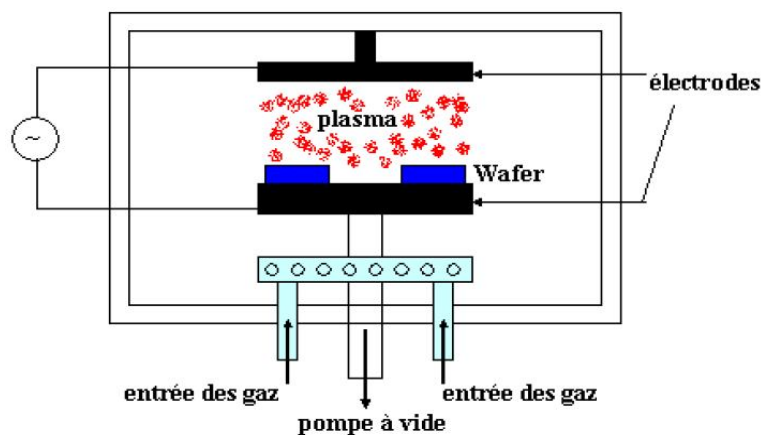


Figure III.4 : Schéma d'un réacteur pour gravure par plasma

III.7. Réalisation des membranes pour capteur de pression :

Contrairement aux procédés de gravure humide isotrope les gravures anisotropes permettent de contrôler précisément les dimensions des structures micro usinées. La réalisation de ces microstructures consiste à graver localement le silicium en se servant comme masque d'une couche de passivation ouverte par endroit par la technique de photolithographie classique en microélectronique. Les gravures sont réalisées dans des solutions aqueuses d'hydroxyde de potassium (KOH). La vitesse d'attaque des plans (100) est de l'ordre de 100 fois la vitesse d'attaque des plans (111). L'explication généralement donnée de l'anisotropie (point de départ de plusieurs programmes de simulation est que la vitesse de gravure pour un plan donné est déterminée par la densité d'atomes dans ce plan et par le nombre de liaisons Si-Si exposées à la solution ou restant à l'intérieur du matériau. Cependant il faut noter que l'anisotropie et les processus chimiques mis en jeu ne sont pas encore parfaitement connus et font toujours l'objet de publications. La forme de la cavité gravée en fonction de l'orientation

du substrat, de la géométrie du masque et de son orientation par rapport au repère cristallographique est donnée dans la littérature . Les membranes carrées sont obtenues à partir d'un substrat orienté (100) recouvert par une couche de masquage dont la vitesse de gravure est beaucoup plus faible que la vitesse de gravure des plans (100) du silicium. Un oxyde thermique, un nitrure déposé, ou un multicouche oxyde+nitrure sont généralement utilisés. On crée par photolithographie dans la couche de masquage des ouvertures carrées dont deux côtés sont parallèles au méplat [01 1]. Après cette étape l'épaisseur du film peut être contrôlée au profilomètre mécanique. La vitesse de gravure des plans (111) étant très faible par rapport à celle des plans (100), la gravure conduit au schéma représenté en (Figure III.5). En négligeant la gravure des plans (111) le côté de l'ouverture du masque M s'exprime en fonction du côté de la membrane W et de la profondeur gravée. Une vue générale montrant l'orientation cristallographique du substrat et les bords d'une membrane alignée par rapport au méplat est donnée en (Figure III.6)

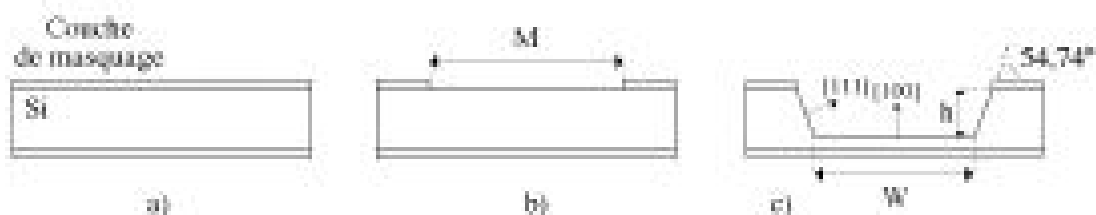


Figure III.5 : étapes de la gravure des membranes

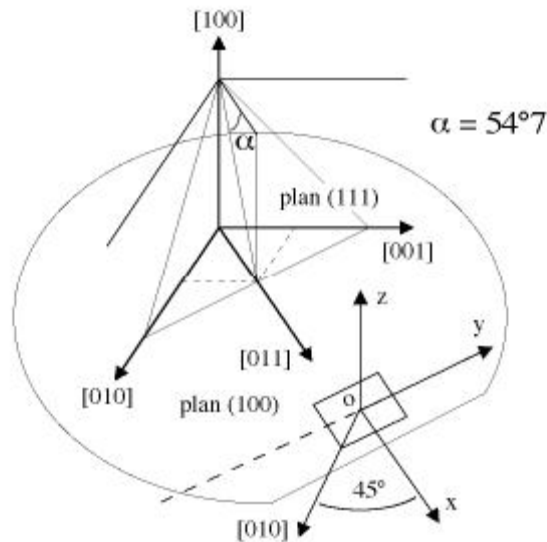


Figure III. 6 : *Orientation d'une membrane par rapport au repère cristallographique du silicium et repère (O,x,y,z)[19]*

III.8. Le micro usinage en volume:

III.8.1. 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 (III-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).

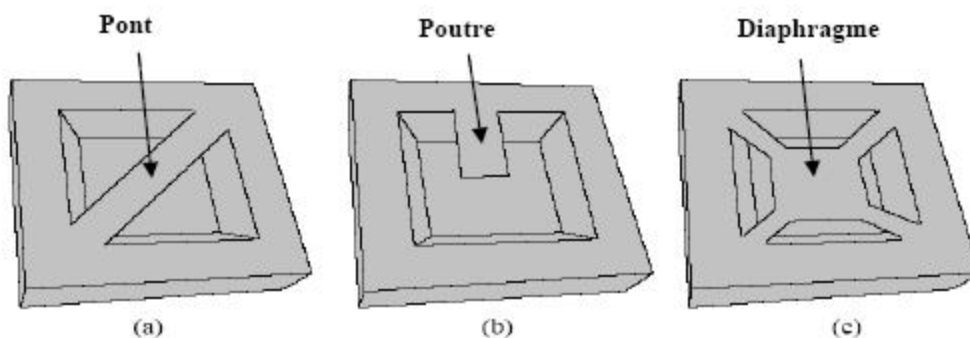


Figure III. 7 : *Schéma des différentes microstructures que l'on peut*

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 coté).

III.8.2. 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 (III.7) montre les structures qu'il est possible d'implémenter avec cette technique. La figure (III.7) (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 (Figure III. 8) (b) montre une membrane close laquelle est attachée une masse suspendue pour des applications thermiques ou de capteurs inertiels.

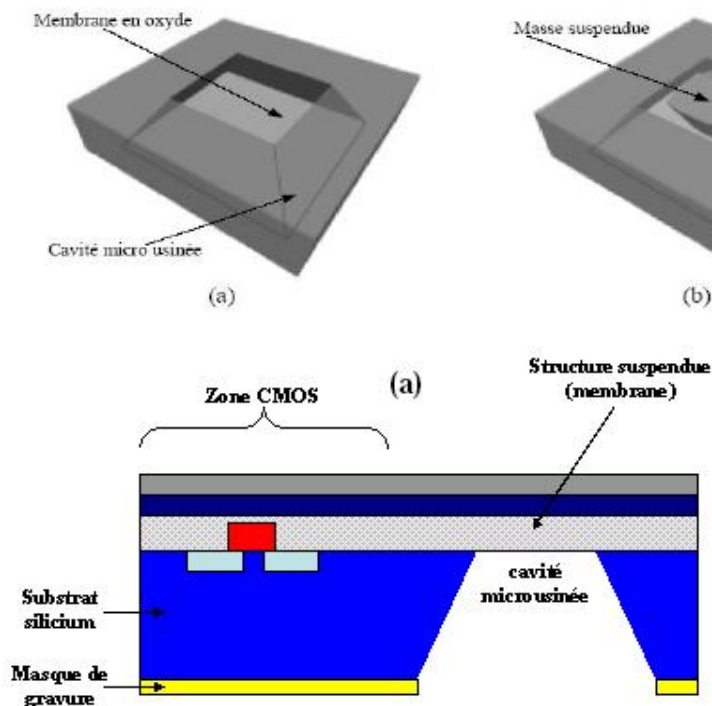


Figure III. 8 :Schéma des différentes structures résultantes d'un micro-usinage en volume face arrière

III.9.Conclusion:

Ce chapitre nous a montré les techniques de fabrication utilisée dans les technologies MEMS.

Après avoir définir les structures MEMS nous avons présentés les principaux procédés de fabrication des composants utilisés en microélectronique, puis nous nous somme intéressés à la fabrication des membranes l'élément de base des microcapteurs de pression.

Chapitre IV

*Simulation d'un capteur de
pression capacitif par
COMSOL*

IV.1. Introduction

Nous nous proposons, dans ce chapitre, d'étudier les propriétés mécaniques et électriques d'un capteur de pression à membrane en silicium. Ce type de capteur constitue un élément de base dans un grand nombre d'applications des microsystèmes MEMS. Avant de présenter nos résultats de simulation, nous commençons ce chapitre par une présentation du logiciel de simulation COMSOL utilisé.

IV.2. Les éléments finis:**IV.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.

IV.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.

IV.3. Présentation du logiciel COMSOL :

IV.3.1. L'interface de COMSOL:

La fenêtre de démarrage de COMSOL est décomposée en trois volets :. à gauche, on retrouve le bibliothèque de model où il est possible de définir des variables et autres paramètres du problème (Paramètres), 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). Le 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.

Les différents éléments de l'interface utilisateur de COMSOL sont présentés à la figure IV. 1

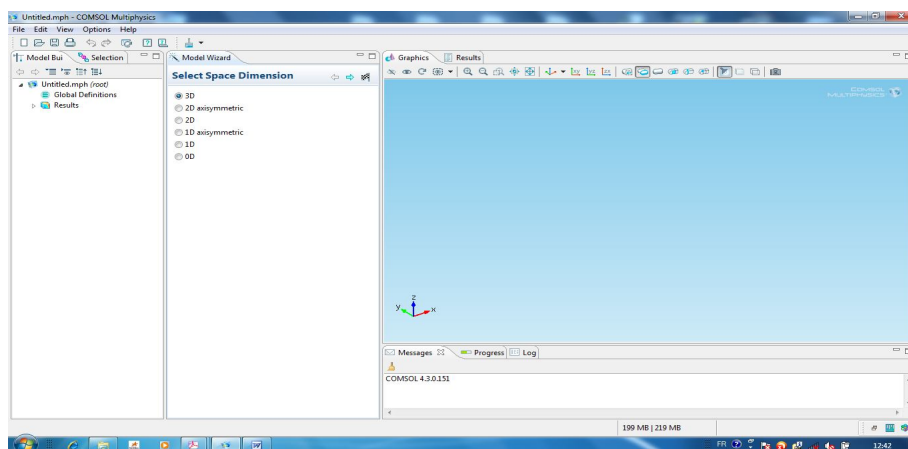


Figure IV. 2: interface graphique du COMSOL

IV.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.

IV.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.

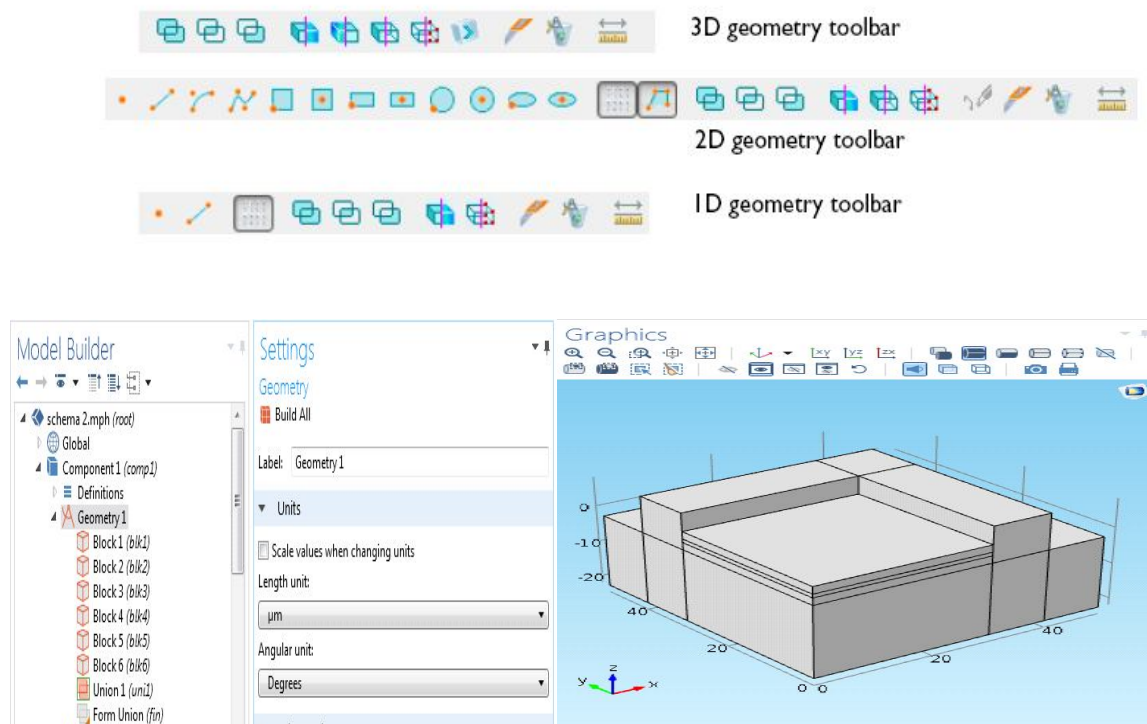


Figure IV. 3: Dessin de la géométrie

IV.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

IV.4.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

IV.4.1. 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.

IV.4.2. 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 utilisée (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.

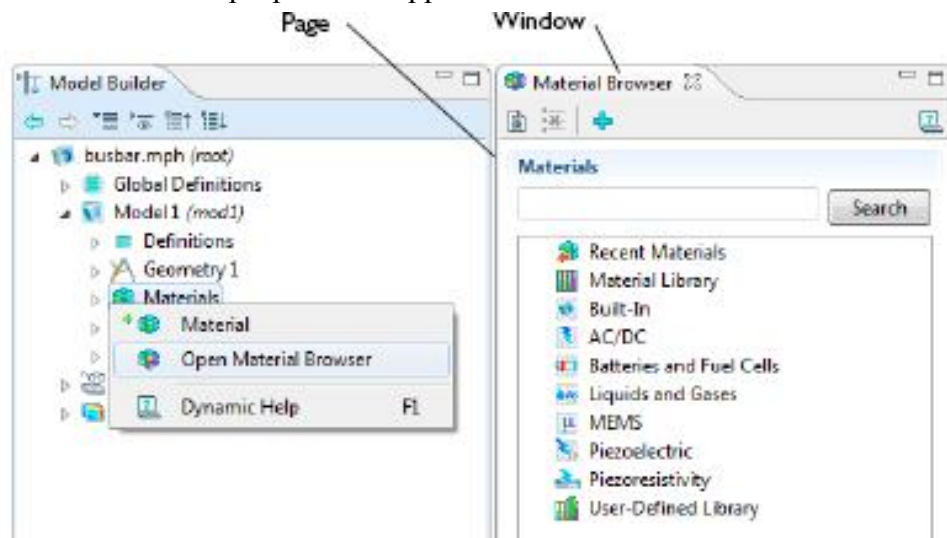


Figure IV. 4: collection et choix de matériaux

IV.4.3. 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

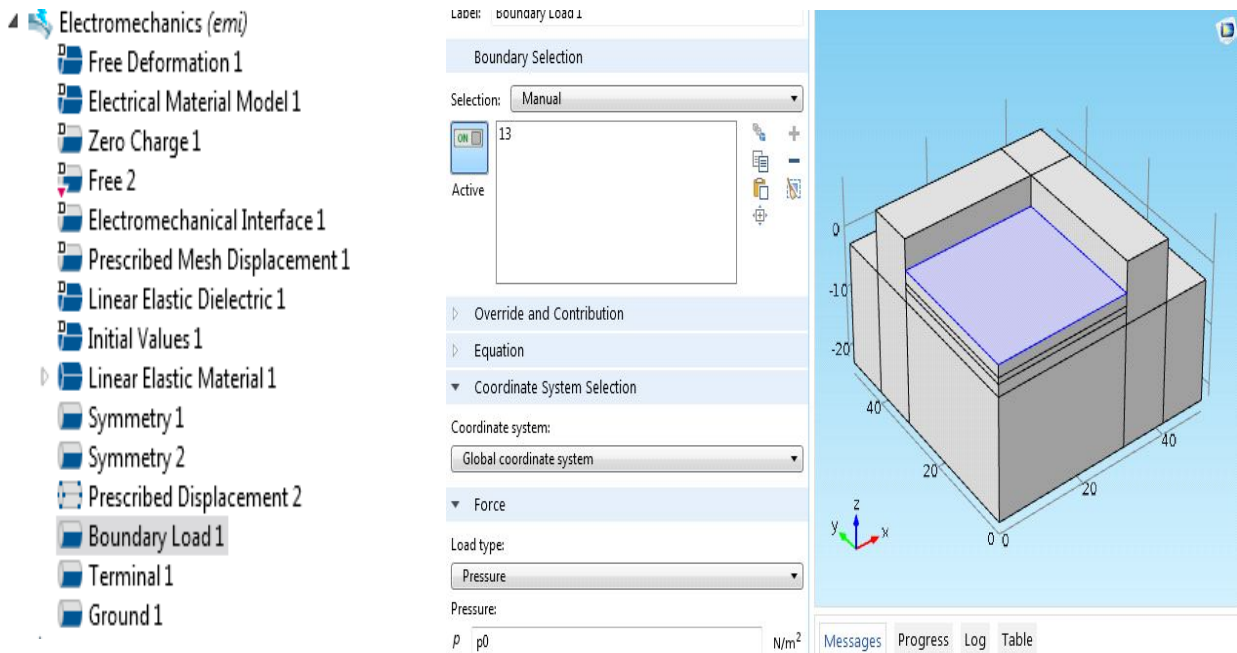


Figure IV. 5 : Sélection des conditions aux limites

IV.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.

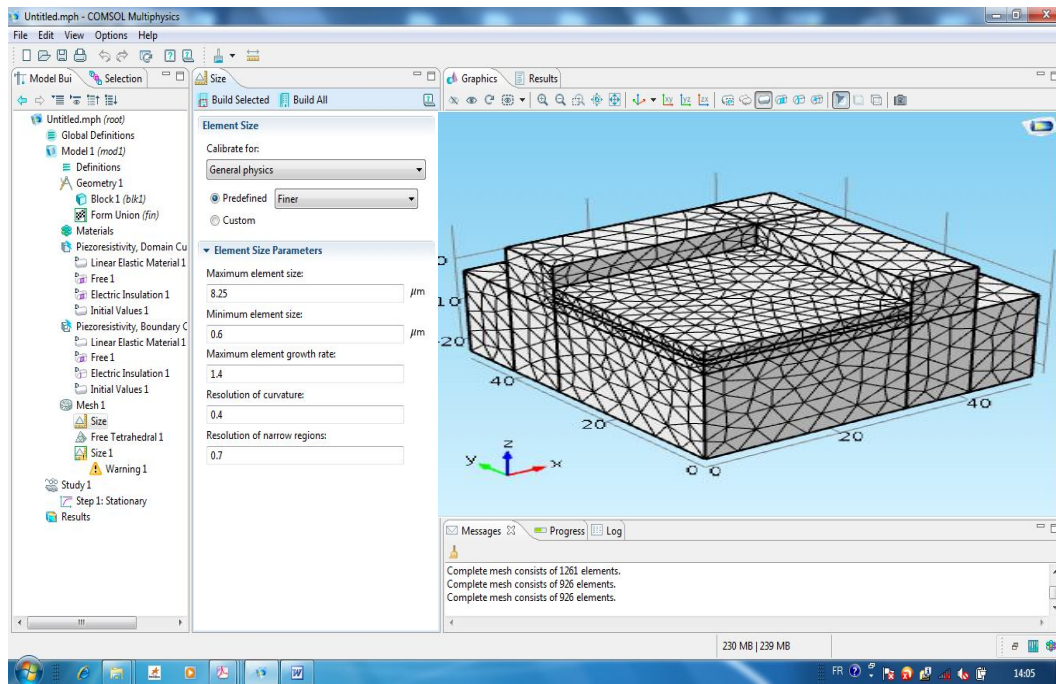


Figure IV. 6: création de mailles (maillage)

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.

IV.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-dépendent 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).

IV.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 solutionneur que vous choisissez. Vous pouvez désactiver le choix automatique de solutionneur basé sur le type d'analyse en dégageant la boîte de contrôle choisie automatique de solutionneur sous la liste d'analyse dans la zone de dialogue de paramètres de solutionneur.

IV.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.

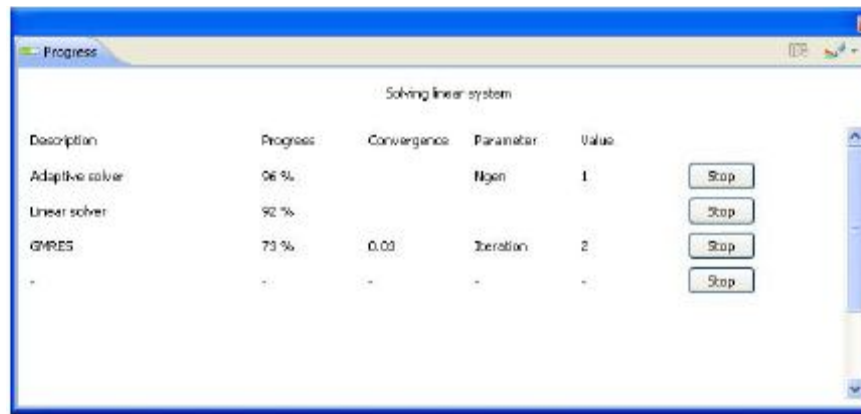


Figure IV. 7: Progression de l'exécution

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.

IV.7.Simulation d'un capteur de pression capacitif :

IV.7.1. Structure simulée :

la structure simulée est constituée principalement d'un élément fixe et d'une membrane en silicium monocristallin, entre les deux armature nous avons utilisé le vide et le verre comme diélectrique isolant. A cause de la symétrie de la structure un seul quadrant est pris en considération dans la géométrie du model(figure IV. 8) :

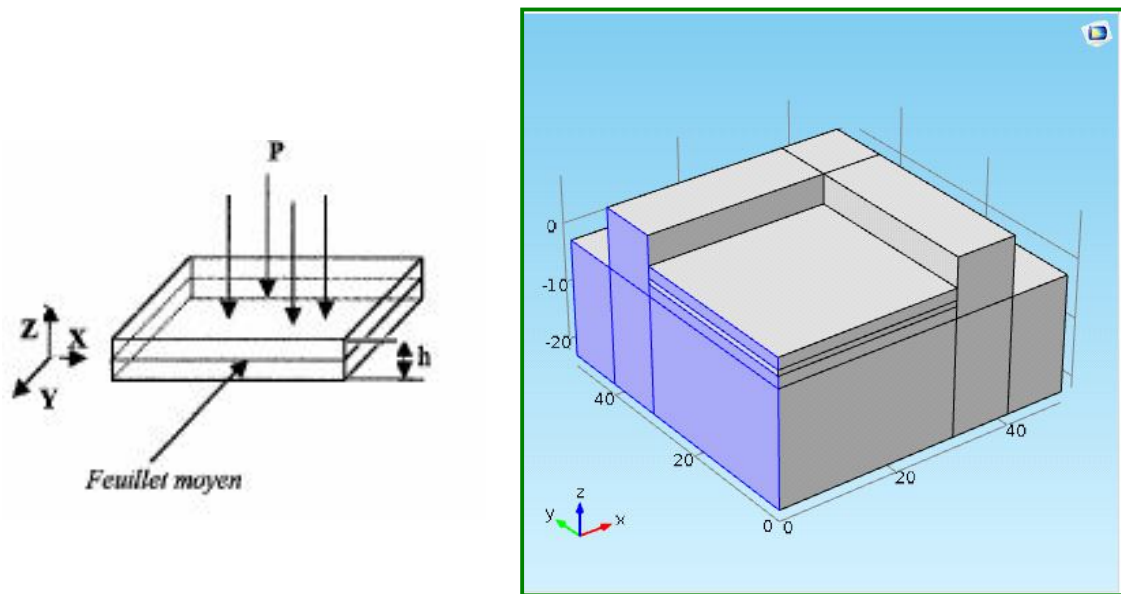


Figure IV. 9: géométrie de la structure simulée

Les propriétés des matériaux utilisés sont regroupées dans le tableau suivant :

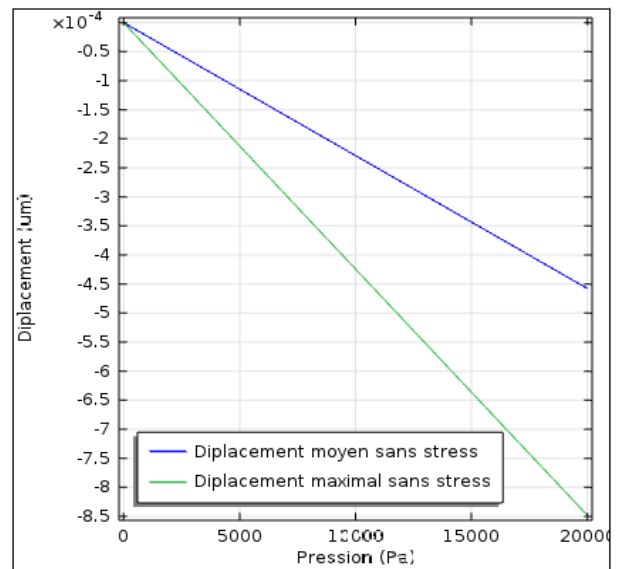
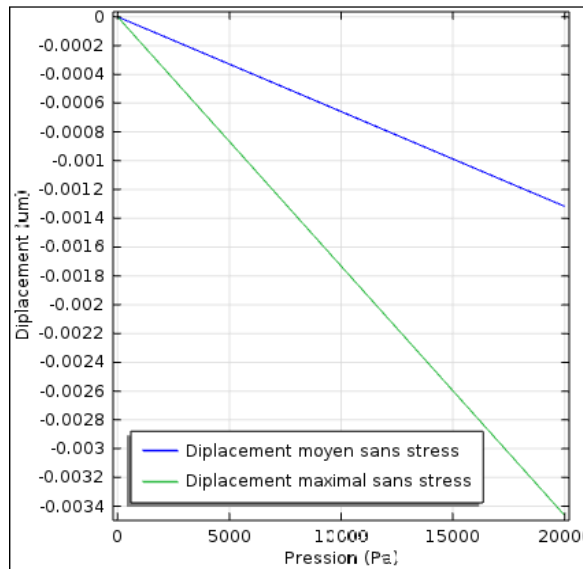
paramètres	matériels	
	Si	SiC
Young Modulus (MPa)	170[GPa]	748e9[Pa]
Coefficient de Poisson	0.06	0.45

Tableau IV. 1 : Les propriétés des matériaux

IV.7.2.Choix du matériau de la membrane :

La figure IV. 10 représente la courbe de déplacement moyen et déplacement maximum de la membrane pour plusieurs valeur de la pression appliquée allons de 0 Pa à 20000 Pa, et ce pour deux différent types de matériaux a savoir le silicium et le SiC.

A partir de cette courbe on peut remarquer que la membrane en Si fournit un plus grand déplacement par rapport à celui en SiC. Ceci va justifier l'utilisation du Silicium comme matériau de la micro membrane pour notre capteur simulé.



a)

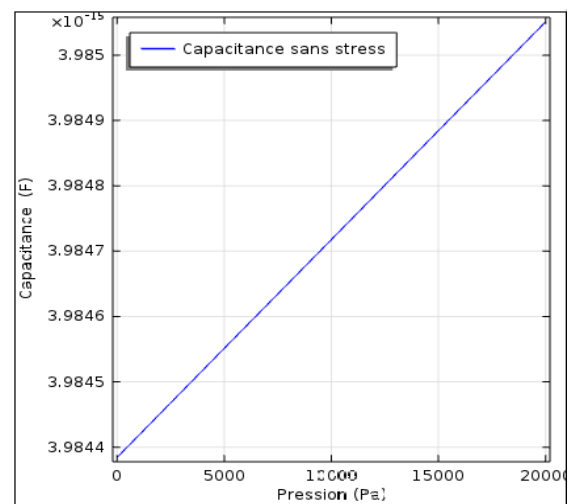
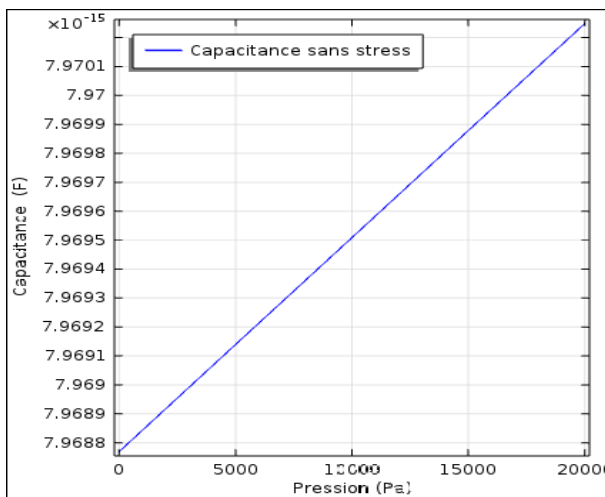


Figure IV. 11: la capacitance en fonction de la pression

a) déplacement : Si à gauche ; SiC à droite

b) capacité : Si à gauche ; SiC à droite

IV.8. Influence des paramètres géométriques :

IV.8.1. Influence de l'épaisseur du diélectrique :

La figure IV. 9 représente l'effet de l'épaisseur du diélectrique sur la réponse capacitif du capteur pour une pression appliquée allant jusqu'à 20Kpa et ce pour des épaisseurs du

diélectrique de 2 μm , 4 μm et 5 μm avec une épaisseur de la membrane de 3 μm et une surface de 900 μm^2 .

On peut remarquer clairement que plus l'épaisseur d augmente plus la capacité diminue.

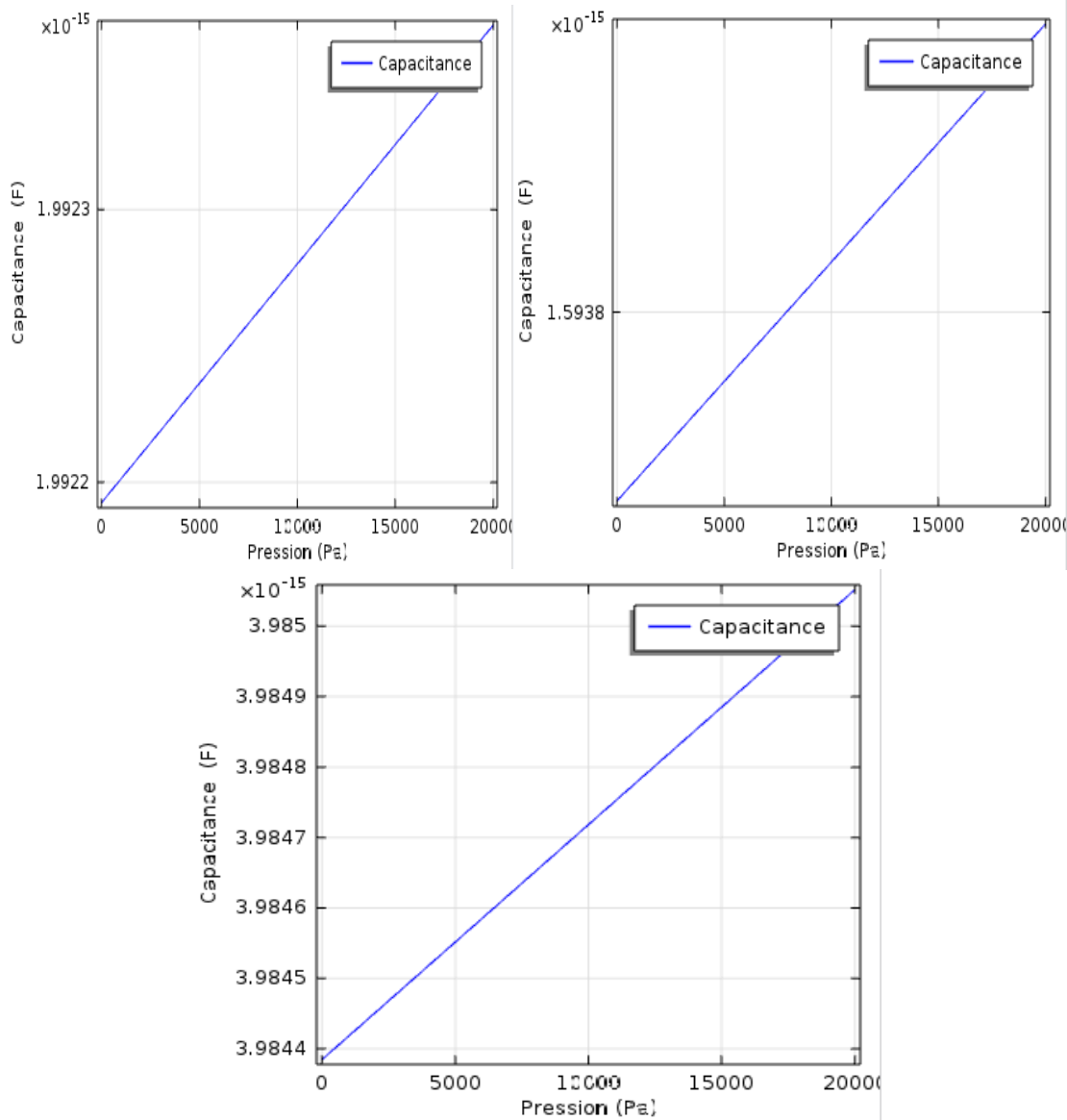
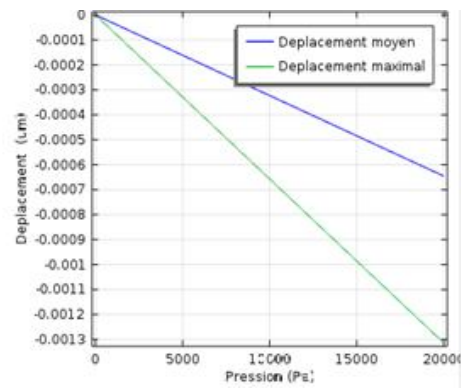
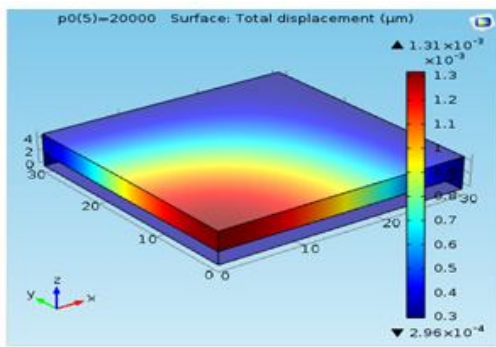


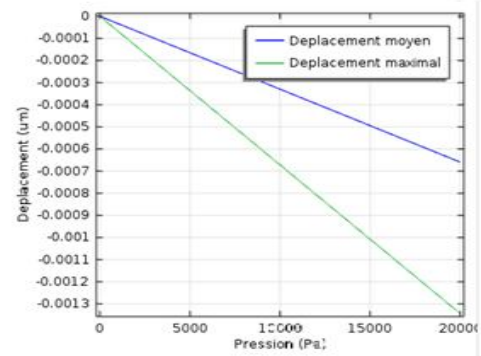
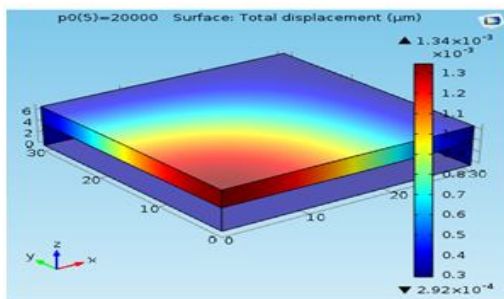
Figure IV. 12: l'effet de l'épaisseur du diélectrique

IV.8.2. Influence sur le déplacement :

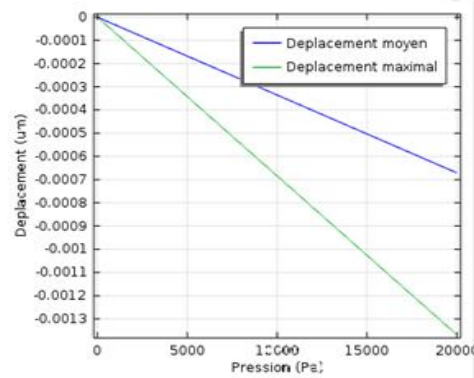
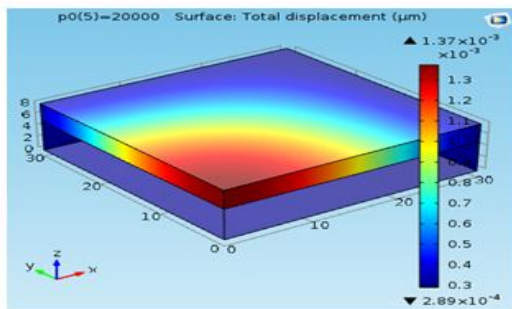
La figure IV.10 présente la variation du déplacement maximum et du déplacement moyen de la membrane pour les différentes valeurs du diélectrique d, sous une pression allant de 0 à 20Kpa. On remarque que le déplacement maximum augment avec l'augmentation de l'épaisseur d, par contre le déplacement moyen reste inchangé dans les trois cas à cause de la distribution de la pression sur toute la surface de la membrane.



a) d=2μm



b) d=4μm



c) d=4μm

Figure IV. 13: la variation du déplacement maximum et du déplacement moyen de la membrane pour les différentes valeurs du diélectrique d

IV.8.3. Influence de l'épaisseur de la membrane :

La membrane est l'élément le plus important du capteur, ce paragraphe présente les résultats obtenus de l'influence de l'épaisseur de la membrane sur la capacité du capteur, en effet pour un capteur de surface de $900\mu\text{m}^2$ et pour une épaisseur du diélectrique de $1\mu\text{m}$ on remarque sur la figure IV. 11 que l'épaisseur de la membrane influe peu sur la capacité.

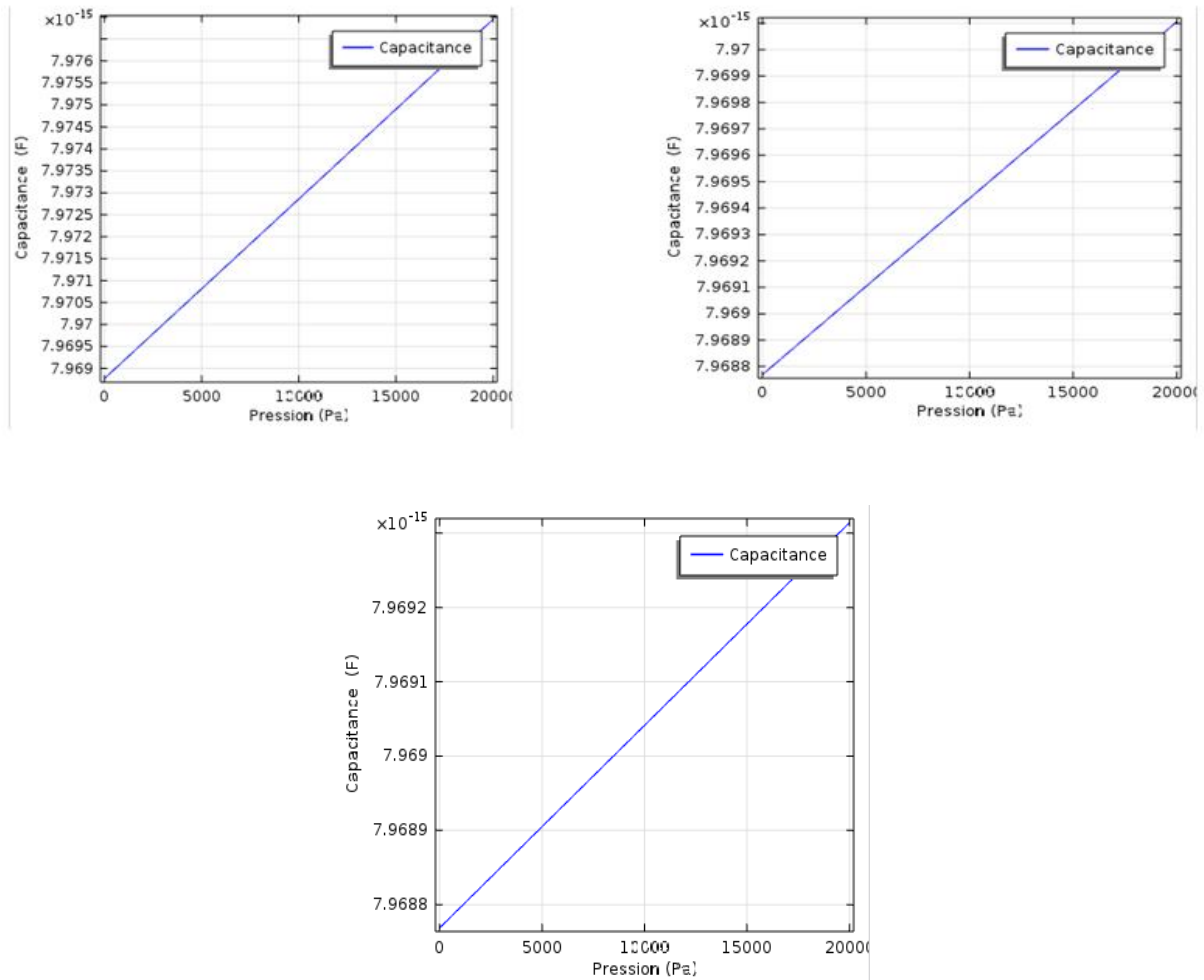


Figure IV. 14: l'influence de l'épaisseur de la membrane sur la capacité du capteur

Contrairement à la capacité on remarque sur la figure IV. 12 une nette influence de l'épaisseur de la membrane sur le déplacement maximum qui passe de E_t et de même une influence est remarquée sur le déplacement moyen.

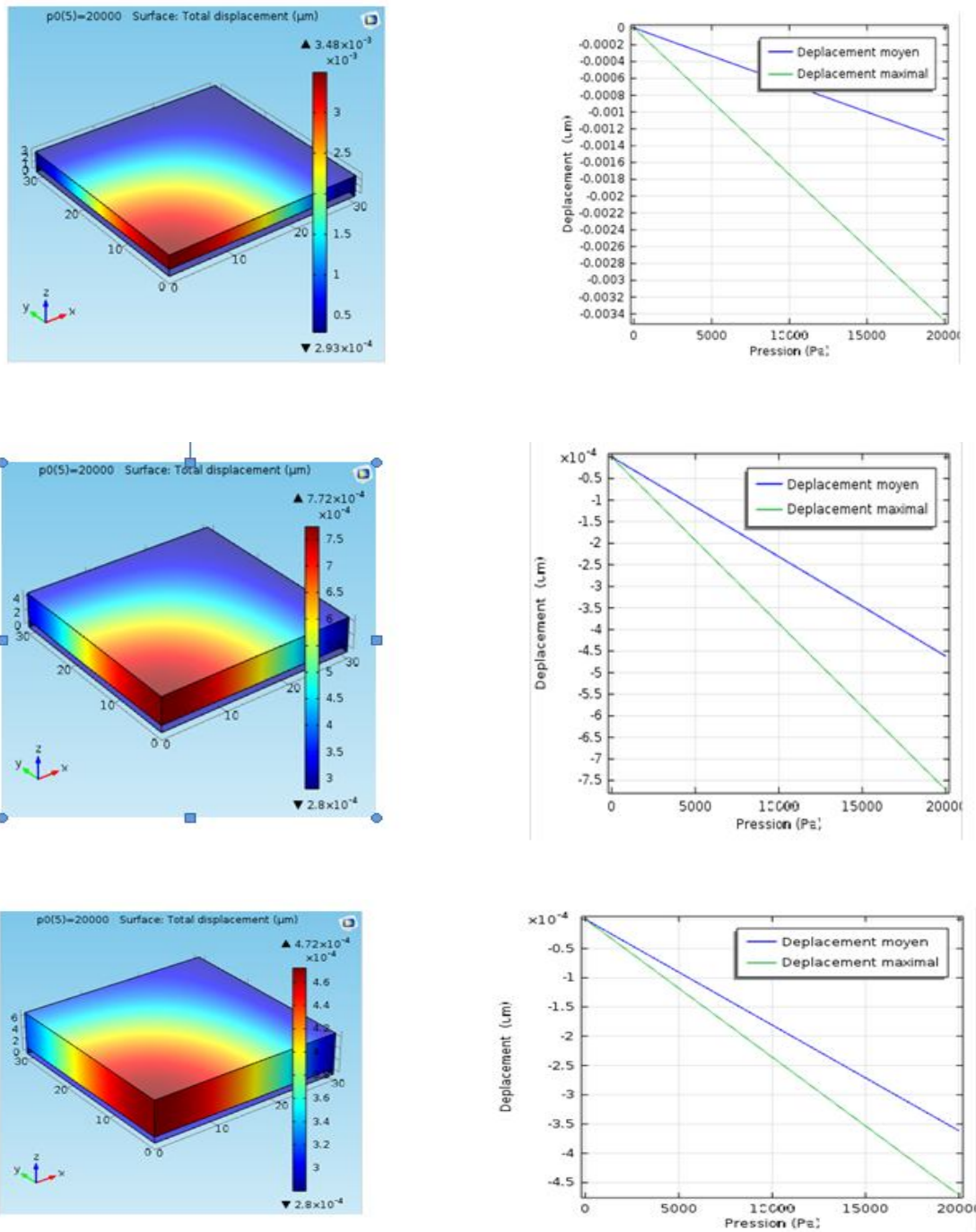


Figure IV. 15: influence de l'épaisseur de la membrane sur le déplacement maximum et moyen

IV.8.4. Influence de la température :

Les courbes de la figure IV. 13 présentent une étude de la réponse capacitive et du déplacement de la membrane en fonction de la température le facteur le plus étudié dans les microcapteurs et les microsystemes. On peut remarquer sur cette figure que : pour une même pression appliquée sur la membrane, la capacité diminue quant la température augmente par contre le déplacement moyen de la membrane augmente avec l'augmentation de la température.

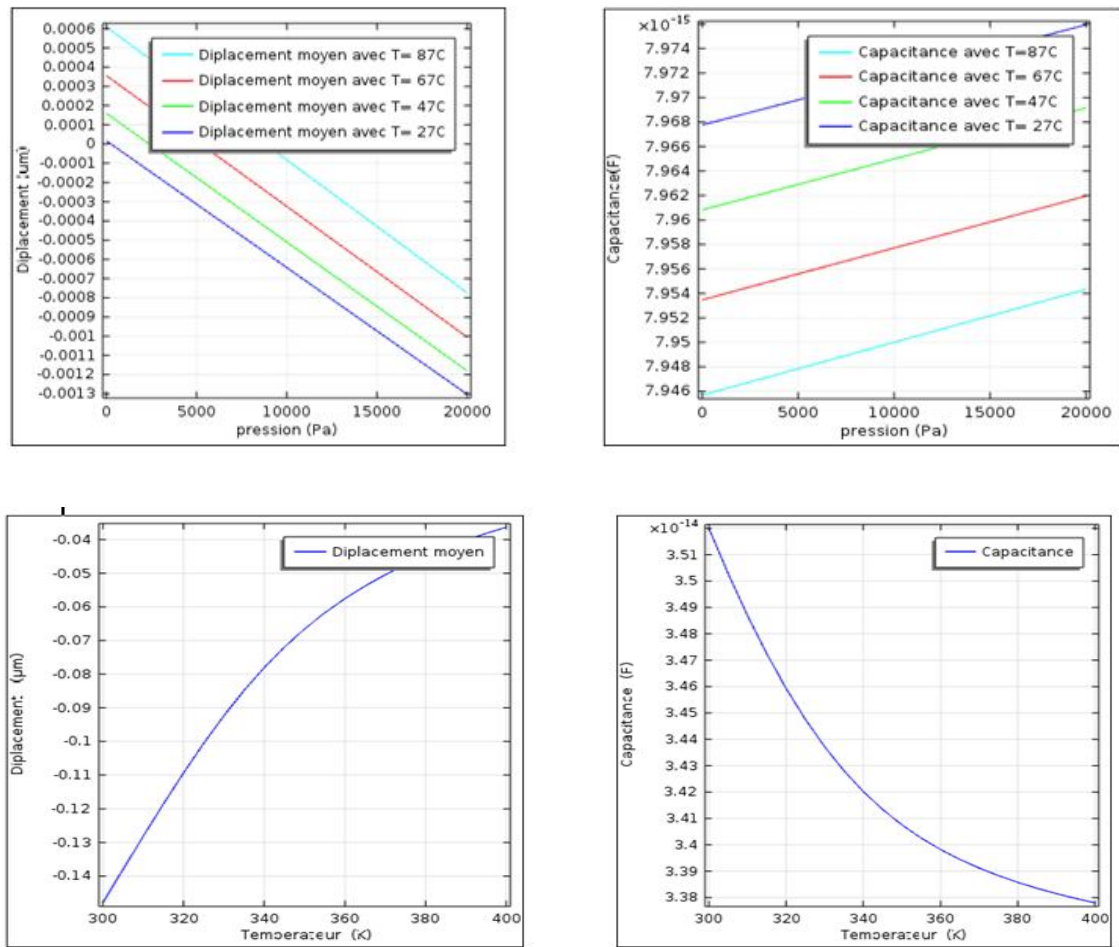


Figure IV. 16: la réponse capacitive et du déplacement de la membrane en fonction de la température

IV.8.5. Influence de la nature du diélectrique :

L'influence de la permittivité du diélectrique est représentée sur la figure IV. 14. Sur cette figures nous avons tracé la variation de la capacité pour deux type d'isolant : le vide et le verre et ce pour différentes valeurs de l'épaisseur. On peut remarquer clairement que pour une même pression appliquée et pour une même épaisseur du diélectrique la capacité du verre est plus élevée que celle du vide

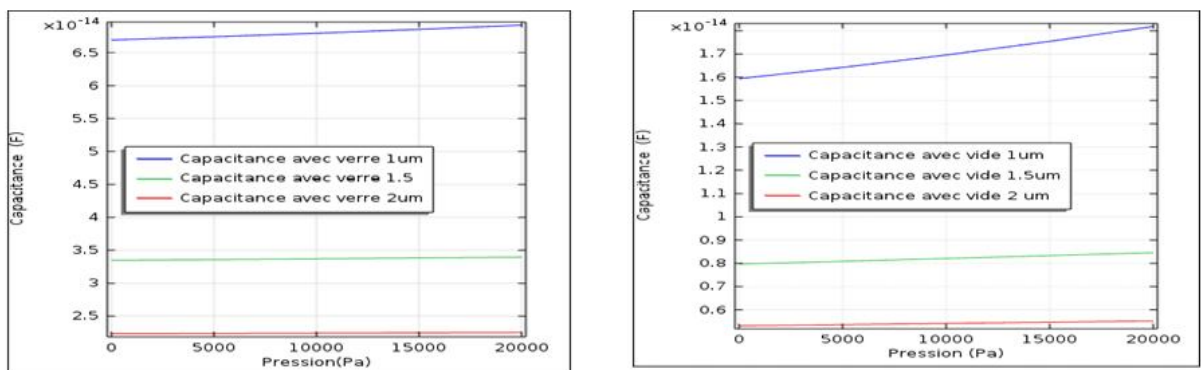


Figure IV. 17: la variation de la capacité pour deux type d'isolant : le vide et le verre

IV.9.Conclusion :

Pour conclusion : dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de notre structure capacitif avec le logiciel multiphysique COMSOL. Nous avons étudié dans ce chapitre l'effet des paramètres géométriques du capteur de pression sur les caractéristiques électrique à partir du déplacement de la membrane et de la capacité du capteur.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail a été consacré à l'étude et la simulation d'un capteur de pression capacitif à membrane au silicium utilisé dans les microsystèmes MEMS pour des applications diverses.

Notre simulation est basée sur la méthode des éléments finis utilisée dans le logiciel multiphasique COMSOL. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques d'une structure capacitif constituée de deux armatures dont l'une est déformable sous l'effet de la pression, sur les caractéristiques mécaniques et électriques du capteur. Nous avons étudié entre autre l'influence de l'épaisseur du diélectrique, l'épaisseur de la membrane, ainsi que la température sur la réponse capacitive du capteur.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : P. Menini. Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium. Micro et nanotechnologies/Microelectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1998.
- [2] : F. KERROUR «Étude et modélisation de capteurs de pression piezoresistifs et capacitif au silicium ». Doctorat d'état en électronique. Université de Constantine. 2008.
- [3] : A. Permuy, E. Donzier «Capteurs microélectroniques», technique de l'ingénieur T3093, mai 2004.
- [4] : A. Benichou «Conception et Modélisation d'un accéléromètre microélectronique triaxial, mémoire de magister, université de Tlemcen, 2012. .
- [5] : G. Asch, les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod/Bordas, Paris, 1982.
- [6] : O. français, «capteurs et électronique associée (partie II : Acquisition de données), 2000
- [7] : K. merabet, «Étude et simulation d'un capteur de pression capacitif au silicium, mémoire de magister, université de Constantine, 2010 .
- [8] : A. permuy, Capteur à semi-conducteurs, technique de l'ingénieur, traité électronique, E 2 310- 7(1990).
- [9] : S. kemouche, simulation thermomécanique de capteurs de pression au silicium pour des applications biomédicales, mémoire de magister, université de Constantine 1, 2014.
- [10] : M. al bahri, influence de la température sur le comportement statique et dynamique des capteurs de pression capacitifs au silicium, Doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, 2005.
- [11] A. pierre, Étude des propriétés électro-thermo-mécaniques de nanofils en silicium pour leur intégration dans les microsystèmes, thèse de Doctorat de l'université de Paris Sud, 2012.
- [12] : M. ras lain, contribution à l'identification des paramètres de non idéalité dans des capteurs de pression piezoresistifs au silicium, thèse de doctorat de l'université Mentouri Constantine, 2008.
- [13] : K.W.lee and K.wise, SENSIM, a simulation program for solid-state pressure sensors, IEEE, 1982.
- [14] : N. benmoussa, conception, modélisation et réalisation d'un capteur de pression capacitif microélectronique, thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier Toulouse, 1985.
- [15] : W.P.eaton, F.bitsie, J.smith, D.W.plummer, a new analytical solution for diaphragm deflection and its application to a surface micromachined pressure sensor, Sandia national laboratories. 2000. Albuquerque, NM 87185-1081.

Bibliographie

- [16] : ML. Hafiane, conception d'un capteur de pression intelligent, memoire de magister, universite de Batna, 2005.
- [17] : X. chauffleur, modelisation par la methode des element finis du comportement thermomécanique de capteur de pression capacitifs et piezoresistifs en silicium, these de l'universite paul sabatier de poulouse, 1998.
- [18] : 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.
- [19] : C. malhaire, caracterisation et modelisation de microtransducteur de pression à hautes performances integrés sur silicium, thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de LYON, 1998 .
- [20] : J. verstraeten, conception d'un microcapteur de force 3-axes pour tissus mous, these de doctorat genie electrique, université de SHerbrooke, 2010.
- [21] : H. horsin molinaro, O. français, Les technologie MEMS, CNS, 2014.
- [22] : J. esteves, la technologie CMOS-MEMS pour des applications acoustiques, docteur de l'université de grenoble, 2006 .
- [23] : P. ginet, conception et élaboration de microstructures en technologie hybride couche épaisse pour des applications MEMS. thèse de doctorat.

Liste des figures

liste des figures

Figure I. 1: Principe d'un capteur	5
Figure I. 2: Constitution d'une chaîne de mesure classique	6
Figure I. 3: Effet d'hystérésis	9
Figure I. 4: Exemple de linéarisation de caractéristiques	11
Figure II. 1: les trois blocs du capteur.	18
Figure II. 2: structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane	20
Figure II. 3: Schéma de principe d'un capteur de pression piézorésistif	21
Figure II. 4: Résistance R de forme parallélépipédique.	21
Figure II. 5: Principe de fonctionnement d'un capteur de pression	24
Figure II. 6: Définition des composantes du tenseur des contraintes mécanique	25
Figure II. 7: Capteur de pression capacitif au repos	28
Figure II. 8: Capteur en fonctionnement ($P_{ext} > P_{in}$)	28
Figure III.1 : Capteur MEMS : différents types de transduction.	33
Figure III. 2 : Visualisation de la cavité réalisée pour obtenir une membrane en silicium	35
Figure III.3 : La Technique de la photolithographie	38
Figure III.4 : Schéma d'un réacteur pour gravure par plasma	38
Figure III.5 : étapes de la gravure des membranes	39
Figure III.6: Orientation d'une membrane par rapport au repère cristallin - graphique du silicium et repère (O,x,y,z)	40
Figure III. 7 : Schéma des différentes microstructures que l'on peut Obtenir par micro-usinage en volume face avant	40
Figure III. 8 : Schéma des différentes structures résultantes d'un micro-usinage en volume face arrière	41
Figure IV. 1: interface graphique du COMSOL	45
Figure IV. 2: Dessin de la géométrie	46
Figure IV. 3: collection et choix de matériaux	48
Figure IV. 4 : Sélection des conditions aux limites	49
Figure IV. 5: création de mailles (maillage)	50
Figure IV. 6: Progression de l'exécution	52
Figure IV. 7: géométrie de la structure simulée	53
Figure IV. 8: la capacitance en fonction de la pression	54

Liste des figures

Figure IV. 9: l'effet de l'épaisseur du diélectrique	55
Figure IV. 10: la variation du déplacement maximum et du déplacement moyen de la membrane pour les différentes valeurs du diélectrique d	56
Figure IV. 11: l'influence de l'épaisseur de la membrane sur la capacité du capteur	57
Figure IV. 12: influence de l'épaisseur de la membrane sur le déplacement maximum et moyen	58
Figure IV. 13: la réponse capacitive et du déplacement de la membrane en fonction de la température	59
Figure IV. 14: la variation de la capacité pour deux type d'isolant : le vide et le verre	59

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Effets utilisés pour les capteurs passifs	7
Tableau I. 2: Effets utilisés pour les capteurs actifs	8
Tableau IV. 1 : Les propriétés des matériaux	53

Résumé

Les capteurs piézorésistifs forment la majorité des capteurs de pression disponibles sur le marché. Ces composants sont extrêmement sensibles à la température et ne peuvent fonctionner correctement sans l'addition de circuits de compensation onéreux, c'est pourquoi, depuis plusieurs années, les recherches s'orientent vers les capteurs de pression capacitifs.

Le travail effectué dans ce mémoire s'insère dans ce cadre, puisqu'il consiste en l'étude du comportement mécanique et électrique d'un capteur de pression capacitif au silicium.

Notre simulation est effectuée par le logiciel COMSOL multiphysics, et nous a permis d'étudier entre autre l'influence de l'épaisseur du diélectrique, l'épaisseur de la membrane, ainsi que la température sur la réponse capacitive du capteur.

Mots clés : capteur de pression, capteur capacitif ; capteur passif, COMSOL.

تشكل غالبية أجهزة استشعار الضغط piezoresistive المتاحة في السوق. هذه المكونات هي حساسة للغاية لدرجة الحرارة ولا يمكن أن تعمل بشكل صحيح بدون إضافة للدوائر تعويضات باهظة الثمن، وهذا هو السبب، لعدة سنوات، يتم توجيه البحوث نحو أجهزة استشعار الضغط بالسعة. الأعمال المنجزة في هذه الورقة هو جزء من هذا الإطار، كما هو دراسة سلوك الميكانيكية والكهربائية لأجهزة الضغط استشعار بالسعة إلى السيليكون. يتم تنفيذ المحاكاة من قبل برنامج COMSOL multiphysics ، وسمح لنا لدراسة بين الآخرين تأثير سماكة العازل، وسمك الغشاء، ودرجة حرارة استجابة جهاز الاستشعار بالسعة .

الكلمات المفتاحية جهاز استشعار الضغط استشعار بالسعة استشعار السلبي Comsol