REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE

LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention de diplôme de Master filière : Electronique

Spécialité : instrumentation

Thème :

CONCEPTION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF EN TECHNOLOGIE MEMS

Présenté par :

- **Yahia KHOUDRANE**
- **Brahim BELMESSAOUD**

proposé et dirigé :

- **Brahim KEHILECHE**
- **Noureddine HENINI**

Année 2020-2021

TABLE DES MATIERES

table des matiéres i

Résumé iv

Remerciements v

Dedicace vi

Liste des figures.....viii

Liste des tableaux x

INTRODUCTION GENERALE 10

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUS

I.1.Introduction.....13

I.2.Généralité sur les capteurs 13

I.2.1.Description d'un capteur de pression.....13

I.2.2. Principes de détection dans les capteurs de pression.....14

I.2.3.Classification des capteurs 16

I.2.4. Grandeurs dinfluence.....17

I.3.Différents types de capteurs de pression.....18

I.3.1.Définition de la pression : 18

I.3.2.Capteur de pression RF 18

I..3.3.Capteur de pression piézorésistif 19

I.3.4.Capteur de pression capacitif 20

I.3.5.Capteur de pression optique: 21

I.4.Capteurs en technologieMEMS(MicroElectro-MechanicalSystem): 22

I.4.1.Définition des MEMS : 22

I.4.2.Les principes physiques du microsystème : 23

I.4.3.Domaines d'applications des MEMS : 23

I.4.4.Capteur de pression en technologie MEMS: 24

I.4.5.Capteur de pression MEMS à transduction électromagnétique : 26

I.5.Conclusion : 26

CHAPITRE II : MODELISATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF (MEMS)

II.1.Introduction 28

II.2.Principe de fonctionnement 28

II.3.Modélisation du capteur de pression capacitif 29

II.4.Etude de la déflexion dans le cas petites déformations 32

II.4.1.Membrane de forme carrée 32

II.4.2.Membrane de forme circulaire 34

II.5.Etude de la déflexion dans le cas grandes déformations 35

II.5.1.Membrane de forme carrée 35

II.5.2.Membrane de forme circulaire 36

II.6.Conclusion 37

CHAPITRE III : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF

III.1.Introduction 39

III.2.Définition du comsol 39

III.2.1Principe d'utilisation 40

III.2.2.L'interface utilisateur comsol 5.2 41

III.3.Resultat de la simulation 43

III.3.1.L'effet de la pression sur le deplacement de la mobrane : 44

III.3.2.L'effet de la pression sur la variation de potentiel electrique : 46

III.3.3.Effet des parametres geometriques sur la sensibilite de capteur 48

III.3.4.La reponse capacitive pour une epaisseur de la membrane de 30µm a 60µm 49

III.3.5.L'effet de l'epaisseur de la membrane sur le deplacement 49

III.3.6.L'influence de la temperature 50

III.4.Conclusion 51

CONCLUSION GENERALE 52

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 53

ملخص

تجمع تقنيات الأنظمة الصغرى بين تقنيات الإلكترونيات الدقيقة المتطورة لأشباه الموصلات وتقنيات المعالجة الدقيقة الجديدة ، مما يجعل من الممكن بناء أنظمة كاملة على شريحة. بالإضافة إلى ذلك ، سيسمح هذا التكامل للنظام بالتصغير وتحسين أدائه وزيادة الحساسية. الهدف من هذه الرسالة هو الدراسة. التتصميم والمحاكاة لمستشعر الضغط بتقنية النظم الكهروميكانيكية الصغرى ، في بيئة COMSOL Multiphysics 5.2 مع مراعاة الهيكل الكامل لمستشعر الضغط السعوي الغشائي ذي الشكل المربع في تقنية Silicium/Pyrex. أظهرت نتائج المحاكاة أن حساسية درجة الحرارة مستقلة عن سمك القاعدة ولكنها تعتمد على سمك الغشاء وسماكة التجويف وشكل التضمين.

الكلمات المفتاحية: تقنية النظم الكهروميكانيكية الصغرى ، مستشعر الضغط السعوي ، COMSOL Mutuphysics.

Résumé

Les technologies microsystèmes conjuguent les techniques de pointes de la microélectronique des semi-conducteurs et des nouvelles techniques du micro usinage permettant ainsi la réalisation des systèmes entiers sur une puce. En plus, cette intégration permettra de miniaturiser le système, d'améliorer ses performances et d'augmenter la sensibilité. L'objectif de ce mémoire est l'étude , la conception et la simulation d'un capteur de pression en technologie MEMS, sous environnement COMSOL Multiphysics 5.2, tenant compte de l'intégralité de la structure du capteur de pression capacitif à membrane de forme carrée en technologie Silicium/Pyrex. Les résultats de simulation ont montré que la sensibilité à la température est indépendante de l'épaisseur du substrat mais qu'elle dépend de l'épaisseur de la membrane, de l'épaisseur de la cavité et de la forme de l'encastrement.

Mots clés : Technologie MEMS, Capteur de pression capacitif, COMSOL Mutuphysics.

Abstract

Microsystems technologies combine cutting-edge microelectronics techniques for semiconductors and new micro-machining techniques which makes it possible to build entire systems on a chip. In addition, this integration will allow the system to miniaturize, improve its performance and increase sensitivity. The objective of this dissertation is studying the design and simulation of a pressure sensor in MEMS technology in a COMSOL Multiphysics 5.2 environment taking into account the entire structure of the square-shaped membrane capacitive pressure sensor in Silicon / Pyrex technology. The simulation results showed that the temperature sensitivity is independent of the thickness of the substrate, but it depends on the thickness of the membrane, the thickness of the cavity and the shape of the embedding.

Keywords: MEMS technology, Capacitive pressure sensor, COMSOL Mutuphysic

Remerciements

Je remercie Allah tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser ce mémoire.

J'exprime mes chaleureux remerciements au directeur de mémoire, **Dr KEHILECHE BRAHIM,** qui a suivi mes travaux.

Pour ses fructueuses remarques, ses encouragements et sa passion pour la recherche. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude. Pour l'honneur qu'il m'a accordé,

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury: Mr CHIBA Younes MCA université de Médéa, et Mr HENINI Noureddine MCA université de Médéa. Je les remercie chaleureusement pour leur présence et pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire.

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

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères, *Masbah, Ismail, Youcef, Sif-Ellah.*

A mes chères sœurs et leurs enfants

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher grand-père,

Qu'Allah repose son âme en paix.

A ma chère binôme, *Brahim.*

Pour sa entente et sa sympathie.

A mes chères amies,*Khiro, Issam, Hafed, Islam, Djilali, Hacen, Bilal, Achraf , Rahim, Zaki, Allaeddin, Ziad, Adel, Zizo, riadh, Badr,Taher. Et celui qui l'a oublié, pardonne-moi*

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

Sans ta présence,

Mon âme est triste et mon cœur est lourd.

Yahia Khoudrane

Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères, *sadek,,Youcef,*

A mes chères sœurs et leurs enfants

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A mon cher grand-père,

Qu'Allah repose son âme en paix.

A ma chère binôme, *Yahia.*

Pour sa entente et sa sympathie.

A mes chères amies, *Allaeddin, Ziad, Adel, Zizo, riadh, Badr, Taher.et chers collègues de classe*

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

A toute ma famille,

Sans ta présence,

Mon âme est triste et mon cœur est lourd.

Brahim Belmessaoud

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUS

Figure I.1: Schéma de principe d'un capteur 13
Figure I.2: Schéma synoptique d'un capteur de pression..... 13
Figure I.3: Exemple d'un capteur sans fils..... 16
Figure I.4 : La partie active d'un capteur de pression RF 18
Figure I.5 : Structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane..... 19
Figure I.6 **:** Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif[15]..... 20
Figure I.7 : Schéma synoptique d'un capteur de pression capacitif 20
Figure I.8 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif 21
Figure I.9 : Principe d'un système de mesure à base d'une cavité Fabry-Pérot 22
Figure I.10 : Visualisation de l'échelle d'un MEMS 22
Figure I .11 : Domaines d'application des MEMS..... 24
Figure I.12 : Production collective de MEMS qui seront séparés en toute fin du précédé visualisation De la cavité réalisée pour obtenir la membrane en silicium 24
Figure I.13 : Schéma de la déformation de la membrane d'un capteur de pression 24
Figure I.14 : Schéma de l'implantation intégrée d'une jauge piézorésistive 24
Figure I.15 : Schéma du pont de Wheatstone..... 25
Figure I.16 : Principe de fonctionnement du capteur MEMS à transduction électromagnétique pour la mesure de la pression 26

CHAPITRE II : MODELISATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF (MEMS)

Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un capteur de pression capacitif..... 28

Figure II.2 : Structure de la cellule sensible capacitive 28
Figure II.3 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif 28

CHAPITRE III : CONCEPTION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF

Figure III.1: Logo de logiciel COMSOL Multiphysics 5.2. 39
Figure III.2: Diagramme des étapes de conception avec COMSOL Multiphysics 40
Figure III.3: L'interface graphique COMSOL Multiphysics 5.2. 41
Figure III.4: La géométrie du capteur de pression MEMS. 42
Figure III.5: Présente le Maillage d'un capteur de pression MEMS… ……42
Figure III.6: Déflexion de membrane Carré. 43
Figure III.7: Déplacement de la membrane de silicium au repos pour une pression de 0 Pa .. 44
Figure III.8: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 10000 Pa 44
Figure III.9: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 20000 Pa 45
Figure III.10: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 25000 Pa 45
Figure III.11: Variation de potentiel électrique pour une pression de 0 Pa 46
Figure III.12: Variation de potentiel électrique pour une pression de 10000 Pa 46
Figure III.13: Variation de potentiel électrique pour une pression de 20000 Pa 47
Figure III.14: Variation de potentiel électrique pour une pression de 25000 Pa 47
Figure III.15: La sensibilité de capteur en fonction de la pression appliquée pour l'épaisseur de la membrane (hs) différentes. 48
Figure III.16: La sensibilité de capteur en fonction de la pression, pour (d) différentes 48
Figure III.17: La capacité en fonction de la pression, pour l'épaisseur (hs) différentes 49
Figure III.18: Déplacement de la membrane en fonction de pression, pour épaisseur (hs) différente 50
Figure III.19:La réponse capacitive en fonction de la température pour épaisseur (hs) différentes 50

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUS

Tableau I.1 : Principaux capteurs actifs 16
Tableau I.2 : Capteurs passifs : principes physiques et matériaux. 17

CHAPITRE II : MODELISATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF (MEMS)

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients réduits Kij pour n=3 33

INTRODUCTION GENERALE

Les microsystèmes MEMS (Micro Electro Mecanical System) sont des composants miniaturisés réunissant des fonctions électroniques, mécaniques et optiques sur la même puce [1].

Les microsystèmes sont nées à la fin des années 80, ces technologies sont la suite logique des progrès réalisés en microélectronique silicium, ainsi ces composants sont destinés à toucher tous les grands secteurs d'applications comme les transports, la santé, les télécommunications et l'environnement... Les applications les plus connues sont pour les microactionneurs et les capteurs [2].

Parmi les capteurs les plus courants nous citerons les capteurs de température, de pression et d'accélération. Les capteurs de pression connaissent depuis les années 80 un essor de plus en plus important. Qui est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium, exploitant les techniques microélectroniques. Les détections piézorésistive et capacitive sont parmi les principes de détection les plus utilisées [3].

La majorité des capteurs de pression disponibles sur le marché sont des capteurs piézorésistifs. 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, des recherches s'orientent vers des capteurs de pression capacitifs à partir des technologies de la microélectronique et de procédés spécifiques. Par rapport aux capteurs de pression classiques, les capteurs MEMS présentent plusieurs avantages. Ce type de capteur est caractérisé par une grande sensibilité à la pression, une fabrication en grande série, une petite taille, une faible consommation d'énergie et une connexion facile avec les circuits intégrés MOS [4].

L'objectif de ce mémoire est la conception et la simulation d'un capteur de pression capacitif en technologie MEMS par le logiciel COMSOL Multiphysics.

Ce mémoire comporte trois chapitres.

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.

Dans le deuxième chapitre, nous commençons par la description de la structure du capteur étudié. Puis nous étudions la déflexion d'une membrane fine au silicium parfaitement encastrée aux bords, de formes carrée soumise à une pression uniforme et constante dans les cas des faibles et des grandes déformations, afin de déterminer les performances du capteur et de l'intervalle de la validité des modèles établis.

Dans le troisième chapitre, nous étudions le capteur de pression capacitif en technologie MEMS qui est composé d'une micro membrane au silicium de forme carrée, constituant l'électrode mobile. Cette membrane est collée par soudure anodique à un substrat pyrex créant ainsi une cavité. La déformation de la membrane sous l'effet de la pression appliquée engendre une variation de capacité qui constitue la réponse du capteur à la pression C(P). 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 carrée, et puis la réponse capacitive C (P, T) ainsi que la sensibilité à la pression et à la température. Ceci nous permet de déterminer les effets des paramètres d'influence (L'épaisseur de la membrane, et la distance inter électrodes) sur les performances du capteur de pression.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR

I.1. INTRODUCTION :

Les capteurs MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) sont des dispositifs électroniques de dimension microniques ou millimétriques qui utilisent la plateforme technologique de la microélectronique.

Parmi les capteurs les plus usuels dans l'industrie, les capteurs de pression connaissent, depuis les années 80 un essor de plus en plus important. Qui est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium, exploitant les techniques microélectroniques. Les capteurs de pression sont largement utilisés dans les applications automobiles, contrôle des processus et des applications biomédicales. Le principe de base des capteurs de pression est de transformer la pression en un signal électrique.

Avant la présentation de la conception et la modélisation du capteur de pression MEMS, il est important de discuter de façon générale sur le capteur de pression dans la technologie MEMS.

Ce chapitre a pour but de présenter une étude bibliographique sur les capteurs standards et en technologie MEMS. Un aperçu du marché mondial des capteurs et des composants en technologie MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) montre tous les besoins et les enjeux économiques liés à ces éléments de mesure, qui deviennent des éléments essentiels pour la vie de tous les jours. Ces demandes émergentes consistent en une simplicité du capteur et le souhait d'un système de mesure sans fil qui ne nécessite pas de contact physique. Les capteurs sans fil présentent plusieurs avantages par rapport autres types de capteurs mais beaucoup de contraintes de conception et réalisation freine leurs développements

I.2. GENERALITE SUR LES CAPTEURS :

I.2.1.DESCRIPTION D'UN CAPTEUR DE PRESSION:

Un capteur est un dispositif électronique servant à transformer une grandeur physique, chimique ou biologique, appelée mesurande, en une autre grandeur exploitable (souvent un signal électrique). Il comprend un élément transducteur qui fournit une grandeur, le plus souvent électrique, constituant le signal de sortie [1] représenté par la figure I .1

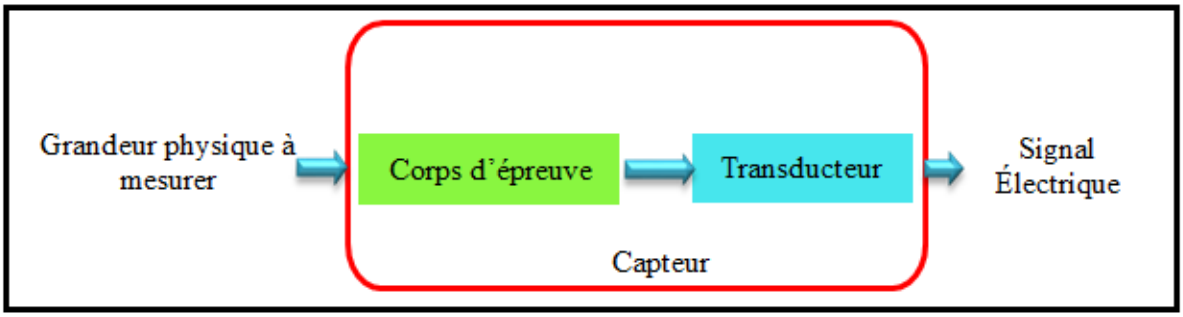


Figure I.1 : Schéma de principe d'un capteur.

La pression, constitue une variable essentielle pour l'étude métrologique d'un milieu environnant qui peut-être soit un gaz soit un fluide. La mesure de cette grandeur physique est réalisée à l'aide d'un capteur de pression, dispositif capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé « réponse ». Le capteur de pression comme étant un système constitué de deux parties : une partie détection que nous appellerons « Cellule sensible » et une partie traitement de l'information par l'intermédiaire d'un circuit électronique que l'on peut appeler « Circuit électronique de traitement » ou encore « Circuit conditionnement ». La partie détection est quant à elle constituée d'un « corps d'épreuve » et d'un « transducteur » qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupart du temps électrique [2]. Un capteur de pression peut donc être représente par le schéma de la figure I .2 :

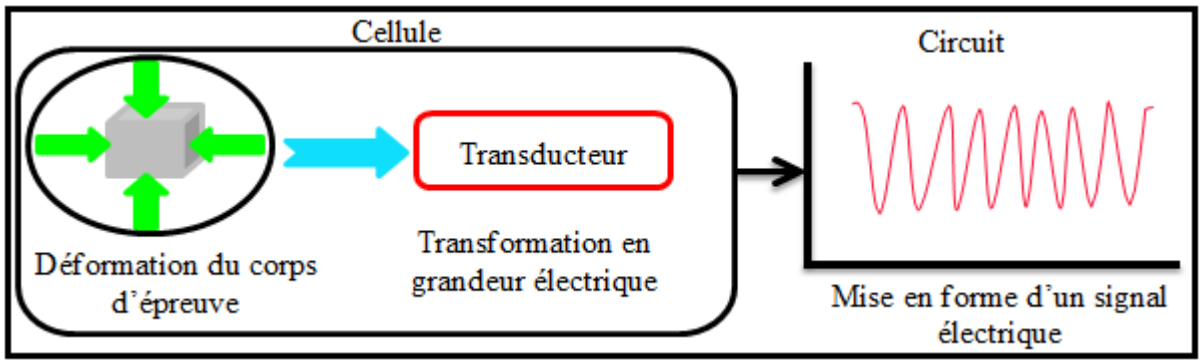


Figure I.1: Schéma synoptique d'un capteur de pression

Le schéma synoptique d'un capteur de pression constitue trois blocs essentiels

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

I.2.2. PRINCIPES DE DETECTION DANS LES CAPTEURS DE PRESSION

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.

- CORPS D'EPREUVE

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 [3]. Le corps d'épreuve d'un capteur de pression est l'élément assurant la transformation de la pression en

déplacement, déformation ou force. Dans cette technologie, les capteurs sont formés d'un corps d'épreuve, généralement une membrane, sur lequel agit la pression.
On mesure cette dernière par la mesure de la déformation du corps d'épreuve [4].
A partir des années 70, les nouveaux capteurs sont basés soit sur la déformation d'un substrat, soit sur celle d'une membrane de silicium qui, de nos jours, est le corps d'épreuve le plus répandu.

- TRANSDUCTEUR

Le transducteur est l'élément sensible qui, lié au corps d'épreuve, traduit les réactions de ce dernier en signal électrique. Pour effectuer la mesure de la pression, on a vu qu'il fallait convertir la déformation du corps d'épreuve en une grandeur physique [5]. Il existe plusieurs techniques pour mesurer un déplacement, une déformation ou une force. La plupart des grandeurs de sortie sont d'ailleurs de type électrique. Depuis des années 80, 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. Ces composants sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique. 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 snsibilité à la température. Le principe de détection de ces structures capacitives est basé sur la variation d'une capacité [2]

- LE CIRCUIT DE CONDITIONNEMENT ELECTRONIQUE

Le circuit de conditionnement électronique est le module de traitement du signal en vue d'une éventuelle exploitation. Comme nous l'avons vu dans la définition d'un capteur, le circuit de traitement sert à mettre en forme un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur. Autrement dit, ce signal doit être l'image de la déformation du corps d'épreuve et par suite, de la pression. 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. Par exemple, pour mesurer une pression, une loi physique permet de calculer la pression à partir de la mesure de la résistance du capteur [5].

I.2.3.CLASSIFICATION DES CAPTEURS :

- CAPTEUR ACTIF

Généralement, un capteur actif est un système de mesure qui nécessite une source d'énergie embarquée, la plupart du temps assurée par une batterie, et ce pour la réalisation de la phase de traitement au cours de laquelle le signal est filtré (nettoyé), amplifié et converti dans un format compatible et exploitable. Dans ce cas, le capteur doit non seulement mesurer des propriétés physiques mais doit également effectuer des tâches additionnelles au travers de circuits de traitement et de communication intégrés [6].Le tableau 1 récapitule les principaux capteurs actifs.

Grandeur physique	**Principe physique**	**Sortie**
Temperature	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement lumineux	Pyroélectricité Photoémissif Photovoltaïque Photoélectromagnétique	Charge Courant Tension Tension
Force, pression, accélérateur	Piézo-électricité	Charge
Vitesse de déplacement	Induction electromagnetique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

Tableau I.1 : Principaux capteurs actifs

- CAPTEUR PASSIF

Les capteurs passifs utilisent les variations d'impédance. L'impédance présente dans l'élément de transduction réagit aux variations du mesura de aux travers des effets du mesurande sur le corps d'épreuve [7]. L'impédance peut être résistive, capacitive ou inductive. La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesura de :

- Soit sur les caractéristiques géométriques ou dimensionnelles
- Soit sur les propriétés électriques des matériaux
- Soit plus rarement sur les deux simultanément

Le tableau I.2 donne un aperçu des divers mesurandes susceptibles de faire varier l'impédance de certains matériaux employés pour la réalisation des capteurs passifs.

Grandeur physique	Caractéristique électrique	Matériau utilisé
Température	Résistivité	Platine, nickel, cuivre
Rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de Ni, Si dopé
	Perméabilité	Alliage ferromagnétique
Position	Résistivité	Matériaux magnet
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau I.2 : Capteurs passifs : principes physiques et matériaux.

I.2.4.GRANDEURS D'INFLUENCE:

Le capteur, de par ses conditions d'emploi, peut se trouver soumis non seulement au esurande mais à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action du mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence. Les principales grandeurs d'influence sont [8] :

- La température, qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse.
- Les champs magnétiques variables ou statiques ; les premiers créent des f.é.m. d'induction qui se superposent au signal utile, les seconds peuvent modifier une propriété électrique, comme la résistivité lorsque le capteur utilise un matériau magnéto-résistant ;
- La tension d'alimentation – amplitude et fréquence – lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe même du capteur
- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et qui risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement

I.3.DIFFERENTS TYPES DE CAPTEURS DE PRESSION

Le but de ce paragraphe est de décrire les différentes types de capteur les plus répandus, Les deux types les plus couramment utilisés sont le type piézorésistif et le type capacitif. Toutefois il existe d'outre capteurs de pression spécifique aux domaines variés de lamédecine au forage des puis de pétrole…

I.3.1.DEFINITION DE LA PRESSION :

La pression est une grandeur physique qui mesure le rapport de la force à la surface sur laquelle elle s'applique. Une force exercée sur un objet est d'autant plus efficace que la surface de contact est petite. Ainsi, la pression exercée par un marteau sur un clou est le rapport de la force utilisée à la surface de la tête du clou. De même, la pression d'un gaz caractérise la force qu'il exerce sur un objet. Elle est définie donc comme le quotient d'une force par une surface.

Ce quotient est indépendant de l'orientation de la surface [10]. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée. L'unité de pression est le pascal (noté Pa), du nom du physicien français Blaise Pascal. Une pression de 1 pascal correspond à une force de 1 newton exercée sur une surface de 1 mètre carré. La pression est une grandeur dérivée du système international des unités. Il existe plusieurs types de capteurs qui permettent de mesurer la pression, nous citons par la suite quelques exemples.

I.3.2.CAPTEUR DE PRESSION RF

C'est un capteur passif, la cellule du capteur représentée sur la figure I .4 est composée d'une membrane en silicium haute résistivité qui subit une déflexion lorsqu'une pression y est appliquée. Cette déflexion modifie l'environnement électromagnétique d'un résonateur coplanaire situé sous la membrane au sien d'une cellule en pyrex.

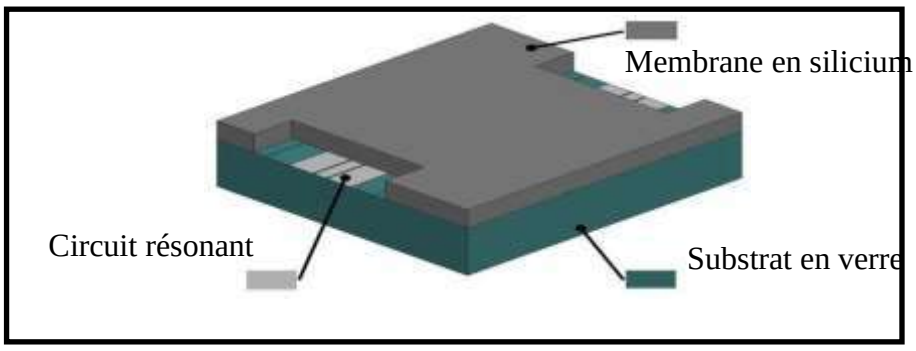


Figure I.3 : La partie active d'un capteur de pression RF

La distribution du champ électromagnétique est par conséquent modifiée et fait apparaitre une variation de la fréquence du résonateur [11]. Des publications plus récentes, montrent que pour des épaisseurs de membrane, de 50µm à 800µm, nous observons une variation linéaire de la fréquence de résonnance, compris entre 0.3µm à 3µm.

Ce type de capteur est utilisé dans des applications spécifiques (surveillance environnementale, des instruments de suivis spatial et aéronautique, des applications liées à la santé) qui nécessitent des unités des mesure miniatures, passives, de grande précision et faibles. L'objectif est de mesurer à distance des grandeurs physiques [11].

I.3.3.CAPTEUR DE PRESSION PIEZORESISTIF

La piézorésistivité se traduit par la variation de conductivité électrique d'un corps lorsque celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques et donc à des forces extérieures. Cette propriété existe pour les métaux ainsi que pour les semi-conducteurs. Il existe un grand nombre d'application notamment dans le domaine des capteurs [12].

Depuis 1954, où l'effet piézorésistif a été découvert dans le Silicium, la démarche pour mesurer la pression a changé et de nouveaux dispositifs avec des performances remarquables sont apparus sur le marché. Grâce au développement des micros technologies, une nouvelle famille de capteurs de pression piézorésistifs miniatures s'est ainsi progressivement imposée pour de nombreuses applications [13].

Un capteur de pression piézorésistif à membrane est un capteur composite (Figure I .5). Une membrane en silicium oxydée de quelques millimètres de côté et quelques microns d'épaisseur recouverte d'oxyde constitue le corps d'épreuve qui se déforme sous l'effet d'une pression appliquée. La déformation de ces jauges se transforme en variation de résistance [14]

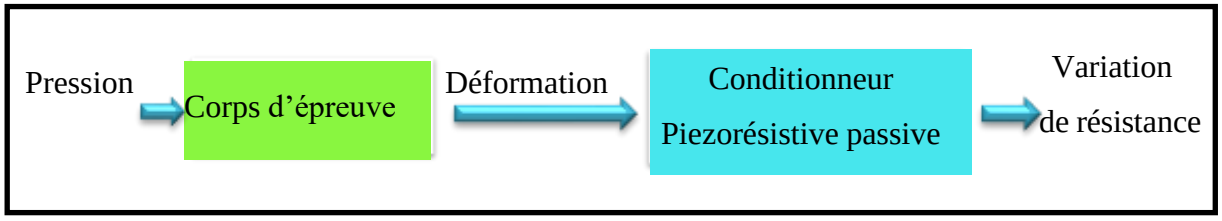


Figure I.4 : Structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane

Pour avoir une sensibilité élevée le conditionneur du capteur peut être constitué de deux jauges longitudinales et deux jauges transversales disposées en bordures de membrane et interconnectées en pont de Wheatstone par des pistes d'aluminium, (la figure I .6).

Où :

PZT : piézorésistances diffusées (jauges de contraintes).

M : métallisations

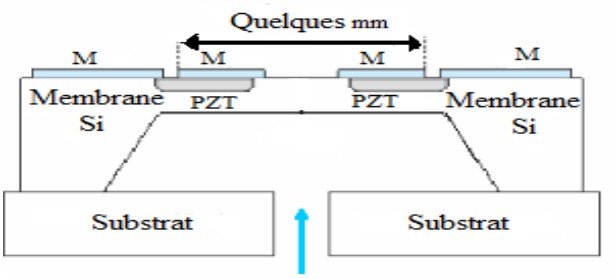


Figure I.5 **:** Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif [15]

I.3.4.CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF

Le capteur de pression capacitif basé sur la variation d'une capacité en fonction de la pression appliquée (figure I .7). Ce type de capteur est caractérisé par une haute sensibilité, une faible consommation électrique et une grande résolution par rapport au capteur de pression piezorésistif, cependant, il présente une réponse non linéaire, une dérive en température et une faible variation par rapport à la capacité d'offset [16,17].

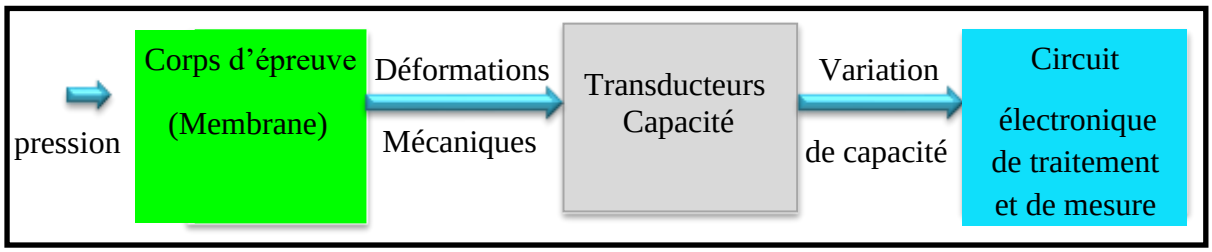


Figure I.6 **:** Schéma synoptique d'un capteur de pression capacitif

La structure de base est composée d'une armature fixe déposée au fond d'une cavité creusée sur un substrat et d'une armature déformable, appelée « membrane » [18], figure(I .8). Le matériau utilisé pour l'armature déformable est le silicium compte tenu de son excellent comportement mécanique et de son micro usinage précis [19].

La cellule est réalisée à partir d'une plaque de silicium suffisamment dopé pour que la résistivité de cette électrode soit faible (environ 0.008 Ω.cm). La membrane est fixée au substrat par soudure thermoélectrique [20]

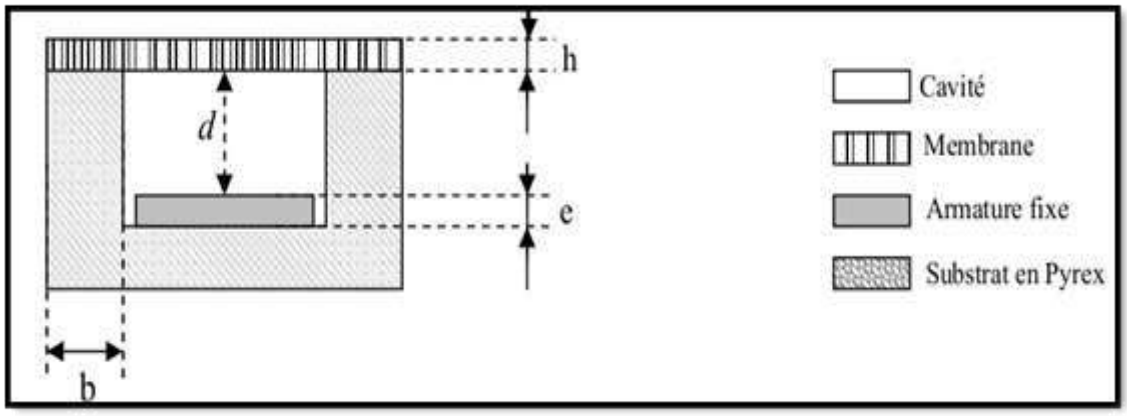


Figure I.7 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif.

Avec :

h : L'épaisseur de la membrane

e : L'épaisseur de l'armature fixe

d : La distance entre les deux armatures

A : Surface de l'armature fixe

b : Largeur de la soudure

I.3.5.CAPTEUR DE PRESSION OPTIQUE:

L'exceptionnelle résolution des instruments optiques (nanométriques) a permis le développement de capteurs de pression à haute réponse fréquentielle par interrogation optique via une fibre optique. Le principe de la méthode repose sur l'utilisation d'un interféromètre de Fabry-Pérot représenté sur la figure I .9 qui inclut une cavité délimitée par deux membranes semi- réfléchissantes dont une est utilisée en tant que corps d'épreuve. Une onde lumineuse incidente, issue typiquement d'une diode laser, est réfléchie par deux fois sur les miroirs cavitaires puis transmise à un photo-détecteur.

Les signaux interférant en sortie génèrent une figure d'interférence dont le positionnement du spectre dépend intrinsèquement de la phase elle-même reliée à la longueur d'onde de l'onde réfléchie et à la profondeur de la cavité .La plupart des procédés créent une cavité sur la fibre en dioxyde de silicium (SiO2) ou silicium (Si) qui est ensuite attachée thermiquement sur le dessus de la cavité. Ainsi, avec une fréquence de résonance de la structure de 4MHz, le temps de monté de ces capteurs a été mesuré à une centaine de nanosecondes lors d'expérimentation avec des ondes de souffle. Afin de mesurer la propagation de l'onde de choc dans un cerveau, une équipe de recherche a développé un capteur optique à cavité Fabry-Pérot miniature avec une fréquence de résonance de la membrane en oxyde de silicium de 4,2MHz [22].

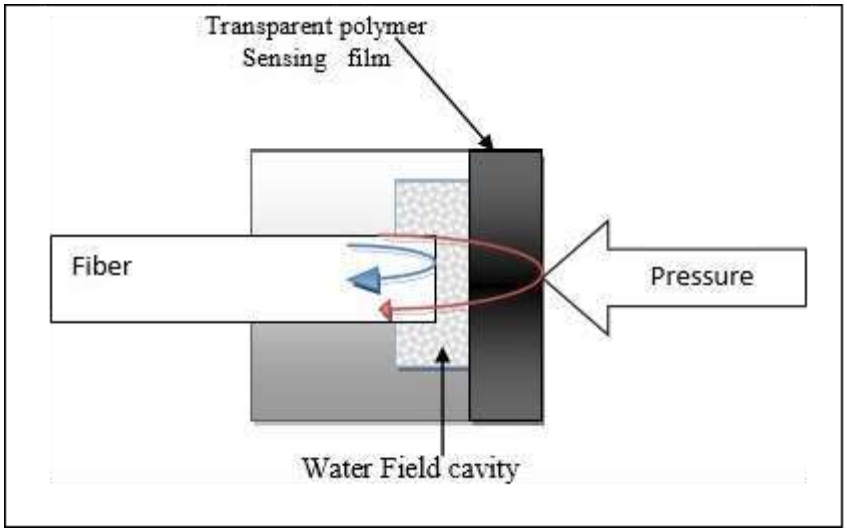


Figure I.8 : Principe d'un système de mesure à base d'une cavité Fabry-Pérot

I.4. CAPTEURS EN TECHNOLOGIEMEMS(MICROELECTRO-MECHANICALSYSTEM):

I.4.1. DEFINITION DES MEMS :

MEMS, acronyme de Micro Electro Mechanical Systems, sont des dispositifs miniaturisés combinant plusieurs principes physiques. Ils intègrent généralement des éléments mécaniques couplés à de l'électronique et sont réalisés par des procédés de fabrication issus de la micro- électronique. Les MEMS exploitent, entre autres, des effets liés à l'électromagnétisme, la thermique et la fluidique. Ils sont dans notre quotidien, au cœur de la téléphonie, de l'automobile, du médical, des chaînes de production ou des manettes de consoles de jeux [22].Leur taille est de l'ordre du millimètre carré (figure I .10) ; les éléments de leurs structures (mécaniques) sont à l'échelle du micron ; à titre de comparaison, le diamètre moyen d'un cheveu est 75 μm et un globule rouge a une taille de 7 μm. Utilisé en tant que capteur, un MEMS possède une partie mobile sensible à la variation d'une grandeur physique (vitesse, pression, direction ...). Cette variation est alors traduite en une grandeur électrique, analysée ensuite par la partie électronique du MEMS. Il possède parfois un micro-actionneur intégré qui, à partir d'un signal électrique, va agir sur la partie mécanique [23].



Figure I.9 : Visualisation de l'échelle d'un MEMS

La raison de l'utilisation des 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 [24].

I.4.2.LES PRINCIPES PHYSIQUES DU MICROSYSTEME:

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 [25].

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 [26].

I.4.3.DOMAINES D'APPLICATIONS DES MEMS:

Avec l'explosion des microsystèmes ces dernières années, les domaines d'utilisations des MEMS sont très vastes. Néanmoins, on peut les répartir en quatre principales catégories, que sont : les capteurs, les MOEMS, les RF MEMS et les BioMEMS. La figure I .11 donne pour chaque domaine quelques exemples d'applications.

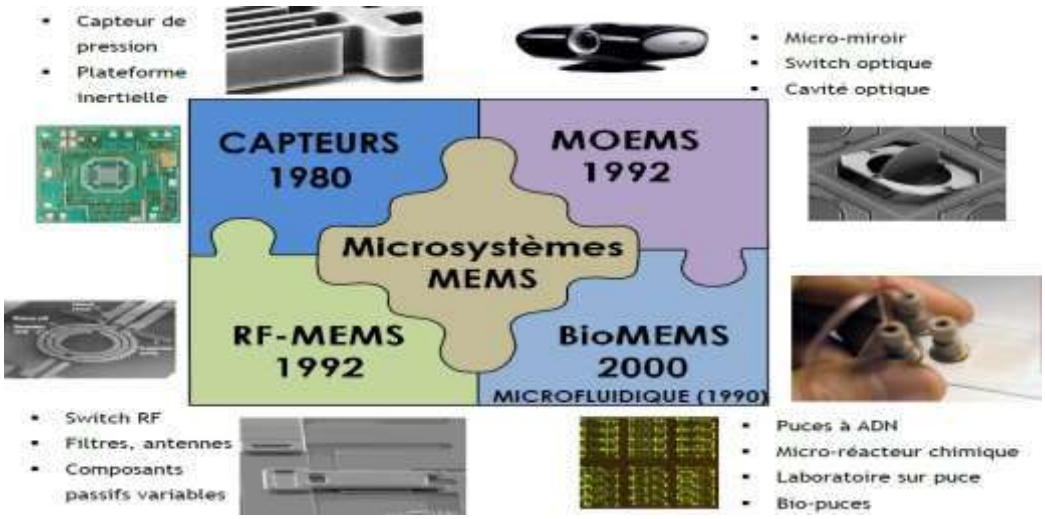


Figure I.10 : Domaines d'application des MEMS

I.4.4. CAPTEUR DE PRESSION EN TECHNOLOGIE MEMS:

Les capteurs MEMS mettent en lien direct une déformation d'une grandeur mécanique avec une variation d'une grandeur électrique. On trouve par exemple des capteurs de pression (de type résistif) pour la surveillance de pneumatiques.

En général une mesure de pression utilise une membrane déformable comme corps d'épreuve. Dans le cadre des MEMS, celle-ci est gravée dans le substrat de silicium (figure I .12).

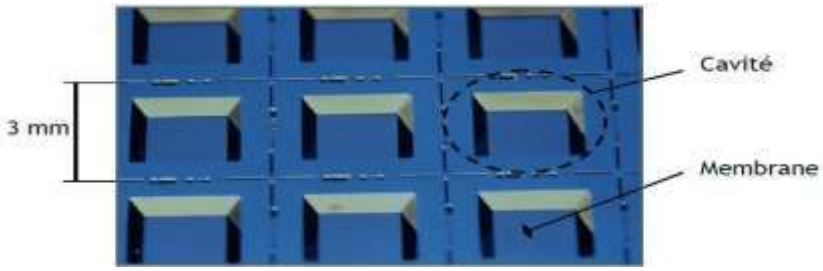


Figure I.11 : Production collective de MEMS qui seront séparés en toute fin du précédé visualisation de la cavité réalisée pour obtenir la membrane en silicium

La membrane du capteur de pression subit une déformation en présence d'une différence de pression (figure I .13) :



Figure I.12 : Schéma de la déformation de la membrane d'un capteur de pression

Afin d'avoir une mesure de déformation, les micro-technologies permettent l'intégration de jauges piézo-résistives directement implantées dans la structure des MEMS au cours de la production (figure I .14). La jauge de contraintes voit sa longueur relative (ΔL/L) varier lors de la déformation, entrainant la variation relative de sa résistance (Δ R/ R) :

$$\frac{\Delta R}{\mathrm{R}} = K\frac{\Delta L}{\mathrm{L}} \qquad \text{(I.1)}$$

$$Avec\ K :\ facteur\ de\ jauge.$$

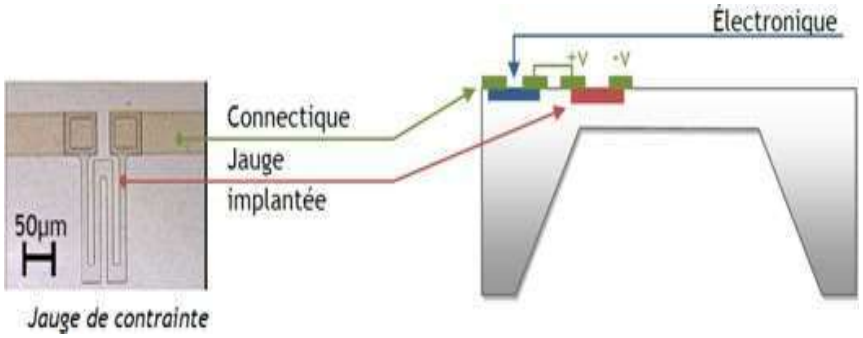


Figure I.13 : Schéma de l'implantation intégrée d'une jauge piézorésistive

L'électronique de mesure associée est le pont de Wheatstone (figure I .15). Une variation de valeur d'une des résistances (jauge piézorésistive) du montage en pont, fait varier la mesure de sortie de la tension. La piézorésistivité des matériaux constituants les jauges de contrainte est la propriété de variation de conductivité sous l'effet d'une déformation mécanique.

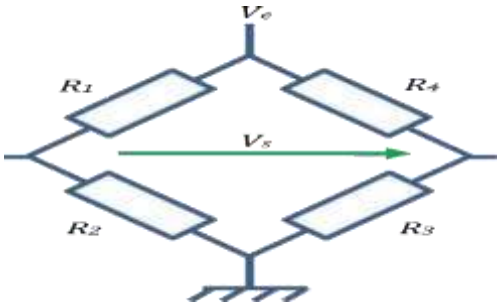


Figure I.14 : Schéma du pont de Wheatstone

I.4.5 CAPTEUR DE PRESSION MEMS A TRANSDUCTION ELECTROMAGNETIQUE :

Le principe du capteur de pression à transduction électromagnétique, fabriqué en technologie MEMS, se base sur la perturbation de la distribution du champ électromagnétique présent à l'interface entre un résonateur planaire, de fréquence de résonance F_0, et une membrane (figure I .16). Le capteur est d'autant plus sensible que la variation du champ est rapide et le couplage mécanique/électromagnétique est fort pour de faible mouvement de membrane (quelques µm).

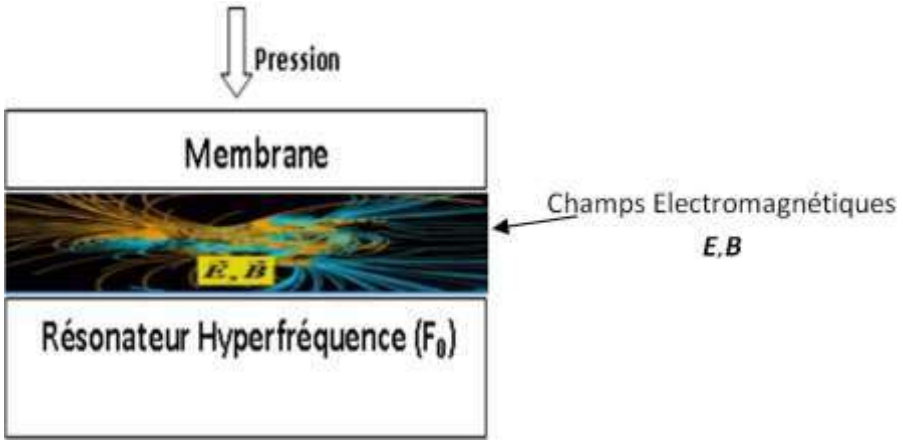


Figure I.15 : Principe de fonctionnement du capteur MEMS à transduction électromagnétique pour la mesure de la pression

Ce mode de transduction permet de supprimer toute la partie de traitement du signal au niveau du capteur et par conséquent la majorité des consommations en énergie. Ceci demande une émission, par les outils d'interrogation, et une haute sensibilité de détection du signal Radio Fréquence de retour.

Des travaux antérieurs [27] et [28], ont déjà travaillé sur ce type de capteur. Pour concevoir ce dernier, ils ont utilisé, respectivement, un résonateur hyperfréquence à ligne demi longueur d'onde ($\lambda/2$) et résonateur en anneau asymétrique (Ring Resonator). La simulation de la pression a été faite par un déplacement vertical de la membrane vers le résonateur, ce que n'est pas tout à fait le cas dans la réalité. La membrane lorsqu'elle est subite à une pression, elle se déforme en forme de cône. L'objectif de ce mémoire est de travailler sur l'amélioration de ce capteur et d'essayer de simuler le fonctionnement du capteur à déflexion réelle de la membrane.

I.5.CONCLUSION :

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une étude bibliographique sur les capteurs, en particulier les capteurs de pression. Nous avons commencé par la présentation de différents capteurs classiques et leurs classements puis les capteurs en technologie MEMS. L'objectif de ce mémoire est de travailler sur l'amélioration d'un micro-capteur de pression capacitif, fabriqué en technologie MEMS,

CHAPITRE II :

MODELISATION CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF (MEMS)

II.1.INTRODUCTION

Les capteurs de pression micro structurés sont actuellement largement diffusés dans le monde pour des applications grand public : dans les domaines de la santé, de l'automobile [29] et le domaine d'électromagnétisme [30].

Un capteur de pression capacitif est un condensateur dont l'une des armatures est déformable. Cette déformation de la membrane engendre une variation de la capacité en fonction de la pression appliquée [31]. Ce type de capteurs est caractérisé par une haute sensibilité, une faible consommation électrique et une grande résolution par rapport aux autres capteurs, cependant, il présente une réponse non linéaire, une dérive en température et une faible variation par rapport à la capacité d'offset [32].

II.2.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le principe de fonctionnement d'un capteur de pression capacitif est la variation de sa capacité en fonction de la pression appliquée et les grandeurs d'influence comme montre la figure II.1, il transforme les déformations élastiques de la membrane en signal électrique. L'objectif de ce chapitre est l'étude de la réponse capacitive et de la sensibilité en fonction de la pression appliquée pour chaque paramètre d'influence.

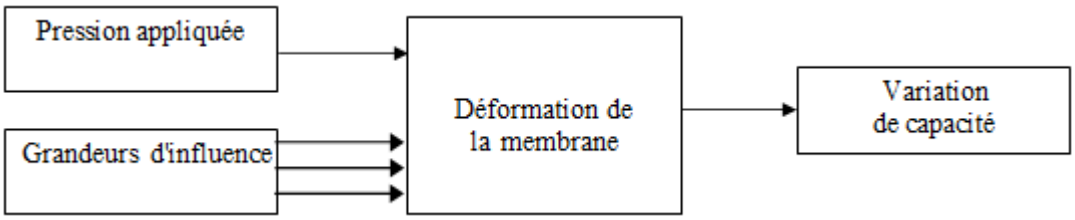


Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un capteur de pression capacitif.

Ce capteur est composé d'une membrane micro usinée au silicium, constituant l'armature mobile et d'un substrat isolant en pyrex représentant la deuxième électrode. La membrane fine au silicium et le substrat de pyrex sont collées par soudure anodique donnant naissance à une cavité hermétique entre les deux comme le montre la figure II.2.

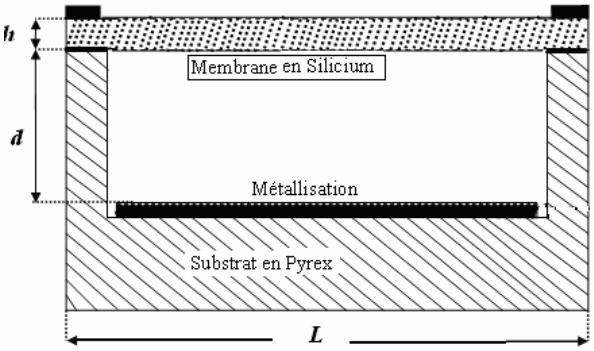


Figure II.2 : Structure de la cellule sensible capacitive

Avec :

h: L'épaisseur de la membrane.

d: La distance entre les deux armatures.

L: La longueur de la membrane.

II.3.MODELISATION DU CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF

L'objectif de cette modélisation est l'application des résultats obtenus précédemment concernant l'étude de déflexion de la membrane fine au silicium dans les cas petites et grandes déformations, à l'étude du micro capteur de pression capacitif. La réponse de ce dernier nécessite la détermination de la déformation en tout point de la membrane en fonction de la pression appliquée *P*. L'expression de déformation en tout point de la membrane permet de calculer la réponse C(P) du capteur de pression capacitif et de déduire sa sensibilité à la pression appliquée S(P) pour différents types de membranes : carrée, rectangulaire et circulaire. Le mécanisme de détection capacitive est relativement simple. En l'absence de pression appliquée, la capacité entre deux plaques planes parallèles de surface « *A* », séparées par un diélectrique de distance « *d* » avec une permittivité diélectrique est définie par:

$$C(P=0) = C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d} \qquad \text{(II.1)}$$

C_0 : est la capacité au repos.

A: est la surface de l'électrode.

d : est la distance inter électrodes.

ε_0 : est la permittivité du vide qu'est égale à 8.86 10^{-12} F/m.

ε_r : est la permittivité relative, qu'est égale à 1 dans le cas de l'air

Lorsqu'on applique une pression *P*, la membrane se déforme engendrant une variation de la déflexion *w(x, y),* comme le montre la figure II.3. Cette dernière fait accroître la capacité *C(P).*

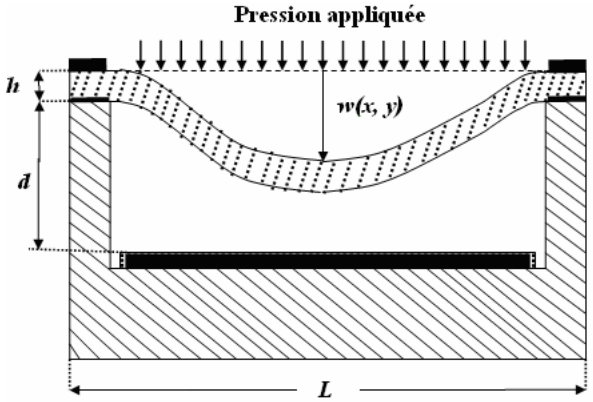


Figure II.3 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif

L'expression de la capacité *C(P)* peut être déterminée à partir de la relation suivante [32]:

- Dans le cas de la membrane carrée :

$$C_0(p) = \varepsilon \iint_A \frac{dA}{d - w(x,y,P)} \tag{II.2}$$

$w(x, y, P)$ représente la déflexion bidimensionnelle de la membrane en fonction de la pression appliquée P au point des coordonnées cartésiennes (x, y) de la membrane.

On rappelle les expressions de la déflexion de la membrane de forme carrée :

- Dans le cas du modèle polynomial [33]

$$w(x,y) = \frac{w_{00}}{16}\left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^2 \sum_{i=0}^{n} \cdot \sum_{j=0}^{n} K_{ij} \left(\frac{x}{a}\right)^i \left(\frac{y}{b}\right)^j \tag{II.3}$$

- Dans le cas du modèle trigonométrique [34]:

$$w(x,y) = \frac{w_{00}}{4} \sum_{i=0}^{n} \cdot \sum_{j=0}^{n} K_{ij} \left[\cos^2\left(\frac{(2i+1)\pi x}{2a}\right).\right] * \left[\cos^2\left(\frac{(2j+1)\pi y}{2b}\right)\right] \tag{II.4}$$

Avec w_{00} la déflexion de la membrane au centre donnée par l'expression suivante [35] :

$$w_{00} = \frac{k\, a^2 b^2 P}{16D} \tag{II.5}$$

- Dans le cas de la membrane circulaire

$$C_0(p) = \varepsilon \iint_A \frac{dA}{d - w(x,\theta,P)} \tag{II.6}$$

Avec :

$w(x, \theta, P)$représente la déflexion bidimensionnelle de la membrane en fonction de la pression appliquée *P* au point des coordonnées polaires (r, θ) de la membrane.

Le calcul de l'intégrale double (II.6) nous permet de déterminer l'expression de la réponse capacitive approchée donnée par l'équation (II.7) [36]:

$$C_0(P) = C\left[1 + \frac{1}{3}\left(\frac{w_0}{d}\right) + 0.2\left(\frac{w_0}{d}\right)^2\right] \quad \text{(II.7)}$$

On rappelle l'expression de la déflexion au centre $w_0$de la membrane circulaire donnée par (Cas des petites déformations) :

$$w_0 = \frac{Pa^4}{64D} \quad \text{(II.8)}$$

Les relations (II.2) et (II.6) montrent que si la pression augmente la distance entre les armatures diminue et par conséquent la capacité augmente.

La sensibilité à la pression appliquée est parmi les caractéristiques essentielles pour définir les performances d'un capteur de pression capacitif. Elle est définie par [32] :

$$S(P) = \frac{1}{C}\frac{dC(P)}{dP} \quad \text{(II.9)}$$

En substituant l'expression analytique de la capacité C (P) dans l'équation (II.7) nous pouvons avoir une expression exacte de la sensibilité à la pression S(P) qui est donnée par :

$$S(P) = \frac{4A^2(1-v^2)}{Edh^3} \quad \text{(II.10)}$$

On constate à partir de l'équation (II.10) que la sensibilité est proportionnelle à la surface de la membrane « A » et inversement proportionnelle à la distance inter électrodes « d » et à l'épaisseur de la membrane « h ». Par conséquent pour concevoir un capteur de pression capacitif de haute sensibilité, il suffit d'avoir une large surface de membrane « A », une faible épaisseur de la cavité « d » et une très mince épaisseur de membrane « h ».

II.4.ETUDE DE LA DEFLEXION DANS LE CAS PETITES DEFORMATIONS

II.4.1.MEMBRANE DE FORME CARREE

L'étude de la déformation d'une membrane parfaitement encastrée aux bords est très importante dans la réalisation des micros capteurs de pression. En effet la connaissance de la réponse d'une membrane, qui est le corps d'épreuve du micro capteur, à une excitation externe de pression, permet de déterminer ses caractéristiques et ses performances.

Conformément à la théorie des plaques élastiques minces et en tenant compte de l'anisotropie du silicium, le comportement mécanique de la membrane, dans le cas des petites perturbations, et soumise à une pression constante et uniforme, est décrit par l'équation aux dérivées partielles de Lagrange d'ordre 4 suivante [37] :

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha_{si}\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} = \frac{P}{D} \qquad \text{(II.11)}$$

Où

$w(x, y)$ représente les faibles déflexions, telle que $w << h$.

P La pression uniforme appliquée.

Avec α Si le coefficient d'anisotropie et D le coefficient de rigidité du silicium, qui sont définies par [38]:

$$\alpha_{si} = v + \frac{2G}{E}(1 - v^2) \qquad \text{(II.12)}$$

$$D = \frac{Eh^2}{12(1 - v^2)} \qquad \text{(II.13)}$$

Les conditions aux limites imposées par l'encastrement parfait de la membrane à ses bords sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} w(x = \mp a, \forall y) &= 0 \\ w(\forall x, y = \mp b) &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x}(x = \mp a, \forall y) &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x}(\forall x, y = \mp b) &= 0 \end{aligned} \qquad \text{(II.14)}$$

Les solutions approchées proposées dans la littérature sont [33, 34].

A. Solution polynomiale proposée [33]

En se basant sur les travaux déjà effectués par [2, 40] qui utilisent la fonction polynomialebidimensionnelle suivante :

$$w(x,y) = \frac{w_{00}}{16}\left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^2 \sum_{i=0}^{n}.\sum_{j=0}^{n} K_{ij}\left(\frac{x}{a}\right)^i \left(\frac{y}{b}\right)^j \qquad \text{(II.15)}$$

Avec *i, j* des nombres entiers pairs

B. Solution trigonométrique proposée [34]

$$w(x,y) = \frac{w_{00}}{4}\sum_{i=0}^{n}.\sum_{j=0}^{n} K_{ij}\left[\cos^2\left(\frac{(2i+1)\pi x}{2a}\right).\right] * \left[\cos^2\left(\frac{(2j+1)\pi y}{2b}\right)\right] \qquad \text{(II.16)}$$

Où *i, j* sont des nombres entiers pairs variant de 0 a n

Les coefficients K_{ij}sont représentés dans le tableau suivant :

	K	k_{00}	$k_{02} = k_{20}$	k_{22}	$k_{24} = k_{42}$	$k_{40} = k_{04}$	k_{44}
Polynomial [33]	0.0220	1	0.2140	0.2700	0.0980	-0.0062	-0.103
Trigonométrique [34]	0.0224	1	0.0284	0.0123	0.0030	0.0038	0.0016

Tableau II.1 : Valeurs des coefficients réduits $\mathbf{K_{ij}}$ pour n=3 [34].

Avec w_{00} est la déflexion maximale au centre (x=0, y=0) de la membrane carrée qui est donnée par l'expression suivante [33,35]

$$w_{00} = \frac{k\, a^2 b^2 P}{16D} \tag{II.17}$$

II.4.2.MEMBRANE DE FORME CIRCULAIRE

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à la résolution de l'équation aux dérivées partielles d'ordre 4, régissant la déformation d'une membrane fine au silicium de forme circulaire parfaitement encastrée aux bords soumise à une pression statique uniforme *P*.

Dans le cas des petites déformations, la loi qui gouverne la déflexion d'une membrane fine de forme circulaire de rayon *a*, parfaitement encastrée aux bords est régie par l'équation différentielle de Lagrange d'ordre 4 en coordonnées polaires [37]:

$$\nabla^2 w(r) = \frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left[r\frac{d}{dr}\left[r\frac{d}{dr}\left(\frac{dw(r)}{dr}\right)\right]\right] = \frac{P}{D} \tag{II.18}$$

Où ∇ est l'opérateur Nabla.

L'expression de la déflexion w(r) en coordonnées polaires est une solution exacte de l'équation différentielle (II.18), donnée par [37]

$$w(r) = w_0\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \tag{II.19}$$

Tel que r est la coordonnée radiale et a le rayon du diaphragme. $w_0$est la déflexion maximale au centre de la membrane circulaire qui est donnée par [39]:

$$w_0 = \frac{Pa^4}{64D} \tag{II.20}$$

On peut réécrire l'équation (II.19) sous la forme :

$$w(r) = \frac{Pa^4}{64D}\left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \tag{II.21}$$

II.5.ETUDE DE LA DEFLEXION DANS LE CAS GRANDES DEFORMATIONS

II.5.1.MEMBRANE DE FORME CARREE

Soit une membrane d'épaisseur h, de coefficients d'élasticité E et v placée dans le plan x y et soumise à une pression uniforme et constante P. l'application de la théorie des plaques [37] conduit à une équation aux dérivées partielles de la fonction de déformation w(x, y) en tous points de la membrane [40, 37] :

$$\frac{\partial^4 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{x}^4} + 2\frac{\partial^4 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{x}^2\,\partial \mathrm{y}^2} + \frac{\partial^4 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{y}^4} = \frac{12(1-\mathrm{v}^2)}{\mathrm{Eh}^3}\left[+\mathrm{h}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{F(x,y)}}{\partial \mathrm{x}^2}.\frac{\partial^2 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{y}^2} - 2.\frac{\partial^2 \mathrm{F(x,y)}}{\partial \mathrm{x}\,\partial \mathrm{y}}.\frac{\partial^2 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{x}\,\partial \mathrm{y}} + \frac{\partial^2 \mathrm{w(x,y)}}{\partial \mathrm{x}^2}.\frac{\partial^2 \mathrm{f(x,y)}}{\partial \mathrm{y}^2}\right)\right] \tag{II.22}$$

La fonction de contrainte d'Airy F(x, y) est donnée par [40] :

$$F(x,y) = -\frac{Eh^2}{32}[f(P)]^2\left[\frac{3\pi^2}{12L^2(1-v)}(x^2+y^2) - cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) - cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) - cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) - \frac{1}{2}cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right)cos\left(\frac{2\pi y}{L}\right) - \frac{1}{16}cos\left(\frac{4\pi x}{L}\right) - \frac{1}{16}cos\left(\frac{4\pi y}{L}\right) - \frac{1}{25}cos\left(\frac{4\pi x}{L}\right)cos\left(\frac{4\pi y}{L}\right) - \frac{1}{25}cos\left(\frac{4\pi x}{L}\right)cos\left(\frac{4\pi y}{L}\right)\right] \tag{II.23}$$

Les conditions aux limites imposées par l'encastrement de la membrane carrée à ses bords sont données par les équations suivantes:

$$\begin{aligned} w = 0 \quad et \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{à} \quad x = \pm\frac{L}{2}. \qquad (l = 2a) \\ w = 0 \quad et \quad \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{à} \quad y = \pm\frac{L}{2}. \qquad (l = 2a) \end{aligned} \tag{II.24}$$

Où $f(P)$ est une fonction qui dépend de *P*, *E*, *v, L,* et *h*

Par la substitution de les équations (II.24) et (II.22) à l'équation (II.21), le résultat obtenu donné par l'équation (II.25) suivante:

$$\frac{3\pi^3 h^2(1-v^2)}{L^2}\left(\frac{9}{64(1-v^2)} + 0.1666\right)[f(P)]^3 + \frac{2\pi^4 h^2}{L^2}[f(P)] - \frac{3(1-v^2)L^2}{Eh^2}P = 0 \tag{II.25}$$

Donc, la déflexion maximale au centre de la membrane dans le cas grandes déformations est :

$$w_{00} = h[f(P)] \tag{II.26}$$

II.5.2.MEMBRANE DE FORME CIRCULAIRE

L'équation différentielle régissant la déformation d'une membrane circulaire dans le cas grandes déformations est donnée par [37, 26]:

$$\nabla^4 w = \frac{P}{D} + \frac{h}{Dr}\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial r}\frac{\partial^2 w}{\partial^2 r}\right) \tag{II.27}$$

$$\nabla^4 \emptyset = -\frac{E}{r}\frac{\partial w}{\partial r}\frac{\partial^2 w}{\partial^2 r} \tag{II.28}$$

$\emptyset$ Est la fonction de contrainte d'Airy et∇^4 l'opérateur biharmonique donnée par:

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial^2 r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r} \right)^2 \tag{II.29}$$

La membrane circulaire vérifie les conditions aux limites suivantes :

$$w(r = a) = 0\,, \qquad \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r = a} = 0 \tag{II.30}$$

Les solutions supposées [39] des fonctions de la déflexion et de contrainte d'Airy vérifientles conditions aux limites (II.30) et donnent par :

$$w(r\text{à} = f\left(1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right)^2 \tag{II.31}$$

$$\emptyset(r) = \frac{f^2 E}{12}\left[\frac{5 - 3v}{1 - v}\left(\frac{r}{a}\right)^2 - \frac{1}{4}\left(\frac{r}{a}\right)^4 + \frac{1}{9}\left(\frac{r}{a}\right)^6 - \frac{1}{48}\left(\frac{r}{a}\right)^8\right] \tag{II.32}$$

Où f est la fonction de la déflexion maximale au centre de la membrane circulaire.

II.6.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement d'une membrane fine au silicium, parfaitement encastrée aux bords, de formes carrée, circulaire, soumise à une pression uniforme et constante, dans les deux cas petite et grandes déformations, ce qui nous a permis de localiser les points les plus déformables de la membrane.

On peut conclure que la déflexion maximale au centre de la membrane est directement proportionnelle à la pression appliquée. Elle est plus importante dans le cas de la forme carrée que pour les formes circulaire.

La forme carrée possède une large zone de linéarité avec les valeurs optimales des paramètres géométriques.Cette déflexion de la membrane engendre une variation de la réponse capacitive.

CHAPITRE III :

CONCEPTION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR DE PRESSION CAPACITIF

III.1. INTRODUCTION

Nous nous proposons, dans ce chapitre, d'étudier les propriétés mécaniques et électriques d'un capteur de pression à membrane en silicium par le logiciel COMSOL Multiphysics. 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

III.2.DÉFINITION DU COMSOL

COMSOL Multiphysics, anciennement appelé FEMLAB, est avant tout est un outil de résolution des équations aux dérivées partielles – PDE - par la méthode des éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base des données des équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques, comme l'électrostatique, magnétostatique, électrodynamique ; l'écoulement de fluides ou encore la déformation des matériaux ainsi que multiple phénomènes physiques modélisées en PDE. La première version du logiciel COMSOL Multiphysics a été publié en 1998 par le groupe COMSOL et il était nommé Toolbox. À l'heure de début, ce logiciel est uniquement appliqué dans le domaine de la mécanique des structures. L'environnement de simulation COMSOL Multiphysics facilite toutes les étapes du processus de modélisation, définir votre géométrie, spécifiant votre physique, maillage, la résolution et ensuite afficher des résultats en post-traitement.



Figure III.1: Logo de logiciel COMSOL Multiphysics 5.2.

III.2.1.PRINCIPE D'UTILISATION

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les étapes du processus de modélisation sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non-linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie chimique, géophysique, électromagnétisme basse et haute fréquence, corrosion, plasma, suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab. Ce logiciel est multiplateforme (Windows, Mac, Linux). En plus des physiques précitées, COMSOL Multiphysics autorise l'utilisateur à définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme di_érentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algébro-di_érentiels (EAD) sont également possibles.

La modélisation du processus avec COMSOL Multiphysics se résume en 6 étapes :

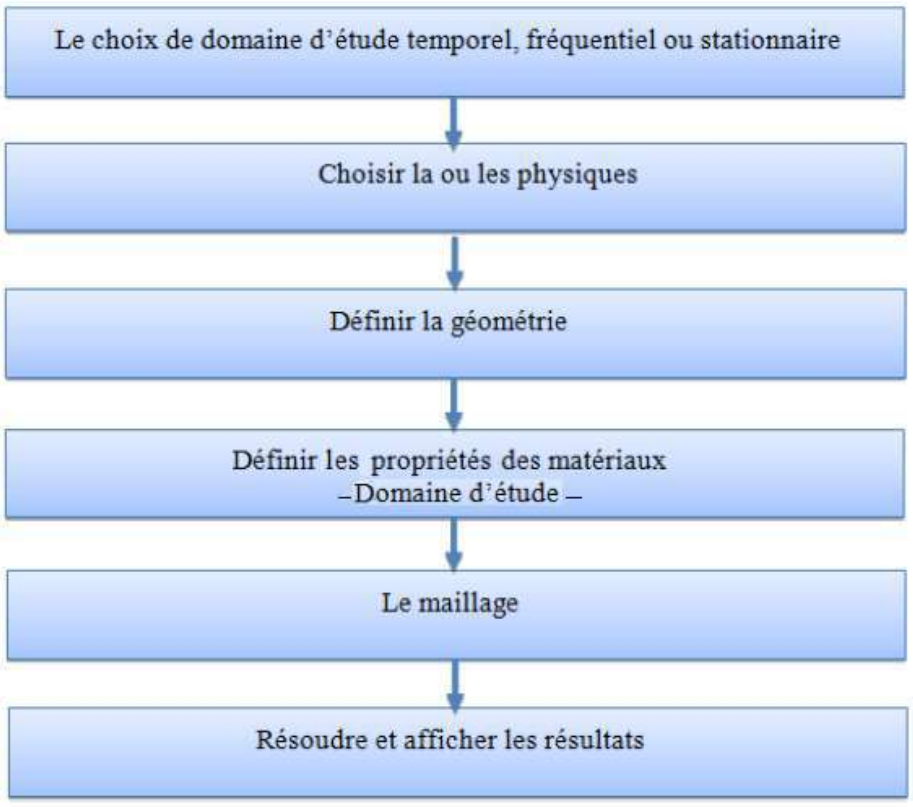


Figure III.2: Diagramme des étapes de conception avec COMSOL Multiphysics

III.2.2. L'INTERFACE UTILISATEUR COMSOL 5.2

Lorsque le ou les modèles ont été choisis, l'écran général apparaît. Nous allons donc d'abord construire la géométrie du problème. La G.U.I permet de créer le domaine sur lequel on cherche à résoudre l'E.D.P a l'aide de commandes classiques de logiciels de dessin (rectangles, lignes brisées, ellipses). On peut donc dessiner un large éventail de domaines différents, L'interface de COMSOL est divisée en plusieurs parties (Figure III.3) :

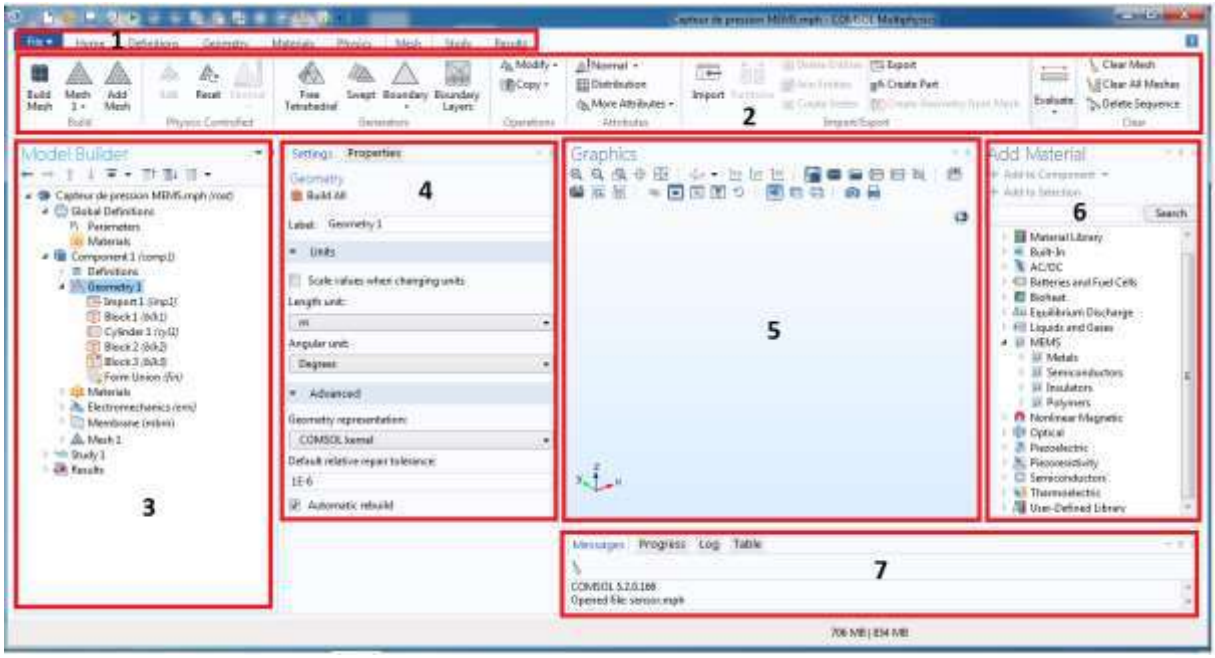


Figure III.3: L'interface graphique COMSOL Multiphysics 5.2.

1. *Ruban :* Le ruban situé en haut du bureau donne accès aux commandes utilisées pour effectuer la plupart des tâches de modélisation.
2. *Mesh :* Le maillage est une partition du modèle de la géométrie en petites unités des formes simples. Nous pouvons créer un maillage libre dans Comsol Multiphysics en cliquant sur le bouton "Build Mesh" sur la barre d'outils principale.
3. *Model Builder :* Dans cette fenêtre on retrouve le constructeur du modèle où il est possible de définir des variables et des autres paramètres du problème (Parameters), le modèle (Model) où se retrouvent la géométrie (Geometry), les propriétés des matériaux formant la géométrie, le ou les modèles de physique s'appliquant au problème étudié et les paramètres de maillage (Mesh).
4. *Setting Geometry :* Au milieu du logiciel on trouve la déclaration des paramètres électriques, physiques et même mécaniques de chaque domaine tels que la conductivité, l'excitation du courant et la tension l'induction etc…

5. *Graphics :* En haut à droite, la fenêtre d'a_chage graphique (Graphics) permet de représenter et visualiser la géométrie, le maillage ou les résultats.
6. *Material :* Pour la définition du matériau, on doit dé ni pour chaque volume le matériau utilisé. On utilise une bibliothèque permettant de définir simplement toutes les constantes physiques du matériau.
7. *Messages et résultats physiques :* Finalement, directement au-dessous de la fenêtre d'affichage graphique, il y a une fenêtre permet de visualiser les messages des 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.

Pour avoir est illustrer la forme du structure, cliquez sur le bouton construire tout (Build all) puis vous pouvez vu la géométrie comme la montre dans (La figureIII.4) ci-dessous

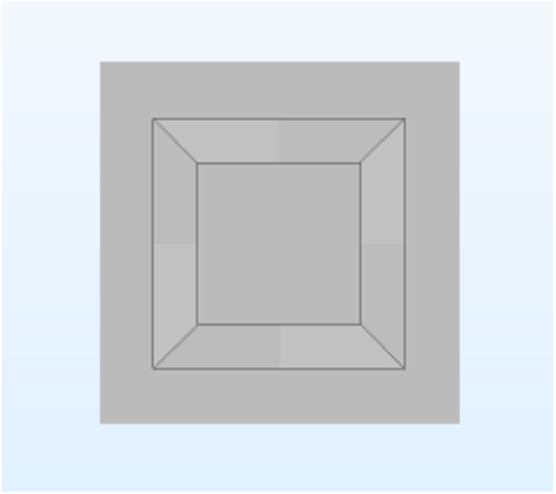


Figure III.3: La géométrie du capteur de pression MEMS.

Pour la définition du matériau, on utilise une bibliothèque permettant de définir simplement toutes les constantes physiques du matériau, par exemple pour le substrat les matériaux utilisent sont : céramiques, semi-conducteurs et ferromagnétiques etc.

L'étape suivante de la structure c'est le Maillage, Pour le faire cliquez sur "Mesh" et choisissez comme taille de maillage. Cliquez sur "Build All", il est maintenant possible de voir le maillage rectangulaire structuré. (La figure III.5) suivante est une vue d'ensemble du maillage par des mailles de forme rectangulaire d'un capteur de pression MEMS.

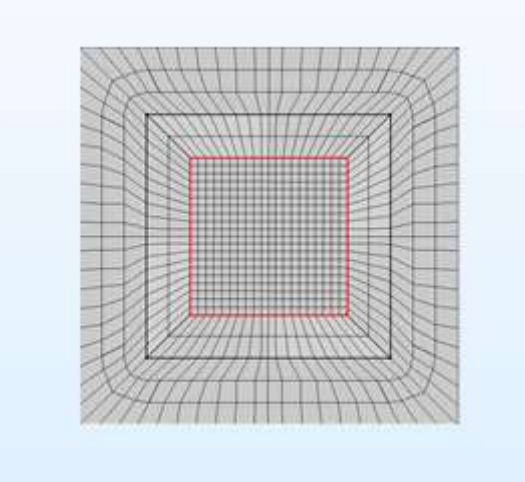


Figure III.4: Présente le Maillage d'un capteur de pression MEMS

III.3. RESULTAT DE LA SIMULATION

Le capteur de pression capacitif sont compose de deux plaques de silicium de forme Carrée comme un condensateur avec de l'air comme diélectrique entre les deux plaques. La plaque supérieure est une membrane déformable et la plaque inferieur est une électrode fixée. Lorsque la pression est appliquée sur la plaque supérieure elle se déforme en changeant la distance entre les deux plaques de condensateur. Cette variation de capacité peut alors être observée pour détecter la pression appliquée

La déformation de la membrane après la simulation est représentée sur la figure III.6:

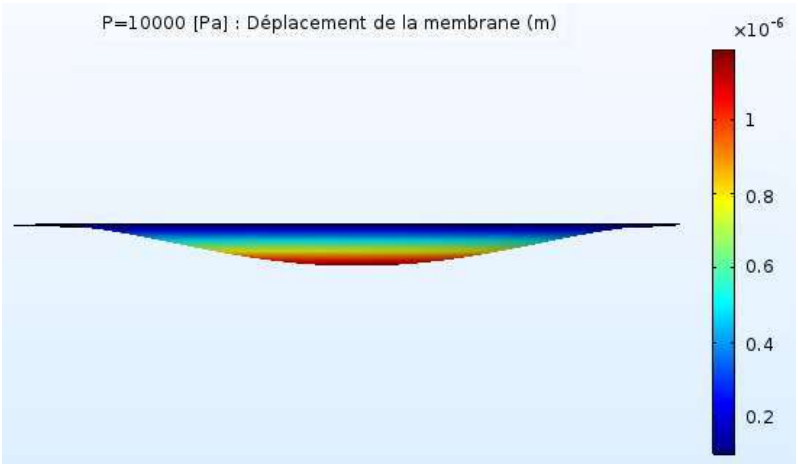


Figure III.5: Déflexion de membrane Carré.

Dans ce paragraphe nous nous intéressons essentiellement sur l'étude de capteur de pression capacitif de la variation de pression dans une plage de 0 à 25000 Pa, Nous avons étudié le comportement de la membrane de capteur. A partir des équations mathématiques,

nous avons modélisé la déformation de la membrane, nous avons tracé les variations de la capacité en fonction de la pression appliquée. Ensuite nous avons examiné l'influence de la géométrie du capteur pour différents paramètres : l'épaisseur de la membrane, la distance entre les deux électrodes avec l'influence de la température.

III.3.1. L'EFFET DE LA PRESSION SUR LE DEPLACEMENT DE LA MOBRANE :

L'état de repos d'un capteur de pression capacitif est caractérisé par une pression différentielle nulle ($P_{max} - P_{in} = 0$) :

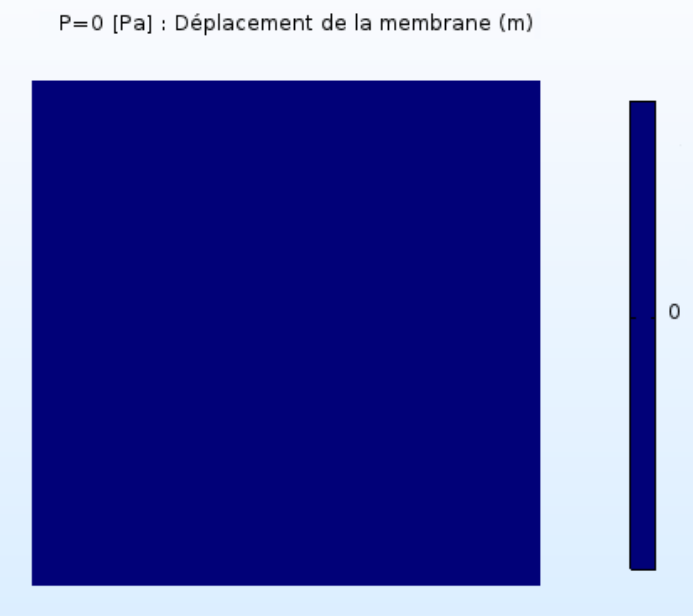


Figure III.6: Déplacement de la membrane de silicium au repos pour une pression de 0 Pa

- Pour différentes valeurs de la pression :

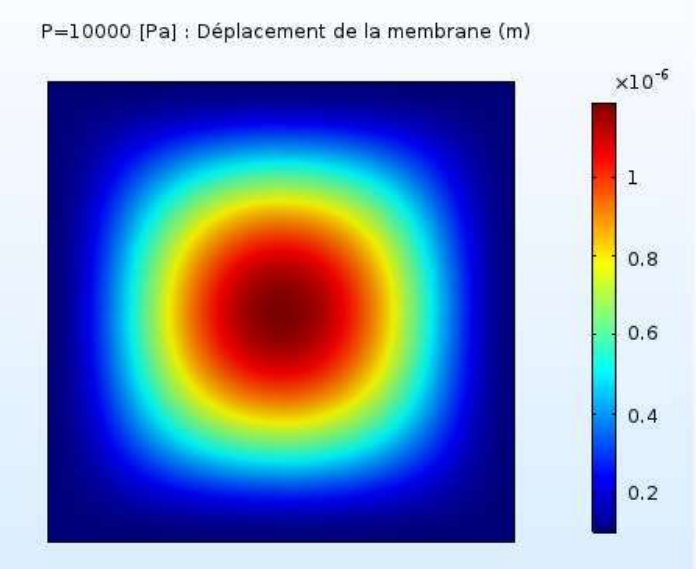


Figure III.7: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 10000 Pa

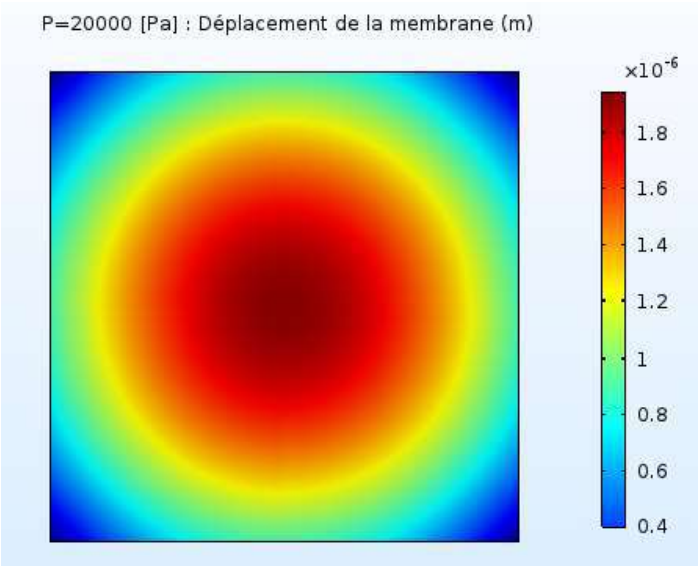


Figure III.8: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 20000 Pa

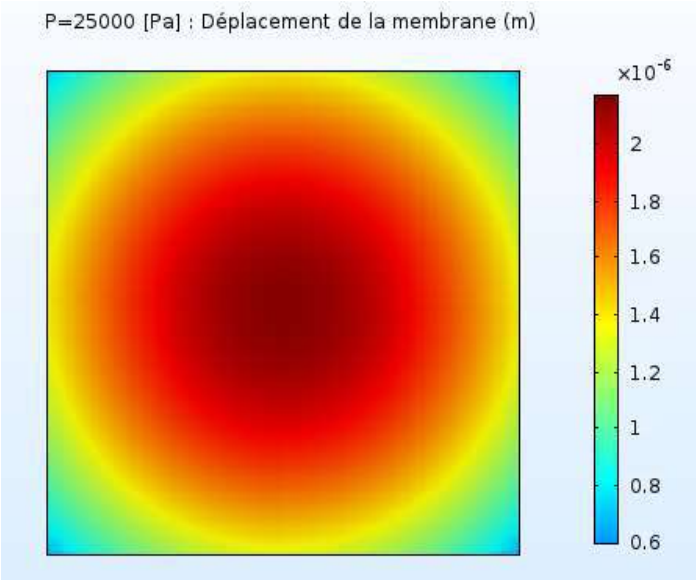


Figure III.9: Déplacement de la membrane de silicium pour une pression de 25000 Pa

Les figures III (7,8, 9 et 10) représente un déplacement à deux dimension (2D) d'une membrane de capteur de pression capacitif de forme carrée, la pression appliquée respectivement (P=0, P=10000, P=20000, P=25000) Pa

Ces figures montrent que le déplacement au centre de la membrane est proportionnelle à la pression appliquée est de l'ordre (P=0, P=10000, P=20000,P=25000),. En remarque que Le déplacement maximale est au centre de la membrane d=2 µm.

III.3.2.L'EFFET DE LA PRESSION SUR LA VARIATION DE POTENTIEL ELECTRIQUE :

L'état de repos d'un capteur de pression capacitif est caractérisé par une pression différentielle nulle ($P_{max} - P_{in} = 0$) :

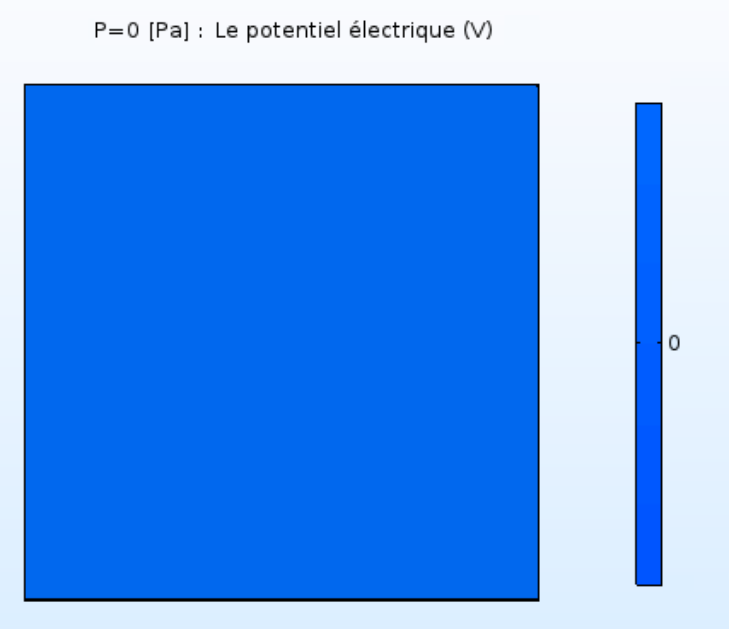


Figure III.10: Variation de potentiel électrique pour une pression de 0 Pa

- Pour différentes valeurs de la pression :

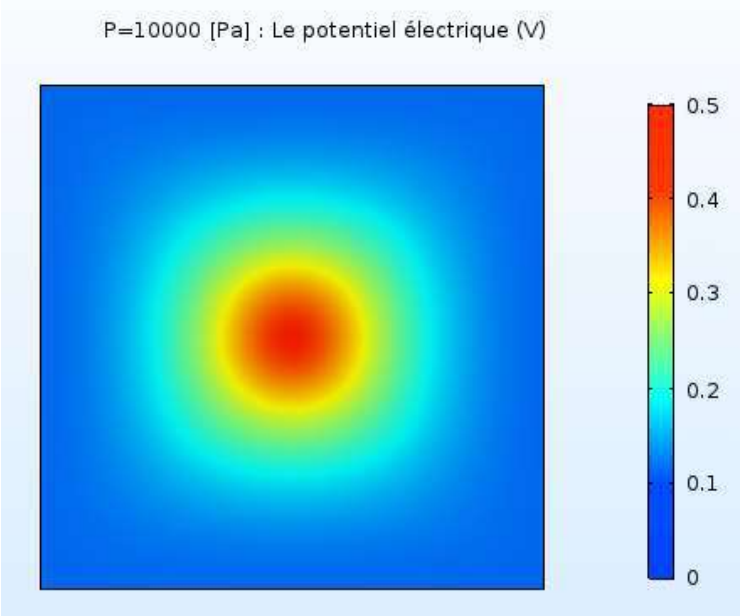


Figure III.11: Variation de potentiel électrique pour une pression de 10000 Pa

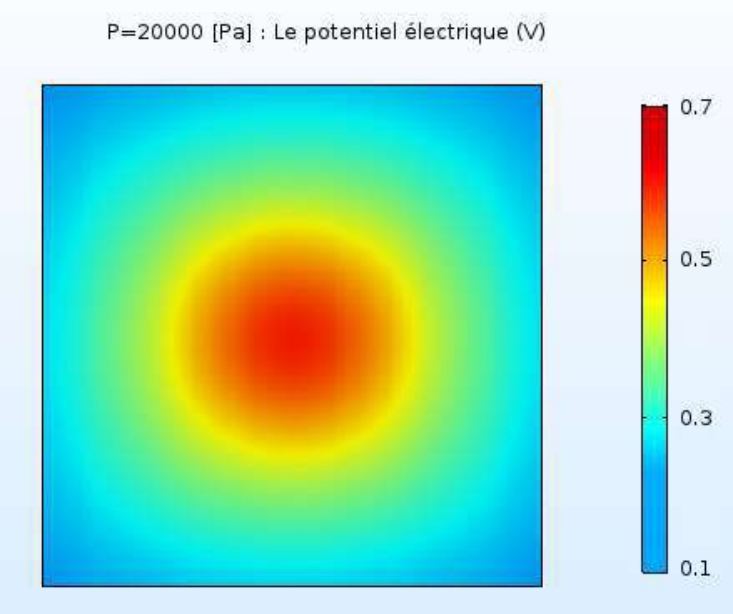


Figure III.12: Variation de potentiel électrique pour une pression de 20000 Pa

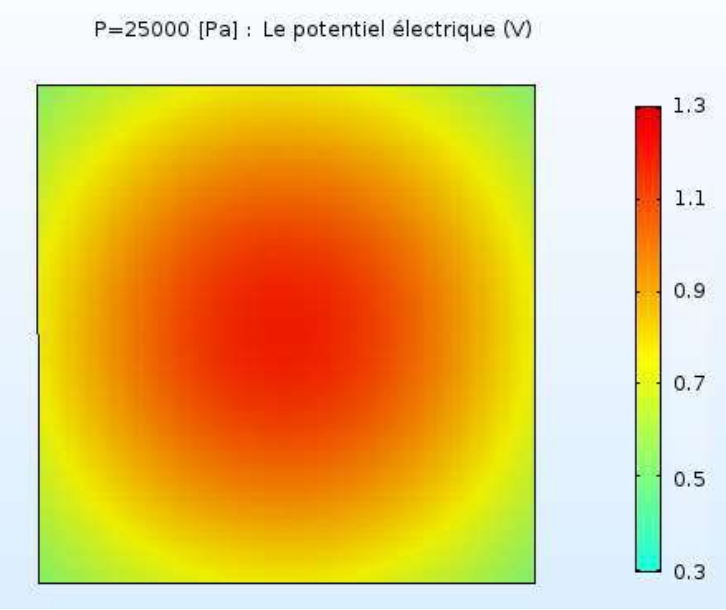


Figure III.13: Variation de potentiel électrique pour une pression de 25000 Pa

Les figures III (11,12, 13 et 14) représente le potentiel électrique à deux dimension (2D) d'un capteur de pression capacitif, la pression appliquée respectivement (P=0, P=10000,P=20000,P=25000) Pa.

Ces figures montrent que le potentiel électrique est proportionnelle à la pression appliquée est de l'ordre (P=0, P=10000,P=20000,P=25000),. En remarque que le potentiel électrique maximale a une pression P=25000 Pa.

III.3.3. EFFET DES PARAMETRES GEOMETRIQUES SUR LA SENSIBILITE DE CAPTEUR

A partir l'expression de la réponse capacitif C(p) nous avons tracé les courbes de la sensibilité S(p) du capteur de pression capacitif pour différentes valeur géométrique : l'épaisseur de la membrane (h), pour avoir l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la sensibilité à la pression

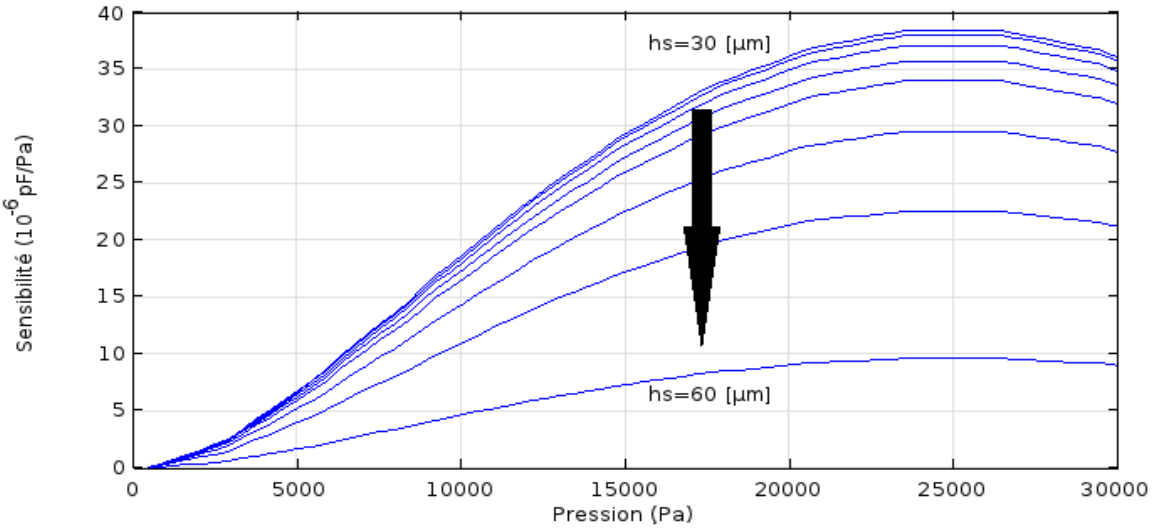


Figure III.14: La sensibilité de capteur en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane (hs).

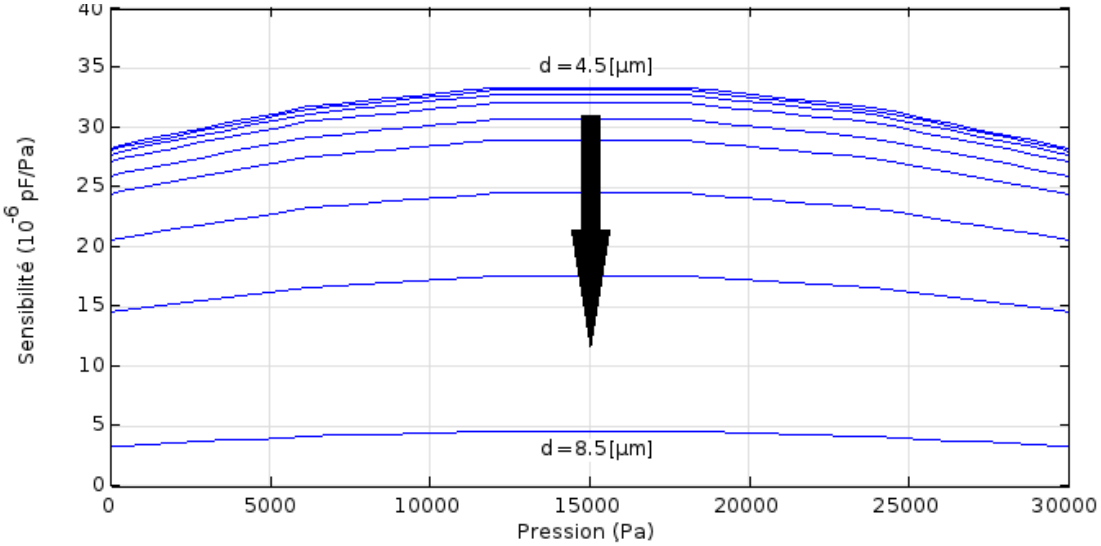


Figure III.15: La sensibilité de capteur en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de la distance entre les deux armatures (d).

A partir des figures (III.15 et III.16) on peut conclure que pour avoir un capteur de pression capacitif de haute sensibilité il faut utiliser une surface de membrane a une épaisseur de la membrane h_S=30µm et une distance inter électrode d=4.5µm.

III.3.4. LA REPONSE CAPACITIVE POUR UNE EPAISSEUR DE LA MEMBRANE DE 30µm A 60µm

Nous traçons les courbes de variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane carrée

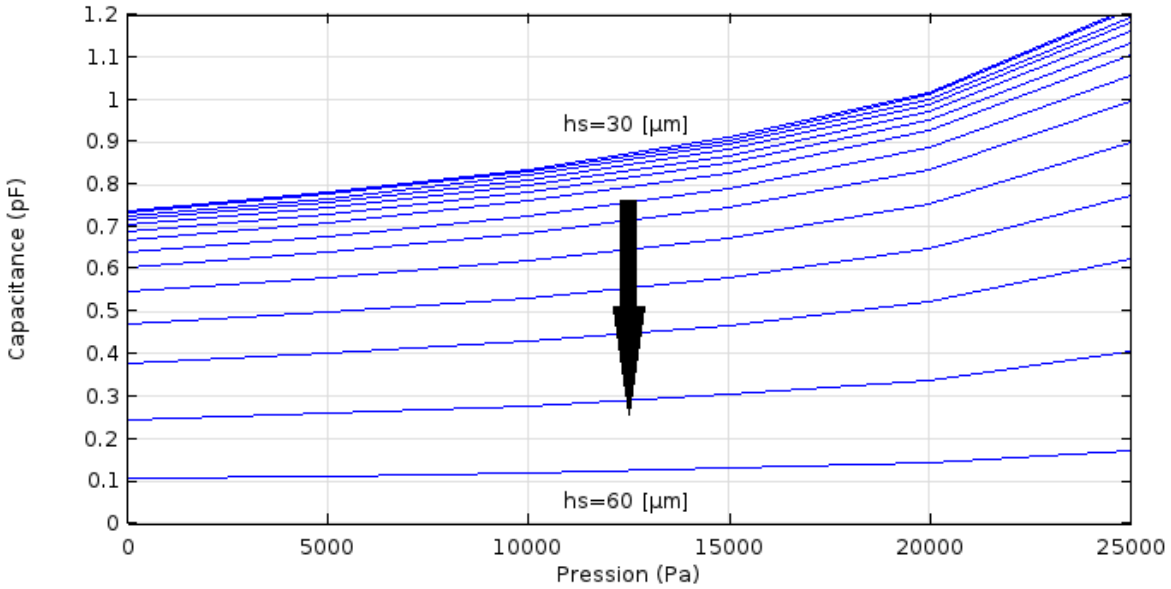


Figure III.16: La capacité en fonction de la pression, pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane (hs).

On remarque que la variation de la capacité est une Relation directe de la pression appliquée sur la membrane pour les différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane (hs).

On note également qu'à la valeur de pression maximale de 25000 Pa, l'effet de la pression dans le cas d'une épaisseur de 30 µm sur la capacité est supérieur à l'épaisseur de 60 µm.

(Une relation directe est une relation positive entre deux variables qui augmentent ou diminuent conjointement)

III.3.5. L'EFFET DE L'EPAISSEUR DE LA MEMBRANE SUR LE DEPLACEMENT

Nous traçons le déplacement au centre de la membrane pour les dimensions géométriques de la membrane :

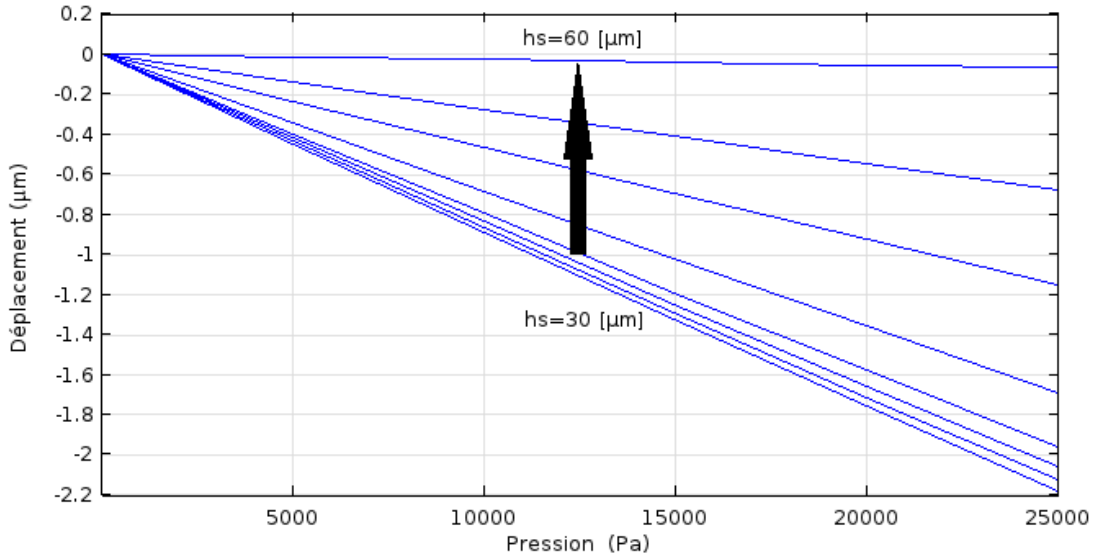


Figure III.17: Déplacement de la membrane en fonction de la pression, pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane (hs).

La Figure III.18 représente la déflexion de la membrane en silicium en pression appliquée , pour différentes valeurs de (hs) ,le déplacement maximale est de l'ordre de (2.2µm), pour les différentes valeurs de h (30µm a 20µm). Donc lorsque l'épaisseur de la membrane augmente, la déplacement au centre de la membrane diminue avec la pression appliquée .cette modélisation nous permet de déterminer la plage de fonctionnement en pression de notre micro capteur qui est inférieur de 25000 Pa.

III.3.6. L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

La figure III.18 présentent une étude de la capacitive en fonction de la température ; le facteur le plus étudié dans les microcapteurs et les microsystemes. On peut remarquer sur cette figure que : la capacité diminue quand la température augmente.

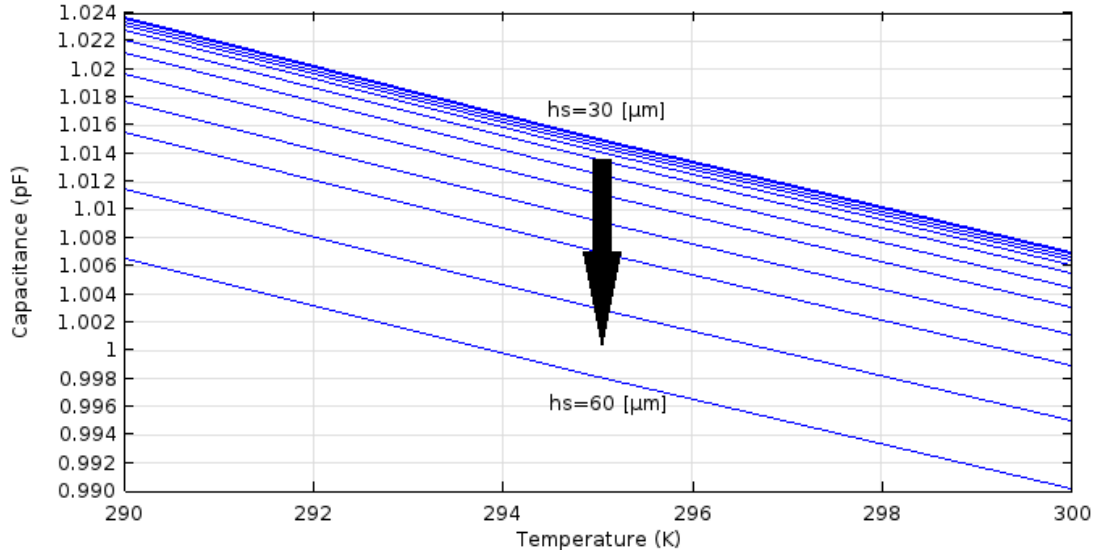


Figure III.19: La réponse capacitive en fonction de la température pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane (hs).

On note que dans le cas de la température maximale de 300 K, son effet sur la capacité est plus efficace dans le cas d'une membrane dont l'épaisseur est de 60 µm, par contre diminue pour l'épaisseur de 30 µm.

III.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de notre structure capacitive avec le logiciel COMSOL Multiphysics. 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 ; sensibilité et la capacité du capteur.

CONCLUSION GENERALE

Les capteurs de pression MEMS font l'objet de recherches intenses depuis den ombreuse années. Parmi les différents types de capteurs, les capteurs de pression qui Présentent des caractéristiques tout à faits intéressants (sensibilité élevée, faible coût, petitetaille) grâce à leur compatibilité avec la technologie de la microélectronique.

Les capteurs de pression MEMS sont généralement composés d'une membrane en silicium collé sur substrat. Sous l'effet de la pression, la membrane se déforme. Cette déformation de la membrane engendrant une variation de la capacité de capteur. La simulation de la réponse des capteurs de pression se base sur la modélisation mécanique du corps d'épreuve.

L'objectif de notre étude était de modéliser et de concepteur un capteur de pression .

Le travail réalisé dans ce mémoire a été consacré dans un premier temps à faire une synthèse bibliographique sur le capteur de pression en technologie MEMS. Au début, nous ont cité des généralités sur ce capteur (le fonctionnement, l'architecture générale et les différents types de capteurs) .

Ce travail a été consacré à la conception 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 COMSOL Multiphysics 5.2. Nous avons étudié l'influence des paramètres géométriques d'une structure capacitif constituée de deux armatures dont l'une et déformable sous l'effet de la pression, sur les caractéristiques mécaniques et électriques du capteur. Nous avons étudié entre autre l'influence de la distance entre les deux armatures, l'épaisseur de la membrane, ainsi que la température sur la réponse capacitive du capteur.

On peut conclure que la déflexion maximale au centre de la membrane est directement proportionnelle à la pression appliquée.

ce qui nous a permis de localiser les points les plus déformables de la membrane.

Nous ont étudié la simulation de ces dispositifs afin de déterminer l'effet de l'influence de chaque paramètre sur leur réponse de capteur.

Les perspectives pour ce travail sont assez nombreuses, étant donné que le thème des microsystèmes se compose d'un sujet multidisciplinaire assez vaste ; notamment la conception d'un multicapteur de pression, d'humidité et de température (une structure qui combine trois type de capteurs dans la même puce).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. V. Kaajakari, Practical MEMS, Small Gear Publishing, Las Vegas, 2009.
2. P. Menini. Faisabilite d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium. Micro et nanotechnologies/Microelectronique. Universite Paul Sabatier - Toulouse III, 1998.
3. F. KERROUR «Etude et modelisation de capteurs de pression piezoresistifs et capacitif au silicium ». Doctorat d'état en electronique. Universite de constabtine.2008.
4. A. Boukaabache, P. Menini, P.Pons. « Microcapteurs de Pression ». Technique de l'ingénieur T2070, mars 2001.
5. A. Permuy, E. Donzier «Capteurs microélectroniques», technique de l'ingénieur T3093,mai 2004.
6. F. Kerrour. « Etude et Modélisation de Capteur de Pression Piezorésistifs et Capacitifs au Silicium ». Thèse doctorat de l'université Mentouri Constantine 2008.
7. A. Benichou «Conception et Modélisation d'un accelerometre microelectronique triaxial, mémoire de magister, université de tlemcen, 2012. .
8. F. KERROUR, F. HOBAR. « Modélisation d'un Capteur de Pression Capacitive au Silicium de Formes Carrée et Rectangulaire ». Sciences & Technologie n°27 2008.
9. Raul. B, "Techniques de conception des circuits intégrés analogiques pour les applications en haute température, en technologies sur substrat de silicium", thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble soutenue, 1999.
10. Tounsi. F, "Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS: étude,modélisation et réalisation", thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.
11. Temple. P, "Développement des matériaux dans le cadre des microtechnologies", thèse de doctorat, Architecture des Systèmes du C.N.R.S, 2004.

12. Christophe. M, "Caractérisation de micro transducteurs de pression à haute performances intégrés sur silicium", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 1998.
13. O.français,. «capteurs et electronique associée (partie II :Acquisition de données), 2000
14. K.merabet, «Etude et simulation d'un capteur de pression capacitif au silicium, meloire de magister, universite de constantine,2010 .
15. A.permuy, Capteur à semiconducteurs, technique de l'ingenieur, traité électronique, E 2 310- 7(1990).
16. http : \\ microélectronique.Univ-Rennes.fr.
17. Tahanout. C, "Etude, Simulation électrothermique d'un micro capteur de gaz à base d'oxyde semi-conducteur", thèse de magister, Université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
18. Zein. J, "Outils CAO pour microsystèmes ", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2003.
19. Saadaoui. M, "Optimisation des circuits passifs micro-ondes suspendus sur membrane diélectrique", Université Paul Sabatier de Toulouse, 2005.
20. Aboubacar. C, "Conception et modélisation de MEMS monolithique CMOS entechnologie FSBM application aux accéléromètres", thèse de doctorat, Université deMontpellier II, 2005.
21. Dardalhon. M, "Contribution à l'analyse de la fiabilité de microsystèmes", thèse dedoctorat, Université de Montpellier II, 2003.
22. Fabien. P, "Capteur intégré tactile d'empreintes digitales à microstructure piezoresistives", thèse de Doctorat, Institute national de polytechnique de Grenoble, 2002.
23. Arnauld. D, "Conception intégrée de microsystèmes électromécaniques", thèse dedoctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 2004.
24. Maurice. R, "Contribution à la méthodologie de conception système : Application à la réalisation d'un microsystème multicapteur communicant pour le génie civil", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
25. Philipe. M, "Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium", thèse de Doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1998.
26. Erik. V et Jacob. R, "Piezo Resistive MEMS Devices: Theory and Applications", these de Magister, Department for Micro and Nano Technology, DTU, 2005.

27. El Bahri. M, "Influence de la température sur le comportement statique et dynamique des capteurs de pression capacitif sur silicium", thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2005.
28. Rouri. J, "Développement of mems sensors for mesurments of pressure, relative humidity and température", thèse de doctorat, Worcester poly technic Institue, 2003.
29. Cristianno. C, "Conception de transducteurs acoustiques micro usinés", thèse de Doctorat, Institut national de polytechnique de grenoble IVPG, 2005.
30. Randy Frank. "Understanding Smart Sensors". Artech House Boston. London.
31. Michal. O, "Modelling and optimization of piezoresistive pressure sensors", thèse dedoctorat, Université de INSA de Toulouse, 2009.
32. Young Han et al, "Diode temperature sensor array for measuring micro-scale surfacetemperature with high resolution", Sensors and Actuators, A 141-52-58-2008.
33. G. Asch, les capteurs en instrumentation industrielle, Dunod/Bordas, Paris,1982.
34. S.kemouche, simulation thermomécanique de capteurs de pression au silicium pour des applications biomedicales, mémoire de magister, universite de constantine1, 2014.
35. P. Eswaran and S.Malarvizhi . «Design Analysis of MEMS Capacitive Differential Pressure Sensor for Aircraft Altimeter ». International Journal of Applied Physics and Mathematics, Vol. 2, No. 1, January 2012.
36. B. Benmoussa, S. Bougima: « Static Response Study of Microelectronic Capacitive Pressure » ISESC'05. 19-21, 2005, Jijel University, Algeria, IEEE.
37. M.-H. Bao . « Micro Mechanical Transducers Pressure Sensors, Accelerometers and Gyroscopes » handbook of sensors and actuators volume 8; 2000.
38. Christophe MALHAIRE «Caractérisation et Modélisation de Microtransducteurs de Pression à Hautes Performances Intégrés sur Silicium», Thèse doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquees de LYON 2005.
39. A.Boukabache. «Conception, Modelisation et Réalisation d'un Capteur de PressionPiezoresistif à Faible Derive Thermique», Doctorat d'état, Fevrier 1993, Universitéde Constantine.