

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Meliani fella

pour l'obtention du diplôme de master en Électronique option Microélectronique
Microsystème e et Conception de Circuits.

Thème

L'alternative MEMS capacitive et MEMS piézorésistive pour une application médicale

Proposé par : madame Cheggaga Nawal

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

Avant toute chose le véritable remerciement revient à Dieu le tout puissant qui ma donné la force de réaliser ce travail.

Je tiens avant tout, à témoigner mes sincères reconnaissances et remerciements plus particulièrement à M^{me} Cheggaga, ma promotrice au niveau de l'USDB qui a fourni le meilleur d'elle-même pour l'élaboration de ce travail.

J'exprime mes sympathies et vifs remerciement à mes enseignants, qui ont participé à ma formation durant mon cursus universitaire.

Je tiens en fin à remercier mes parents, mon frère et mes sœurs, et toute personne qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire représentant le labeur d'une grande partie de ma jeunesse.

ملخص:

تتطلب العديد من المجالات استخدام أجهزة استشعار الضغط مع ارتفاع متزايد. وبتقنيات جد عالية. قمنا في هذا العمل بدراسة ومقارنة جهاز استشعار الضغط بالسعة و جهاز استشعار الضغط بالمقارنة من أجل تطبيق طبي.

هذه المقارنة تسمح لنا بتحديد خصائص و حدود استعمال هذه الأجهزة خاصة :

الشكل ، الحجم ، الحساسية ، الانجراف الحراري ، الاستهلاك و الخطي على نطاق قياس ضغط الدم

كلمات المفاتيح: جهاز استشعار الضغط بالسعة و الخطي الحساسية

Résumé : Plusieurs domaines exigent l'utilisation des capteurs de pression avec des performances de plus en plus élevées. Dans ce travail nous allons comparer, l'alternative MEMS capacitive, à celle MEMS piézorésistive, pour une application médical. Une étude comparative permettra de déterminer les caractéristiques et les limites d'utilisation de ces dispositifs, en particulier : formes, dimensions, sensibilité, dérive thermique, consommation et linéarité sur l'intervalle de mesure de la pression artérielle.

Mots clés : capteur capacitif; piézorésistif ; linéarité.

Abstract :

Several fields require the use of pressure sensors with increasingly high performance. In this work we will compare the alternative capacitive MEMS, piezoresistive MEMS, for a medical application. A comparative study will determine the characteristics and limitations of use of these devices, in particular: shape, size, sensitivity, temperature drift, and linearity consumption on the measuring range of blood pressure.

Keywords: capacitive sensor; piezoresistive; linearity.

Listes des acronymes et abréviations

| | |
|---------------|---|
| A | <i>section de la membrane</i> |
| α_{si} | <i>le coefficient d'anisotropie</i> |
| $C(p)$ | <i>la capacité en fonction de la pression</i> |
| $C(0)$ | <i>la capacité a l'équilibre</i> |
| C | <i>est la constante de Bridgman</i> |
| D | <i>coefficient de rigidité du silicium</i> |
| d | <i>distance inter électrodes</i> |
| e_i | <i>Erreur de mesure</i> |
| $E.M$ | <i>entendu de mesure</i> |
| E | <i>le module de Young du matériau</i> |
| F | <i>fréquence propre</i> |
| f_c | <i>Fréquence de coupure</i> |
| F | <i>forces</i> |
| G | <i>facteur de jauge</i> |
| h | <i>épaisseur de la membrane</i> |
| K | <i>facteur de jauge</i> |
| L | <i>longueur de la membrane</i> |
| ΔL | <i>déformation d'une longueur</i> |
| \acute{m} | <i>valeur moyenne</i> |

R *résistance*

R *rayon de la membrane*

ΔR *variation de la résistance*

ρ *résistivité électrique*

S *sensibilité du capteur*

S *surface de la membrane*

$T_{R5\%}$ *temps de réponse à 5%*

ν *le coefficient de Poisson.*

V_s *tension de sortie*

V_{ex} : *tension de l'alimentation*

$w(x, y)$ *Déflexion de la membrane*

w_{00} : *déflexion maximale au centre ($x=0, y=0$)*

ϵ_0 *permittivité électrique du vide*

ϵ_r *permittivité de l'air*

MEMS *micro-electro-mechanical-système*

Table des matières

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction général | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre 1: Généralité sur les MEMS

| | |
|---|----|
| 1.1 Introduction..... | 4 |
| 1.2 Domaines d'application..... | 5 |
| 1.3 Domaines visé par l'application | 7 |
| 1.4 Classifications des capteurs | 8 |
| 1.5 Modes de traduction | 8 |
| 1.6 Outils de modélisation..... | 9 |
| 1.7 Outil utilisé pour l'application..... | 10 |

Chapitre 2 : Performances Des Micro-capteurs

| | |
|---|----|
| 2.1 Introduction..... | 12 |
| 2.2 Performance d'un micro-capteur..... | 13 |
| 2.2.1 La caractéristique de transfert ou d'entrée-sortie (courbe d'étalonnage)..... | 13 |
| 2.2.2 étendu de mesure..... | 14 |
| 2.2.3 Domain de fonctionnements..... | 14 |
| 2.2.4 La sensibilité..... | 15 |
| 2.2.5 La finesse | 17 |
| 2.2.6 La linéarité..... | 17 |
| 2.2.7 La rapidité..... | 20 |
| 2.2.8 L'hystérésis..... | 22 |
| 2.2.9 La précision..... | 22 |
| 2.2.10 la résolution..... | 24 |
| 2.2.11 Grandeur d'influence..... | 24 |
| a. grandeurs d'ambiance (environnement)..... | 24 |
| b. grandeurs d'influence d'alimentation..... | 25 |
| 2.2.12 La répétabilité et la reproductibilité | 25 |
| 2.3 Étalonnage d'un capteur | 26 |
| 2.3.1 Étalonnage simple..... | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.3.2 | Étalonnage multiple..... | 26 |
| 2.4 | Erreur de mesure dans les capteurs..... | 27 |
| 2.4.1 | errer sur le zéro | 27 |
| 2.4.2 | Erreur liée à l'étalonnage | 27 |
| 2.4.3 | Erreurs dues aux grandeurs d'influence..... | 28 |
| 2.4.4 | Les erreurs dues aux conditions d'alimentation et de traitement de signal | 28 |
| 2.4.5 | Les erreurs dues au mode d'utilisation | 29 |
| 2.5 | Incertitudes de mesure dans les capteurs | 29 |
| 2.5.1 | Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques d'un capteur | 29 |
| 2.5.2 | Erreurs dues à des signaux parasites de caractère aléatoire | 30 |
| 2.5.3 | Erreurs de mesure dues aux grandeurs d'influence non-contrôlées | 30 |
| 2.6. | Capteur de pression | 31 |
| 2.6.1 | Définition d'un capteur de pression | 31 |
| 2.6.2 | Jauge extensomètre (ou de contrainte)..... | 33 |
| 2.6.3 | Corps d'épreuves | 36 |

Chapitre 3 : Etude de capteur capacitif et piézorésistif

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1 | Introduction | 38 |
| 3.2 | Etude de comportement mécanique de la membrane | 38 |
| 3.2.1. | déflexion de la membrane carrées | 38 |
| a. | Résultats sous matlab | 41 |
| b. | Résultats sous comsol..... | 43 |
| 3.2.2. | Déflexion de la membrane circulaire..... | 49 |
| a. | des résultats sous matlab | 49 |
| b. | Résultat sous comsol | 50 |
| 3.3 | étude du capteur de pression capacitif | 53 |
| 3.3.1 | principe de fonctionnement | 53 |
| 3.3.2 | simulation et discussions de résultat sous matlab | 55 |
| 3.4. | Etude du capteur de pression piézorésistif | 56 |

| | |
|------------------------------------|----|
| 3.4.1 Introduction | 56 |
| 3.4.2 facteur de jauge | 57 |
| a. Facteur de jauge..... | 57 |
| b. principe de fonctionnement..... | 58 |
| c. résultats sous matlab | 63 |
| 3.4.3 pont de Wheatstone | 65 |
| 3.5 Discution des résultats | 67 |
| Conclusion Général..... | 69 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Echelle dimensionnelle de MEMS et de Nanotechnologie..... | 6 |
| Figure2 : contraction du cœur (systole), relâchement du cœur (diastole)..... | 8 |
| Figure3 : Schéma d'un principe d'un capteur..... | 12 |
| Figure 4: Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif..... | 13 |
| Figure5: caractéristique de transfert d'un capteur de pression..... | 13 |
| Figure6: Domaines de fonctionnement d'un capteur..... | 15 |
| Figure7 : caractéristique linéaire..... | 16 |
| Figure8 : caractéristiques non linéaires (sensibilité pente locale)..... | 16 |
| Figure9: Linéarisation de la caractéristique et domaine de linéarité..... | 17 |
| Figure 10 :: valeur de position d'un capteur de déplacement | 18 |
| Figure11 : valeurs théoriques et valeur mesurée de tension de sortie..... | 19 |
| Figure12 : l'erreur de linéarité | 20 |
| Figure13 : réponses de systèmes de premier et deuxième ordres..... | 21 |
| Figure 14 : Courbes d 'hystérésis..... | 22 |
| Figure15: Fidélité d 'un capteur..... | 23 |
| Figure16 : Justesse d'un capteur..... | 23 |
| Figure17: a) Erreur de zéro, b) Erreur d'étalonnage..... | 27 |
| Figure18 : Synoptique d'un capteur de pression..... | 32 |
| Figure19 : (droite) capteur de pression piézoresistif, a(gauche) capteur De pressions capacitif..... | 33 |
| Figure20: Courbe de la durée de vie en fonction de la déformation unitaire..... | 36 |
| Figure21: Lame en traction | 37 |

| | |
|---|----|
| Figure 22 : membrane carrée | 39 |
| Figure 23 : Déflexion normalisée de la membrane $w(x, y)/w_0$ à 100 mmHg dans le cas petites déformations | 41 |
| Figure24 : variation de $W_{00}(p)$ pour différentes épaisseur de la membrane $h_1=30\mu\text{m}, h_2=25\mu\text{m}, h_3=20\mu\text{m}$ | 42 |
| Figure 25: déflexion W_{00} en fonction de la longueur A pour h différente | 43 |
| Figure 26 : Géométrie du modèle étudié | 44 |
| Figure 27 : Conditions aux frontières | 45 |
| Figure 28: membrane carrée décomposé en éléments finit pour calculer la déformation après l'application de la pression | 45 |
| Figure 29: Comportement mécanique de la membrane carrée | 46 |
| Figure 30 : fréquences et modes propres de la membrane carrée Dans le Domain fréquentiel | 48 |
| Figure 31: Déflexion $w(r)$ fonction de rayon r pour différente h | 49 |
| Figure 32: déflexion de la membrane en fonction de P avec h différentes | 50 |
| Figure 33 : Comportement mécanique de la membrane circulaire | 51 |
| Figure 34 : le comportement mécanique de la membrane circulaire Dans le Domain fréquentiel..... | 52 |
| Figure 35 : Capteur de pression capacitif au repos..... | 53 |
| Figure36 : Capteur en fonctionnement | 54 |
| Figure 37 : variation de la capacité en fonction de (d) distance inter électrodes Pour (h) épaisseur de membrane différente..... | 55 |
| Figure 38 : Système d'axe utilisé pour le calcul de la résistance électrique des jauges de contraintes..... | 58 |
| Figure 39 : structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane..... | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure 40: Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif à membrane de type | 59 |
| Figure 41 : différentes géométrie des membranes | 60 |
| Figure 42 : Jauges métalliques..... | 61 |
| Figure 43 : variation de la déflexion par apport à la pression appliqué(P) | 63 |
| Figure 44 : variation de la résistance par apport a la déflexion | 64 |
| Figure 45 : variation de la résistance par apport a la pression appliquée(P) | 64 |
| Figure 46 : pont de Wheatstone..... | 65 |
| Figure 47 : pont de Wheatstone avec dr..... | 66 |
| Figure 48 : membrane piézorésistif..... | 66 |
| Figure 50 : caractéristique linéaire..... | 67 |
| Figure 51 : Caractéristique linéaire de capteur piézorésistif..... | 68 |

Introduction générale

L'amélioration de la qualité et de l'efficacité en santé est un réel enjeu sociétal. Elle implique la surveillance continue des paramètres vitaux ou de l'état mental du sujet. Les champs d'applications sont vastes : l'application la plus importante est la surveillance des patients à distance, mais les dispositifs conçus permettent aussi le monitoring de professions à risque (militaires, pompiers) ou encore l'étude de performances sportives, etc.

Les avancées en micro-électronique permettent aujourd'hui le développement des systèmes performants pour le monitoring de paramètres physiologiques (capteur de pression intraoculaire, capteur de pression sanguine,...), capables de prendre en compte d'importantes contraintes techniques: forte intégration pour la réduction de la taille et faible consommation pour une plus grande autonomie, fiabilité,....

Les micro-capteurs MEMS (Micro-electromechanical-Systems) sont largement utilisés dans le domaine biomédical (outils de diagnostic, Instrumentation de chirurgie, organes artificiels,...) car les applications de la technologie MEMS offre la possibilité de réaliser des appareils petits et compacts avec de grandes performances. L'acronyme MEMS désigne un micro dispositif électromécanique, il englobe tout système disposant d'une partie électronique et intégrant une fonction mécanique dont l'ensemble est à l'échelle micrométrique de l'ordre [1cm à 0.1 μm].

L'objectif essentiel de l'étude des microstructures est d'aller vers d'éventuelles réalisations de microsystèmes en passant par de simples concepts composés de structures simples (des pointes, des poutres, des ponts ou bien encore des

membranes) appelées corps d'épreuves . Cette phase est un passage obligatoire pour :

- appréhender ultérieurement le comportement mécanique de microsystèmes plus complexes lorsqu'ils sont soumis à des perturbations externes.
- une maîtrise d'un procédé technologique (il s'agit de briques de base incontournables) mais surtout pour des études mécaniques rigoureuses avant d'aborder la conception de structures plus élaborées.

Les MEMS sont composés de structures mécaniques de base hybride ou monolithique, déformables et mobiles. Nous pouvons assimiler à la base leur constitution mécanique à un assemblage d'éléments simples de type : pont (bridge), cantilever (poutre en porte à faux) ou membrane en liaison avec un substrat de base plus massif, soumises à des sollicitations mécaniques s'apparentant à des efforts du type traction, torsion, flexion ou pression. De plus, leur principe d'élaboration peut induire des contraintes résiduelles qui peuvent être à l'origine de mécanismes d'endommagement ou de modification des propriétés intrinsèques aux structures citées.

Dans ce travail nous allons comparer, l'alternative MEMS capacitive, à celle MEMS piézorésistive, pour une application médical. Une étude comparative permettra de déterminer les caractéristiques et les limites d'utilisation de ces dispositifs, en particulier : formes, dimensions, sensibilité, dérive thermique, consommation et linéarité sur l'intervalle de mesure de la pression artérielle.

Donc pour chaque alternative nous allons :

- Dans un premier temps rappeler l'étude du comportement mécanique d'une membrane parfaitement encastrée aux bords, dans le cas de faibles perturbations, en déterminant l'expression de la déformation en fonction de la pression appliquée.

- En deuxième lieu nous nous focaliserons sur la modélisation du capteur de pression capacitif et à la détermination des effets des paramètres d'influence sur ses performances, tels que la surface de la membrane "A", l'épaisseur de la membrane "h" et la distance inter électrode "d".

Enfin, nous exposons les résultats obtenus et nous effectuons une étude comparative entre les différentes structures. Ce qui nous permettra d'évaluer les effets de chaque paramètre sur la réponse du capteur C(P) et sur sa sensibilité (Sp) à la pression appliquée P.

Le présent mémoire sera organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre renferme des généralités sur la technologie (Micro electro mechanical système) MEMS
- Le deuxième chapitre renferme des définitions et caractéristiques générales des micro-capteurs.
- Le troisième chapitre est consacré au micro capteur à alternative MEMS capacitive et MEMS piézorésistif à savoir comportement mécanique, modélisation et étude statique et dynamique et caractéristique de chaque capteur, et discussions des résultats .

Chapitre 1 Généralité sur les MEMS

1.1 Introduction

MEMS est un acronyme anglais pour « Micro-Electro-Mechanical-System » qui peut se traduire par « microsystèmes électromécaniques ». Le concept est né dans les années 80 à Berkeley [1] comme prolongement technologique aux savoirs faire de la microélectronique à base de silicium, l'idée étant de compléter les technologies pour passer du circuit électronique aux-micro systèmes intégrés.

MEMS désigne un système miniaturisé associant des éléments mécaniques, optiques, électromagnétiques, thermiques et fluidiques à de l'électronique, sur des substrats semi-conducteurs. Il assure des fonctions de capteurs pouvant mesurer des paramètres physiques dans l'environnement (pression, accélération, gaz, ...) et/ou des fonctions d'actionneurs pouvant agir sur cet environnement.

Le terme intelligent lui est associé pour exprimer qu'il dispose d'une capacité de calcul embarquée. Les MEMS peuvent assurer des fonctions électromécaniques, telles que celles des moteurs, des relais mais aussi des fonctions optiques, comme des commutateurs optiques ou des micro-miroirs. Le tout peut quelquefois être intégré sur une puce de silicium (System On Chip) ou être le résultat d'un assemblage hybride (System-In-Package).

Les microsystèmes, aussi intéressants soient-ils du point de vue de l'intégration multifonctionnelle, doivent pouvoir remplir leur mission dans des conditions d'utilisation et d'environnement qui peuvent être difficiles (profil de mission) avec une fiabilité maîtrisée, contrôlée et prévisible. Or, il s'avère que la complexité des microsystèmes, leur multidisciplinarité, l'hétérogénéité des matériaux utilisés et les

interfaces avec l'environnement extérieur constituent de nouvelles inconnues dans l'évaluation de la fiabilité d'un microsysteme. [2]

1.2 Domaines d'application

Les domaines les plus importants que l'on peut citer pour l'emploi des microsystemes à ce jour sont :

L'industrie automobile : qui est certainement à l'heure actuelle le domaine industriel pour lequel les microsystemes ont le plus de débouchés et où la présence de puces électroniques et de microsystemes ne cessent de croître. Les applications concernent en priorité des capteurs de pression, de température, de flux et les systemes d'analyse de qualité d'huile. Les éléments de sécurité des automobiles, tels que les capteurs de pressions intégrés dans les pneus, les accéléromètres dans le dispositif de l'airbag et pour l'assistance au pilotage, ainsi que les détecteurs de reculs ultrasonores font également appel aux technologies microsystemes. [3]

L'industrie aérospatiale : est l'un des domaines où l'emploi des microsystemes va prendre une place de plus en plus prépondérante, car les aspects de miniaturisation et de fiabilité sont très importants dans les satellites. Les microsystemes dans l'aérospatiale et les autres domaines ne sont pas soumis aux mêmes contraintes. En effet, dans un satellite, un microsysteme devra résister à des radiations importantes présentes dans l'espace, pour que son fonctionnement ne soit pas perturbé. Les principaux microsystemes utilisés sont des systemes de positionnement par visée de la terre et des gyromètres. [3]

Le domaine aérien est un grand consommateur de capteurs réalisés en technologie microsystemes. L'apport des Microsystemes se retrouve surtout dans le gain en termes de miniaturisation et dans la réduction des coûts des capteurs permettant d'augmenter leur présence, ce qui revient à dire une plus grande sécurité et fiabilité des avions. Il est ainsi possible d'installer dans les ailes des avions un réseau de capteurs qui fourniront

une mesure de la pression, des contraintes dans les matériaux ou de la température en divers points, pour une plus grande aide au pilotage. [3]

L'industrie des télécommunications et de l'informatique, utilise aussi des produits issus des microsystèmes. Les deux produits le plus utilisés, les têtes d'imprimantes et les têtes de lecture des disques représentent la plus grosse part du marché mondial des microsystèmes. A l'heure actuelle, les MEMS RF représentent les axes de recherches des télécommunications. Les MEMS RF visent l'intégration de composants discrets tels que les oscillateurs, les filtres, les inductances ou les relais.

Pour terminer, **Le biomédical** est le domaine où l'intérêt des microsystèmes est le plus grand. L'avènement des nouvelles technologies a permis à la science médicale de développer différents appareils de mesure pouvant aider à comprendre plusieurs troubles, d'aider à les soigner mais surtout d'améliorer la médecine. [3]

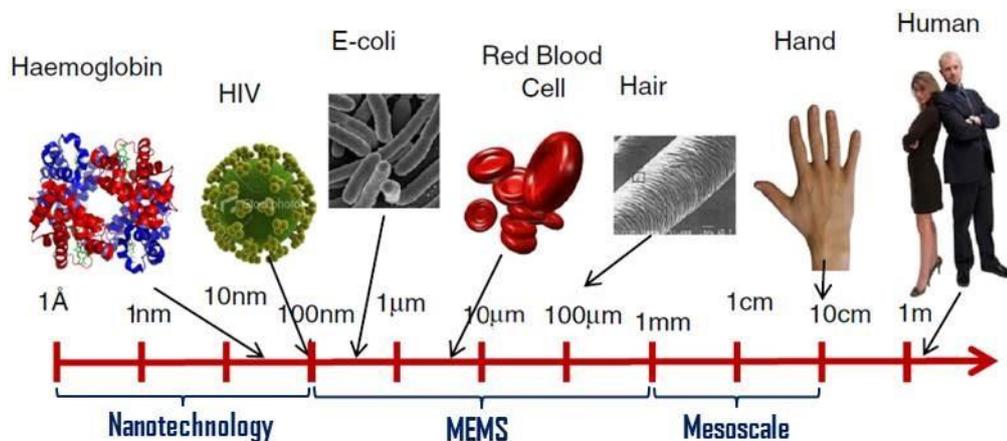


Figure 1 : Echelle dimensionnelle de MEMS et de Nanotechnologie [4]

L'amélioration de la médecine peut toucher plusieurs secteurs dont : l'imagerie médicale, la télémédecine, la micromanipulation en salle d'opération et la mesure des signes vitaux. Dans le système de santé, une grande importance est mise sur la possibilité de prévenir et de mieux diagnostiquer les maladies. La surveillance constante

des signes vitaux est utile à cette fin. La température, le pouls et la fréquence respiratoire sont des exemples de signes vitaux, mais la mesure de la pression artérielle est un des signes vitaux les plus importants, car elle sert à déterminer l'intégrité fonctionnelle du système cardiovasculaire

L'utilisation de nouvelles technologies, telles que la microélectronique ainsi que la micro-fabrication, peuvent aider à la conception et à l'intégration d'un système de monitoring sans fil de la pression artérielle. Ce nouvel appareil de mesure peut à la fois être facile d'utilisation, précis et moins invasif. Les suivis médicaux s'effectuent plus simplement en gardant une base de données des lectures de la pression et ces données peuvent être envoyées de façon sécuritaire à un professionnel de la santé.

- Plus d'un milliard de personnes devraient mesurer leur tension artérielle tous les jours afin d'éviter les conséquences possibles de l'hypertension, la pression artérielle est mesurée par un capteur avec les caractéristiques de la sensibilité, Résolution, étendu de mesure, rapidité et linéarité).

1.3 Domaine visé par l'application

Le tensiomètre (capteur de pression artériel) est un Capteur de pression artérielle qui permet de mesurer simplement le rythme cardiaque (en battements par minute) ainsi que les pressions systolique et diastolique (en mm de mercure). Ces valeurs peuvent être déterminées graphiquement ou être affichées automatiquement numériquement [5].

Par définition :

La pression artérielle est la pression qu'exerce le flux sanguin dans les artères. Cette pression augmente et diminue en fonction de l'activité du cœur et des muscles du corps.

La pression sanguine artérielle est le produit du débit cardiaque par la résistance rencontrée par le sang lorsqu'il circule dans les vaisseaux. La pression artérielle est définie en termes de pression systolique et pression diastolique.

La pression systolique est la pression maximale produite dans les artères par chaque battement cardiaque.

La pression diastolique est la pression constante maintenue dans les artères entre chaque battement cardiaque. De nombreux facteurs peuvent intervenir sur la pression artérielle : l'âge, l'exercice physique, le stress, l'obésité et les médicaments . [6]

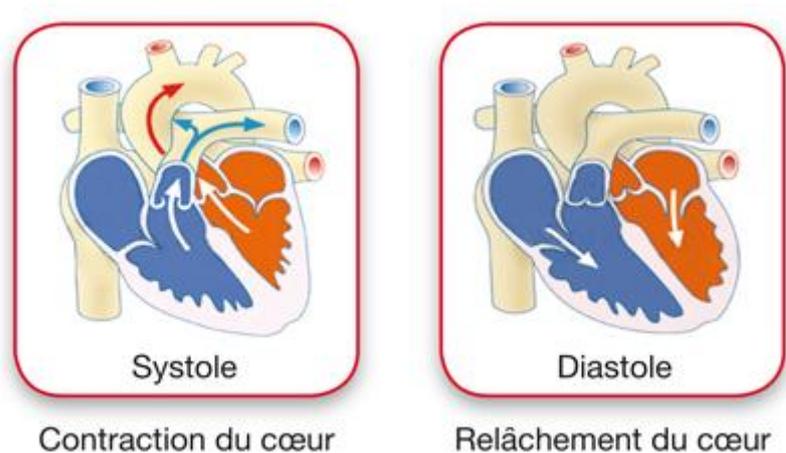


Figure2 : contraction du cœur (systole), relâchement du cœur (diastole [7]).

1.4. Classifications des capteurs :

- Par domaine d'énergie : mécanique, magnétique, thermique,...
- Par type de mesurande : température, débit, pression, capteurs proprioceptif, extéroceptif, 1D, 2D, 3D,...
- mode de transduction : piézoélectrique, capacitif, électromagnétique
- Par nature électrique/électronique : capteur actif ou passif (résistive/capacitif/inductif en boucle ouverte/ fermée, a sortie analogique/numérique
- Par type de technologie de fabrication : En Quartz, Silicium, a fibre optique, micro-usiné, hybride, intégré,....

1.5 Modes de traduction :

Il s'agit de l'effet physique mis en œuvre pour traduire un mesurande en grandeur électrique :

- **Mode Piézoélectrique** : La piézoélectricité est la propriété de certains corps de se polariser électriquement générer un champ ou un potentiel électrique sous l'action d'une contrainte mécanique comme le *Quartz*.
- **Mode Piézoresistif** : La piézorésistivité est le changement de la résistance électrique d'un matériau du à une contrainte mécanique.

- **Pyroélectrique** : Se dit des phénomènes électriques développés par le changement de température... ex : *Leucophane*.
- **Mode Electrostatique** : phénomène provoqué par l'électricité statique (charge électriques).
- **Mode Magnétostrictif** : la magnétostriction désigne la propriété que possède les matériaux ferromagnétique de se déformé sous l'effet d'un champ magnétique... ex : le fer.
- **Mode Thermoélectrique** : l'ensemble de transformation réversible de l'énergie thermique en énergie électrique... ex : effet Thomson.
- **Mode Photoélectrique** : l'ensemble se phénomènes électriques d'un matériau provoqués par la lumière...Ex : effet photovoltaïque,

1.6 Outils de modélisation

L'utilisation des moyens de modélisation et de simulation accélère et améliore la qualité du processus de conception de chaque produit technique. Elle permet également d'organiser les tests, d'optimiser le système conçu après avoir examiné différentes alternatives de conception. La modélisation rend possible la détermination de l'influence des variations internes (variations de la technologie, ...) ou de l'ambiance externe (température, humidité, ... en cours de mission) sur un composant ou le système entier. Notre ambition sera d'utiliser la modélisation pour étudier les effets d'influence, anticiper (prédire) leur effet et faire une estimation des défauts globaux liés à des défaillances localisées.

La modélisation aux éléments finis est une méthode de modélisation qui est très utilisée dans le domaine de la mécanique pour le calcul des déformations et des contraintes de structures complexes. Dès lors, cette méthode a été employée pour la modélisation et la simulation des MEMS du fait de sa capacité à simuler des structures en trois dimensions dans différents domaines que l'on peut coupler (multi-physique), tels la mécanique, la thermique, et l'électrique.

Le principe de la simulation aux éléments finis est de faire un découpage de structure. Pour cela, le domaine est divisé en sous domaines que l'on appelle éléments. Les éléments sont constitués d'un ensemble de points appelés nœuds qui contiennent une représentation mathématique des échanges d'énergies à l'intérieur de l'élément et entre ses nœuds. Le champ global calculé est alors déterminé par un nombre fini de valeurs de champ sur les nœuds. On illustrera cette approche dans le prochain chapitre en utilisant l'outil de simulation commercial COMSOL® pour résoudre un problème multi-physique, à savoir l'étude des comportements électrique, thermique et mécanique d'un actionneur électrothermique dit "en chevron" ; pour cela, nous respecterons les étapes suivantes : la définition de la géométrie du dispositif, le maillage de la structure, la définition des propriétés physiques des matériaux et des conditions aux limites, la résolution numérique, et enfin bien sûr l'analyse des résultats (post traitement).[2]

1.7 Outil utilisé pour l'application :

Le logiciel Comsol, anciennement appelé FEMLab est avant tout un outil de résolution d'équations aux dérivées partielles (EDP) par éléments finis. Sa particularité est de disposer d'une base de données d'équations permettant de modéliser différents phénomènes physiques tels que : l'électrostatique, la thermique, l'écoulement des fluides ou encore la déformation des matériaux.

En effet, cet outil de simulation permet de traiter de nombreux problèmes couplés grâce à sa banque intégrée d'équations physiques très variées (électrothermique, thermo-fluidique, etc.) décrits par les équations aux dérivées partielles [8] . Cette approche autorise une simulation numérique au plus près des systèmes réels.

Le logiciel Comsol multiphysique possède un environnement de programmation (Comsol script) dans lequel il est possible de modifier le maillage et les équations du problème. Ce logiciel possède de nombreux systèmes de résolution dits « Solveurs », pouvant être linéaires ou non, paramétriques, ou encore dépendants du temps [9] . En effet, les différentes étapes proposées par cet outil sont :

1. La construction de la géométrie : la première étape est la création d'une géométrie 2D ou 3D.
2. Définition de la physique : définition des constantes et des expressions.

3. Définition des propriétés des matériaux : une bibliothèque de matériaux est à disposition dans Comsol multiphysique. De plus, il est possible d'introduire d'autres propriétés des matériaux qui ne figurent pas dans cette bibliothèque.
4. Les conditions aux frontières : on impose des conditions sur certaines frontières (selon le cas voulu).
5. Le maillage de la géométrie : le maillage des domaines est automatique. Il est possible de le raffiner globalement ou de manière sélective.
6. Exploitation des résultats *Post-traitement* : Lorsque le programme converge vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de *Post-processing (post-traitement)* qui permet d'analyser et d'afficher les résultats. [10]

Chapitre 2 Performances Des Micro-capteur

2.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les performances et les caractéristiques métrologiques des micro-capteurs. Tous d'abord un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique ou chimique observée (mesurande m) en une grandeur physique utilisable (signal s , le plus souvent électrique), Tel que $s = F(m)$ La transformation F se fait grâce a un corps d'épreuve sensible au mesurande qui assure une première traduction en une grandeur physique non électrique (mesurande secondaire). Grace à un transducteur, la mesurande secondaire est en suite transformée une grandeur électrique.

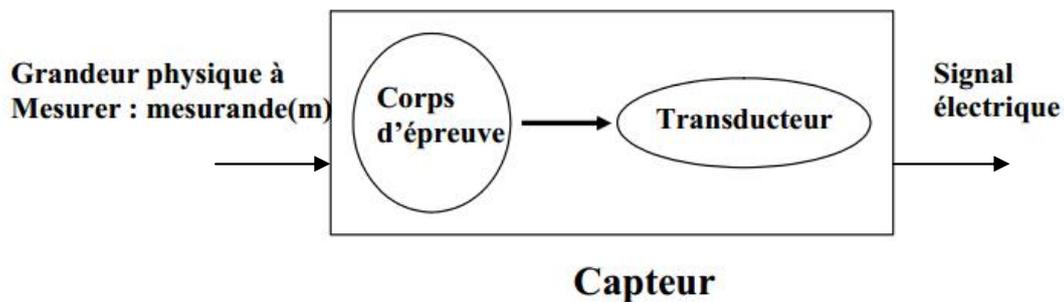


Figure3 : Schéma d'un principe d'un capteur [11]

2.2. Performance d'un micro-capteur :

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

Chaque capteur (ou élément de mesure) présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurande, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

2.2.1 La caractéristique de transfert ou d'entrée-sortie (courbe d'étalonnage):

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. Il s'agit d'une courbe en régime permanent qui ne donne pas d'informations sur les caractéristiques transitoires du capteur.

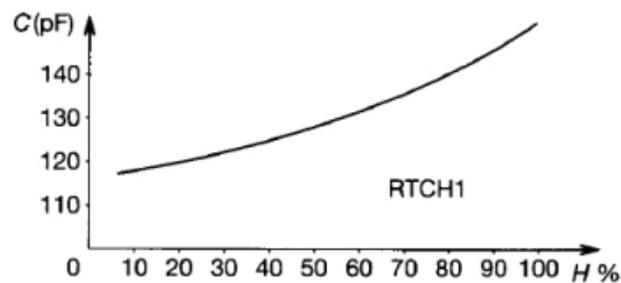


Figure 4: Exemple de caractéristique d'un capteur d'humidité du type capacitif [12]

Et sur la figure 4 on représente la caractéristique de transfert d'un capteur de pression air admission : $V_S = S.P$ (S : sensibilité du capteur).

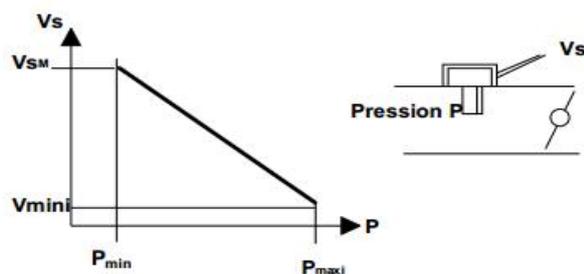


Figure5: caractéristique de transfert d'un capteur de pression

Avec :

V_{SM} = Valeur maxi de la tension de sortie du capteur (ou F.S.O full scall output)

P_{maxi} = pression maxi ou portée maximale

P_{min} = Portée minimale

$V_{SM} - V_{mini}$ = valeur de pleine échelle

$[P_{min} P_{max}]$ = Etendue de mesure

Remarque : Notons que le capteur peut généralement être exploité en dehors de la plage dite "étendue de mesure", mais dans ce cas il ne bénéficie plus de la garantie du constructeur quant à ses performances métrologiques. Rappelons aussi qu'il ne faut pas confondre l'étendue de mesure telle qu'elle est définie par le constructeur du capteur et la plage de mesure (souvent abusivement appelée étendue de mesure) qui sera celle d'une application donnée et qui sera donc en règle générale sensiblement réduite par rapport à l'étendue de mesure.[12]

2.2.2 Etendue de mesure :

L'étendue de mesure d'un capteur correspond à l'intervalle entre la valeur minimale et la valeur maximale du mesurande. Ces deux valeurs sont respectivement appelées portée minimale et portée maximale. Elle est exprimée dans l'unité de mesure du mesurande.

De l'étendue de mesure, on peut obtenir l'étendue d'échelle qui représente l'écart entre la portée minimale et maximale de l'étendue de mesure.

2.2.3 Domaines de fonctionnement :

Ils définissent les zones dans lesquelles les caractéristiques du capteur sont assurées par rapport à des spécifications données. On peut classer cette zone en trois familles :

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

- Zone de non-détérioration : Valeurs limites des grandeurs influençant le capteur (mesurande, température environnement, etc...) sans que les caractéristiques du capteur ne soient modifiées après annulation de surcharges éventuelles.

- Zone de non-destruction: Elle définit les limites garantissant la non-destruction du capteur mais dans laquelle il peut y avoir des modifications permanentes des caractéristiques du capteur.[12]

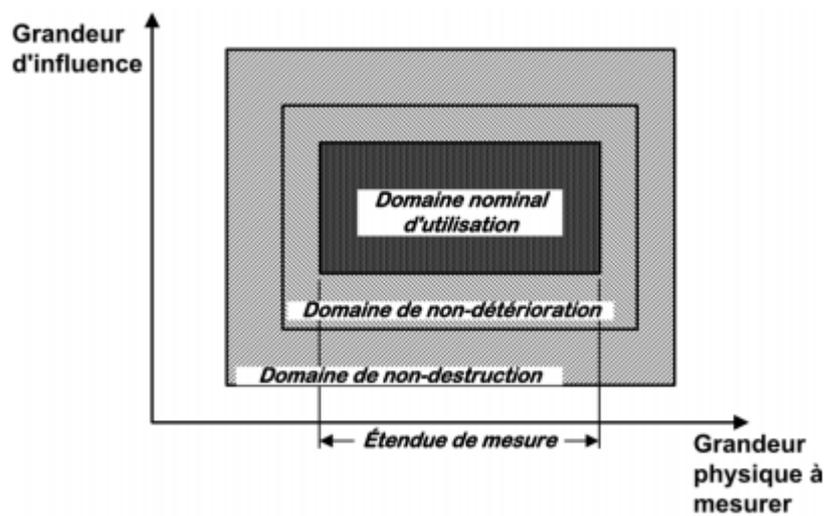


Figure6: Domaines de fonctionnement d'un capteur[12]

2.2.4 La sensibilité :

La sensibilité d'un capteur représente la rapport de la variation du signal de sortie a la variation du signal d'entrée, pour une mesure donnée. C'est donc la pente de la courbe de réponse de ce capteur i.e :

$$S = \frac{\Delta \text{sortie}}{\Delta \text{entrée}} \quad (2.1)$$

Si le capteur est linéaire, une seule valeur de sensibilité est nécessaire, car la pente de la courbe de la caractéristique entrée/sortie du capteur est constante (Figure 7). La caractéristique est alors une droite.

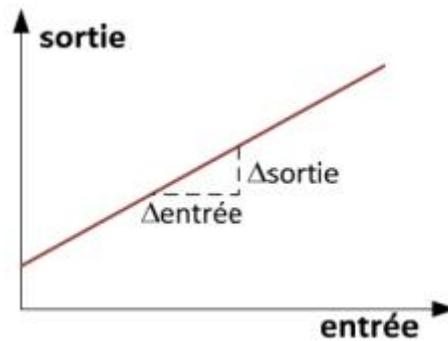


Figure7 : caractéristique linéaire [12]

Si le capteur est non - linéaire, on spécifie alors la sensibilité pour différentes mesures. La sensibilité est une indication de la pente locale de la caractéristique pour une mesure donnée (exemple : pente locale à la mesure e_1 sur la Figure 8).

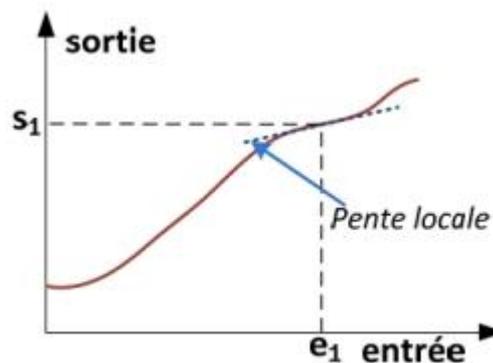


Figure8 : caractéristiques non linéaires (sensibilité pente locale) [12]

Certains capteurs ont une sortie dont l'amplitude dépend non seulement du mesurande, mais aussi de leur tension d'alimentation. Cela implique que la sensibilité du capteur doit prendre en compte la tension d'alimentation. Pour simplifier le calcul de la sensibilité, les fabricants ont définis la spécification de sensibilité réduite. Cette spécification est utilisée entre autres avec les capteurs de force (cellules de charge).

L'électronique à développer pour un MEMS doit être soigneusement élaborée pour ne pas induire du bruit compte-tenu des valeurs des capacités des MEMS, comparable aux capacités de fuite du système lui-même (quelques pF) et il faut également stabiliser la position du système, grâce à des dispositifs de contre réaction, suite à des déplacements dus à des forces électriques ou mécaniques (phénomène de pull-in ou d'amortissement).

Les composants électroniques utilisés doivent être préalablement caractérisée et sélectionnée, notamment les applications opérationnelles (devront avoir un gain très stable).

2.2.5 La 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.

Finesse et 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.

2.2.6 La linéarité:

La linéarité est une caractéristique qui définit la constance de la sensibilité sur toute la plage de mesure.

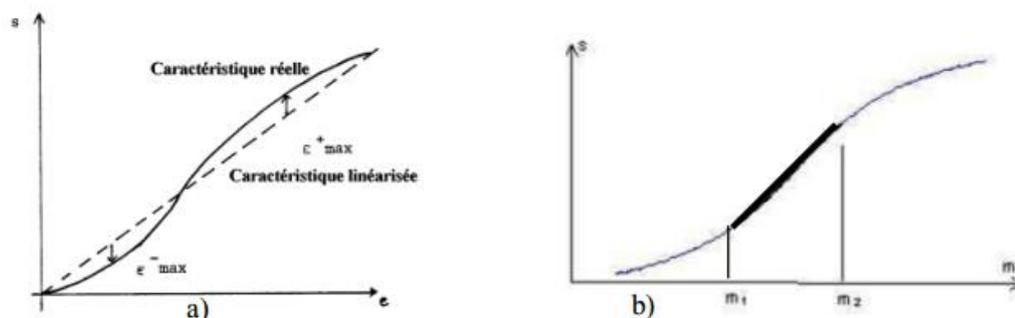


Figure9: Linéarisation de la caractéristique et domaine de linéarité [12]

L'équation décrivant la relation entre le signal d'entrée x et le signal de sortie y doit être de premier ordre ($y = ax+b$) pour que le capteur soit linéaire. Si le capteur n'est pas

linéaire, la relation entrée/sortie peut être approximée par une équation du premier ordre, mais il faut accepter l'imprécision causée par cette approximation. L'écart de linéarité est exprimé par un pourcentage de l'étendue de mesure.

On parle aussi de domaine linéaire, la caractéristique est une portion de droite. Dans ce domaine, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation du mesurande.

Exemple de calcul de la linéarité:

Soit un capteur de déplacement dont on mesure pour différentes positions la tension de sortie (tableau ci dessous).

| Position (mm) | Tension mesurée (V) |
|---------------|---------------------|
| 0 | 0.002 |
| 10 | 0.570 |
| 20 | 1.115 |
| 30 | 1.677 |
| 40 | 2.210 |
| 50 | 2.701 |
| 60 | 3.123 |
| 70 | 3.889 |
| 80 | 4.545 |
| 90 | 5.050 |

Figure10 : valeur de position d'un capteur de déplacement [12]

Selon le fabricant le capteur à une étendue de mesure de 0 à 90 mm et génère une sortie de 0 à 5 Volts.

Pour calculer la linéarité, il faut évaluer dans un premier temps, la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite approximant le mieux les mesures faites. Pour la méthode de régression linéaire, les équations à appliquer sont :

Pour trouver la pente,

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (2.2)$$

Puis l'ordonnée à l'origine,

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \frac{M}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

Dans ces deux équations, les x_i représentent les valeurs en entrée (mesurande) et les y_i sont les valeurs en sortie du capteur. Le nombre de points considéré dans ce calcul est n . En appliquant ces équations sur les valeurs du Tableau précédent, on trouve que la pente de la caractéristique du capteur est 0.0577 V/mm son ordonnée à l'origine est de - 0.019 Volts. À partir de ces valeurs la caractéristique est :

$$y=0.0577x-0.019$$

A partir de cette équation, on peut calculer les valeurs théoriques de tension de sortie en assurant que le capteur ait cette relation linéaire. La dernière colonne du fableau ci-dessous est la tension théorique calculée avec l'équation précédente.

| Position (mm) | Tension mesurée (V) | Tension théorique (V) |
|---------------|---------------------|-----------------------|
| 0 | 0.002 | -0.019 |
| 10 | 0.570 | 0.538 |
| 20 | 1.115 | 1.095 |
| 30 | 1.677 | 1.653 |
| 40 | 2.210 | 2.210 |
| 50 | 2.701 | 2.767 |
| 60 | 3.123 | 3.324 |
| 70 | 3.889 | 3.881 |
| 80 | 4.545 | 4.439 |
| 90 | 5.050 | 4.996 |

Figure11 : valeurs théoriques et valeur mesurée de tension de sortie [12]

Les deux dernières colonnes montrent qu'il existe un écart entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Il est possible, pour chaque mesure, calculer l'erreur de la façon suivante:

$$e_i = |y_{i.mesuré} - y_{i.théorique}|$$

Puis, on peut calculer l'erreur de linéarité en pourcentage de l'étendue de mesure en divisant l'erreur par l'étendue de mesure et en multipliant le résultat par 100 %:

$$E_i = \frac{e_i}{E.M.} * 100\% \quad (2.4)$$

Ce qui donne les deux dernières colonnes du Tableau ci-dessous.

En consultant la dernière colonne de ce dernier tableau, on constate que l'erreur maximale est de $\pm 4.02\%$ E.M. Donc, l'erreur de linéarité de ce capteur sera spécifiée comme étant $\pm 4.02\%$ E.M. [12]

| Position (mm) | Tension mesurée (V) | Tension théorique (V) | Erreur (V) | Erreur (% E.M.) |
|---------------|---------------------|-----------------------|------------|-----------------|
| 0 | 0.002 | -0.019 | 0.021 | 0.42 |
| 10 | 0.570 | 0.538 | 0.034 | 0.68 |
| 20 | 1.115 | 1.095 | 0.020 | 0.39 |
| 30 | 1.677 | 1.653 | 0.024 | 0.49 |
| 40 | 2.210 | 2.210 | 0.000 | 0.00 |
| 50 | 2.701 | 2.767 | 0.066 | 1.32 |
| 60 | 3.123 | 3.324 | 0.201 | 4.02 |
| 70 | 3.889 | 3.881 | 0.008 | 0.15 |
| 80 | 4.545 | 4.439 | 0.106 | 2.13 |
| 90 | 5.050 | 4.996 | 0.054 | 1.08 |

Figure12 : l'erreur de linéarité [12]

2.2.7 La rapidité:

La rapidité indique l'aptitude d'un capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur physique à mesurer. En effet, il faut toujours un certain temps pour qu'un changement du signal à l'entrée soit perçu à la sortie. On l'exprime de l'une des trois façons suivantes:

Le temps de réponse (ou constante de temps);

La bande passante du capteur;

La fréquence de coupure (ou fréquence propre).

Le temps de réponse représente le temps qu'il faut au capteur pour que sa sortie soit à moins d'un certain écart en pourcentage de la valeur finale, lorsque le mesurande (l'entrée) est soumis à une variation brusque de type échelon. Comme le temps de réponse dépend du pourcentage d'écart, il est obligatoire de spécifier le pourcentage d'écart (généralement 5 %) considéré pour évaluer le temps de réponse de l'élément de mesure. Plus le capteur est rapide, plus le temps de réponse est court. Si le capteur est un système de premier ordre (Figure 13.a), la réponse à un échelon possède un temps de réponse qui dépend de la constante de temps t du système. La constante de temps correspond au temps de réponse à 37 %. Le temps de réponse à 5% d'un capteur de premier ordre est égal à environ $3t$. [12]

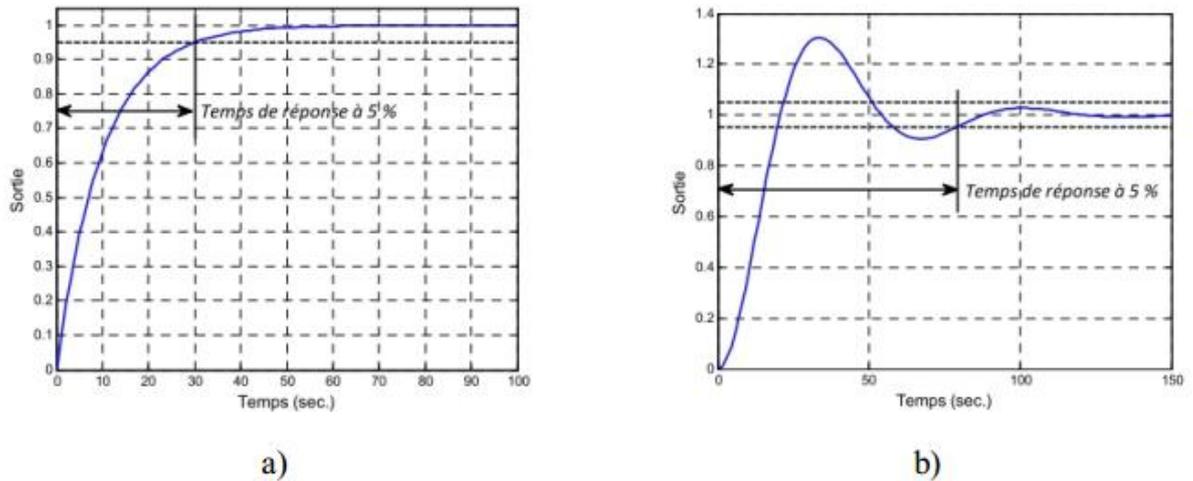


Figure 13 : réponses de systèmes de premier et deuxième ordres [12]

La bande passante d'un capteur du premier ordre sera la plage de fréquence entre 0 Hertz et la fréquence de coupure f_c qui est égale à $1/2\pi\tau$. Pour qu'un capteur du premier ordre soit rapide, il faut donc que la constante de temps soit courte, que sa fréquence de coupure soit élevée et que la bande passante soit étendue. Ce constat est évident, puisque tous ces paramètres sont liés entre eux.

Si le capteur est un système du deuxième ordre (Figure 13.b), la réponse à un échelon à un temps de réponse qui dépend de sa fréquence propre ω_0 et du coefficient d'amortissement ξ . L'équation pour trouver le temps de réponse à 5% est (avec $0 < \xi < 1$):

$$T_{R5\%} = \frac{3}{\varepsilon\omega_0} \quad (2.5)$$

Pour qu'un capteur du second ordre soit rapide, il faut que la fréquence propre soit élevée pour que le temps de réponse soit court. Par contre, il faut se méfier du facteur d'amortissement qui devrait être idéalement pas trop loin de 1. Si la valeur du facteur d'amortissement est trop petite, le système tend à avoir quelques oscillations avant de se stabiliser, la première oscillation générant un dépassement important. À la limite, si le facteur d'amortissement est nul, le système est oscillant. Si le facteur d'amortissement est grand, le système tend à être très sous amorti, et l'équation ci-dessus devient invalide si $\varepsilon \geq 1$.

2.2.8 L'hystérésis.

Un système présente une hystérésis (Figure 14) lorsque la grandeur de sortie ne dépend pas uniquement de la valeur du mesurande, mais aussi de la façon dont elle a été atteinte.

L'hystérésis est définie par l'amplitude de l'écart maximum exprimé en pourcentage de l'étendue de mesure.

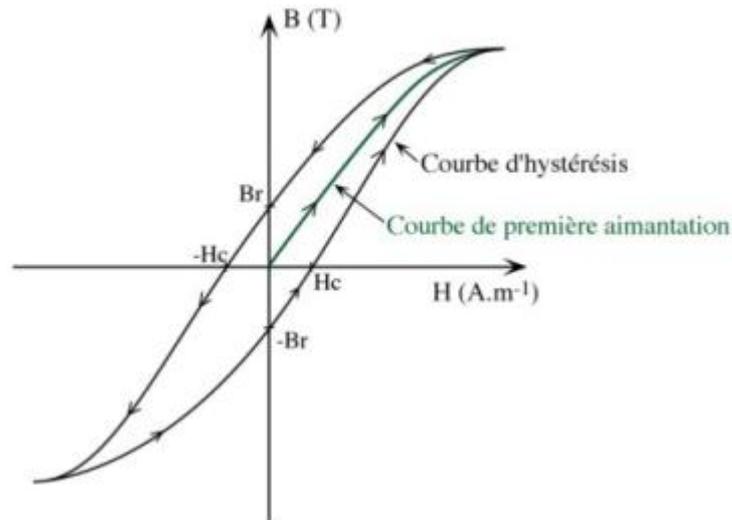


Figure 14 : Courbes d'hystérésis [12]

L'hystérésis peut être de nature mécanique ou électrique. En mécanique, l'hystérésis est associée aux phénomènes de frottement sec et de jeu dans un mécanisme. En électrique, l'hystérésis est associée à des phénomènes de polarisation mécanique ou électrique.

2.2.9. La précision:

La précision est un des paramètres les plus importants d'un système de mesure. Elle permet d'évaluer la qualité de mesure en donnant l'idée de l'ampleur de l'erreur affectant la mesure. La précision fait appel à la notion de fidélité et de justesse, puisqu'un capteur précis est juste et fidèle.

➤ La fidélité:

La fidélité d'un capteur (Figure15) correspond à l'écart type d'un ensemble de mesures faites pour un mesurande donné. Plus l'écart type est élevé, moins le capteur est fidèle .

la fidélité représente donc les incertitudes de mesures d'un capteur. Elle dépend des erreurs aléatoires (exemple: bruit électromagnétique).

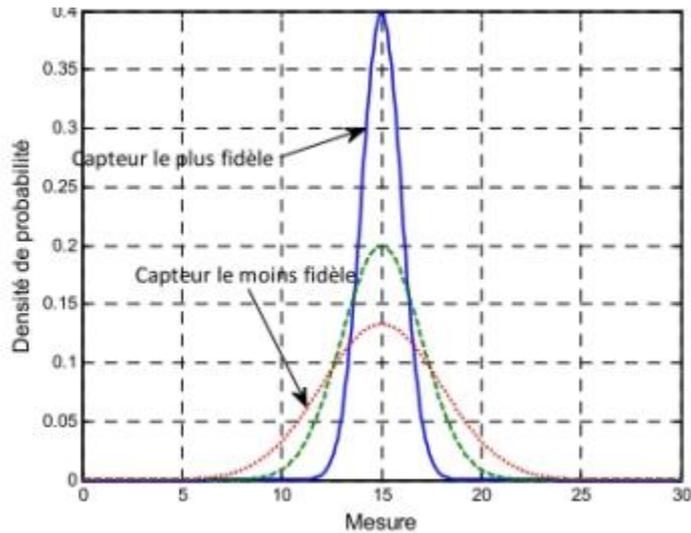


Figure15: Fidélité d'un capteur [12]

➤ **La justesse:**

La justesse d'un capteur (Figure 16) correspond à la différence entre la valeur moyenne d'un ensemble de mesures faites pour un mesurande donné et celui-ci. La justesse représente les erreurs systématiques du système de mesure. Ces erreurs peuvent être réduites par de la Calibration du capteur.

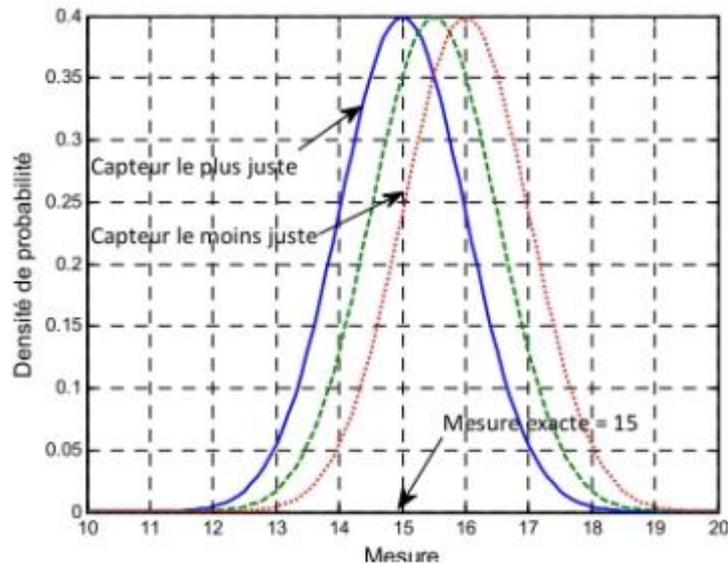


Figure16 : Justesse d'un capteur [12]

La précision est spécifiée par l'erreur de précision qui délimite un intervalle autour de la valeur mesurée, à l'intérieur duquel on est assuré de trouver la valeur vraie du mesurande.

Cette erreur de précision peut être représentée de trois façons:

- Par l'erreur absolue e_a qui exprime l'erreur de précision dans l'unité de mesure du mesurande;

Par l'erreur relative e_r qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à la valeur mesurée m : $e_r = (e_a/m) \times 100\%$

- Par la classe de précision CP, qui exprime l'erreur de précision en pourcentage par rapport à l'étendue de mesure E.M: $CP = (e_a/E.M) \times 100\%$

2.2.10 La résolution:

La résolution correspond à la granularité de la mesure, i.e., à la plus petite variation discernable par le capteur. Elle peut ne pas être constante sur toute l'étendue de la mesure. La résolution s'applique

aussi aux convertisseurs analogiques/numériques (A/N). Le seuil est la résolution à l'origine, au voisinage de la valeur 0 du mesurande. [12]

2.2.11 Grandeurs d'influences:

La relation $s=f(m)$ entre mesurande et grandeur électrique n'est de cette forme que dans le cas idéal.

En réalité, beaucoup d'éléments autres que le mesurande peuvent modifier la grandeur E. La relation est de la forme: $s=f(m, g_1, g_2, \dots)$ où les g_i sont les grandeurs d'influence.

Les grandeurs d'influence sont variables d'un capteur à l'autre car elles dépendent du processus physique mis en œuvre. On retrouve les grandeurs de type mécanique ou thermique mais aussi des grandeurs électriques.

On les classe en deux types:

- a. **grandeurs d'ambiance (environnement):** grandeurs physiques indépendantes du mesurande (température, hygrométrie, champ magnétique...). La température joue souvent un rôle important.

Elle provoque deux types de phénomènes : dilatation des corps et modifications des propriétés électriques (changement de conductibilité et de caractéristiques

diélectriques). Les variations de pression, les forces (éventuellement d'inertie) provoquent des déformations. Les champ magnétiques peuvent induire des f.e.m. parasites.

b. grandeurs d'influence d'alimentation: paramètres électriques (courant, tension, fréquence) des circuits d'alimentation du capteur.

Face à ces grandeurs d'influence, il y a plusieurs attitudes possibles:

- prise en compte : lorsqu'on utilise le capteur pour mesurer m , il faut en parallèle mesurer toutes les grandeurs d'influence.
- Isolation du capteur vis-à-vis des éléments pouvant modifier les grandeurs d'influence: blindage électromagnétique; suspension antivibratoire; ...
- Stabilisation des grandeurs d'influence : enceinte thermostatée, sources de courant et de tension stabilisées, ...
- Compensation par un circuit électrique ou électronique adapté (méthodes utilisant des ponts par exemple).

Remarque: on notera que les constructeurs n'envisagent en général que quelques grandeurs d'influence et que ce sera donc souvent à l'utilisateur d'identifier l'importance de certaines d'entre elles dans le contexte de leur application spécifique. il ne faut surtout pas supposer que parce que le constructeur ne dit rien a propos d'une grandeur d'influence potentielle que cela signifie à coup sûr qu'elle n'a aucune influence sur le comportement du capteur. [12]

2.2.12 La répétabilité et la reproductibilité:

La répétabilité est la marge de fluctuation de la sortie à court terme, lorsque le même mesurande est appliqué à plusieurs reprises et dans le même sens. Cette marge est attribuable à plusieurs causes (entre autre l'opérateur) et s'exprime en pourcentage de l'étendue de mesure.

La reproductibilité est la marge de fluctuation de la sortie à long terme, lorsque le même mesurande est appliqué à plusieurs reprises et dans le même sens. Cette marge est attribuable à plusieurs causes (dont le vieillissement) et s'exprime en pourcentage de l'étendue de mesure.

2.3. 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, dans le cas contraire il est multiple.[12]

2.3.1 Etalonnage simple

On distingue deux méthodes possibles:

L'étalonnage direct dans lequel les valeurs du mesurande sont issues d'étalons ou d'objets de référence pour lesquels le mesurande est connu avec une incertitude donnée.

-l'étalonnage par comparaison dans lequel on compare les mesures du capteur à étalonner avec celles provenant d'un autre capteur lui-même préalablement étalonné et considéré comme étant la référence, ce qui signifie que son étalonnage est raccordé à des étalons et que l'incertitude correspondante est connue.

2.3.2 Etalonnage multiple

L'existence de grandeurs d'influence susceptibles de varier au cours des mesures oblige à paramétrer l'étalonnage pour différentes valeurs de ces grandeurs: c'est l'étalonnage multiple. Quelques cas particuliers d'étalonnages multiples méritent d'être mentionnés:

- pour les capteurs présentant une hystérésis, il est nécessaire de procéder à l'étalonnage par une succession ordonnée et spécifiée des valeurs du mesurande.

- pour les capteurs de grandeurs dynamiques, il faut relever la réponse en fréquence pour un mesurande d'amplitude fixée et la réponse en amplitude pour une fréquence fixée.

-dans certains cas, notamment pour beaucoup de capteurs mécaniques et thermiques, lorsque le constructeur ne donne pas d'indication relative à l'usage du capteur, il est souvent souhaitable d'effectuer l'étalonnage après son installation sur le site. Ainsi, l'étalonnage d'un accéléromètre peut être effectué après sa fixation à la structure dont on veut mesurer l'accélération, en particulier si, dans le certificat d'étalonnage, le constructeur a spécifié une procédure différente. [12]

2.4 Erreurs de mesure dans les capteurs

Les erreurs de mesure ont des causes systématiques que l'opérateur peut corriger ou non. Ces erreurs ont des causes clairement identifiées et prévisibles. Parmi ces erreurs, il faut considérer aussi l'erreur de linéarité déjà abordée.

2.4.1 Erreur sur le zéro (l'offset)

L'erreur sur le zéro appelée aussi "dérive" est généralement due au vieillissement des composants d'un capteur et aux variations de température. Elle se traduit par un décalage de la grandeur de sortie indépendante du mesurande (Figure 17 a).

Dans le cas de la température, la dérive se produit lors de la période d'échauffement du capteur, ce qui implique qu'il est préférable d'étalonner un capteur une fois cette période écoulée. Dans le cas du vieillissement, la dérive est facilement corrigeable par un étalonnage du capteur à intervalle régulier.

2.4.2 Erreur liée à l'étalonnage

L'erreur liée à l'étalonnage du capteur est due à la qualité de l'opération d'étalonnage (Figure 17 b).

Si cette opération n'est pas effectuée correctement, cela se traduit par une erreur dans la pente de la caractéristique du capteur. Il est recommandé de toujours étalonner un capteur avec un étalon de référence au moins plus de trois fois.

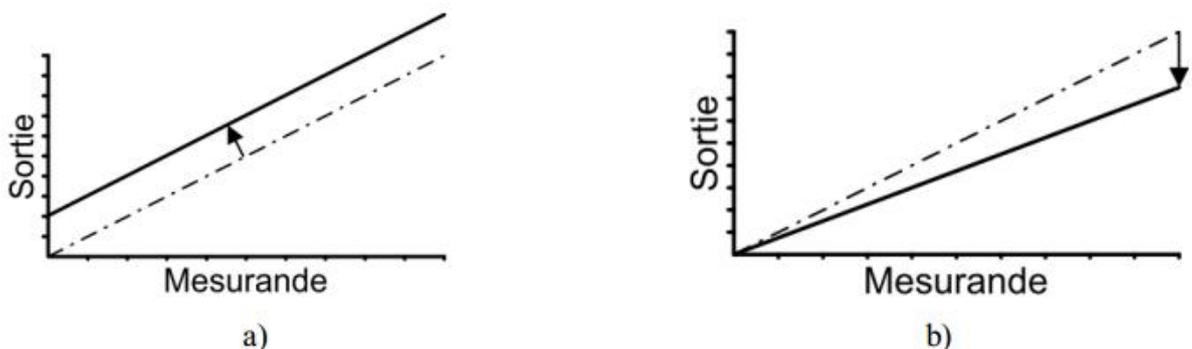


Figure 17: a) Erreur de zéro, b) Erreur d'étalonnage [12]

Même dans le cas où l'étalon est précis, il est bon de faire plusieurs mesures lors de la calibration du capteur, car l'erreur de répétabilité est présente, même avec l'étalon.

2.4.3 Erreurs dues aux grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence provoquent sur le capteur des variations de ses caractéristiques métrologiques. L'erreur sur le zéro mentionnée précédemment est un très bon exemple de ces variations.

L'erreur sur la sensibilité est aussi une erreur due aux grandeurs d'influence. Cette erreur se traduit par une variation de la sensibilité et est représentée par l'écart maximal entre la sensibilité mesurée et la sensibilité nominale.

Toutes les grandeurs physiques connues peuvent agir comme grandeur d'influence. Pour minimiser l'effet de ces grandeurs d'influence, il faut utiliser soit la compensation ou la stabilisation.

Par exemple, si l'on a un capteur sensible à la température on peut y ajouter un circuit électronique de compensation pour le rendre indépendant des variations de température. Ce genre de circuit est généralement déjà inclus dans certains capteurs pour diverses grandeurs physiques.

On peut aussi minimiser les erreurs dues aux grandeurs d'influence en faisant en sorte que l'environnement du capteur reste constant. La stabilisation consiste donc à avoir un environnement contrôlé. Si un capteur est dans une pièce qui reste toujours à 22 °C, alors il n'est pas nécessaire d'avoir des circuits de compensation puisque la température est constante.

2.4.4 Les erreurs dues aux conditions d'alimentation et de traitement de signal:

La grandeur de sortie peut être fortement dépendante des conditions d'alimentation du capteur.

L'alimentation du capteur est dans certains cas une grandeur modifiante qui peut affecter la précision d'une mesure.

L'exemple suivant illustre bien ce qui peut se passer dans un système de mesure.[12]

Supposons une jauge de contrainte montée dans un pont de résistance. Si cette jauge, ayant une résistance de valeur R , est montée avec trois autres résistances de valeur R , la tension de sortie du pont est alors égale à:

$$V_s = V_{ex} \left(\frac{1}{2} - \frac{R}{R+R_j} \right) \quad (2.6)$$

Où V_{ex} est la tension de l'alimentation et V_s est la tension de sortie.

La tension d'excitation représente la sensibilité du capteur. Si elle varie, par exemple de 1%, cela fait varier la tension de sortie, ce qui entraîne une erreur de mesure.

Le traitement de signal peut aussi contribuer à générer des erreurs, ce qui peut se produire si le gain d'un amplificateur de sortie n'est pas constant ou linéaire.

2.4.5 Les erreurs dues au mode d'utilisation:

Certaines erreurs sont simplement dues à une utilisation incorrecte d'un capteur. Par exemple, si on utilise un capteur pas assez rapide dans un cas où le mesurand évolue de façon rapide. Il est très important de suivre les directives du fabricant pour le montage et l'installation d'un capteur pour s'assurer que ce dernier mesure correctement.

2.5 Incertitudes de mesure dans les capteurs

Les erreurs d'incertitude sont des erreurs de nature non-déterministes dues à des causes accidentelles que l'opérateur ne peut corriger. Elles sont appelées parfois «erreurs aléatoires» et elles ont les propriétés suivantes:

- Pour une erreur d'une amplitude de valeur absolue donnée, la probabilité que l'erreur soit positive est égale à celle que l'erreur soit négative;
- La probabilité que l'erreur due à une incertitude se produise est inversement proportionnelle à son amplitude;
- Pour un nombre élevé de mesure d'une grandeur physique donnée, la moyenne des erreurs approche de 0;
- Pour une méthode de mesure donnée, les erreurs dues aux incertitudes de mesures ne doivent pas excéder une valeur donnée. Toute mesure ayant une erreur excédant cette valeur doit être répétée, et si nécessaire analysée séparément.[12]

2.5.1 Erreurs liées aux indéterminations intrinsèques d'un capteur

Certaines erreurs aléatoires sont liées à la non - connaissance de caractéristiques de capteurs. Ainsi, pour certains capteurs, on ne connaît pas de façon précise des paramètres comme la résolution, réversibilité, hystérésis, ... Par exemple, lorsque l'on

achète un potentiomètre, on ne se pose pas de questions sur la résolution de ce capteur. Pourtant, cette résolution peut générer une erreur de mesure de nature aléatoire, car le passage du curseur d'une bobine de fil à l'autre fait augmenter (ou diminuer) la résistance d'une valeur ΔR qui n'est pas nécessairement constante d'un bout à l'autre du potentiomètre.

Le même genre d'indétermination se pose chez les capteurs utilisant des principes basés sur les champs magnétiques et qui sont susceptibles à être le siège de phénomènes d'hystérésis. [12]

2.5.2 Erreurs dues à des signaux parasites de caractère aléatoire

Le bruit électrique, si nuisible à la qualité des mesures, est la source principale des signaux parasites. Ces signaux sont dus généralement à des phénomènes d'induction, ce qui fait que l'on recommande de blinder les conducteurs transportant les signaux de mesure.

En effet, lorsqu'un capteur envoie un signal de mesure à un automate (ou tout autre appareil), un conducteur transporte le signal de mesure, tandis qu'un autre assure que les deux éléments aient la même masse. Les deux conducteurs forment donc une boucle qui est en mesure de pouvoir détecter des ondes électromagnétiques, comme une antenne. Une tension parasite apparaît, affectant la qualité du signal transmis.

2.5.3 Erreurs de mesure dues aux grandeurs d'influence non-contrôlées

Les grandeurs d'influence non-contrôlées sont souvent sources d'erreur, car le corps d'épreuve d'un capteur est généralement sensible à plus d'une grandeur physique. Par exemple, plusieurs capteurs sont sensibles à la température. Ainsi, une jauge de contrainte, dont le but premier est de mesurer une déformation, peut donner un signal qui varie en fonction de la déformation (bien sûr!), mais aussi avec la température. Ainsi pour un changement du signal de sortie peut provenir aussi bien d'une déformation que d'une température, et il n'y a aucun moyen pour trouver laquelle des deux grandeurs physiques a changé.

Il faut donc prévoir l'utilisation de circuits de compensation pour réduire cette erreur. Le circuit de compensation génère un signal qui a pour but d'annuler l'effet produit par la grandeur d'influence non contrôlée.

La stabilisation de la grandeur d'influence peut aussi réduire les erreurs de mesures. Par exemple, si le capteur est dans un environnement où la température est maintenue constante, il n'y aura aucune erreur due au changement de température puisque celle-ci est constante. Donc en stabilisant la grandeur d'influence, on en réduit grandement les effets. Ces deux solutions peuvent ne pas être faisables, ce qui fait en sorte qu'il faut vivre avec cette source d'erreur aléatoire. Il peut être bon de calculer l'erreur induite par la grandeur physique non-contrôlée pour évaluer l'erreur pouvant entacher la qualité de la mesure. [12]

2.6. Capteur de pression

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.

Depuis le début des années 80, Une demande de plus en plus forte s'est fait ressentir dans des domaines bien plus variés comme la robotique, le génie biologique et médical, l'environnement (notamment dans la métrologie et météorologie), la domotique et surtout l'automobile qui représente le secteur qui tire le marché des capteurs grâce à son grand volume de production. [13]

2.6.1 Définition d'un capteur de pression

La pression, comme chacun sait, 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 variable est réalisée à l'aide d'un capteur de pression, dispositif capable d'associer à la grandeur mesurée, un signal électrique reconnaissable appelé repense.

Nous définirons tout le long de ce mémoire, 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 convertisseur ». La partie détection est quant à elle constituée d'un « corps

d'épreuve » et un « transducteur » qui transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, la plupart du temps électrique. Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la figure 18.

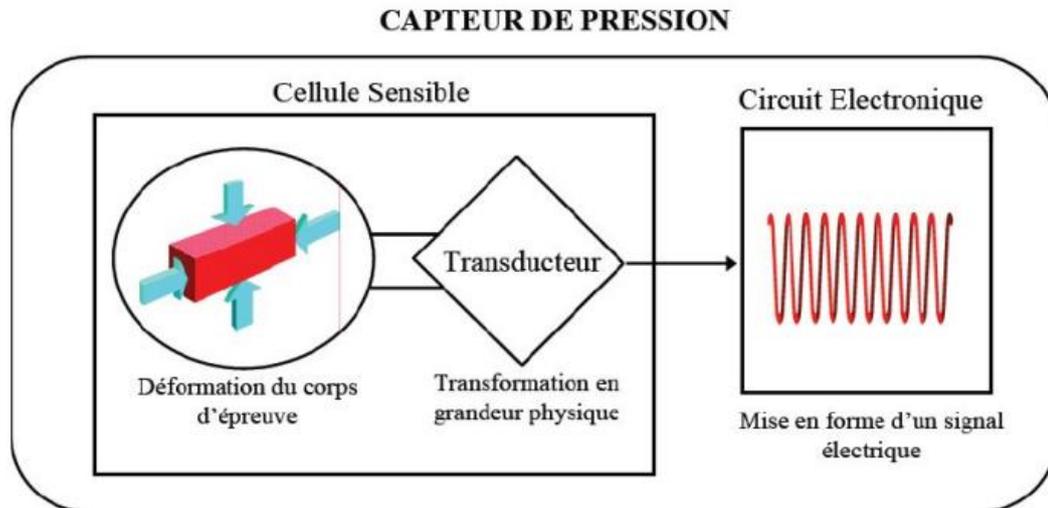


Figure18 : Synoptique d'un capteur de pression [14]

Les capteurs de pression connaissent, depuis les années 80 un essor de plus en plus important cet essor s'est surtout ressenti depuis le développement des capteurs miniatures sur silicium. C'est –à-dire depuis l'utilisation des technique issue de la micro-électronique.

De nous jours, la majeure partie des nouvelles cellules sensibles disponibles sur le marché, est basé sur le principe de détection de types *piézorésistif*. Cela signifie que la détection de la pression se fait la mesure d'une variation de résistance.

L'évolution des jauges métalliques déposées vers celle en poly silicium ou encore en silicium dopé, directement implanté dans le corps d'épreuve, a permis a ces composants d'atteindre de très bonnes performances et donc de monopoliser le marché [15].

En dépit de leur avantage (bonne précision, faible non linéarité, électronique associée simple et pas nécessairement à proximité), ces composants sont extrêmement sensibles a la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire.

Un autre type de capteur est basé sur la détection *capacitive* dont les avantages potentiels sont une grande sensibilité a la pression et une faible sensibilité a la température [14].

Le principe de détection de ces structures capacitives est basé sur la variation d'une capacité qui peut être aussi bien liée à celle de la surface des électrodes en regard qu'à celle de la distance entre les électrodes (le plus courant), ou encore celle de la permittivité » du diélectrique[16] . La figure 3 représente les deux types de capteur.

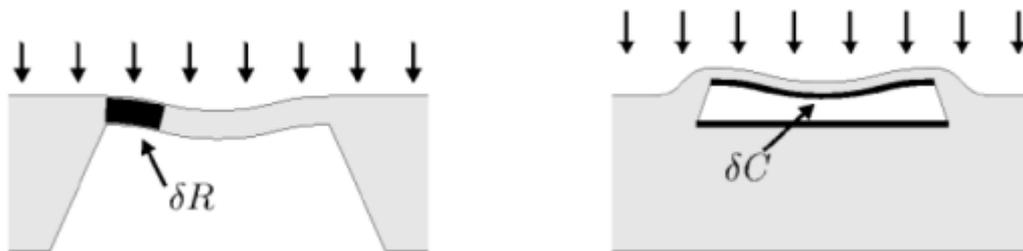


Figure19 : (droite) capteur de pression piézo-resistif, a(gauche) capteur
De pressions capacitif [17]

2.6.2 Jauge extensomètre (ou de contrainte)

La déformation peut être mesurée grâce à des jauges extensomètres, appelées aussi jauges de contrainte.

Le principe de fonctionnement de la jauge de contrainte repose sur le changement de résistance que subit un conducteur électrique soumis à une déformation.

Un conducteur électrique de résistivité ρ (en Ohm m), d'une longueur L (en mètre) et d'une section A (en m^2) possède une résistance électrique définie par :

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.7)$$

La résistance électrique subira des changements lorsque le conducteur électrique est soumis à une contrainte entraînant sa déformation.

Lorsque le conducteur se déforme d'une longueur ΔL . D'autre part, l'allongement du conducteur d'une longueur ΔL résulte d'une contrainte qui a comme effet de réduire la section du conducteur. C'est un phénomène bien connu en résistance des matériaux,

lorsqu'une barre subit une force de traction, elle s'allonge et en vertu de la loi de Poisson, sa section diminue. Comme un élastique que l'on étire.

Le rapport entre l'allongement unitaire et le changement de surface est défini par la loi de Poisson :

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

Le paramètre ν est le coefficient de Poisson.

Un autre effet du à l'allongement unitaire $\Delta L/L$, c'est l'effet piézoélectrique. Cet effet est provoqué par le changement de la mobilité des électrons dans le conducteur, car la contrainte affecte la structure du conducteur. Cela entraîne aussi un changement de la résistivité du conducteur. On exprime cet effet par la relation suivante :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} \quad (2.9)$$

ou C est la constante de Bridgman. Comme le volume V du conducteur est égal au produit de la section A par la longueur L , la relation devient alors :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C(1 - 2\nu) \frac{\Delta L}{L} \quad (2.10)$$

La combinaison de tous ces effets causés par une contrainte dans un conducteur se résume :

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu + C(1 - 2\nu)) \frac{\Delta L}{L} \quad (2.11)$$

Le terme $(1 + 2\nu + C(1 - 2\nu))$ dépend du conducteur électrique utilisé et il désigné sous le vocable « facteur de jauge ». Le facteur de jauge est ainsi définit par :

$$G = 1 + 2\nu + C(1 - 2\nu) \quad (2.12)$$

ce qui mène à réécrire l'équation (II.6.5) comme suit :

$$\frac{\Delta R}{R} = G \frac{\Delta L}{L} \quad (2.13)$$

Divers matériaux peuvent être utilisés dans les jauges extensiométriques. Les conducteurs ont généralement des facteurs de jauge de l'ordre de 1,8 à 2,4. Les semi – conducteurs ont des facteurs de jauge plus élevés, de l'ordre de 50 à 200. Les jauges à semi – conducteurs sont donc plus sensibles [19]. Toutefois, les matériaux semi – conducteurs sont beaucoup moins ductiles que les matériaux conducteurs.

Pour donner un ordre de grandeur de la déformation admissible de ces matériaux, définissons tout d'abord le « strain ». Cette unité représente la déformation par unité de longueur, que l'on appelle aussi la déformation unitaire exprimée en mètre de déformation par mètre de longueur.

Comme les déformations des matériaux sont d'une très faible amplitude, on utilise habituellement le microstrain, ce qui correspond à une déformation unitaire de 1 micromètre par mètre de longueur du conducteur.

Les jauges de contrainte utilisant des conducteurs tolèrent des extensions maximales de 0,1 à 40000 microstrains. Ceux utilisant des semi- conducteurs tolèrent des extensions maximales de 0,001 à 0,003 microstrain.[19]

Les spécifications de manufacturiers pour les jauges de contrainte pour la sélection d'une jauge sont donc :

- Le facteur de jauge.
- La déformation maximale acceptable.
- La durée de vie utile.
- La résistance de la jauge au repos.

La jauge de contrainte possède une valeur de résistance au repos. La résistance change avec l'allongement du conducteur du à la contrainte que la jauge subit. Supposons une jauge de contrainte métallique avec un facteur de jauge $G = 2,4$ et une déformation unitaire maximale de 40000 micro-strains. Le changement maximal de résistance lorsque la jauge est en traction st donc obtenu par :

$$\Delta R/R = G \Delta L/L = 2.4 \times 40000 \times 10^{-6} = 0.096$$

Ce qui implique un changement de résistance de 9.6% au maximum. En répétant cet exercice avec une jauge de contrainte à semi – conducteur, avec :

$G = 200$ et $\Delta L/L = 0.003 \times 10^{-6}$, on trouve un changement maximal de résistance de $0,6 \times 10^{-4}\%$.

Ces faibles variations de résistance électrique mènent à la question suivante : comment les mesurer ? Un pont de Wheatstone permet de mesurer ces variations de résistance de jauge. [19]

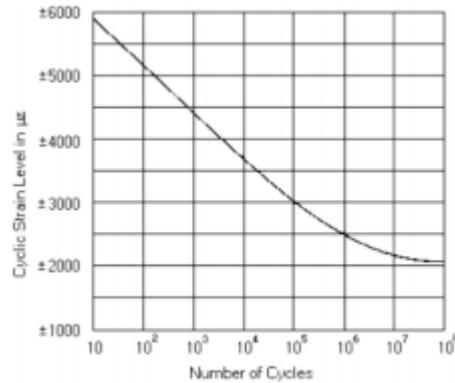


Figure 20: Courbe de la durée de vie en fonction de la déformation unitaire

2.6.3 Corps d'épreuves

La jauge peut être collée sur divers corps d'épreuve. Si ce corps d'épreuve est une lame en traction ou en compression (Figure II-6-2), la jauge peut être placée comme montrée en Figure II-6-2. Elle est orientée dans le sens de la longueur.

La déformation unitaire de cette jauge est [19] :

$$\varepsilon = \frac{F}{Eae} \quad (2.14)$$

F est la force appliquée, E le module de Young du matériau constituant la lame en traction et e, a sont les dimensions de la lame (donc la longueur peut être quelconque). Si la jauge était orientée dans le sens de la largeur, il faudrait prendre en compte la loi de Poisson et la déformation unitaire est :

$$\varepsilon = \frac{-\nu F}{Eae} \quad (2.15)$$

ν est le coefficient de Poisson.

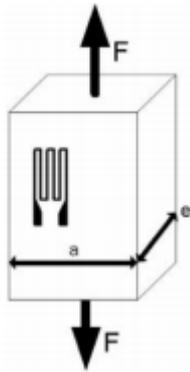


Figure21: Lame en traction [19]

Chapitre 3 Etude de capteur capacitif et capteur

piézorésistif

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous étudions le comportement mécanique d'une membrane fine au silicium, parfaitement encastrée aux bords, de formes, rectangulaire carrée, et circulaire, soumise à une pression uniforme et constante, dans le cas des faibles déformations. Et nous étudions le capteur de pression capacitif qui est composé de la micro membrane au silicium, constituant l'armature mobile et d'un substrat isolant en verre (pyrex) représentant l'électrode fixe. Les deux armatures sont collées par soudure anodique créant une cavité entre eux. Nous analysons la réponse du capteur et sa sensibilité à la pression en fonction de la pression appliquée.

3.2 Etude de comportement mécanique de la membrane :

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.

Nous utilisons les expressions de la déformation $w(x, y)$ obtenues par la résolution de l'équation de Lagrange qui régissent le comportement mécanique d'une membrane carré et circulaire.

3.2.1 Déflexion de la membrane carrée:

La figure 2.2 représente une membrane de forme rectangulaire. C'est une micro structure orientée selon le plan cristallographique (110), collée sur un substrat

d'orientation cristallographique (100) [7]. Ces dimensions sont : - la longueur a suivant l'axe ox . - la largeur b suivant l'axe oy . - la hauteur h suivant l'axe oz . Avec $h \ll a$ et $h \ll b$ (hypothèses des plaques minces).

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 [19]

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha_{si} \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (3.1)$$

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

P La pression uniforme appliquée.

Avec α_{si} le coefficient d'anisotropie et D le coefficient de rigidité du silicium

$$\alpha_{si} = \nu + \frac{2G}{E} (1 - \nu^2) \quad (3.2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3.3)$$

Où ν est le coefficient de Poisson, E le module de Young et G le module de Coulomb.

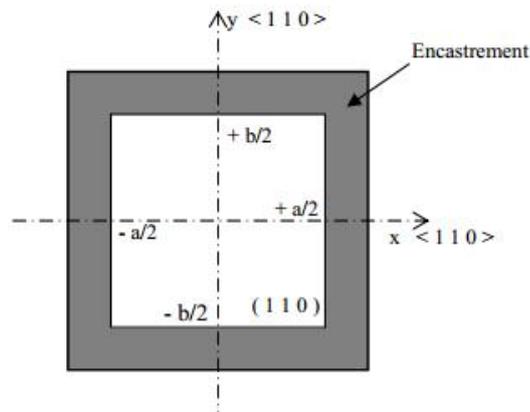


Figure 22 : membrane carrée

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

$$\begin{aligned}
w(x = \pm a, \forall y) &= 0 \\
w(\forall x, y = \pm b) &= 0 \\
\frac{\partial w}{\partial x}(x = \pm a, \forall y) &= 0 \\
\frac{\partial w}{\partial x}(\forall x, y = \pm b) &= 0
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Les solutions approchées proposées dans la littérature sont :

Solution polynomiale proposée [19]

En se basant sur les travaux déjà effectués qui utilisent la fonction polynomiale bidimensionnelle suivante:

$$w(x, y) = \frac{w_{00}}{16} \left(1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2\right)^2 \left(1 - \left(\frac{y}{b}\right)^2\right)^2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} \left(\frac{x}{a}\right)^i \left(\frac{y}{b}\right)^j \tag{3.5}$$

Avec i, j des nombres entiers pairs.

Solution trigonométrique proposée [19]

$$w(x, y) = \frac{w_{00}}{4} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} \left[\cos^2 \left(\frac{(2i+1)\pi x}{2a} \right) \right] * \left[\cos^2 \left(\frac{(2j+1)\pi y}{2b} \right) \right] \tag{3.6}$$

i, j sont des nombres entiers pairs variant de 0 à 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 [2] | 0.0220 | 1 | 0.2140 | 0.2700 | 0.0980 | -0.0062 | -0.103 |
| Trigonométrique [7] | 0.0224 | 1 | 0.0284 | 0.0123 | 0.0030 | 0.0038 | 0.0016 |

Tableau 2.3 : Valeurs des coefficients réduits k_{ij} pour $n=3$ [19]

Avec

w_{00} est la déflexion maximale au centre ($x=0, y=0$) de la membrane carrée ou rectangulaire qui est donnée par l'expression suivante

$$w_{00} = k \frac{a^2 b^2 P}{16D} \quad (3.7)$$

a. Les résultats sous matlab

A partir des expressions (3.5) et (3.6) nous traçons les courbes de variations de la déflexion $w(x, y)$. Pour une raison de commodité, nous utilisons l'expression (3.7) normalisée par rapport aux dimensions de la membrane.

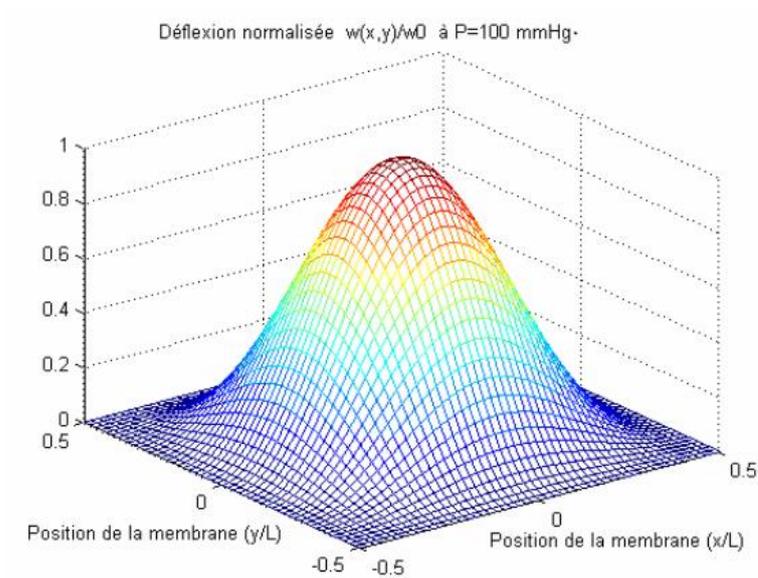


Figure 23 : Déflexion normalisée de la membrane $w(x, y)/w_{00}$ à 100 mmHg dans le cas petites déformations.

On a représenté sous matlab W_{00} la déflexion maximale au centre de la membrane en fonction de la pression (P) appliqué et en fonction de la longueur (A) de la membrane carrée

$$w_{00} = k \frac{a^2 b^2 P}{16D} \quad (3.7)$$

$$P = 4.10^4 \text{ pa}$$

$$a = 1800 \mu\text{m}$$

$$b = 1800 \mu\text{m}$$

$$k = 0.0220$$

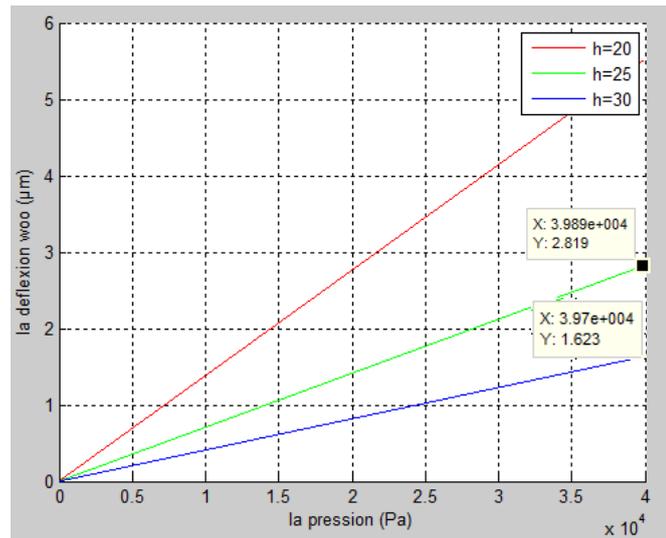
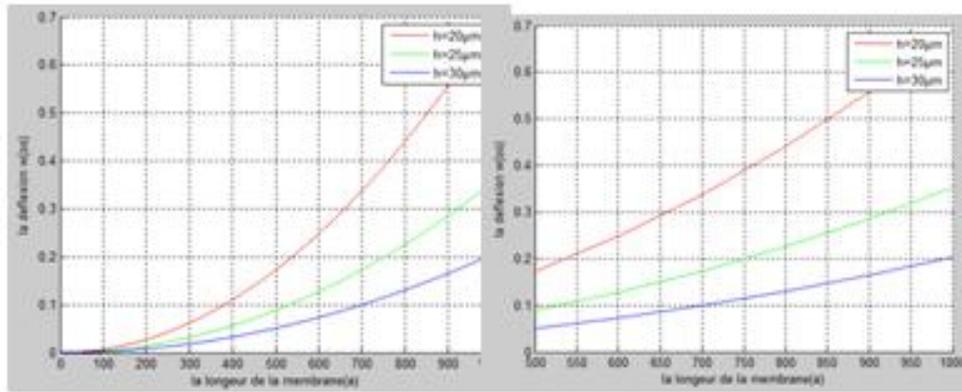


Figure24 : variation de $W_{00}(p)$ pour différentes épaisseur de la membrane $h_1=30\mu\text{m}, h_2=25\mu\text{m}, h_3=20\mu\text{m}$

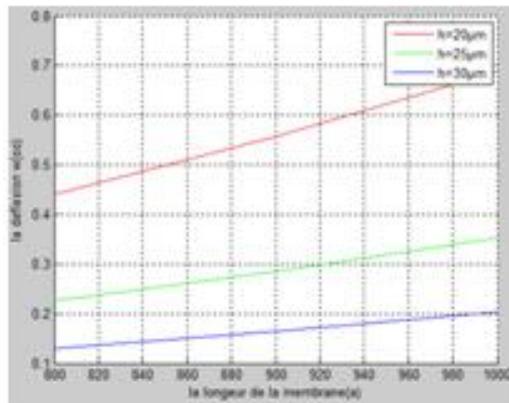
La figure 25 est la déflexion W_{00} par rapport a la longueur a pour $h_1= 20\mu\text{m}$, $h_2=25\mu\text{m}$, $h_3=30\mu\text{m}$,

- la courbe est plus linéaire lorsque la longueur a est proche de la largeur b .
- lorsque $a=b$ la membrane est carrée , donc on a une bonne déflexion de la membrane



a- Pour $a = 0,5b$

b- Pour $a = \frac{a}{2}b$



c- Pour $a = \frac{4}{5}b$

Figure 25: déflexion W_{00} en fonction de la longueur a pour différentes épaisseurs h

Lorsqu'on applique une pression p la déflexion augmente au centre de la membrane et cette déflexion est grande pour les petites épaisseurs h

- Nous avons repris le même travail, en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysique

b. les résultats sous COMSOL

La clé d'une bonne analyse réside dans la définition de la structure à étudier, sa géométrie, la finesse du maillage, et sur la définition des conditions aux frontières. Cette méthode est certainement la plus simple et la plus conviviale

• Géométrie du modèle

Quel que soit le modèle analytique ou d'élément finis, certaines simplifications sont inévitables afin d'obtenir respectivement des expressions mathématiques exploitables et une description simplifiée de la géométrie de la microstructure permettant d'effectuer des simulations dans un laps de temps raisonnable. La géométrie du modèle que nous proposons possède deux axes de symétrie (fig. 26). Elle est assimilée à un solide en silicium, de forme carrée. Ces dimensions sont : $1800\mu\text{m} \times 1800\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$, correspondant aux dimensions des membranes réalisées en salle blanche. De plus, pour la simplification des calculs, la modélisation des jauges piézorésistives n'a pas été prise en compte. [10]

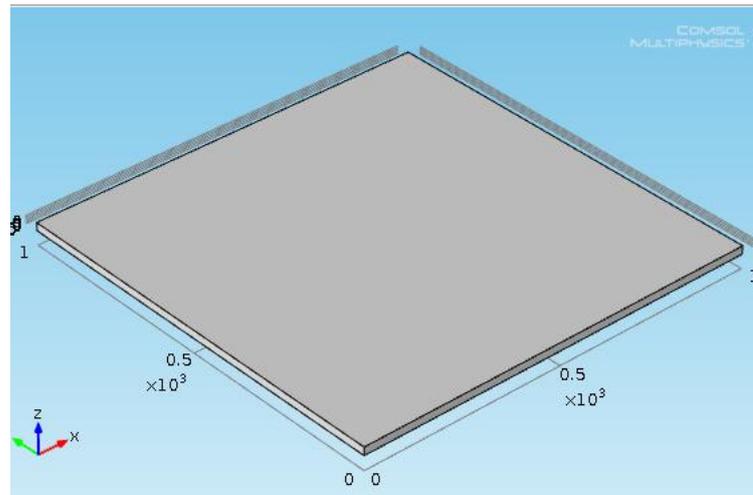


Figure 26 : Géométrie du modèle étudié.

•Condition aux frontières et chargement de la structure

Dans le cas idéal, les conditions aux frontières imposées doivent reproduire l'environnement où se trouve la structure durant son fonctionnement. La membrane a ses déformations et ses déplacements bloqués aux points d'ancrage (bords de couleur rouge) comme le montre la figure.27. Par ailleurs, elle est libre de se déplacer verticalement. [10]

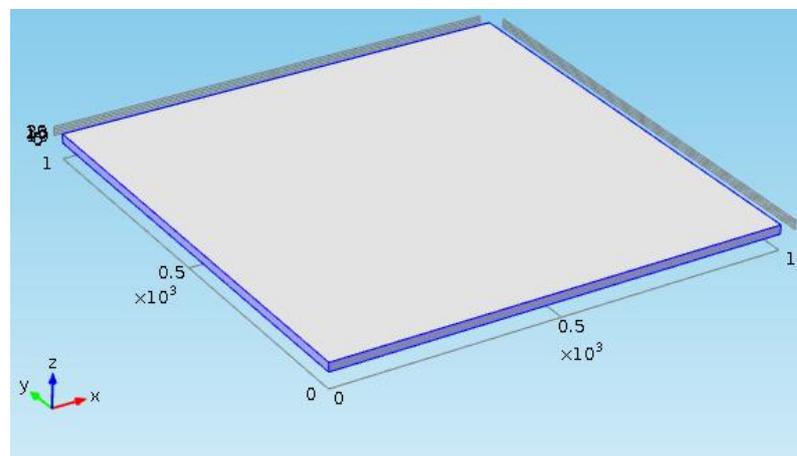


Figure 27 : Conditions aux frontières.

•Maillage de la membrane

L'optimisation du maillage est essentielle afin d'assurer la meilleure précision de calcul qui permet d'avoir une bonne qualité des résultats. Cette structure peut se présenter par une géométrie discrète, où les paramètres sont exprimés pour chaque nœud du maillage (le nombre total de degrés de liberté est égal au nombre de nœuds multiplié par le nombre de degrés de liberté par nœud). Nous cherchons donc à déterminer un maillage (le nombre d'éléments) suffisant dans les trois dimensions et offrant un temps de calcul acceptable. Concernant la discrétisation des structures, le logiciel Comsol offre neuf possibilités de choix de maillage prédéfinies: extrêmement grossier, ..., grossier, normal, fin, plus fin, encore plus fin. Par ailleurs, il faut prendre en considération la taille de l'élément de base, dont le facteur d'échelle dans la direction Z ne doit pas dépasser l'épaisseur de la membrane.[10]

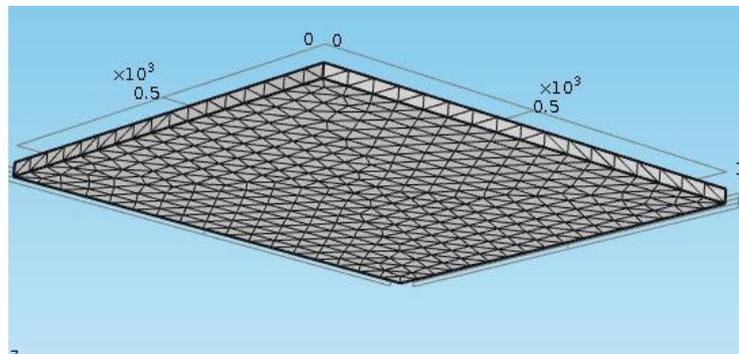


Figure 28: membrane carrée décomposé en éléments finit pour calculer la déformation après l'application de la pression

La pression appliqué engendre une déflexion de la membrane, le logiciel comsol multi-physique nous a permet de représenté la déformation et mesuré la valeur de déflexion pour différentes épaisseur de la membrane (h) avec :

la longueur du côté $1800\mu m$

Epaisseur de la membrane (h) : $h1= 30\mu m, h2=25\mu m, h3=20\mu m$

Module de Young (E) : $130GPa$

Coefficient de Poisson $\nu=0.28$

Domain stationnaire

Membrane déformé avec différent h (épaisseur de la membrane)

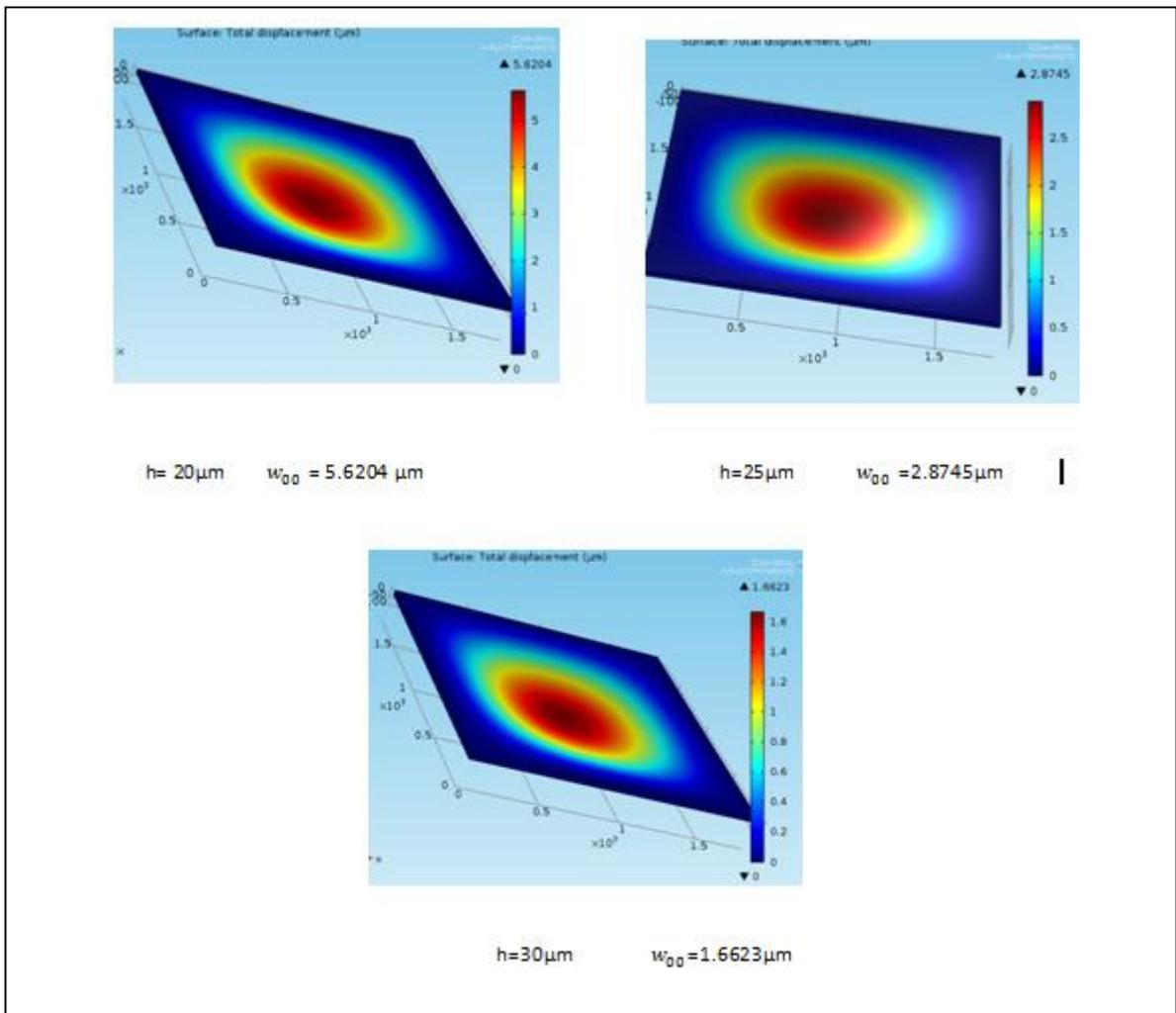


Figure 29: Comportement mécanique de la membrane carrée

D'après les résultats obtenus nous avons constaté que lorsque l'épaisseur de la membrane (h) est petite la déflexion est grande

Les résultats obtenue de Comsol est identique avec la représentation de l'équation de la déflexion sous matlab

Domain fréquentielle

La structure membranaire carrée nous montre que les paramètres pris en compte sont suffisants pour étudier les vibrations d'une membrane suspendue. Après une étude de convergence en fonction de la qualité du maillage, nous avons obtenu les six premiers modes (figure 30), il ne reste donc qu'à observer les formes des différents modes et leurs fréquences associées.

Pour $h=20 \mu\text{m}$ et $p=4.10^4 \text{ pa}$

$E=130.10^9$

$V=0.28$

$A=1800\mu\text{m}$

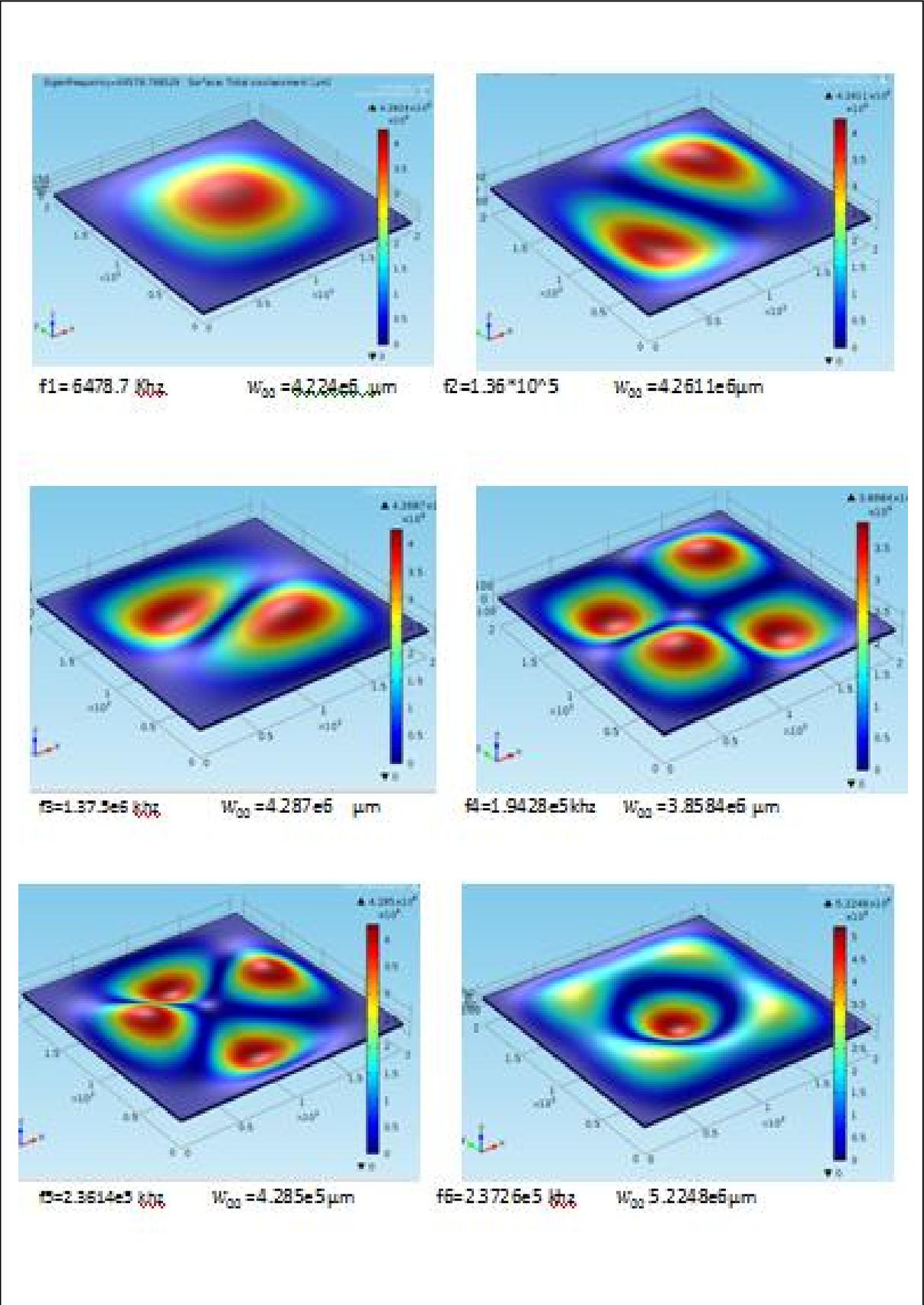


Figure 30 : fréquences et modes propres de la membrane carrée
 Dans le Domaine fréquentiel

3.2.2. Déflexion de la membrane circulaire

Le corps d'épreuve est l'élément qui est soumis à l'action du mesurant et se transforme en une autre grandeur non électrique à laquelle le capteur est sensible. Les grandeurs mécaniques (pression, force, ...) sont appliquées à un corps élastique (membrane) qu'elles vont déformer. Les capteurs vont mesurer les faibles déplacements qui résultent de ces déformations.

a. présentation des résultats sous matlab

La déflexion
$$w(r) = \frac{12p(1-\nu^2)R^4}{64Eh^3} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)^2 \quad (3.8)$$

Où :

E le module de Young

h l'épaisseur de la membrane

R, rayon de la membrane

ν le coefficient de Poisson,

la figure suivante montre la déflexion de la membrane pour la Structure cylindrique en fonction de (r) pour différentes h avec $P=4.10^4\text{Pa}$:

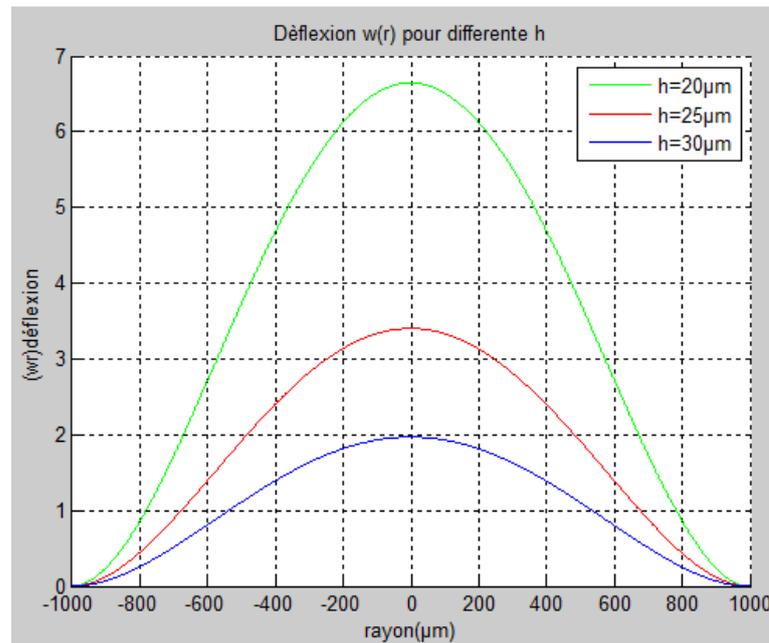


Figure 31: Déflexion w(r) fonction de rayon r pour différente empeseur de la membrane

La figure suivante montre la déflexion de la membrane pour la Structure cylindrique en fonction de (p) pour différentes h avec $P=4.10^4\text{Pa}$:

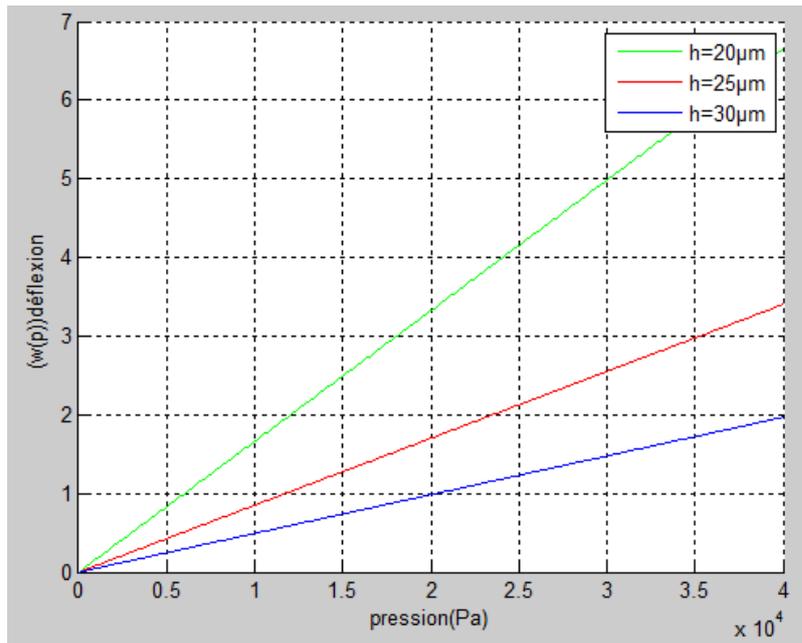


Figure 32: déflexion de la membrane en fonction de P avec h différentes

d'après la figure 32 'lorsque l'épaisseur h de la membrane est petite, la déflexion w_{00} augmente pour $p= 4.10^4$ Pa ,

b. présentation des résultats sous comsol

ou on a modéliser la membrane sous comsol qui nous a donné les résultat suivantes :

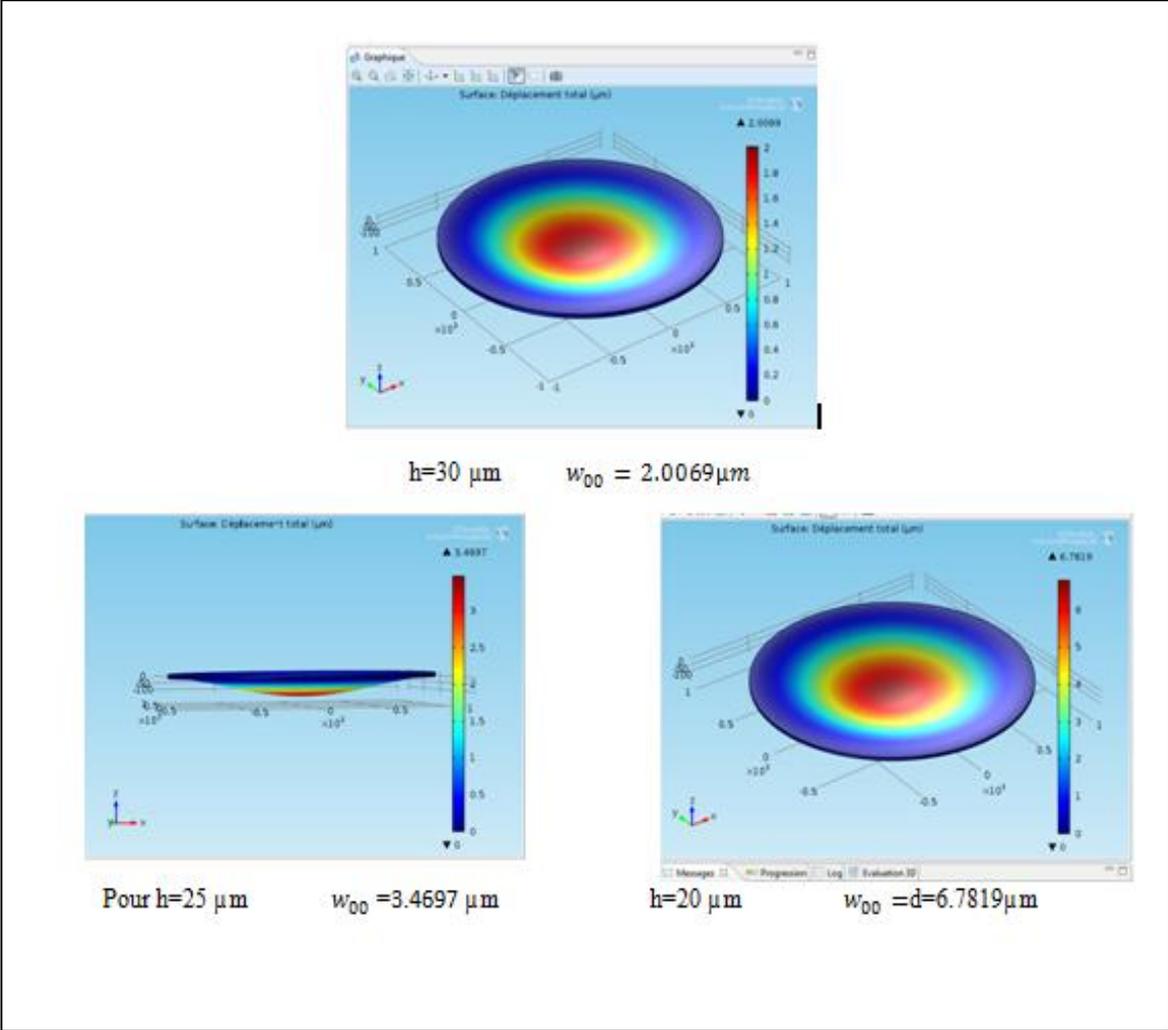


Figure 33 : Comportement mécanique de la membrane circulaire

Domaine fréquentiel

Pour $h=20\mu\text{m}$

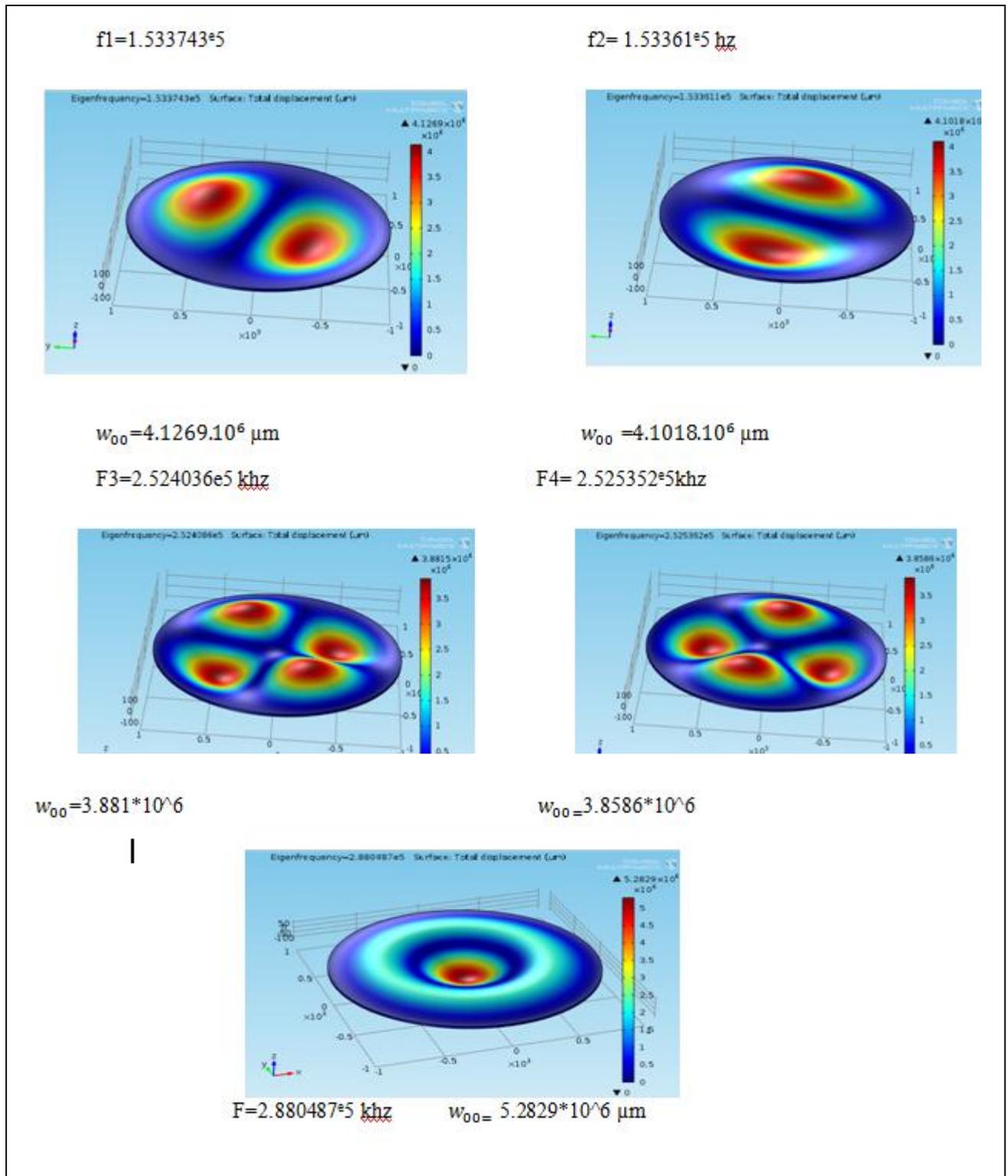


Figure 34 : le comportement mécanique de la membrane circulaire

Dans le Domain fréquentiel

nous avons étudié la déflexion statique d'une membrane fine au silicium de forme circulaire et carrés d'un micro-capteur de pression capacitive, soumise à une pression uniforme et constante en utilisant Matlab . Il s'agit d'analyser la réponse en pression de la capacité sur un intervalle de pression de 0 à 40 kPa (0-300 mmHg) . Pour valider nos résultats nous avons effectué la simulation de notre structure à l'aide du logiciel COMSOL Multi-physique. Pour les deux moyens de simulation nous avons obtenue exactement les mêmes résultats, sauf que Matlab présente un meilleur moyen de comparaison et que Comsol peut donner les résultats sous études théorique

3.3 Etude d'un Capteur de pression capacitif

3.3.1. Principe de fonctionnement

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 [20].

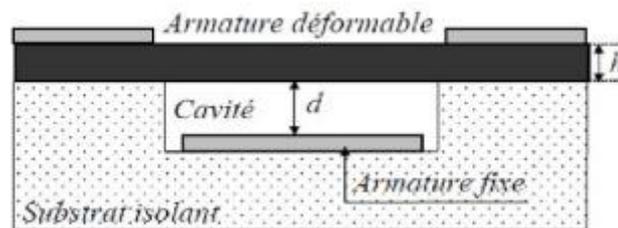


Figure 35 : Capteur de pression capacitif au repos[20]

Allons la caractéristique de transfert d'un micro-capteur de pression figure 35.

La membrane fine au silicium figure I constitue l'armature mobile, tandis que l'armature fixe est la couche métallique déposée sur le substrat en Pyrex. Les deux électrodes, fabriquées séparément, ont été collées par soudure anodique. La pression appliquée P engendre une variation de la déflexion $w(x, y)$ qui à son tour fait croître la capacité $C(P)$.

La valeur de la capacité en l'absence de pression appliquée (capacité au repos) $C(0)$ est donnée par [14]

$$C(0) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (3.9)$$

Où : ϵ_0 représente la permittivité électrique du vide et ϵ_r la permittivité de l'air et qui égale à 1. A l'aire de la surface des électrodes en regard c'est-à-dire l'aire de l'armature fixe, d la distance entre les armatures.

A l'équilibre la capacité $C(P)$ est exprimée par :

$$C(0) = \epsilon_0 \epsilon_r \iint_A \frac{\partial A}{d - w(x,y)} \quad (3.10)$$

Après l'application d'une pression la capacité $C(P)$ est exprimée par :

$$C(P) \approx C(0) \left[1 + \frac{1 - \nu^2}{16E} \frac{R^4 P}{h^3 d} \right] \quad (3.11)$$

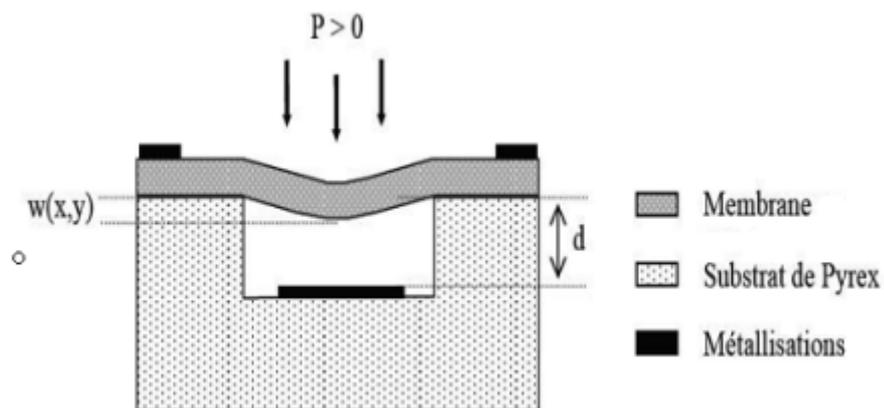


Figure36 : Capteur en fonctionnement [14]

3.3.2 les résultats sous matlab

Lorsque la pression extérieure augmente, la distance inter-armatures diminue, et par suite, la capacité augmente, la figure 38 représente le graphe de variation de la capacité en fonction de la pression appliqué pour différente (d) distance inter électrodes

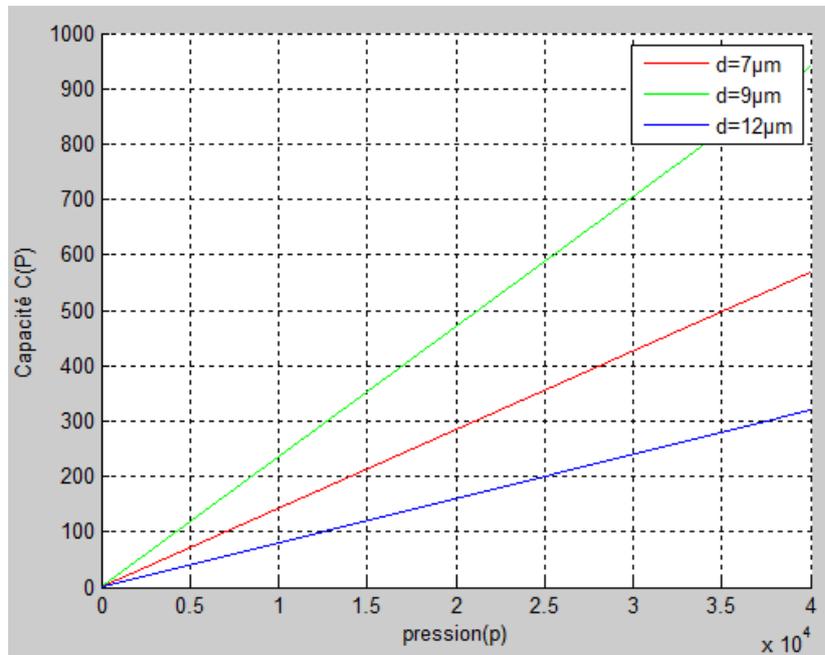


Figure 37 : variation de la capacité(pF) en fonction de la pression (Pa)

3.4. études du capteur de pression piézorésistif

3.4.1 Introduction :

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 dans le marché. Grâce au développement des micros technologies, une nouvelle famille de capteurs de pression piézorésistif miniatures s'est ainsi progressivement imposée pour de nombreuses applications.

Même si le principe de fonctionnement des capteurs de pression piézorésistif en silicium reste le même depuis de nombreuses années, l'optimisation des capteurs pour une application donnée reste toujours une étape coûteuse [21].

. La piézorésistivité

La piézorésistivité se manifeste par un changement de la conductivité électrique d'un corps lorsque celui-ci est soumis à des contraintes mécaniques et donc à des déformations cette propriété physique fut découverte par Sir lord Kelvin en 1956 dans le cas de métaux, dans le cas des semi conducteurs l'effet est cent fois plus prononcé que pour les métaux permettant l'exploitation de ce phénomène physique dans le domaine des facteurs intégrés [22].

La piézorésistivité se traduit par un changement physique du volume du matériau dû à des contraintes mécaniques.

- **Un choix judicieux des matériaux :**

La qualité d'un capteur à jauges de contraintes passe tout d'abord par un choix de matériaux adaptés pour le corps d'épreuve, le support isolant et la jauge elle-même [23].

La tendance naturelle consiste à choisir des matériaux se prêtant à des déformations importantes, afin d'obtenir des signaux de grande amplitude. Il faut alors éviter d'aller aux limites d'élasticité des matériaux afin de s'affranchir des risques des déformations permanentes voire de ruptures.

Il existe deux types de jauges de contraintes : les jauges piézorésistives (ou à semi-conducteurs) et les jauges métalliques [24].

3.4.2 La jauge

Différents critères doivent être pris en compte, parmi lesquels le facteur de jauge. La résistance à la fatigue, l'aptitude au soudage et la tenue en température. Les principaux matériaux pouvant servir dans la réalisation de capteurs à jauges de contraintes se distinguent par leur comportement thermique, leur résistance à la fatigue ainsi que par leurs propriétés de linéarité et d'hystérésis.

-le poly silicium ne possède pas de structure cristalline propre puisque il est formé d'un agglomérat de grains présentant chacun une direction cristallographique particulière de plus les phénomènes de conduction au niveau des joints de grains semblent apporter une grande influence sur la résistivité globale d'un conducteur formé de poly silicium, ce dernier possède une résistivité relativement élevée par rapport à celle d'un métal ($20\Omega \cdot \text{Cm}$ contre $10,6 \mu\Omega \cdot \text{Cm}$ pour le platine par exemple) [23].

-Constantan (alliage cuivre-nickel) : c'est l'alliage le plus courant. Il offre une bonne aptitude au soudage et peut être utilisé jusqu'à 200°C .

-Karma (alliage nickel-chrome) : par rapport à l'alliage précédent, le Karma présente une sensibilité plus importante pour une contrainte similaire et sur le même corps d'épreuve. Il offre aussi de meilleure performance à haute température (jusqu'à 350°C).

-Platine-tungstène 92% Pt, 8% W : ce matériau est le plus cher, mais il présente la meilleure résistance à la fatigue, la gamme de température la plus large et un facteur de jauge élevé de 4,6. Il reste cependant employé pour des applications très spécifiques.

a. Facteur de jauge

Alors que les coefficients piézorésistifs longitudinaux expriment la variation de résistivité électrique en fonction des contraintes mécaniques les facteurs de jauge l'expriment en fonction des déformations du conducteur en tenant compte des considérations géométriques. La définition des facteurs de jauge s'appuie sur l'expression fondamentale donnant la résistance électrique R d'un conducteur en fonction de la géométrie et de sa résistivité comme le montre la figure 38.

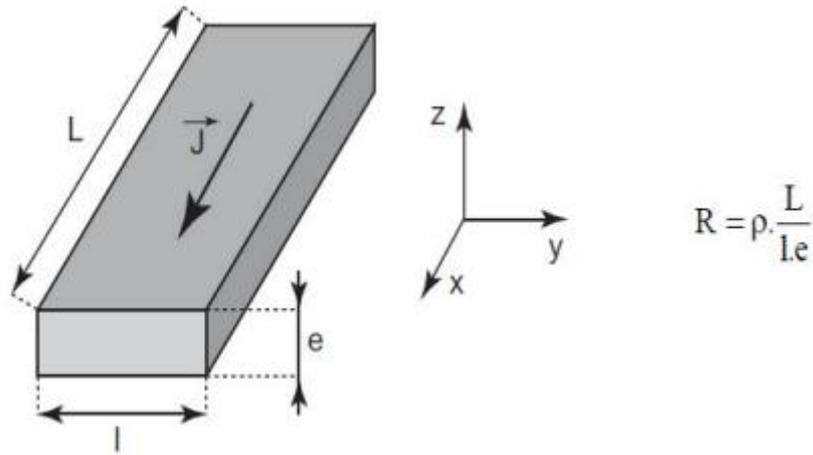


Figure 38 : Système d'axe utilisé pour le calcul de la résistance électrique des jauges de contraintes [26]

(R) Résistance du matériau, (ρ) sa résistivité, (L) sa longueur, (e) son épaisseur.

Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge K qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (3.12)$$

K est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques, K est proche de 2. Pour les jauges semi-conductrices, la valeur absolue de K est 50 fois plus grande. Ces dernières ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température.

b. principe de fonctionnement

Un capteur piezorésistif à membrane est un capteur composite (figure 39).

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. Des jauges piezorésistives en surface constituent le corps d'épreuve forme un conditionnement passif. La déformation de ces jauges se transforme en variation de résistance.

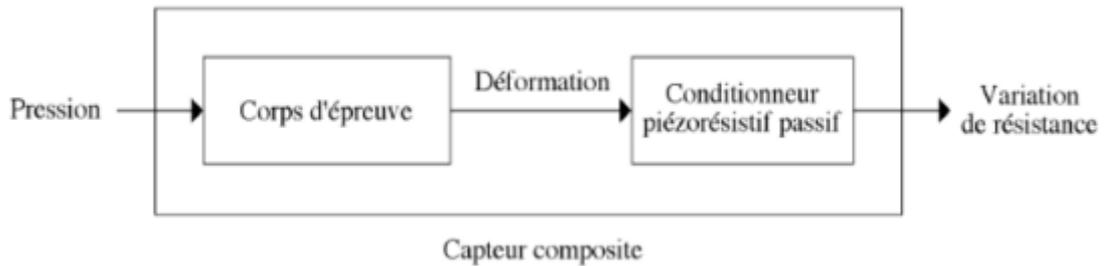


Figure 39 : structure d'un capteur de pression piézorésistif à membrane

Pour avoir une sensibilité élevée le conditionneur du capteur peut être constitué deux jauges longitudinales et deux jauges transversales disposées en bordures de membrane et interconnectées en pont de Wheatstone par des pistes d'aluminium [27], (la figure 40)

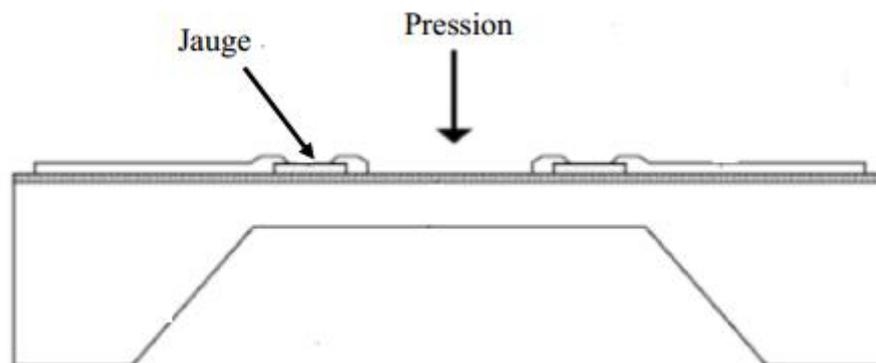


Figure 40: Schéma en coupe d'un capteur piézorésistif à membrane de type SOI [5].

Bien que les facteurs de jauge de poly silicium soient inférieurs à ceux du silicium monocristallin [5], le poly silicium représente l'avantage de pouvoir être déposé à faible coût sur différents types d'isolants par (pecvd) ou plus généralement par (lpcvd) à l'état amorphe ou cristallin.

La résistivité du silicium poly cristallin est généralement supérieure et plus fortement dépendante du dopage que celle du silicium monocristallin. Cette propriété permet de réduire la taille des jauges pour les positionner dans les zones de forte déformation du corps d'épreuve tout en gardant des valeurs de résistance élevées.

Le corps d'épreuve est réalisé par gravure chimique anisotrope localisée du silicium en règle générale les solutions de gravure anisotrope sont des solutions alcalines a haute température qui présentent la propriété d'attaquer plus vite les plans (100) du silicium que les plans . Les gravures anisotropes permettent de contrôler précisément les dimensions latérales des structures de photolithographie est utilisé comme masque.

En partant de substrats silicium orientés , cette méthode permet d'obtenir des membranes de forme géométrique simple, carré ou rectangle voir figure 41.

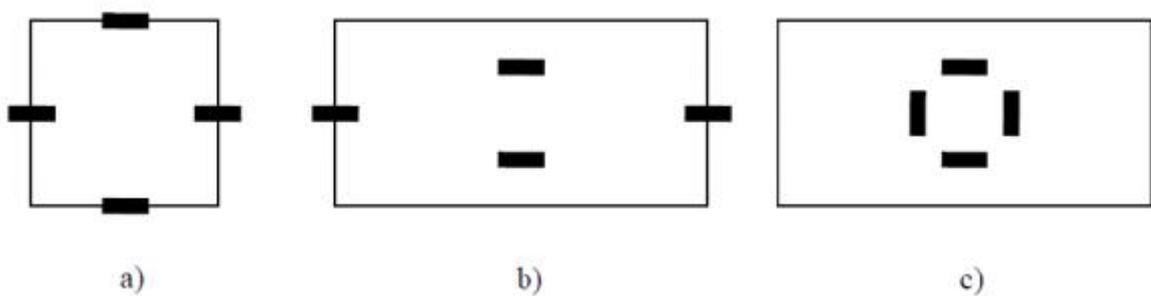


Figure 41 : différentes géométrie des membranes [28].

Positionnement de jauges piézorésistives sur le corps d'épreuve

Pour obtenir un capteur de pression sensible les jauges piézorésistives en surface du corps d'épreuve doit être disposées aux endroits ou celui-ci déforme le plus sous pression comme le montre la figure II.10. Ces zones sont situées sur les axes médians de la structure près des bords de membrane [27].

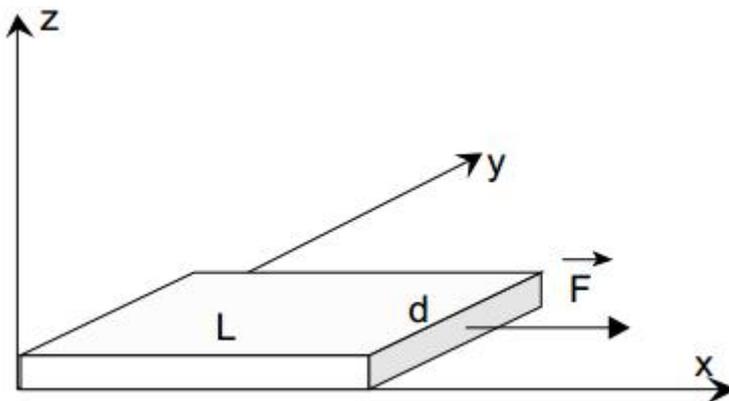
La figure schématise une membrane déformée sous l'effet d'une pression appliquée sur sa face supérieure. Une jauge longitudinale j_l est parcourue par un courant parallèle de la déformation ε_x , sa résistance augmente (facteur de jauge transversal négatif)

Une jauge transversale j_t est parcourue par un courant I perpendiculaire à la déformation ε_y sa résistance diminue (facteur de jauge transversal négatif). Pour un montage en pont de Wheatstone complet deux jauge de chaque type sont nécessaires

et doivent avoir la même valeur de résistance au repos pour que la tension de décalage du pont (offset) soit nulle.



Figure 42 :Jauge métalliques



Déformation selon x :

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta L}{L} \sigma_x = E \varepsilon_x$$

Déformation selon y :

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta d}{d} \varepsilon_x = -\nu \varepsilon_x$$

La jauge de contrainte est l'élément métallique collé sur la surface d'une pièce. Lorsque la pièce est sollicitée, elle se déforme. La jauge subit alors la même déformation que la pièce. Cette déformation modifie certaines caractéristiques physiques du matériau, notamment sa résistance.

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3.13)$$

Lorsque la déformation de la structure entraîne une déformation de la jauge, donc une variation de résistance $\Delta R/R$ fonction de $\Delta L/L$.

Pour un métal cylindrique longueur L et diamètre D :

$$R = \frac{4\rho L}{\pi D^2} dR = \frac{4L}{\pi D^2} dp + \frac{4\rho}{\pi D^2} dL - \frac{8\rho L}{\pi D^3} dD$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - 2 \frac{dD}{D} \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} + 1 - 2 \frac{dD/D}{dL/L}$$

$$v = - \frac{dD/D}{dL/L} k = \frac{dR/R}{dL/L} = 1 - 2v + \frac{d\rho/\rho}{dL/L}$$

| | |
|---|--------|
| $\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} \quad K : \text{facteur de jauge}$ | (3.14) |
|---|--------|

Relation $\Delta R/R$ et la force (pression) :

La force est relié à la contrainte par :

$$F = \sigma S$$

$$F = E \cdot s \cdot \frac{dL}{L} \quad (3.14) \quad E : \text{Module de young}$$

| | |
|--|--------|
| $F = \frac{Es}{K} * \frac{dR}{R} \quad \text{Ou} \quad \frac{dR}{R} * \frac{K}{E.s} * F$ | (3.15) |
|--|--------|

K : facteur de jauge K=2a 4 pour les métaux

K=+- 50 à +- 200 pour les semi conducteurs

S représente la sensibilité de jauge

$$S_A = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{dR/R}{\varepsilon_A} \quad (3.16)$$

$$P = F * S$$

$$F = E \cdot s \cdot \frac{dL}{L} = \frac{P}{E} \cdot L \quad (3.17)$$

C. Les résultats sous matlab :

En a représenté la variation de la déflexion par rapport a la déflexion sous matlab

La variation de la déflexion par rapport à la pression appliqué :

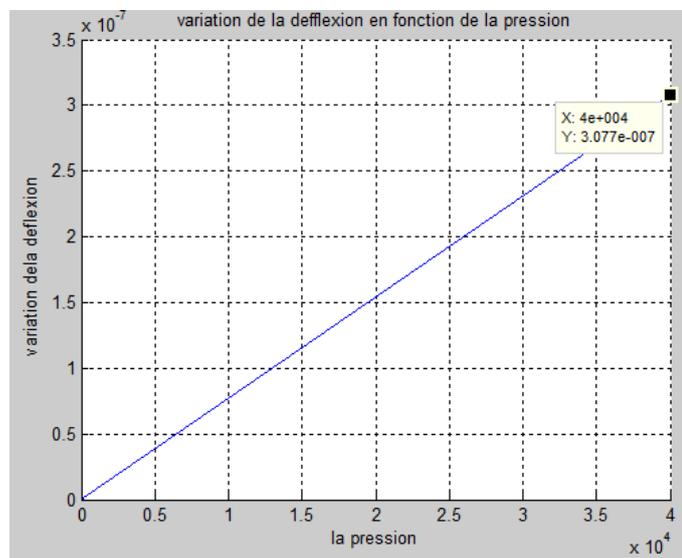


Figure 43 : variation de la déflexion(μm) par rapport à la pression appliqué(Pa)

La variation de la résistance par rapport a la déflexion résulte par la pression appliqué :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L} \quad (3.18)$$

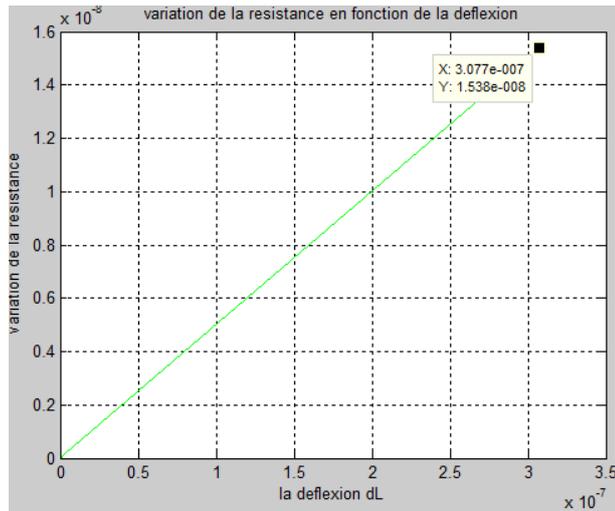


Figure 44 : variation de la résistance (hom) par rapport a la déflexion(Pa)

La variation de la résistance par rapport a la pression appliquée :

$$F = \frac{Es}{K} \cdot \frac{dR}{R} \quad P = F \cdot S$$

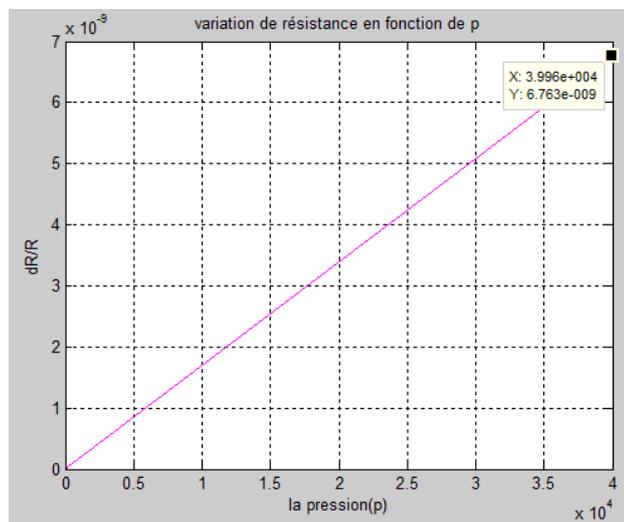


Figure 45 :variation de la résistance (hom) par rapport a la pression appliquée(Pa)

La jauge de contrainte possède une valeur de résistance au repos. La résistance change avec l'allongement du conducteur due à la contrainte que la jauge subit.

La pression appliquée sur la jauge est 4.10^4pa . D'après la figure 44 le changement maximal de la résistance est $3,96.10^{-7}\%$

Ces faibles variations de résistance électrique mènent à la question suivante : comment les mesurer? Comme les variations de résistance sont trop faibles pour être directement mesurables. Un pont de Wheatstone permet de mesurer ces variations de résistance de jauge. Généralement, la jauge au repos est de 350 Ohms ou 1200 Ohms, selon le fabricant. Les jauges de contraintes possèdent une durée de vie limitée indiquée sous forme du nombre de cycles (extension/compression) que peut subir la jauge.

3.4.3 Pont de Wheatstone

Pour détecter les faibles variations de résistances, il est nécessaire de faire appel à un montage en pont de Wheatstone.

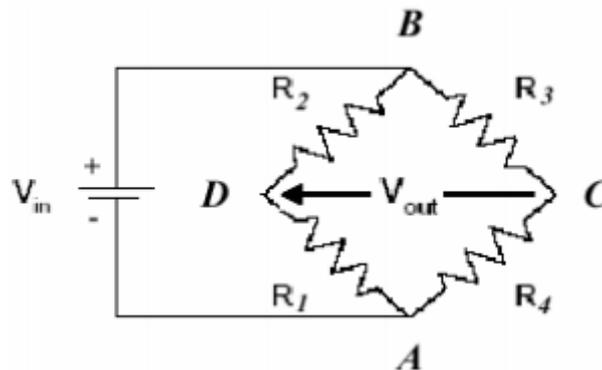


Figure 46 : pont de Wheatstone [29]

L'intérêt de ce montage est que deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. On peut donc réduire les variations parasites (comme la température) et avoir une meilleure précision

- En appliquant le théorème de Millman en C et en D on obtient l'équation de base du pont

$$v_{out} = \frac{(R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4)}{(R_2 + R_1) \cdot (R_3 + R_4)} V_{in} \quad (3.19)$$

- Le pont est équilibré lorsque V_{out} est nulle quelle que soit l'entrée $(R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) = 0$

Le pont est initialement équilibré mais R1 et R3 varient de dR et R2 et R4 de $-dR$.

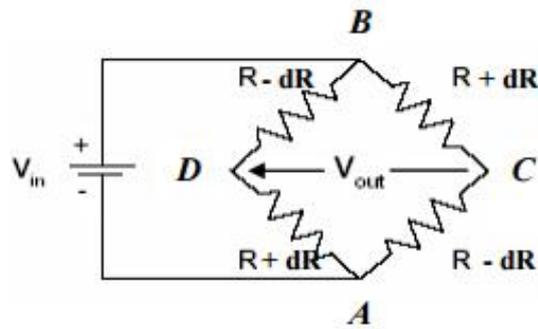


Figure 47 : pont de Wheatstone avec dR [29]

$$V_{out} = \frac{V_{in}(2,4.dRR^3 - (-2,4dR.R^3))}{(4dR.R^2)(4dR.R^2)} = V_{in} \frac{dR}{R} \quad (3.20)$$

$$V_{out} = V_{in} \frac{\Delta R}{R}$$

- La valeur de V_{out} mesuré dépend de changement de la résistance $\frac{\Delta R}{R}$, calculons le changement de résistance due à la déformation de la membrane définit la pression appliqué .

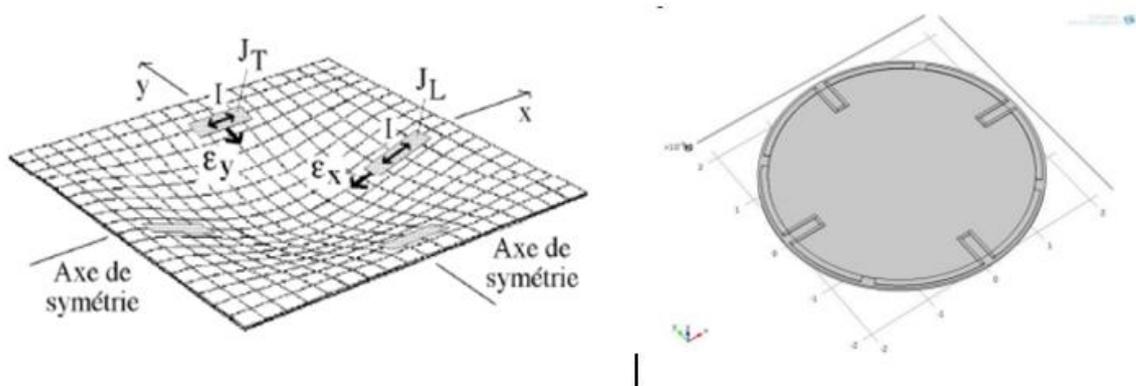


Figure 48: membrane piézorésistive (membrane carrée déformé, cylindrique au repos)

3.5 Discussion des résultats

1) La forme et l'épaisseur de la membrane :

La membrane cylindrique de petite épaisseur est plus déformable que la membrane carrée.

2) La valeur de la capacité augmente avec la diminution de la distance inter électrodes.

3) Le changement de la résistance est proportionnel à la déflexion de la jauge causé par la pression $P = [0 : 4.10^4]$

4) Sensibilité $S = \frac{\Delta \text{Sortie}}{\Delta \text{Entrée}}$, on distingue :

a. Capteur de pression capacitif : Entrée = pression appliquée

Sortie = variation de capacité

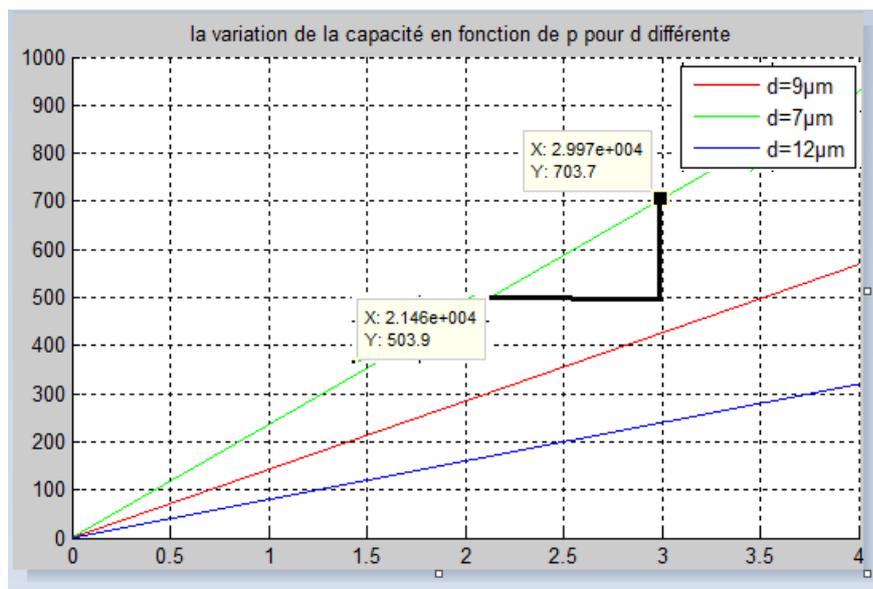


Figure 50 : caractéristique linéaire

Sensibilité pour $d=9 \mu\text{m}$ $S = \frac{\Delta C}{\Delta P}$ $S_1 = \frac{703.7 - 503.9}{2.997e4 - 2.146e4}$
 pour : $d=7 \mu\text{m}$ $S_1 = 0.023 \text{ F/Pa}$

$d=9 \mu\text{m}$ $S_2 = 0.015 \text{ F/Pa}$

$d=12 \mu\text{m}$ $S_3 = 0.003 \text{ F/pa}$

- la sensibilité diminue lorsque d (distance inter électrode) est grande

b. Capteur piézorésistif

1) Sensibilité $S = \frac{\Delta \text{Sortie}}{\Delta \text{Entrée}}$

Capteur de pression capacitif : Entrée = pression appliquée

Sortie = variation de résistance

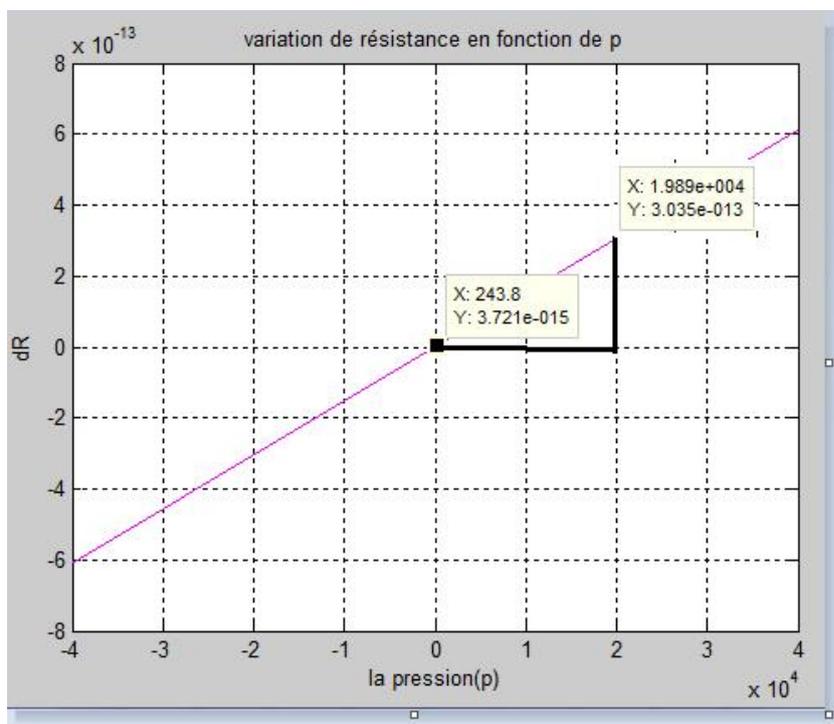


Figure 51 : Caractéristique linéaire de capteur piézorésistif

$S = \frac{\Delta C}{\Delta P}$ $S = 0.74 \text{ ohm/Pa}$

Conclusion générale

L'utilisation des moyennes de modélisation et de simulation accélèrent et améliorent la qualité du processus de conception des produits techniques.

Dans le présent travail nous avons utilisé les moyens de modélisation et de simulation pour un micro-capteur capacitif de pression artérielle, il s'agit d'un capteur formé d'une armature plane fixe et une armature plane déformable.

Après une étude théorique et en utilisant le logiciel Matlab R2007b nous avons pu tracer :

- Les variations de la déflexion de l'armature déformable pour différentes épaisseurs de l'armature .
- Les variations de la capacité en fonction de la pression (la caractéristique de transfert).

La simulation nous a permis de caractériser le micro-capteur en jouant sur la forme (rectangulaire, carrée, circulaire) et les dimensions, Nous avons complété l'étude en utilisant le logiciel Comsol multiphysique (4.3b) , avec lequel nous avons repris l'étude statique (déjà faite avec Matlab) et nous avons entamé l'étude dynamique à savoir l'étude du domaine fréquentiel de l'armature mobile.

Nous avons repris le même travail pour un capteur de pression piézorésistif.

Lors de l'étude, nous nous sommes intéressés de près aux performances des micro-capteurs, à savoir :

- la linéarité
- la sensibilité
- Rapidité
- la bande passante

• Certaines caractéristiques du micro-capteur ne peuvent être étudiées que si le capteur est réalisé.



Bibliographie

[1] D. Estève, J. Simonne, "Microsystèmes", Techniques de l'Ingénieur, traité Electronique, ISSN 0399-4120, 2000, vol. 2, noE2305, pp. E2305.1-E2305.17.

[2] M.matmat : "Pour une approche complète de l'évaluation de fiabilité dans les microsystèmes" thèse de doctorat de l'université de Toulouse.

[3] : Rima HAMOUI : 'Contribution à une plate forme d'aide à la conception de Microsystème' thèse de doctorat

[4] : Dr. Ramesh Ramadoss, Formfactor, San Jose, CA ' MEMS devices for biomedical applications'

[5] : <http://www.sordalab.com/documents/ps2207pressionarterielle.pdf>

[6] : livre d'Automesure de la tension artérielle Pour mieux surveiller votre santé
©Éditions Imothep médecine-sciences 19, avenue Duquesne, 75007 Paris. Juin 2002

[7] : Modifications physiologiques lors d'un effort

[8]: S.Savarese, " Modélisation avec Comsol Multiphysic 3.4" , France 2008.

[9] : W.Harba, " Développement de méthodes thermique compacts en vue de la modélisation électrothermique des composants de puissance" . Thèse doctorat, Université Paul sabatier, Toulouse, juin 2007

[10] : Mr. Acheli Abdelhakim : Modélisation des microsystèmes, universite saad dahled de blida

[11] : Christophe.M, " caractérisation de microtransducteur de pression a haut performance integé sur Silicium " thèse de doctorat , institue national des sciences appliquées de Lyon 1998

[12] : Dr bensaid.S 'cour capteur et actionneur' de l'université de bouira

[13] Annan.S' conception d'un microcapteur de pression humidité et température en technologie MEMS ' m émoire de magister

[14] : hilipe.M : "faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium" thèse de doctorat, univocité de paul sabatier de Toulouse.1998

[15] : : Erik.V et joub.R, « piezo resistif MEMS devrier : theory and applications' 'thèse de magister, Département for micro and Nano technologie D TU 2005.

[16] : Tounsi.F, " Microphone electrodynamiqueMEMS en technologie CMOS étude modélisation et réalisation " thèse de doctorat .

[17] : Ander.H, "Développement of multi sebsor for marine environnement studies", magister Département for micro and Nano Technologie DTU, 2005

[18] : Arnauld.D , "conception intégrée de microsystème électromécanique " thèse de doctorat institue national de polytechnique de gronoble.

[19] : Merabet K "Étude Et Simulation D'un Capteur De Pression Capacitif Au Silicium" mémoire de magistère université de Constantine

[20] : El Bahri.M, " influence de la température sur le comportement statique et dynamique de capteur de pression capacitif sur silicium " , thèse de doctorat institue national des science applique de toulouse

[21] : : Erik.V et joub.R, « piezo resistif MEMS devrier : theory and applications' 'thèse de magister, Département for micro and Nano technologie D TU 2005.

[22] : : cristiane. C''cpnception de traducteurs acoustique micro usinés'', thèse de doctorat , Institue national de polytechnique de gronoble IVPG, 2005

[23] : : Habib .C'' Conception et réalisation d'une plate. Forme multi capteur de gaz conductimétrique vers le nez électronique intégré '' thèse de doctorat, université de Paul Cézanne, 2007

[24] : : Roui.J , ''Développement of MEMS sensors for measurement of pressure, relative humidity and température''thèse de doctorat, Worsterplay technic Institue.2003.

[26] : Fbien.P '' capteur intégrée tacile d'empreintes digitales a micro structurepiézorésistive'' thèse de doctorat , institue nationale de polytechnique gronoble 2002.

[27] : Jingbo .X et al,''Amonolitic Silicon multi. Sensor for measuring three-axis acceleration pressure and temperature'', Journal of mechanical science and technology, 22-731-739-2008.

[28]: Michal.O.''Modelling and optimization of piézorésistif pressure sensor'' these de doctorat univercité de INSA de Toulouse 2009.

[29]: C:/Users/vaio/Downloads/Pont_de_Wheatstone.pdf