

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



Université des Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département d'Électronique



N° d'ordre :
Série :

THÈSE

Présentée pour obtenir le diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle
en **Électronique**

OPTION : Microélectronique et nanotechnologie

Par

Mr. SOUILAH Mohamed

THEME

***Etude et modélisation de capteurs
piézoélectriques, piézorésistifs et capacitifs***

Soutenue le : 06/04/2017

Devant le jury :

Président :	M. BENSLAMA	Prof.	Université des Frères Mentouri Constantine
Rapporteur :	A. CHAABI	Prof.	Université des Frères Mentouri Constantine
Co-Rapporteur :	J.M. QUERO	Prof.	Université de Séville
Examineurs :	R. MAHAMDI	Prof.	Université de Batna 2
	D.BENATIA	Prof.	Université de Batna 2
	F. KERROUR	M.C.A	Université des Frères Mentouri Constantine

REMERCIEMENTS

Avant tout, mes remerciements à mon **DIEU**, le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse Monsieur **Abdelhafid CHAABI**, Professeur à l'Université des frères Mentouri Constantine pour avoir accepté de m'encadrer et me proposer le sujet de cette thèse. Je tiens à exprimer ma profonde gratitude pour ses encouragements et son suivi pour finaliser les travaux de la thèse.

J'exprime aussi mes vifs remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur **José Manuel QUERO**, professeur au département d'électronique de l'université de Séville en Espagne. Je le remercie pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire, pour la confiance qu'il m'a accordé, pour m'avoir donné la possibilité d'utiliser les équipements du laboratoire microsystemes, pour son suivi et sa disponibilité lors de mes stages.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements à Monsieur **Francisco Perdigones** et Melle **Guadalupe Flores** pour toute l'aide qu'ils m'ont fourni durant mes séjours de stages.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur **M.BENSLAMA**, Professeur à l'Université des frères Mentouri Constantine, pour l'honneur qu'il m'a fait d'accepter de présider le jury de cette thèse.

Je remercie chaleureusement les membres de mon jury :

Monsieur **R.MAHAMDI**, Professeur à l'université de Batna 2, Monsieur **D.BENATIA**, Professeur à l'université de Batna 2, Monsieur **F.KERROUR**, Maître de conférence (A) à l'Université des frères Mentouri Constantine, qui ont accepté de participer à ce jury et d'examiner mon manuscrit de thèse.

Je tiens à remercier Monsieur **M.RAS LAIN** et également tous mes collègues du laboratoire Hyperfréquences et Semiconducteurs (LHS) et tous mes amis pour leurs encouragements.

Mes remerciements vont également aux gens du groupe microsystemes, pour leur gentillesse et leurs précieux conseils.

Je tiens enfin à adresser un dernier merci tout spécial à mes parents et à toute ma famille pour leur amour, leurs encouragements et leur soutien moral.

Sommaire

Liste des figures	I
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1

Chapitre I. Etat de l'art (capteurs de pression)

1. Introduction	4
2. Définition d'un capteur de pression	4
3. Capteur de pression piézoélectrique	6
3.1. Principe de fonctionnement	7
3.2. Exemple d'un capteur de pression piézoélectrique	7
4. Capteur de pression piézorésistif	7
4.1. Principe de fonctionnement	8
4.2. Exemple d'un capteur de pression piézorésistif	9
5. Capteur de pression capacitif	9
5.1. Principe de fonctionnement	9
5.2. Gap des capteurs de pression capacitifs	10
6. Les microsystèmes	18
6.1. Définition et applications des microsystèmes	18
6.2. Les principaux matériaux utilisés pour les microsystèmes	20
6.2.1. Silicium.....	20
6.2.2. La résine photosensible négative SU-8.....	22
6.2.3. Polydiméthylsiloxane PDMS.....	25
7. Conclusion	26

Chapitre II. Techniques de fabrication des capteurs de pression

1. Introduction	27
2. Les processus de fabrication des capteurs de pression	27
2.1. Techniques de déposition	27
2.1.1. Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)	28
2.1.2. Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD)	30

2.2. La photolithographie.....	32
2.3. Techniques de gravure.....	34
2.3.1. Gravure humide.....	34
2.3.2. Gravure sèche.....	36
2.4. Micro usinage en surface.....	39
2.5. Micro usinage en volume.....	40
3. Procédé de fabrication SU-8	42
3.1. Dépôt de SU-8.....	42
3.2. Premier recuit (softbake)	43
3.3. Insolation	43
3.4. Deuxième recuit (Post exposure bake PEB)	43
3.5. Développement	44
3.6. Troisième recuit (Hard bake)	44
4. Le processus BETTS.....	44
4.1. Le réseau de microcanaux 3D.....	45
4.2. Membranes à motifs.....	46
4.3. Microchambres.....	46
5. Techniques de collage	47
5.1. Le collage par fusion	47
5.2. Le collage anodique	48
5.3. Le collage adhésif	48
6. Exemple de fabrication d'un capteur de pression capacitif	49
7. Conclusion	51

Chapitre III. Modélisation des capteurs de pression capacitifs

1. Introduction.....	52
2. La relation entre contrainte et déformation - loi de Hooke	52
3. Modélisation mécanique de la membrane	54
3.1. Membrane de forme carrée et rectangulaire.....	54
3.2. Membrane de forme circulaire	58
4. Modélisation du capteur de pression capacitif	59
4.1. Réponse capacitive C(P).....	59
4.2. Sensibilité S(P)	62

5. Simulation du capteur de pression capacitif	62
5.1. Description de la structure	62
5.2. Equations fondamentales	64
5.3. Maillage et résolution du modèle	65
6. Résultats et discussions	66
6.1. La déformation de la membrane en fonction de la pression appliquée	66
6.2. La réponse de la capacité en fonction de la pression appliquée.....	70
6.3. Etude des paramètres géométriques de la membrane.....	72
6.4. Etude comparative	77
7. Conclusion	79

Chapitre IV. Conception et réalisation du capteur de pression capacitif (premier prototype)

1. Introduction	80
2. Définition de la structure	80
3. Fabrication des masques	81
4. Procédés de fabrication	86
4.1 Réalisation des circuits imprimés	87
4.1.1. Plaque inférieure de PCB	87
4.1.2. Plaque supérieure de PCB	92
4.2 Le processus BETTS	93
4.2.1. Dépôt de PDMS.....	93
4.2.2. Dépôt de la résine négative SU-8	96
4.3 Métallisation de l'électrode supérieure	98
4.4. Assemblage des deux circuits imprimés	99
5. Description du banc de test	100
6. Circuit convertisseur Capacité - Fréquence	100
6.1. Relation entre la fréquence et la capacité	101
7. Modélisation par la méthode des éléments finis	102
8. Résultats expérimentaux du premier prototype	105
8.1. Relation entre la fréquence et la pression appliquée	105
8.2. Relation entre la capacité et la pression appliquée.....	107

9. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation par COMSOL.....	109
10. Conclusion	112

Chapitre V. Conception et réalisation du capteur de pression capacitif (deuxième prototype)

1. Introduction	113
2. Définition de la structure	113
3. Fabrication des masques	114
4. Procédés de fabrication	117
4.1. Réalisation de la plaque inférieure PCB (électrode fixe)	119
4.1.1. Méthode de métallisation par lift off	119
4.2. Réalisation de la plaque supérieure PCB (La membrane en SU-8 et l'électrode mobile)	120
4.3. Photographies du capteur réalisé	120
5. Description du banc de test	122
6. Circuit convertisseur Capacité - Fréquence	122
6.1. Relation entre la fréquence et la capacité	123
7. Modélisation par la méthode des éléments finis	124
8. Résultats expérimentaux du deuxième prototype	127
9. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation (sous environnement COMSOL)	129
9.1. Effet de température	130
10. Conclusion.....	132

Conclusion générale..... 133

Références bibliographiques 136

Productions scientifiques..... 147

Résumé 148

Abstract 149

ملخص 150

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma synoptique d'un capteur de pression.....	5
Figure I.2 : L'effet piézoélectrique : (a) effet direct, (b) effet inverse.....	6
Figure I.3 : Schéma synoptique d'un capteur de pression piézoélectrique.....	7
Figure I.4 : Capteur de pression en quartz.....	7
Figure I.5 : Schéma de principe d'un capteur de pression piézorésistif.....	8
Figure I.6 : Schéma en coupe d'un capteur de pression piézorésistif.....	9
Figure I.7 : Schéma synoptique d'un capteur de pression capacitif.....	9
Figure I.8 : Structure d'un capteur de pression capacitif MEMS à base de LCP.....	10
Figure I.9 : Photographies de (a) une couche supérieure de LCP avec électrode en cuivre, (b) une couche d'espacement LCP avec des cavités circulaires, (c) un substrat LCP avec une électrode inférieure commune en cuivre, et (d) une prototype de capteurs de pression capacitifs en matrice 5×3	12
Figure I.10 : Séquence d'alignement des trois couches LCP	12
Figure I.11 : Collage par thermo-compression des trois couches LCP	13
Figure I.12 : Capteur de pression capacitif avec circuit d'oscillateur à relaxation	13
Figure I.13 : Procédé de fabrication du capteur de pression capacitif	14
Figure I.14 : (a) Capteur de pression capacitif fabriqué, (b) circuit d'oscillateur à relaxation avec le capteur fabriqué sur la même plaque inférieure PCB	15
Figure I.15 : Structure du capteur de pression différentielle en PCB	16
Figure I.16 : Photographie du capteur fabriqué	16
Figure I.17 : Structure du capteur capacitif flexible	17
Figure I.18 : Photographie du capteur de pression capacitif	17
Figure I.19 : Multidisciplinarité dans la conception et la réalisation des microsystèmes	19
Figure I.20 : Représentation schématique des structures (a) cristalline, (b) polycristalline, et (c) amorphe dans un matériau de Si	21
Figure I.21 : Structure chimique de la résine SU-8	22
Figure I.22 : Photographie MEB de microstructure réalisé en SU-8 (Roue crantée de 200 um d'épaisseur).....	23
Figure I.23 : Formule chimique du PDMS	25

Figure I.24 : Etapes pour la réalisation d'un microcanal en PDMS, (a) Fabrication du moule, (b) Réticulation du PDMS, (c) Nettoyage plasma, (d) Collage	25
Figure II.1 : Dépôt par évaporation thermique	29
Figure II.2 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique	30
Figure II.3 : Structure simplifiée d'une chambre du réacteur CVD	31
Figure II.4 : Oxydation du Silicium.....	32
Figure II.5 : Principales étapes du procédé photolithographie	33
Figure II.6 : Les résultats de gravure isotrope et anisotrope par voie humide	34
Figure II.7 : Réalisation d'une poutre de polysilicium par attaque HF de l'oxyde sous-jacent	35
Figure II.8 : Gravure anisotrope	36
Figure II.9 : Schéma de principe de la technique RIE	37
Figure II.10 : Principe de la gravure DRIE	38
Figure II.11 : Micro usinage de surface	39
Figure II.12 : Procédé de réalisation des capacités variables	40
Figure II.13 : Micro usinage de volume	41
Figure II.14 : a) Dépôt de SU-8 sur le substrat par spin-coating, b) Courbe d'épaisseur de la couche SU-8 en fonction de la vitesse de rotation (tours par minute) pour différents type de SU-8.....	42
Figure II.15 : Fabrication de réseau des microcanaux en trois dimensions	45
Figure II.16 : Les microchambres comme une structure de base. Le transfère de la couche SU-8 à motif	46
Figure II.17 : Fabrication des microchambres hermétiques. Un cylindre creux avant et après revêtement par le processus BETTS est représenté en (a) et (b).	47
Figure II.18 : Fabrication des microchambres ouvertes. Photos (a) et (b) illustrent une microchambre avant et après le processus de transfert	47
Figure II.19 : Collage par fusion	48
Figure II.20 : Collage anodique	48
Figure II.21 : Schéma synoptique des étapes de fabrication d'un capteur de pression capacitif	49
Figure II.22 : Vue de dessous et de dessus des différentes structures réalisées.....	51

Figure III.1 : Définition des composantes du tenseur des contraintes mécaniques.....	53
Figure III.2 : Vue de dessus de la membrane rectangulaire.....	55
Figure III.3 : Capteur de pression capacitif au repos.....	59
Figure III.4 : Capteur de pression capacitif en fonctionnement	60
Figure III.5 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif.....	63
Figure III.6 : Vue en 3D des différentes structures du capteur de pression capacitif a) carrée, b) rectangulaire, c) circulaire.....	63
Figure III.7 : Vue en 3D des différentes structures maillées du capteur de pression capacitif a) carrée, b) rectangulaire, c) circulaire.....	66
Figure III.8 : Vue en 3D de la déflexion $w(x,y)$ de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée	67
Figure III.9 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée.....	67
Figure III.10 : Vue en 3D de la déflexion $w(x,y)$ de la membrane de forme rectangulaire en fonction de la pression appliquée	68
Figure III.11 : Déflexion maximale de la membrane de forme rectangulaire en fonction de la pression appliquée.....	68
Figure III.12 : Vue en 3D de la déflexion $w(r,\theta)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée	69
Figure III.13 : Déflexion maximale de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée.....	69
Figure III.14 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas de la membrane de forme carrée.....	70
Figure III.15 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée de la membrane de forme rectangulaire.....	71
Figure III.16 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas de la membrane de forme circulaire.....	72
Figure III.17 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de la surface " A ".....	73
Figure III.18 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de la distance inter électrodes " d "	73

Figure III.19 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane " h "	74
Figure III.20 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de la surface " A " d'une membrane de forme circulaire	75
Figure III.21 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de la distance inter électrodes " d " d'une membrane de forme circulaire	75
Figure III.22 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane " h " d'une membrane de forme circulaire	76
Figure III.23 : Comparaison de la déflexion maximale en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes.....	77
Figure III.24 : Comparaison de la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes.....	77
Figure III.25 : Comparaison de la variation de la sensibilité à la pression S(P) en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes.....	78
Figure IV.1 : Vue en coupe du capteur de pression capacitif.....	81
Figure IV.2 : Masque 1 de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB)	82
Figure IV.3 : Masque 2 de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB).....	82
Figure IV.4 : Masque de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB), pour les deux capteurs.....	83
Figure IV.5 : Masque de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB), pour les deux capteurs.....	84
Figure IV.6 : Phototraceur	84
Figure IV.7 : Masque réalisé de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB), pour les deux capteurs.....	85
Figure IV.8 : Masque réalisé de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB), pour les deux capteurs	85
Figure IV.9 : Structure en 3D du capteur de pression capacitif (premier prototype).....	86
Figure IV.10 : Procédés de fabrication du premier prototype.....	87
Figure IV.11 : Processus de fabrication de la plaque inférieure PCB	88
Figure IV.12 : (a) Structure 3D de la plaque PCB (b) photographie de la plaque PCB .	88
Figure IV.13 : Insolation de la plaque PCB.....	89
Figure IV.14 : Une insoleuse (Marque : Bi2000 KF)	90

Figure IV.15 : Développement de la plaque PCB	90
Figure IV.16 : Gravure de la plaque PCB	91
Figure IV.17 : Structure 3D de la plaque PCB	91
Figure IV.18 : Photographie de la plaque inférieure du PCB contenant l'électrode de cuivre et les fils de connexions électriques	92
Figure IV.19 : Processus de fabrication de la plaque supérieure PCB	92
Figure IV.20 : Balance électronique	93
Figure IV.21 : Le mélange de l'agent de durcissement et de prépolymère pour obtenir le PDMS	94
Figure IV.22 : Appareil pour élimination des bulles	94
Figure IV.23 : Photographie de la tournette (spin coating)	95
Figure IV.24 : Photographie des plaques chauffantes	95
Figure IV.25 : Dépôt de PDMS	95
Figure IV.26 : Le processus de fabrication de la membrane SU-8	96
Figure IV.27 : Dépôt de SU-8 par spin coating	96
Figure IV.28 : Rotation et placement de la couche SU-8 sur la plaque supérieure PCB	97
Figure IV.29 : Insolation UV de la couche SU-8	97
Figure IV.30 : Appareil d'insolation UV	97
Figure IV.31 : Réalisation de la membrane SU-8.....	98
Figure IV.32 : Métallisation de l'électrode supérieure	98
Figure IV. 33 : Photographie de l'appareil pour effectuer la métallisation (Marque : EMITECH K550X)	98
Figure IV.34 : L'électrode supérieure en Argent avec la membrane en SU-8 (Vue de dessous PCB).....	99
Figure IV.35 : Capteur de pression capacitif	99
Figure IV.36 : Photographie du capteur de pression capacitif après assemblage.....	99
Figure IV.37 : Le dispositif expérimental utilisé	100
Figure IV.38 : Un circuit NE555 en mode astable, (a) schéma électrique (b) photographie de circuit convertisseur astable.....	101
Figure IV.39 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité	102
Figure IV.40 : a) représentation schématique en 3D de la géométrie du capteur de pression capacitif, b) la structure maillée en 3D.....	103

Figure IV.41 : La déformation de la membrane SU-8 en fonction de la pression appliquée	104
Figure IV.42 : La réponse de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée	104
Figure IV.43 : Structure 3D des deux électrodes du premier capteur	105
Figure IV.44 : Variations des fréquences f12 et f13 (test 1) en fonction de la pression appliquée	105
Figure IV.45 : Variations des fréquences f12 et f13 (test 2) en fonction de la pression appliquée	106
Figure IV.46 : Comparaison des fréquences f12 et f13 pour le test 1 et test 2 en fonction de la pression appliquée	106
Figure IV.47 : Variations des capacités C12 et C13 (test 1) en fonction de la pression appliquée	107
Figure IV.48 : Variations des capacités C12 et C13 (test 2) en fonction de la pression appliquée	108
Figure IV.49 : Comparaison des capacités C12 et C13 pour le test 1 et test 2 en fonction de la pression appliquée	108
Figure IV.50 : Comparaison de la variation de capacité en fonction de la pression appliquée, obtenue expérimentalement et par simulation COMSOL	110
Figure IV.51 : Comparaison de la variation de la capacité relative ($\Delta C/C$) en fonction de la pression appliquée, obtenue expérimentalement et par simulation COMSOL.....	110
Figure V.1 : Vue en coupe du capteur de pression capacitif	113
Figure V.2 : Masque 3, la distance entre les deux armatures les connexions électriques des électrodes fixe et mobile (plaque inférieure de PCB)	115
Figure V.3 : Masque 4 de l'électrode fixe (plaque inférieure de PCB)	115
Figure V.4 : Masque 5 de l'électrode mobile (membrane : plaque supérieure de PCB)..	115
Figure V.5 : (a) Conception de masque 3. (b) Masque 3 réalisé pour les deux capteurs.	116
Figure V.6 : (a) Conception de masque 4, (b) Masque 4 réalisé pour les deux capteurs.	117
Figure V.7 : (a) Conception de masque 5. (b) Masque 5 réalisé pour les deux capteurs.	117
Figure V.8 : Structure 3D du capteur de pression capacitif (deuxième prototype)	118
Figure V.9 : Procédé de fabrication du deuxième prototype	118
Figure V.10 : Métallisation de l'Or par lift off	119

Figure V.11 : Capteur de pression fabriqué (deuxième prototype)	121
Figure V.12 : Photographie de la membrane SU-8 et le gap	121
Figure V.13 : Le dispositif expérimental utilisé	122
Figure V.14 : Un oscillateur à relaxation : (a) schéma électrique, (b) photographie de circuit convertisseur	122
Figure V.15 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité	123
Figure V.16 : Représentation schématique de la géométrie du capteur de pression capacitif	124
Figure V.17 : La déformation de la membrane SU-8 en fonction de la pression appliquée pour $P=12.5$ kPa	125
Figure V.18 : La réponse de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée	126
Figure V.19 : La pression en fonction de la fréquence simulée par COMSOL	126
Figure V.20 : Fonction de transfert du capteur de pression capacitif	127
Figure V.21 : Trois tests expérimentaux pour la même structure assemblée	128
Figure V.22 : Variation de la fréquence d'offset en fonction du gap d'offset	128
Figure V.23 : Décalage de la fonction de transfert du capteur de pression capacitif	130
Figure V.24 : Variation de la température maximale du capteur en fonction de la pression appliquée	131
Figure V.25 : La fréquence compensée en fonction de la température pour différentes valeurs de la pression appliquée	131

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques de la résine SU-8 Série 2000 MICROCHEM	24
Tableau II.1 : Temps du premier recuit pour différentes épaisseurs	43
Tableau II.2 : Temps du deuxième recuit pour différentes épaisseurs	43
Tableau II.3 : Temps de développement pour différentes épaisseurs	44
Tableau III.1 : Valeurs des coefficients réduits k et K_{ij} pour $n = 3$	57
Tableau III.2 : Valeurs de facteur k_1 pour la membrane de forme carrée et rectangulaire	58
Tableau III.3 : Les paramètres géométriques des capteurs utilisés dans la simulation.....	64
Tableau III.4 : Caractéristiques mécaniques de Silicium	64
Tableau IV.1 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité.....	102
Tableau IV.2 : Comparaison de la sensibilité.....	111
Tableau V.1 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité	124
Tableau V.2 : Décalage de la fréquence du capteur correspond à la déviation du gap effectif estimé.....	129

Introduction générale

Introduction générale

La pression est l'un des paramètres les plus importants à mesurer sur de nombreux types de dispositifs. La mesure de pression peut être effectuée en utilisant différents effets physiques, par exemple, la piézorésistivité de certains matériaux [1], la variation de la capacité entre les électrodes conductrices d'un dispositif [2], ainsi que la piézoélectricité de certains matériaux (comme exemple le quartz) [3]. Ce genre de dispositifs, qui est le capteur de pression à un large éventail d'applications telles que l'automobile [4], l'aérospatiale [5] et médicale [6]. Le choix d'un capteur pour mesurer la pression sur un système dépend généralement de l'application souhaitée et la facilité de l'intégration de ce capteur dans le système. En ce qui concerne, l'un des capteurs les plus utilisés est celui de type capacitif. Ce choix est également supporté par plusieurs caractéristiques fonctionnelles (une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température)[7].

Fondamentalement, le principe de détection du capteur de pression capacitif est basé sur la variation du gap entre une électrode supérieure mobile et une électrode inférieure fixe. Lorsqu'une pression est exercée sur une membrane flexible qui agit comme une électrode mobile, cette membrane se déforme, en changeant la distance entre les deux électrodes, ce qui permet de mesurer la capacité de ce capteur et par conséquent la mesure indirecte de la pression appliquée.

Le développement de technologies alternatives au silicium concentré sur la fabrication des dispositifs microsystèmes MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) qui a augmenté rapidement au cours de la dernière décennie. Les coûts élevés et les restrictions dans le traitement de silicium ont entraîné un intérêt dans le choix de différents matériaux capables d'offrir des procédés de fabrication simples et peu coûteux. Par la caractérisation des procédés de fabrication innovants et l'optimisation des technologies de fabrication traditionnelles, il est possible de créer des dispositifs complexes à faible coût pour des applications MEMS (capteur de pression MEMS).

La plupart des capteurs de pression capacitifs sont fabriqués à base de silicium monocristallin en utilisant les techniques de micro-usinage en volume, micro-usinage de surface, ou une combinaison de ces deux techniques [7,8]. La réalisation du gap souhaité nécessite l'utilisation de techniques sophistiquées et des installations coûteuses [9,10]. Une autre technique pour fabriquer des capteurs de pression capacitifs est la technologie de

circuit imprimé (PCB). Ce procédé de fabrication comprend les matériaux habituellement disponibles dans les circuits imprimés : la plaque en bakélite ou en verre époxy (Flame Resistant 4, "FR4") en tant que substrat et une couche conductrice de cuivre pour relier les composants électroniques. Cette technique fournit un procédé plus facile pour la fabrication à faible coût. La technologie de PCB a été utilisée pour la fabrication de capteurs de pression capacitifs. Les électrodes sont fabriquées en utilisant une gravure humide. Toutefois, la définition du gap repose sur une couche de diffusion étain / plomb qui est également utilisée pour coller la plaque supérieure (électrode supérieure) et la plaque inférieure (électrode inférieure). Ce dispositif utilise seulement deux couches de PCB mais le contrôle du gap n'est pas facile [11].

D'autres dispositifs ont été développés en utilisant la technologie PCBMEMS, par exemple, des capteurs de déplacement et des capteurs d'environnement. De nombreux systèmes microfluidiques sont construits en utilisant la technologie PCBMEMS (par exemple, les micropompes) [12]. Les avantages de cette technologie sont bien connus : faible coût, processus de fabrication facile, robustesse et l'intégration avec d'autres dispositifs.

Compte tenu de ces avantages, et dans ce contexte, notre objectif est la conception et le développement et la fabrication d'un capteur de pression capacitif en utilisant la technologie PCBMEMS.

Le principe est de mettre en place un capteur de pression capacitif à faible coût pour être intégré dans les technologies de PCB. Le capteur de pression capacitif fabriqué est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en argent ou en Or. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe en cuivre ou en Or. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur. Le choix est dû à la plus grande accessibilité à ce type de substrat, la bonne adhérence avec SU-8 et l'intégration facile avec d'autres composants électroniques.

Le processus de fabrication est basé sur BETTS (collage, UV exposition et le transfert technique dans SU-8), un processus qui permet de réaliser les membranes en suspension (développées par le groupe de microsystèmes de l'université de Séville) [13]. L'utilisation de ce procédé BETTS est très pertinent, il permet de fabriquer des structures SU-8 complexes tridimensionnelles, de ce fait, il acquiert une compatibilité et une intégration avec des dispositifs microfluidiques.

Cette thèse est divisée en cinq chapitres :

Le chapitre I permet d'introduire le principe de base d'un capteur de pression ainsi qu'un état de l'art sur les capteurs de pression capacitif. nous présenterons les matériaux les plus répandus dans les procédés de fabrication des capteurs de pression MEMS.

Le chapitre II décrit d'une manière générale les différentes techniques connues et utilisées pour réaliser les capteurs de pression. Nous présentons les techniques de déposition, les techniques de photolithographie, les techniques de gravure ainsi que les techniques de micro usinage en surface et en volume et les techniques de collage. Par la suite, nous développons la technologie SU-8 et le processus " BETTS " et l'exemple de fabrication du capteur de pression capacitif en silicium.

Le chapitre III sera consacré à la modélisation analytique de la déformation de la membrane de formes carrée, rectangulaire et circulaire et la réponse de capacité du capteur ainsi que sa sensibilité à la pression en fonction de la pression appliquée. Nous utiliserons le logiciel COMSOL multiphysiques pour simuler la réponse capacitive et la sensibilité du capteur de pression capacitif pour différentes formes de la membrane. Nous déterminerons l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la performance du capteur de pression capacitif. Nous présenterons une étude comparative entre les résultats de simulation et les résultats théoriques.

Dans le chapitre IV, nous présenterons la structure du capteur de pression capacitif (premier prototype) et les différents procédés de fabrication. Nous montrerons la fabrication des différents masques utilisés pour définir les deux électrodes et les procédés utilisés pour la gravure des deux PCB ainsi que le processus BETTS pour fabriquer la membrane en SU-8. La description du banc utilisé pour le test du capteur sera définie. Nous allons présenter les résultats de simulation obtenus par le simulateur COMSOL du comportement mécanique de la membrane en SU-8, la réponse capacitive, la sensibilité du capteur, ainsi que les résultats expérimentaux, afin de les comparer.

Le chapitre V sera consacré à la conception et à la réalisation du capteur de pression capacitif (deuxième prototype). Nous présenterons les différents procédés de fabrication ainsi que le banc de test utilisé pour caractériser son comportement. Nous déterminerons la dépendance de la fréquence en fonction du gap. Nous étudierons l'effet de température sur la réponse du capteur de pression fabriqué et nous procéderons à une étude comparative des résultats obtenus expérimentalement et par simulation.

Chapitre I
Etat de l'art
(Capteurs de pression)

1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une introduction générale sur le principe de base d'un capteur de pression ainsi qu'un état de l'art sur les capteurs de pression de type capacitif. Avant les années soixante dix (70), les manomètres à tube de Bourdon, les manomètres mécaniques à cadran, les membranes métalliques; sont utilisées pour mesurer la pression. Après les années 70 jusqu'à ce jour, l'électromécanique vers la microélectronique a évolué et changé qui a permis de fabriquer des capteurs de pression miniaturisés où le matériau dominant est le Silicium monocristallin. Récemment, les capteurs de pression sont fabriqués à base de matériaux polymères en utilisant uniquement des plaques de circuit imprimé (PCB) ou par la combinaison "PCB-MEMS" de la technologie PCB et la technologie microsystemes (en anglais "MEMS", Micro Electro Mechanical Systems).

La technologie MEMS permet de fabriquer des capteurs de pression de meilleures performances grâce aux avantages suivants : la miniaturisation, la faible consommation d'énergie, le grand volume de production, le faible coût, la sensibilité élevée. L'application de ces capteurs MEMS est largement utilisée dans divers domaines tels que le domaine biomédical, la robotique, l'environnement et surtout l'automobile.

Une description sur les matériaux les plus répandus dans les procédés de fabrication des capteurs de pression MEMS sera présentée.

2. Définition d'un capteur de pression

La pression est un paramètre essentiel dans plusieurs disciplines telles que la thermodynamique, l'aérodynamique, l'acoustique, la mécanique des fluides.

La pression est une grandeur très importante dans la chaîne de mesure, détection et de contrôle, elle a pour but d'étudier un milieu qui peut être soit un gaz soit un fluide.

La mesure de cette grandeur physique est réalisée à l'aide d'un capteur de pression dont la sortie est un signal, appelé **réponse**.

Un capteur de pression est un système constitué de deux parties [14] :

- Une partie détection appelée Cellule **sensible**, qui contient un **corps d'épreuve** et un **transducteur**.
- Une partie traitement de l'information appelée **circuit électronique de traitement**.

Un capteur de pression peut donc être représenté par le schéma de la figure I.1.

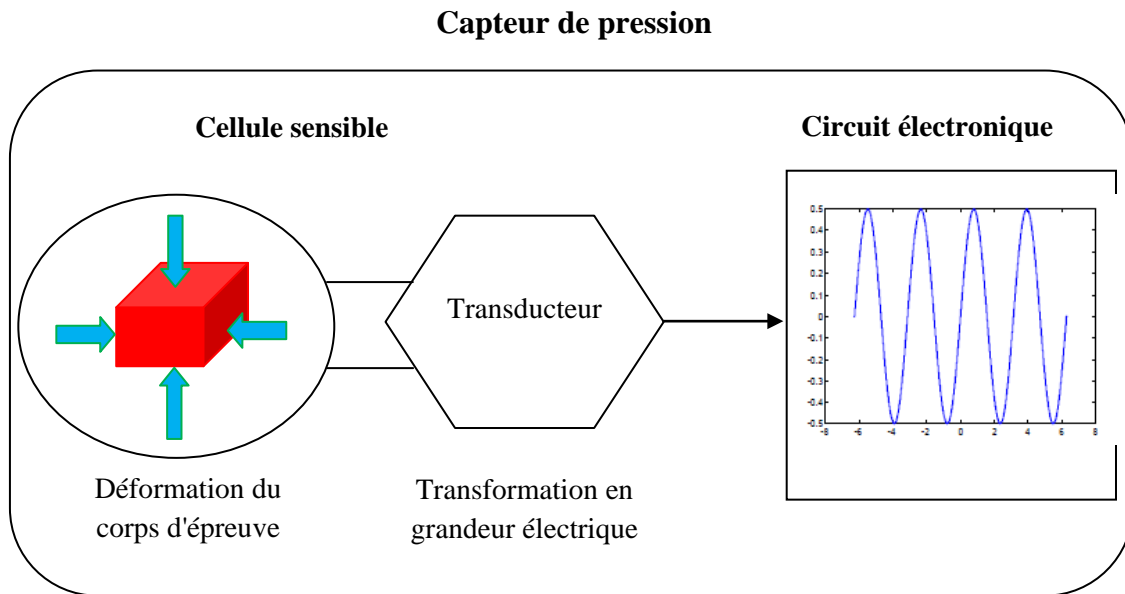


Figure I.1 : Schéma synoptique d'un capteur de pression [14]

Le corps d'épreuve est l'élément mécanique qui est soumis à l'action du mesurant et de le transformé en une grandeur physique mesurable (la déformation).

Le transducteur transforme la déformation de ce corps d'épreuve en une grandeur physique, généralement de forme électrique.

Le circuit électronique de traitement ou encore le circuit conditionneur permet de traiter le signal de sortie et lui mettre en forme un signal électrique transportant l'information donnée par le transducteur.

La majeure partie des capteurs de pression disponibles sur le marché sont des capteurs à membrane. Selon le principe de détection des cellules sensibles on peut définir leurs types.

Il existe différents types de capteurs de pression, mais les plus couramment utilisés sont les capteurs de pression piézorésistifs, capacitifs et piézoélectriques. Chacun d'eux possède ses propres caractéristiques.

L'utilisation de ces types de capteurs de pression dépend de l'application visée, d'une façon générale, le capteur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne linéarité.
- Une grande étendue de mesure.
- Une très bonne sensibilité à la pression.
- Une insensibilité aux grandeurs d'influence (température, humidité, ...etc).

3. Capteur de pression piézoélectrique

Les capteurs de pression piézoélectriques sont basés sur l'effet piézoélectrique [15]. Cet effet qui peut être direct ou indirect, a été découvert par les frères Curie en 1880. L'application d'une contrainte mécanique à un matériau piézoélectrique (le quartz par exemple), entraîne l'apparition d'une polarisation électrique proportionnelle à la force appliquée. En 1881, l'effet inverse a été découvert par Lippmann. L'application d'une tension électrique à un matériau piézoélectrique, entraîne l'apparition d'une déformation mécanique du matériau piézoélectrique qui est proportionnelle à la tension appliquée (figure I.2).



Figure I.2 : L'effet piézoélectrique : (a) effet direct, (b) effet inverse

La détection de la pression d'un capteur de pression piézoélectrique se fait par la mesure de la tension électrique. Les avantages d'un capteur de pression piézoélectrique sont : construction robuste, petite taille, grande plage dynamique, électronique associée simple [16]. Ces types de capteurs sont sensibles à la température et nécessitent un câblage et une amplification spéciaux.

Plusieurs efforts ont été effectués dans la simulation et la fabrication de capteurs de pression piézoélectriques [16, 17, 18]. Abhay B. Joshi et al [17], ont présenté la simulation de capteur de pression piézoélectrique pour la mesure de l'impulsion de l'artère radiale. Ce capteur de pression micromécanique basé sur un mécanisme de détection piézoélectrique a été conçu et simulé à l'aide de CoventorWare. Les résultats montrent que les conceptions des capteurs répondent aux critères d'application dans le système de mesure des impulsions (la pression appliquée comprise entre 1 et 30 kPa). C. Zinck et al [19] ont présenté la fabrication et la caractérisation de membranes de silicium actionnées par des films minces piézoélectriques, la combinaison de ces derniers avec des membranes de silicium micro-usinés a entraîné de nouveaux micro-dispositifs tels que capteurs de pression, accéléromètres, actionneurs et résonateurs acoustiques.

3.1. Principe de fonctionnement

La description de la structure et le principe d'un capteur de pression piézoélectrique est illustré sur la figure I.3.

- La membrane qui constitue le corps d'épreuve se déforme sous l'effet d'une pression appliquée.
- Le matériau piézoélectrique assure la transformation de cette déformation en variation de la tension.

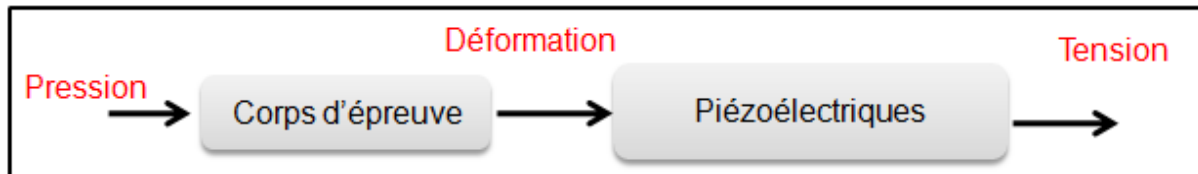


Figure I.3 : Schéma synoptique d'un capteur de pression piézoélectrique

3.2. Exemple d'un capteur de pression piézoélectrique

Un capteur de pression en quartz est illustré sur la figure I.4 [20]. L'application d'une contrainte de pression hydrostatique sur la cavité oscillante en quartz permet d'exciter cette dernière à sa fréquence de résonance via une paire d'électrodes situées de part et d'autre de l'oscillateur.

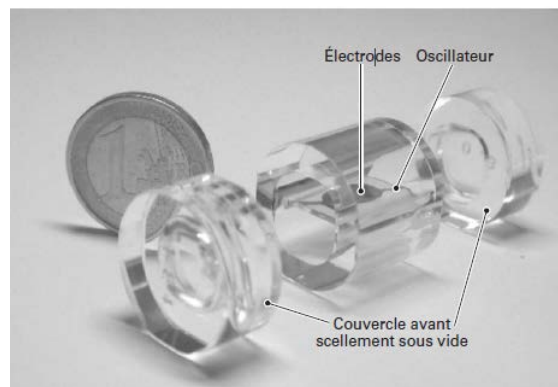


Figure I.4 : Capteur de pression en quartz [20]

4. Capteur de pression piézorésistif

La détection de la pression d'un capteur de pression piézorésistif se fait par la mesure d'une variation de résistance. Les avantages de ce capteur sont : bonne précision, faible non linéarité, électronique associée simple. Ces types de capteurs sont extrêmement sensibles à la température et nécessitent un circuit de compensation spécifique, ce qui élève considérablement leur prix de revient unitaire.

Les travaux rapportés dans la littérature [21,22,23], ont montrés des techniques de compensation de la température (dérives thermiques) par l'utilisation des circuits de résistance avec différents arrangements ainsi que l'usage intelligent des propriétés des matériaux.

D'autres auteurs proposent des solutions pour corriger ces dérives thermiques. Les travaux de Sun et al [22], ont montré que la dérive électrique du capteur de pression piézorésistif peut être utilisée pour compenser la dérive thermique de la tension d'offset du pont. Les travaux de Perraud [24], ont présenté des modèles mathématiques de différents types de conditionneurs de signal pour compenser la dérive thermique du capteur de pression piézorésistif. Une autre méthode basée sur l'utilisation d'un pont double est utilisé pour compenser la dérive thermique du capteur de pression piézorésistif et améliorer ces performances. Les travaux de Šaponjić [25], ont utilisé un microcontrôleur pour assurer la compensation de la température et la linéarisation du capteur utilisant un polynôme de second ordre. Les travaux de Ras lain [26], ont proposé deux techniques de compensation des dérives thermiques: la première utilise des capteurs de température CTP (coefficient de température positif) et CTN (coefficient de température négatif) en série ou en parallèle avec le pont de Wheatstone et la deuxième est le dépôt d'une couche d'aluminium au dessous de la membrane pour minimiser la dérive thermique.

4.1. Principe de fonctionnement

La description de la structure et le principe d'un capteur de pression piézorésistif est illustré sur la figure I.5 [27].

- La membrane qui constitue le corps d'épreuve se déforme sous l'effet d'une pression appliquée.
- Les jauges piezoresistives assurent la transformation de cette déformation en variation de résistance.
- Le pont de Wheatstone permet de traduire cette variation de résistance en tension électrique.

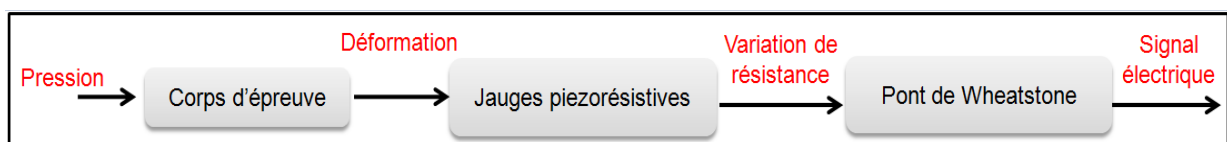


Figure I.5 : Schéma de principe d'un capteur de pression piézorésistif

4.2. Exemple d'un capteur de pression piézorésistif

Un exemple de capteur de pression piézorésistif est représenté sur la figure I.6 [28].

- Une membrane en silicium oxydée de quelques millimètres de côté et quelques microns d'épaisseur recouverte d'oxyde est réalisée en utilisant le micro-usinage du silicium par un agent chimique anisotropique (Hydroxyde de potassium "KOH").
- Les jauges en polysilicium peuvent être déposées par la méthode de dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD), suivi par une étape de gravure et une étape d'implantation ionique (dopage). Ces jauges sont interconnectées en pont de Wheatstone par des pistes d'aluminium. La tension délivrée à la sortie de pont de Wheatstone est proportionnelle à la pression appliquée.

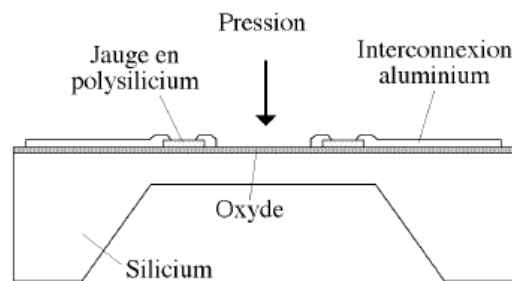


Figure I.6 : Schéma en coupe d'un capteur de pression piézorésistif [28]

5. Capteur de pression capacitif

5.1. Principe de fonctionnement

La détection de la pression d'un capteur de pression capacitif se fait par la mesure d'une variation de capacité. Les avantages de ce capteur sont : une grande sensibilité à la pression et une faible sensibilité à la température [14]. La description de la structure et le principe d'un capteur de pression capacitif est illustré sur la figure I.7.

- La membrane qui constitue le corps d'épreuve se déforme sous l'effet d'une pression appliquée.
- Les armatures métalliques assurent la transformation de cette déformation en variation de capacité.
- Le circuit électronique de traitement et de mesure permet de transformer cette variation de capacité en tension électrique.



Figure I.7 : Schéma synoptique d'un capteur de pression capacitif

5.2. Gap des capteurs de pression capacitifs

Plusieurs paramètres introduits dans la fabrication des capteurs de pression capacitifs. Le gap est l'un des paramètres les plus importants à contrôler pour fabriquer ce type de capteur, car la variation de la capacité dépend fortement de la valeur du gap.

La réalisation du gap souhaité nécessite l'utilisation des techniques sophistiquées et des installations coûteuses. La plupart des capteurs de pression capacitifs sont fabriqués par le silicium en utilisant les techniques de micro-usinage en volume, micro-usinage en surface, ou une combinaison de ces deux techniques. Une autre technique pour fabriquer des capteurs de pression capacitifs est la technologie de circuits imprimés (PCB). Cette technique fournit un procédé de fabrication plus facile et à faible coût. La technologie PCB a été utilisée pour la fabrication de capteurs de pression capacitifs [11,29-32].

Le capteur de pression capacitif rapporté dans les travaux de Jithendra N.Palasagaram et al [29, 30] est fabriqué à l'aide de cette technique de circuit imprimé. La figure I.8 illustre un capteur de pression capacitif MEMS à base du polymère à cristaux liquides (LCP). Ce capteur de pression est fabriqué avec un rayon de diaphragme de 1,6 mm (diamètre de 3,2 mm) et une épaisseur de 50 μm , et fournit une variation de capacité totale de 0,277 pF pour une pression appliquée dans la gamme de 0 à 100 kPa.

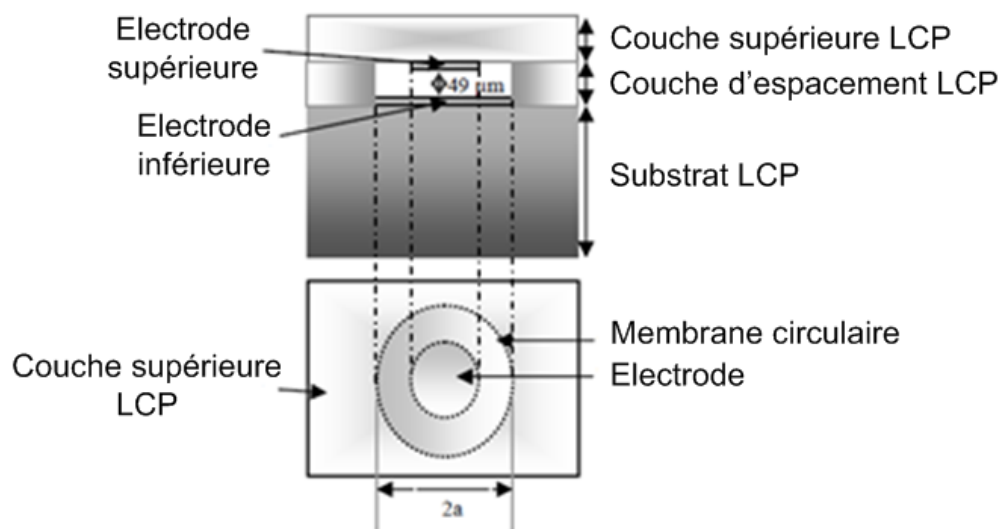


Figure I.8 : Structure d'un capteur de pression capacitif MEMS à base de LCP[29,30]

Il se compose de trois couches différentes :

- Une couche polymère à cristaux liquides LCP (Liquid Crystal Polymer) d'épaisseur de 762 μm avec métallisation de cuivre d'épaisseur de 0,5 μm , utilisée comme un substrat (avec l'électrode inférieure).
- Une couche supérieure LCP d'épaisseur de 50,8 μm avec métallisation de cuivre d'épaisseur de 0,5 μm utilisée comme une membrane (avec l'électrode supérieure).
- Une couche d'espacement LCP d'épaisseur de 50,8 μm utilisée pour définir la cavité du capteur (forme circulaire), qui est formée par un sandwich de deux couches LCP.

Le capteur de pression capacitif MEMS comprend trois couches LCP, où l'une d'eux est utilisée pour définir le gap. L'épaisseur de cette couche d'espacement détermine le gap initial (49 μm) entre les deux électrodes du capteur.

Le processus de fabrication du capteur comporte trois étapes principales :

- Dans la première étape, les couches de métallisation sur la surface supérieure du substrat LCP et la surface inférieure de la couche supérieure de LCP sont réalisées par la méthode de photolithographie et de procédé de gravure humide pour former l'électrode inférieure et l'électrode supérieure du capteur de pression capacitif.

- Dans la deuxième étape, des cavités de forme circulaires de différents diamètres dans l'intervalle de 1 à 4 mm, sont usinées dans la couche d'espacement LCP en utilisant une technique de perforation mécanique ou la technique de gravure profonde par ions réactifs (DRIE). Le diamètre de la membrane circulaire mobile correspond au diamètre de la cavité circulaire dans la couche d'espacement LCP. La figure I.9 montre des photographies des trois couches du capteur de pression capacitif.

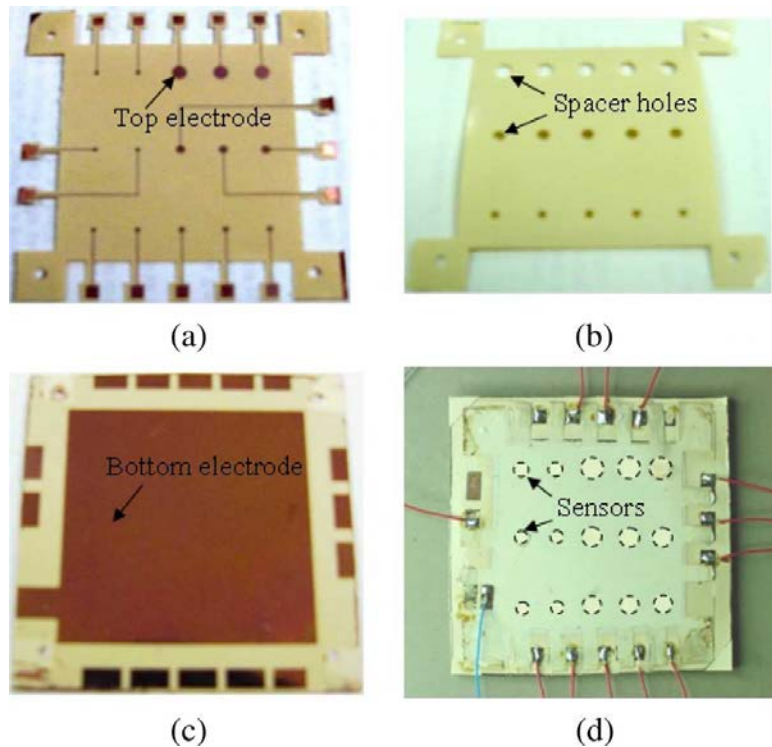


Figure I.9 : Photographies de (a) une couche supérieure de LCP avec électrode en cuivre, (b) une couche d'espacement LCP avec des cavités circulaires, (c) un substrat LCP avec une électrode inférieure commune en cuivre, et (d) un prototype de capteurs de pression capacitifs en matrice 5×3 [29,30]

- Dans la troisième étape, le procédé de laminage implique un alignement des trois couches LCP, suivi par un procédé de soudage par thermo-compression. Deux blocs en acier inoxydable avec des trous d'alignement et les broches sont utilisés pour aligner les trois couches. La séquence des trois couches après alignement est représentée sur la figure I.10.

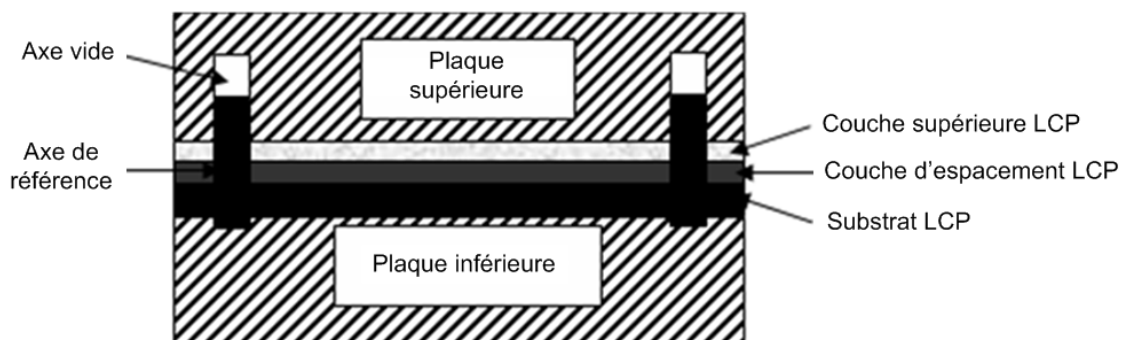


Figure I.10 : Séquence d'alignement des trois couches LCP [29,30]

Le collage par thermo-compression a été effectué en utilisant une presse Carver constituée de deux plaques rectangulaires en aluminium représentées sur la figure I.11.

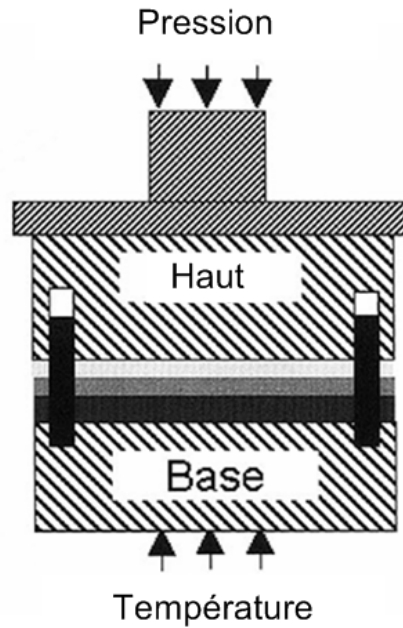


Figure I.11 : Collage par thermo-compression des trois couches LCP[29,30]

Le dispositif de fixation constitué de deux blocs d'acier inoxydable, ainsi que les couches alignées, sont placés entre les plateaux de la presse. Le soudage par thermo-compression est effectué à une pression de 150 psi et à une température de 280 °C qui est la température de fusion de la couche d'espacement LCP. Au cours de ce processus de collage, la température et la pression sont maintenues pendant 30 minutes et l'ensemble est refroidi à température ambiante avant que la pression est relâchée. Enfin, les trois couches sont assemblées et le réseau des capteurs de pression fabriqués est représenté sur la figure I.9 (d).

Le capteur de pression capacitif rapporté dans les travaux de A.Luque et al [11] est fabriqué en utilisant des techniques de plaque de circuit imprimé (technique PCB). La figure I.12 illustre la structure de ce capteur.

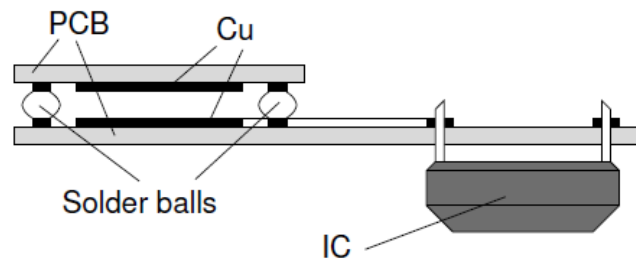


Figure I.12 : Capteur de pression capacitif avec circuit d'oscillateur à relaxation [11]

Ce capteur de pression est fabriqué avec un rayon de diaphragme de 3,5 mm (diamètre de 7 mm), un gap de 16,5 μm . Il fournit une variation de capacité de 20,6 pF à 39,2 pF pour une pression appliquée dans la gamme de 0 à 3000 mbar (300 kPa). Il se compose de deux substrats de PCB se liant avec une soudure étain / plomb (solder balls). Ce dispositif utilise seulement deux couches de PCB, mais le contrôle du gap n'est pas facile.

Le processus de fabrication du capteur comporte les étapes suivantes (figure I.13):

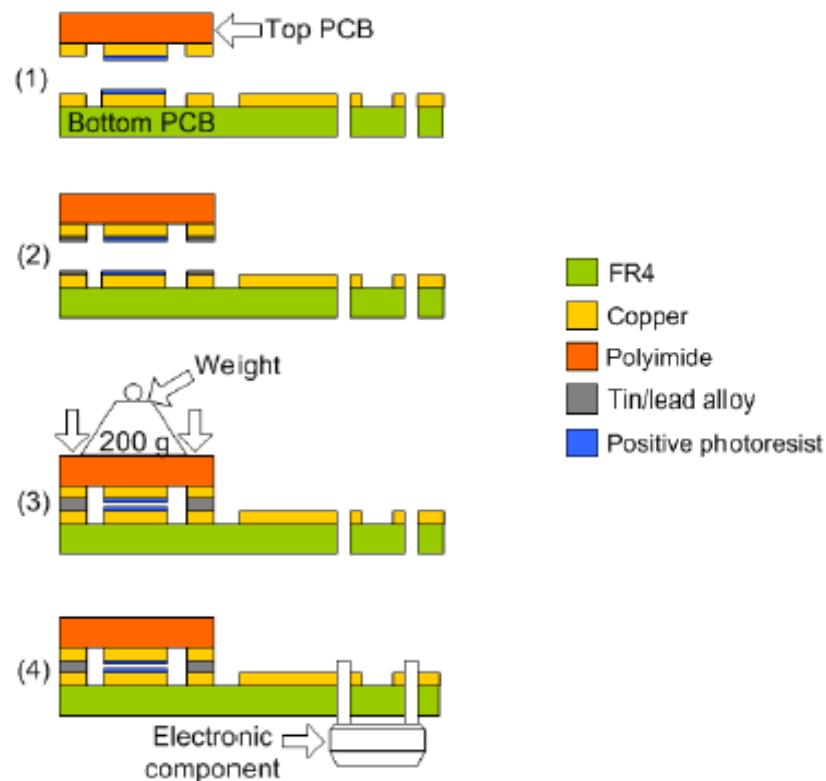


Figure I.13 : Procédé de fabrication du capteur de pression capacitif [11]

- Le procédé de fabrication commence par structurer les électrodes en cuivre (gravure humide) dans les deux PCB (l'un avec un substrat rigide en FR4 et l'autre avec un substrat souple en polyimide) en utilisant le procédé photolithographie. Ensuite, le circuit imprimé inférieur est percé pour effectuer les connexions des composants électroniques (étape 1). Des repères d'alignement sont effectués dans cette étape afin de rendre le placement des électrodes précisément l'un devant l'autre. Une fois que le circuit électronique et la capacité du capteur ont été structurés, les deux PCB sont prêts à être collés.

- A l'étape 2, le processus de collage est réalisé en déposant une couche étain / plomb sur les PCB. Pour protéger les électrodes au cours de cette étape, en les empêchant de se lier ensemble, un masque adhésif en plastique est placé sur chaque électrode.

La couche de soudure étain/plomb préchauffée est étalée sur toute la surface de sorte que le collage se fait uniquement dans les parties en cuivre.

- Ensuite, à l'étape 3, les deux PCB sont alignés l'une devant l'autre. Ils sont serrés avec du ruban adhésif et mis sur une plaque chauffante à 250 °C pendant cinq minutes. Un poids de 200 grammes est placé sur la plaque supérieure de PCB pour assurer la soudure uniforme. Après ce temps, la température diminue au-dessous du point de fusion, les deux PCB sont collés ensemble.

- Enfin, à l'étape 4, les composants électroniques (les résistances et le circuit intégré) sont placés dans la plaque inférieure de PCB. Le prototype final fabriqué et le circuit d'oscillateur à relaxation sont représentés sur la figure I.14.

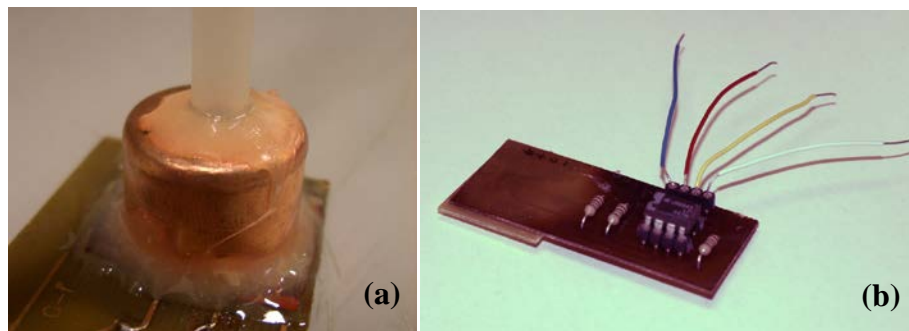


Figure I.14 : (a) Capteur de pression capacitif fabriqué, (b) circuit d'oscillateur à relaxation avec le capteur fabriqué sur la même plaque inférieure PCB [11]

Les travaux de M.Zagnoni et al [31], ont montré la fabrication d'un capteur de pression capacitif différentiel pour mesurer la pression aérodynamique. Les dimensions de ce capteur sont 13 à 16 cm de longueur, 1,5 à 3 cm de largeur, et l'épaisseur totale est inférieure à 1 mm. Ce capteur est composé de trois couches (figure I.15) :

- Une base en fibre de verre (FR4) recouverte de cuivre rigide.
- Une entretoise en fibre de verre rigide d'épaisseur comprise entre 510 et 770 μm . Ces valeurs élevées du gap impliquent des valeurs élevées de la surface d'électrodes, dans ce cas, dans l'ordre de centimètres, pour parvenir à une capacité raisonnable.
- Une couche de polyimide (Kapton) déformable de rayon de 1 cm et d'épaisseur de 25 μm , recouverte de cuivre. Les couches sont fixées l'une à l'autre au moyen d'un ruban bi-adhésif d'épaisseur de 50 μm , structurées dans la même forme que la couche d'espacement. La figure I.16 illustre la photographie du capteur fabriqué.

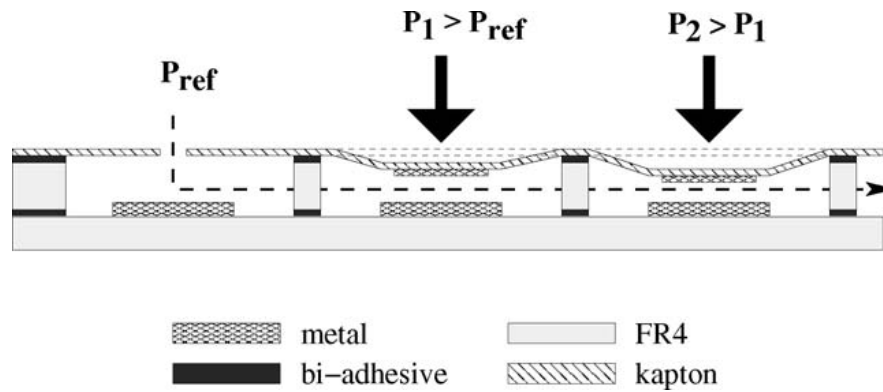


Figure I.15 : Structure du capteur de pression différentielle en PCB [31]

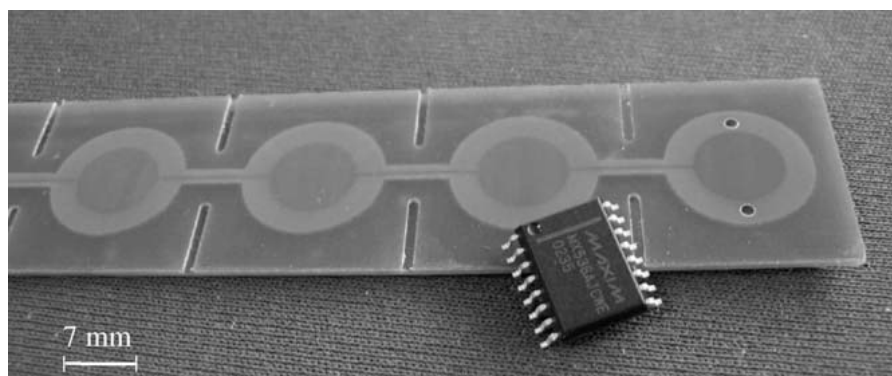


Figure I.16. Photographie du capteur fabriqué [31]

Ils ont fabriqué deux types de capteurs avec une épaisseur différente des couches d'espacement. Ce capteur fournit une variation de capacité de 2,3 pF à 4,3 pF pour une pression appliquée dans la gamme de 0 à 2 kPa. La sensibilité est de 0,5 jusqu'à 2,5 fF/Pa pour une couche d'espacement d'épaisseur de 770 μm , et de 0,67 à 5 fF/Pa pour une couche d'espacement d'épaisseur de 510 μm .

Semblable à ce dernier dispositif, Petropoulos et al [32] ont fabriqué un capteur capacitif flexible par la technologie de PCB, il est utilisé comme un capteur de pression ou un capteur tactile. Dans ce cas, le gap est également défini par deux couches adhésives et une entretoise de kapton (figure I.17). Le choix et les dimensions des matériaux bénéficient de la performance de l'application. En outre, le procédé de fabrication est simple et intéressant pour le prototypage rapide.

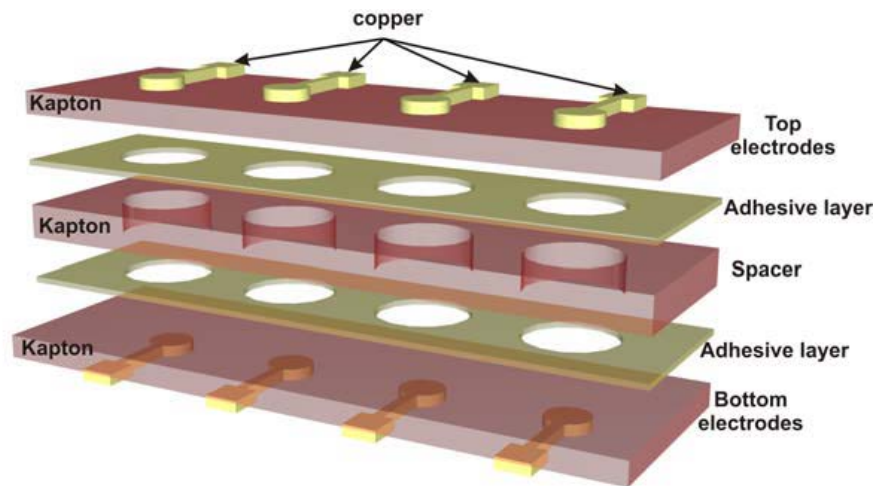


Figure I.17 : Structure du capteur capacitif flexible [32]

Le capteur de pression capacitif est constitué des trois couches flexibles :

- Les électrodes en cuivre résident sur les surfaces extérieures de la couche supérieure et la couche inférieure de polyimide (Kapton). La formation des structures en cuivre est obtenue par des procédés classiques de photolithographie et de gravure chimique.
- Une couche de polyimide (Kapton) intermédiaire est utilisée pour constituer des cavités entre les couches flexibles supérieures et inférieures. Des couches supplémentaires de matériaux adhésifs sont placées pour lier l'ensemble.
- L'étape finale du processus est le collage des couches de polyimide (Kapton) en utilisant le soudage par thermo-compression. Une photographie du capteur de pression capacitif est représentée sur la figure I.18.

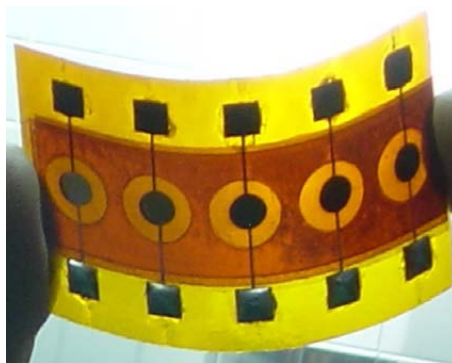


Figure I.18 : Photographie du capteur de pression capacitif [32]

Ils ont fabriqué deux types de capteurs :

- Le capteur (C1) est constitué d'électrodes de 2 mm de diamètre et d'une cavité cylindrique de 4 mm de diamètre. Ce capteur fournit une variation de capacité de 50 fF pour une pression appliquée dans la gamme de 0 à 400 mbar (40 kPa) et la sensibilité est 0,14fF/mbar.
- Le capteur (C2) est constitué d'électrodes de 4 mm de diamètre et d'une cavité cylindrique de 8 mm de diamètre. Ce capteur fournit une variation de capacité de 250 fF pour une pression appliquée dans la gamme de 0 à 400 mbar (40 kPa) et la sensibilité est 0,78 fF/mbar.

D'autres dispositifs ont été développés en utilisant la technologie PCBMEMS, par exemple, des capteurs de déplacement [33] et des capteurs d'environnement [34]. De nombreux systèmes micro fluidiques sont construits en utilisant la technologie PCBMEMS, par exemple, le débit des systèmes d'analyse d'injection (FIA) [35], [36], et d'autres plates formes micro fluidiques [37], [38]. D'autres structures de capteurs, tels que le réseau de cellules de capteur électrochimique ou un capteur d'écoulement [39], peuvent être générées en combinant PCBMEMS avec d'autres technologies. Les avantages de cette technologie sont bien connus : faible coût, processus de fabrication facile, robustesse et l'intégration avec d'autres dispositifs.

En prise en compte de ces avantages, et dans ce contexte, notre objectif est la conception et le développement et la fabrication d'un capteur de pression capacitif en utilisant la technologie PCBMEMS.

6. Les microsystèmes

6.1. Définition et applications des microsystèmes

Les microsystèmes (MEMS en anglais) sont des systèmes miniaturisés intelligents qui combinent de manière monolithique des capteurs et des actionneurs et des composants microélectroniques [40,41]. Les dispositifs MEMS sont fabriqués par des techniques de micro-usinage collectives issues de la fabrication des circuits intégrés [42].

Ils sont définis comme des dispositifs généralement de petites dimensions micrométriques. La technologie des microsystèmes peut être appliquée en utilisant une grande variété de matériaux et de techniques de fabrication et le choix dépendra du type de dispositif destiné à être fabriqué. La figure I.19 présente la multidisciplinarité dans la conception et la réalisation des microsystèmes.

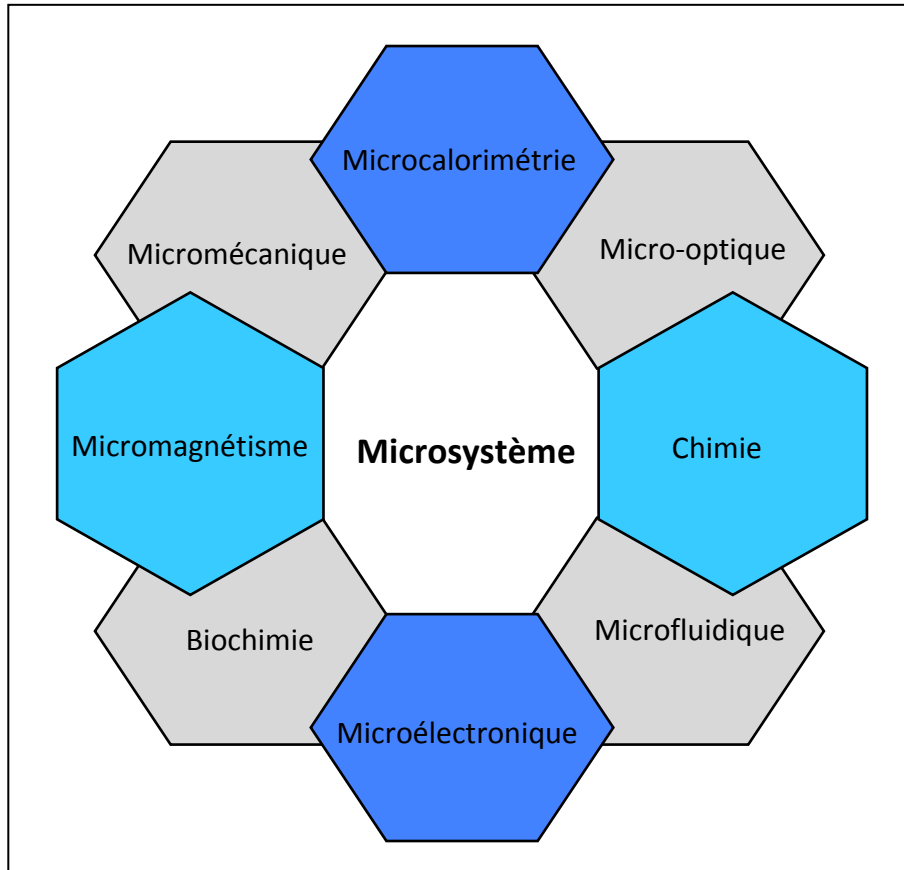


Figure I.19 : Multidisciplinarité dans la conception et la réalisation des microsystèmes [43]

Les domaines d'applications des microsystèmes les plus importants sont [44] :

➤ L'industrie automobile [45] où les applications concernent en priorité des capteurs de pression, de température, de flux et les systèmes 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.

➤ L'industrie aérospatiale [46] est l'un des domaines où l'emploi des microsystèmes va prendre une place de plus en plus prépondérante, car les aspects de miniaturisation et de fiabilité sont très importants dans les satellites. Dans un satellite, un microsystème devra résister à des radiations importantes présentes dans l'espace, pour que son fonctionnement ne soit pas perturbé. Les principaux microsystèmes utilisés sont des systèmes de positionnement par visée de la terre et des gyromètres.

➤ Le domaine aérien est un grand consommateur de capteurs réalisés en technologie microsystèmes. L'apport des microsystèmes se retrouve surtout dans le gain en termes de

miniaturisation et de réduction des coûts des capteurs, 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 [47] ou de la température en divers points, pour une plus grande aide au pilotage.

➤ L'industrie biomédicale est à ce jour un grand domaine de recherche pour les microsystèmes dans lequel de nouvelles possibilités d'application apparaissent. notamment l'analyse biomédicale [48]. Les microsystèmes sont souvent utilisés pour :

- la conception d'instruments de diagnostic (mesure de pH du sang avec des ISFET "Ion Sensitive Field Effect Transistor", mesure du taux de glucose ou de sodium).
- des fins thérapeutiques (microélectrodes de stimulation. injection médicamenteuse par micro pompes, mesure de l'activité neuronale).
- dans le domaine de l'analyse biomédicale avec l'apparition des puces à ADN (acide désoxyribonucléique) qui sont présentées comme une vraie révolution pour l'analyse biochimique.

6.2. Les principaux matériaux utilisés pour les microsystèmes

Le matériau de base est le silicium (Si) ainsi que ses dérivés tels que l'oxyde de silicium (SiO_2), le nitrure de silicium (Si_3N_4), le carbure de silicium (SiC). Ces matériaux sont déposés comme une couche mince d'épaisseur qui varie entre une dizaine d'Angström et plusieurs dizaines de micromètres. Divers métaux servent aussi à des liaisons électriques ou comme surface d'accroche biochimique tels que l'aluminium, le titane, l'or ou le cuivre. On peut joindre à cette liste quelques polymères tels que la résine photosensible négative (SU-8), le polydiméthylsiloxane (PDMS) et les polyimides (PI). Une brève description des matériaux les plus utilisés, sera détaillée par la suite.

6.2.1. Silicium

Le silicium est le matériel de base le plus utilisé dans la micro fabrication grâce à ses propriétés physiques, mécaniques et électriques par rapport à d'autres matériaux. Au cours des dernières décennies, le silicium et ses composés (SiO_2 , Si_3N_4 , SiC, ... etc) a permis d'innover et explorer de nouveaux domaines d'application s'étendant au-delà de la fabrication des

circuits intégrés. Comme un exemple d'application, les capteurs à base de silicium ont été développés pour fabriquer des accéléromètres, capteurs de pression, capteurs de température, capteurs chimiques. Il devient évident que le silicium est la plate-forme appropriée sur laquelle les composants électroniques, mécaniques, thermiques, optiques, et même les fonctions de dynamique des fluides peuvent être intégrées. Des plaquettes de silicium (wafer) sont conçues à des prix très bas pour l'industrie des circuits intégrés et ainsi pour les dispositifs MEMS [49].

Le silicium possède une structure de type diamant, forme dérivée de la structure cubique à faces centrées (CFC). Le silicium comme la plupart des matériaux semi-conducteurs, il peut être dopé avec des impuretés pour modifier sa conductivité [50]. Il existe trois formes différentes de la structure de silicium : monocristalline, poly cristalline ou amorphe (illustrées sur la figure I.20).

- Le silicium monocristallin est d'usage pour fabriquer des substrats circulaires de diamètre allant de 100 mm jusqu'à 300 mm dont l'épaisseur varie de 525 μm jusqu'à 650 μm . Ce matériau peut être produit avec une grande pureté et de la qualité (contenant très peu de défauts de structure). Une structure monocristalline est une structure atomique tridimensionnelle de même orientation cristallographique, qui s'appelle le grain, dans laquelle les atomes occupent des emplacements spécifiques.

- Le silicium polycristallin et le silicium amorphe peuvent être déposés comme des couches minces avec une épaisseur typique inférieure à 5 μm . Dans un matériau polycristallin, l'orientation du réseau n'est pas la même dans tout le matériau. Les grains sont séparés par des joints de grains, qui sont des zones dans lesquelles le réseau cristallin est "perturbé" puisqu'il s'agit d'une transition entre deux orientations. Le silicium amorphe, où les atomes de Silicium ne respectent aucun ordre et aucune orientation [50].

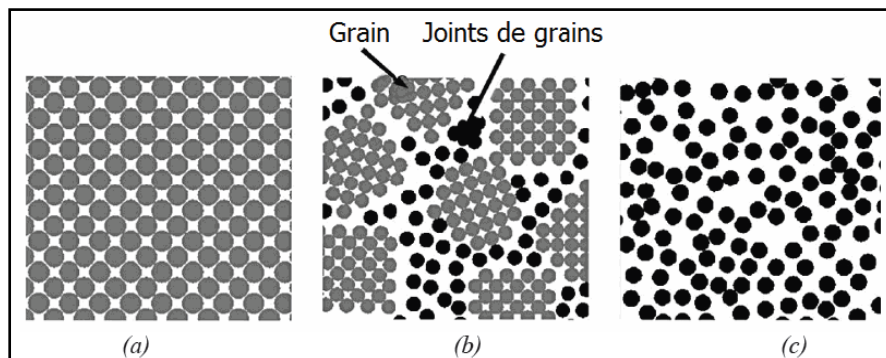


Figure I.20: Représentation schématique des structures (a) cristalline, (b) polycristalline, et (c) amorphe dans un matériau de Si [50]

6.2.2. La résine photosensible négative SU-8

La SU-8 est un polymère de type époxy. Un polymère de façon générale est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) [51]. Un polymère que l'on trouve peut être constitué de différentes tailles et de compositions variées, est caractérisé par leur [51] :

- Composition chimique moyenne.
- Masse moléculaire moyenne.
- Degré de polymérisation.
- Structures (amorphe ou semi-cristallin).

La SU-8 est définie comme une résine époxy photosensible négative dont le photo-amorceur est sensible à l'ultraviolet UV (365nm - 436nm). Elle est composée principalement de trois composants [52] :

- la résine époxyde EPON® SU-8 (ou EPIKOTE®157), disponible sous forme de granulés et fabriquée par Shell Chemical.
- le solvant organique qui permet de solubiliser la résine et d'ajuster la viscosité des formulations.
- le photo-amorceur, un sel de triarylsulfonium, qui amorce la réaction de polymérisation.

La figure I.21 illustre la structure chimique de la résine SU-8.

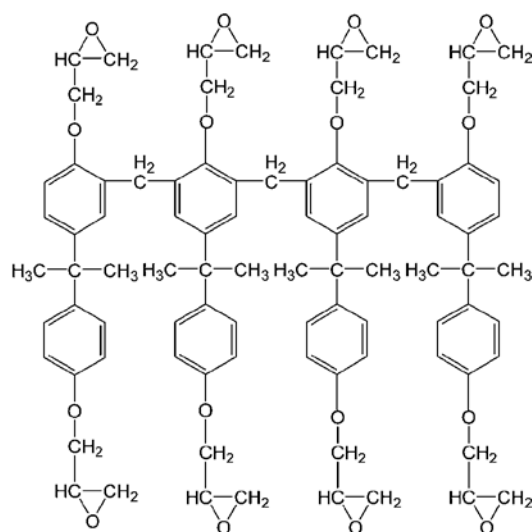


Figure I.21 : Structure chimique de la résine SU-8 [53]

Cette résine a été développée et brevetée en 1989 par IBM-Watson Research Center (USA), ce matériau a été ensuite adapté au milieu des années 90 par une collaboration entre " l'EPFL (école polytechnique fédérale de Lausanne), Insitute of Microsystems" et " IBM-Zurich " pour des applications dédiées à la structuration de MEMS [54-55], d'autre utilisation dans les systèmes micro fluidiques [56] et les microcomposants optiques (exemple les microlentilles de Fresnel) [57]. Cette résine, actuellement commercialisé par MicroChem. Corp. [58].

Un exemple d'utilisation de la SU-8 est illustré sur la figure I.22 (une photographie en microscope électronique à balayage (MEB) de la microstructure réalisé en SU-8). H. Lorenz et son équipe [55,59] ont permis d'élaborer de nombreuses structures en SU-8 à un rapport d'aspect élevé (le rapport de la largeur à la hauteur) : de plusieurs millimètres de hauteur pour quelques centaines de micromètres de largeur.

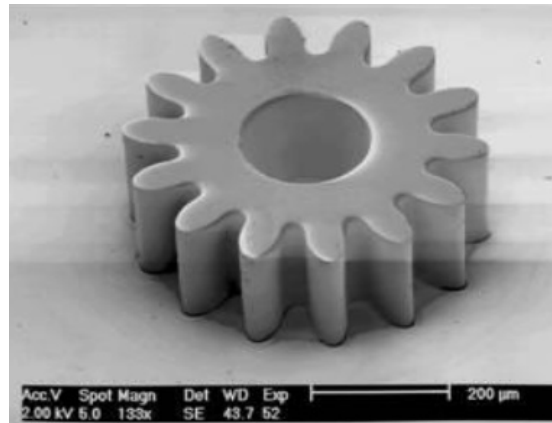


Figure I.22 : Photographie MEB de microstructure réalisé en SU-8 (Roue crantée de 200 µm d'épaisseur)[55]

La SU-8 est une résine époxy dont la structure chimique de la fonction de base est Ether Glycidique de Bisphénol A novolaque [60]. La SU-8 se divise en plusieurs séries telles que la SU-8 ; SU-8 série 20xx ; SU-8 série 20xx Flex ; SU-8 série 30xx. Ces séries, se distinguent les unes des autres par leur viscosité. Ils sont utilisées pour réaliser des couches minces (films) d'épaisseur allant de quelques centaines de nanomètres jusqu'au millimètre. Le choix d'une résine dépend donc de l'épaisseur des films à réaliser. En effet, les différences se situent dans la composition des résines, initialement le solvant utilisé pour la résine SU8 était la γ butyrolactone (GBL). Récemment, de nouvelles séries de résines SU-8, appelées SU-8 20xx, SU-8 20xx Flex, sont apparues. Ces dernières résines, sont solubles dans le cyclopentanone et présentent de meilleures propriétés de revêtement, d'adhésion et de réduction des contraintes internes de la résine [58].

La SU-8 série 30xx, possède une propriété d'amélioration de l'adhérence sur un grand nombre de substrat, en particulier le verre et les métaux.

La résine photosensible SU-8 série 20xx est le polymère choisi pour la fabrication de la plupart de nos capteurs en raison de l'utilisation de technologies ou d'équipements de fabrication relativement simple, ainsi que le faible coût du produit lui-même. Elle est biocompatible et possède une bonne résistance chimique et mécanique. Actuellement c'est l'un des polymères les plus utilisés dans la fabrication de microsystèmes en raison de l'intérêt des propriétés qu'elle détient.

Un tableau récapitulatif (tableau I.1) montrant les principales propriétés de ce polymère est illustré ci-dessous [61,62,63] :

Tableau I.1 : Caractéristiques de la résine SU-8 Série 2000 MICROCHEM

Propriétés		Valeur
L'épaisseur maximale en un seul dépôt		250 um
Rapport d'aspect		10 : 1
Module de Young (GPa)		4,4
Coefficient de Poisson		0,22
Coefficient d'expansion thermique CTE (ppm/°C)		52
La conductivité thermique (W/mK)		0,3
Allongement à la rupture (%)		6,5
Adhérence à un substrat (MPa)	Si	53
	SiN	43
	Ni	45
	Au	29
	Cu	38
	verre	Pauvre

En plus des propriétés observées dans le tableau ci-dessus, qui se réfèrent à des propriétés thermiques et mécaniques. D'autres propriétés sont mentionnées ci-dessous [64]:

- Un polymère biocompatible, ce qui le rend intéressant dans des applications microfluidiques.
- Il est hydrophobe, cette propriété est importante lorsque la fabrication de dispositifs microfluidiques empêche le liquide de coller aux parois.

- Une bonne résistance mécanique et chimique. Il est plus rigide que le PDMS et par conséquent le risque de déformation des structures est réduit au minimum.
- Une bonne isolation électrique et une stabilité thermique.
- Du fait d'être transparent, la possibilité de voir la façon qu'effectuent les fluides dans les dispositifs microfluidiques.

6.2.3. Polydiméthylsiloxane PDMS

Le Polydiméthylsiloxane (PDMS) est un polymère largement utilisé pour effectuer des microsystèmes fluidiques qui représentent près de 90 % des réalisations microfluidiques. C'est un polymère à basse densité (masse density : $0,97 \text{ kg / m}^3$) et un module de Young faible (360-870 kPa) [65]. Il se présente sous la forme d'un liquide visqueux, transparent dans le visible. Il a des propriétés intéressantes pour la réalisation de dispositifs microfluidiques comme l'hydrophobie et la biocompatibilité. La formule chimique du motif de base est représentée sur la figure I.23.

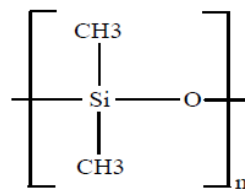


Figure I.23 : Formule chimique du PDMS

Le Polydiméthylsiloxane (PDMS) est défini comme un élastomère. On peut l'obtenir en mélangeant le PDMS de forme liquide avec un agent de réticulation puis le chauffer pour activer les réactions de réticulations (PDMS réticulé). A titre d'exemple, la figure I.24 illustre les étapes de réalisation d'un microcanal en PDMS [66].

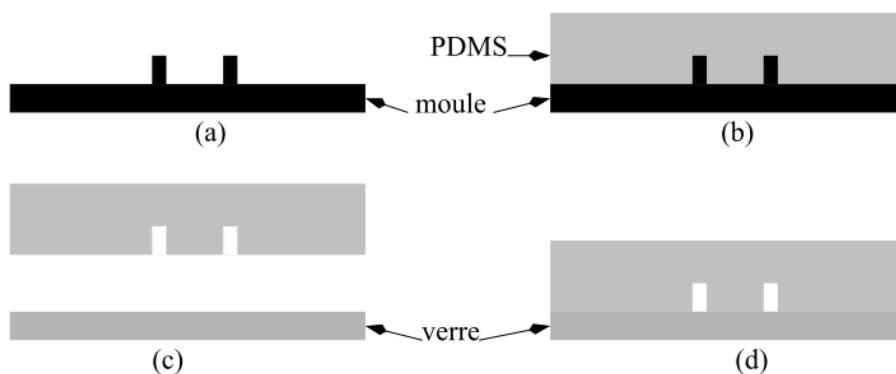


Figure I.24 : Etapes pour la réalisation d'un microcanal en PDMS,
 (a) Fabrication du moule, (b) Réticulation du PDMS, (c) Nettoyage plasma,
 (d) Collage [66]

- Le microcanal en PDMS est réalisé par moulage. Le moule peut se faire à l'aide d'une gravure humide sur un substrat en silicium ou par la photolithographie avec une résine négative SU-8 (étape a).
- Une étape de dégazage des bulles d'air produit dans le mélange de PDMS et l'agent réticulant (proportions 10:1), ensuite le moule est rempli par ce mélange. La durée et la température de l'étape de réticulation déterminent les caractéristiques mécaniques de l'élastomère (une température de 72°C pendant 2 heures), (étape b) [67].
- Le moule est retiré après le traitement thermique et la structure de PDMS réticulé est obtenue. Le substrat en verre et le PDMS réticulé sont mis en traitement par plasma (étape c).
- La fermeture des canaux s'effectue alors à l'aide d'un substrat en verre et le collage est fait après le traitement du plasma. Ce dernier permet d'améliorer le contact entre les deux substrats (étape d).

7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe de détection d'un capteur de pression, ainsi que l'état de l'art sur les capteurs de pression capacitifs, les différentes méthodes de fabrication de ces capteurs, l'utilisation uniquement de la plaque de circuit imprimé (PCB) ou par la combinaison PCB-MEMS. Ensuite un bref rappel sur les matériaux les plus utilisés dans les microsystèmes. Parmi ces matériaux MEMS, la résine négative SU-8 qui possède des propriétés intéressantes: une bonne résistance chimique et mécanique, une excellente adhésion sur la plupart des substrats et une bonne isolation électrique et thermique.

Notre étude sera donc consacrée à réaliser un capteur de pression capacitif en utilisant la technologie PCBMEMS. Le prochain chapitre est destiné à étudier d'une manière descriptive les différentes méthodes de fabrication concernant la réalisation de capteur de pression.

Chapitre II

Techniques de fabrication des capteurs de pression

1. Introduction

Après avoir énuméré les matériaux les plus répandus dans la fabrication des capteurs de pression, il est nécessaire de présenter les différentes techniques connues et utilisées pour réaliser ces capteurs. Dans un premier temps, nous aborderons les techniques de déposition (dépôt physique et chimique), les techniques de photolithographie, les techniques de gravure ainsi que les techniques MEMS (micro usinage en surface et en volume). Dans un second temps, nous présenterons la technologie SU-8 ainsi le processus " BETTS " (collage, UV exposition et le transfert technique dans SU-8), et dans un dernier temps, une brève description sur les techniques de collage et aussi un exemple de fabrication d'un capteur de pression capacitif en silicium.

2. Les processus de fabrication des capteurs de pression

2.1. Techniques de déposition

Les procédés de micro usinage sont basés sur la technologie du dépôt de couches minces et épaisses. Cette technique est nécessaire pour réaliser une couche conductrice, isolante ou de masquage dans un procédé. Cette dernière n'utilise pas directement le matériau du substrat. Par exemple, les films épais sont utilisés pour construire des capteurs de pression ou des microphones, où les membranes doivent être fabriquées. Les épaisseurs de couches obtenues et leurs caractéristiques (électriques, piézoélectriques, mécaniques...) sont très dépendantes des procédés utilisés : la déposition physique en phase vapeur (PVD : Physical Vapor Deposition) ainsi que la déposition chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) qui sont les méthodes les plus utilisées [68,69].

Parmi les méthodes de dépôt par voie physique ou PVD, nous pouvons citer :

- L'évaporation thermique.
- La pulvérisation cathodique.
- L'ablation laser.

Dans ces procédés, le matériau a été déposé et placé physiquement sur le substrat, sans aucune réaction chimique traditionnelle.

Parmi les méthodes de dépôt par voie chimique ou CVD, nous pouvons citer :

- Le dépôt à basse pression (LPCVD).
- L'oxydation thermique.
- L'épitaxie.
- L'électrodéposition.

Ces procédés sont basés sur la création de couches minces solides obtenue directement par des réactions chimiques avec des gaz, avec des composés liquides ou à partir du matériau du substrat.

Le choix entre ces procédés dépend essentiellement des coûts de dépôt, des performances souhaitées et de l'application visée.

2.1.1 Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)

Le dépôt physique en phase vapeur ou PVD (Physical Vapor Deposition) comprend les technologies de dépôt des films métalliques ainsi que des films diélectriques. Le matériau a été déposé et mis en phase vapeur par un procédé physique. La technique de PVD repose sur la création d'un milieu sous vide et contrôlé afin que les atomes de la cible (élément à déposer) quittent celle-ci et aillent se déposer sur le substrat. Les deux principales techniques pour la méthode PVD sont l'évaporation sous vide et la pulvérisation.

- ***Evaporation sous vide***

Le principe de base de la technique d'évaporation consiste à chauffer un matériau jusqu'à la température de fusion par effet Joule, canon à électrons ou d'autres sources d'échauffements, afin de le rendre en phase vapeur. Le matériau évaporé va se déposer par condensation sur le substrat dans un milieu sous vide. Pour améliorer l'homogénéité de la couche déposée, il est nécessaire de soumettre le substrat à un mouvement de rotation ou de translation par rapport à la source d'évaporation [70]. Figure II.1 montre le principe de cette technique. En effet, toutes les techniques d'évaporation utilisent ce principe, mais les méthodes diffèrent par la façon dont le matériau source est chauffé et évaporé. Les inconvénients de cette méthode sont [69] :

- Le nombre de matériaux à déposer est limité.
- La maîtrise des dépôts de matériaux combinés est difficile (alliages par exemple).
- Les taux d'impuretés qui restent importants.

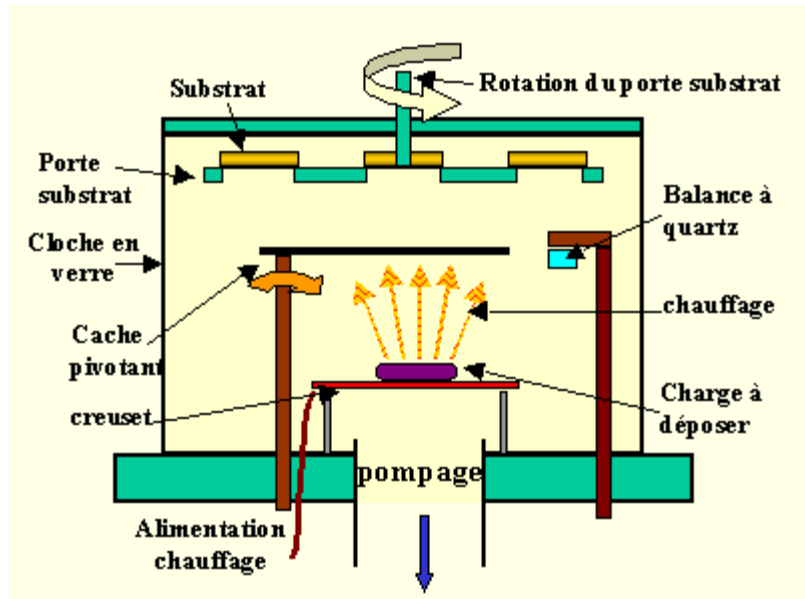


Figure II.1: Dépôt par évaporation thermique [70]

- **La pulvérisation cathodique**

La pulvérisation cathodique est une technique utilisée pour déposer des films minces des différents matériaux (métaux, céramiques et diélectriques) sur un substrat.

Le substrat est placé dans une enceinte sous vide avec le matériau à déposer (désigné par la cible) et d'un gaz inerte de l'argon. Un plasma est créé entre l'anode reliée à la masse (le substrat) et la cathode polarisée négativement (la cible), à l'aide d'une source d'énergie de haute tension continue ou alternative, le plus souvent la décharge de radio fréquence (RF), donc le gaz est ionisé. Les ions du plasma sont accélérés contre la cible, l'énergie cinétique des ions bombardant est suffisamment élevée pour libérer des atomes de la surface de la cible. Le matériau à déposer, maintenant sous forme de vapeur, se condense sur toutes les surfaces, y compris le substrat. Ce principe de pulvérisation est commun pour toutes les technologies de pulvérisation. Les différences sont typiquement dans le procédé de bombardement ionique de la cible.

La pulvérisation est intéressante, surtout si un champ magnétique est introduit dans la chambre. Le champ magnétique permet d'améliorer le flux d'atomes vers l'anode et d'obtenir un revêtement uniforme sur toute la surface exposée, l'adhésion est excellente et il n'y a aucune limite en ce qui concerne les matériaux cibles.

Le procédé de pulvérisation cathodique peut être étendu à la pulvérisation cathodique de plusieurs cibles à la fois (co-pulvérisation cathodique), par exemple, la pulvérisation cathodique de nichrome (Ni, Cr) [68,71]. Le principe de pulvérisation est représenté sur la figure II.2 .

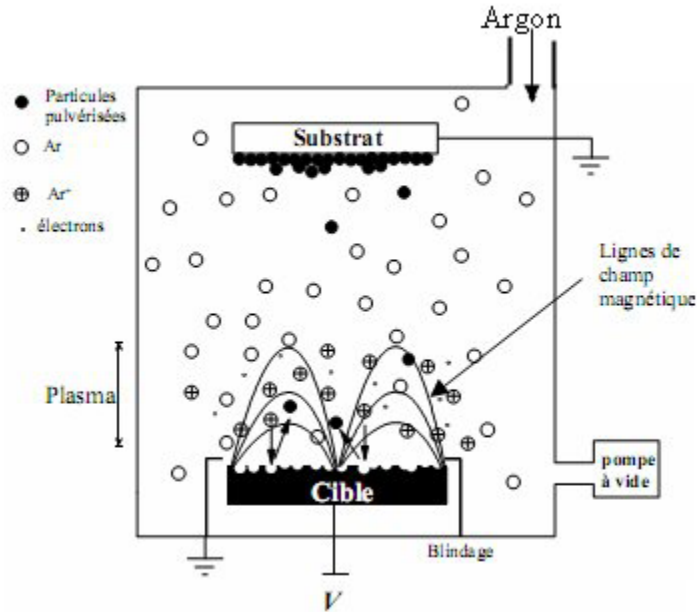


Figure II.2 : Schéma de principe de la pulvérisation cathodique [72]

2.1.2 Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD)

Le dépôt chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical Vapor Deposition) consiste à placer le substrat à l'intérieur du réacteur, dans lequel un certain nombre de gaz est mis en place. Le principe de base est que la réaction chimique se produit entre les gaz réactifs en phase vapeur qui réagissent à la surface du substrat chauffé, afin de déposer un film solide.

La méthode de CVD est utilisée pour traiter des films minces avec une bonne uniformité. Les avantages majeurs de cette technique sont : une faible dégradation de la surface comparée à celle obtenue par la méthode de pulvérisation et une grande variété de matériaux à déposer. Par contre, les inconvénients sont : la nécessité d'une température et d'une pression élevée et l'utilisation de produits corrosifs et de gaz dangereux.

Il existe différents types de dépôts CVD selon le mode d'activation, les techniques LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) et PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) qui sont les plus utilisées dans l'industrie. Les matériaux les plus souvent déposés par ces méthodes sont l'oxyde de silicium (SiO_2), le nitrure de silicium (Si_3N_4) et le polysilicium [73,74].

En effet, le choix de la technique dépend de plusieurs paramètres : la qualité des films à déposer, la pression, la température de dépôt, le type de gaz dopant utilisé et la compatibilité avec les structures qui sont déjà présentes sur le substrat [75].

L'une des formes simplifiées de procédé CVD est illustrée à la figure II.3 [68]. Les substrats sont positionnés sur une table fixe ou en rotation, dont la température est élevée au niveau requis par les éléments chauffants.

Il existe dans ce cas trois raisons qui sont:

- les oxydes sont décomposés et évaporés de la surface de la plaquette.
- la surface est lissée, souvent à l'échelle atomique.
- la décomposition des gaz de source par effet thermique, qui est nécessaire pour la déposition de la couche.

L'ouverture supérieure de la chambre permet d'introduire le gaz porteur, qui peut être ajouté aux différents précurseurs et dopants. Ces additifs, tout en étant portés sur la surface chauffée du substrat, forment une couche mince. Le mélange gazeux circule à partir du cône de distribution au-dessus de la surface supérieure des plaquettes et sort à travers les sorties.

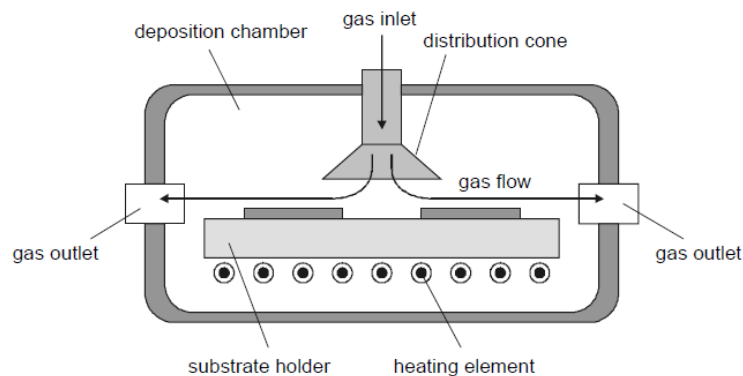


Figure II.3 : Structure simplifiée d'une chambre du réacteur CVD [68]

- **Oxydation thermique**

L'oxydation thermique est une méthode très efficace permettant d'obtenir des films d'oxyde de silicium (SiO_2) : le matériau le plus utilisé dans la fabrication des composants en microélectronique. C'est une étape commune par rapport aux autres procédés technologiques [76].

Le principe de l'oxydation thermique consiste à placer des substrats de silicium dans un four porté à des températures généralement comprises entre 900°C et 1200°C [28]. Cette méthode consiste à oxyder le silicium depuis la surface du substrat pendant un certain temps dépendant de l'épaisseur de la couche d'oxyde désirée. La croissance de couche d'oxyde peut se faire sous un flux d'oxygène (oxydation sèche) ou de la vapeur d'eau (oxydation humide) [77]. La couche de silicium initiale réagit avec l'élément oxydant pour former le SiO_2 , où une partie du silicium a été consommée lors de l'oxydation et donc l'épaisseur finale de l'oxyde sera composé de 54 % de nouvelle croissance et de 46 % de silicium oxydé (figure II.4) [76].

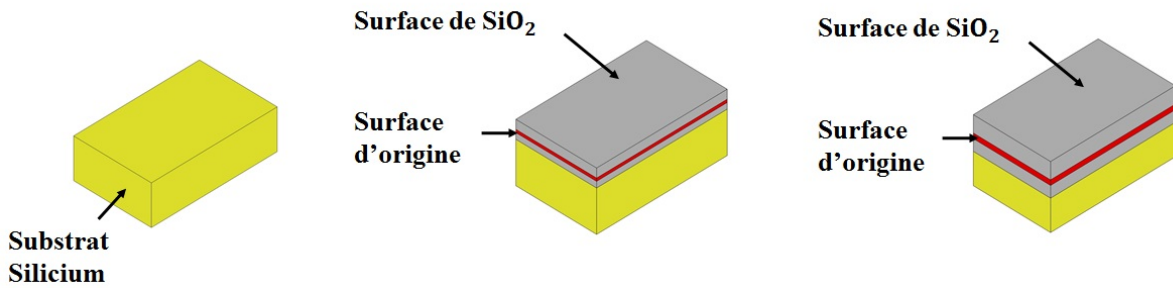
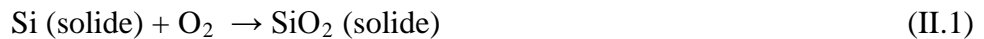


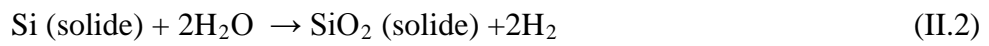
Figure II.4 : Oxydation du Silicium [78]

Les réactions chimiques dans l'opération d'oxydation sont les suivantes :

- Oxydation sèche (l'oxygène O_2 utilisé) :



- Oxydation humide (la vapeur d'eau H_2O utilisée) :



La vitesse d'oxydation dépend de la pression du gaz oxydant, de la température, de la durée d'oxydation et du type de processus (sec ou humide). En général, pour une température donnée, la croissance de l'oxydation humide est plus rapide que celle de l'oxydation sèche pour obtenir une couche d'oxyde d'épaisseur donnée [28]. Aussi, plus la température est élevée, plus la croissance est rapide. Cependant, la couche d'oxyde peut servir comme un masque d'implantation, de diffusion de dopants ou d'isolation électrique entre les différents niveaux de métallisation [74].

2.2. La photolithographie

La photolithographie est le seul processus le plus important qui permet aux circuits intégrés et les MEMS à produire de manière fiable avec des dimensions microscopiques et en grand volume.

La photolithographie sert, avec la gravure, à réaliser des différentes structures micrométriques. Ce procédé, commun à plusieurs techniques de gravure de volume ou de surface, permet de reproduire un motif désiré sur la surface d'un substrat pour définir la zone délimitant la gravure.

Le principe de la photolithographie consiste à irradier un film de matériau photosensible, appelé résine (sensible au rayonnement ultraviolet U.V), au travers d'un masque qui est défini l'image du circuit. Une partie de l'intensité lumineuse est absorbée par la couche, engendrant des modifications physico-chimiques de la résine, les zones exposées deviendront solubles, dans le cas des résines positives, ou insolubles, quand il s'agit de résines négatives. Après une étape de développement, les motifs de la résine apparaissent, créant à leur tour un masque sur le substrat. Ce dernier permet ensuite de délimiter les régions du substrat qui subiront un traitement de gravure. Le processus de photolithographie est montré dans la Figure II.5.

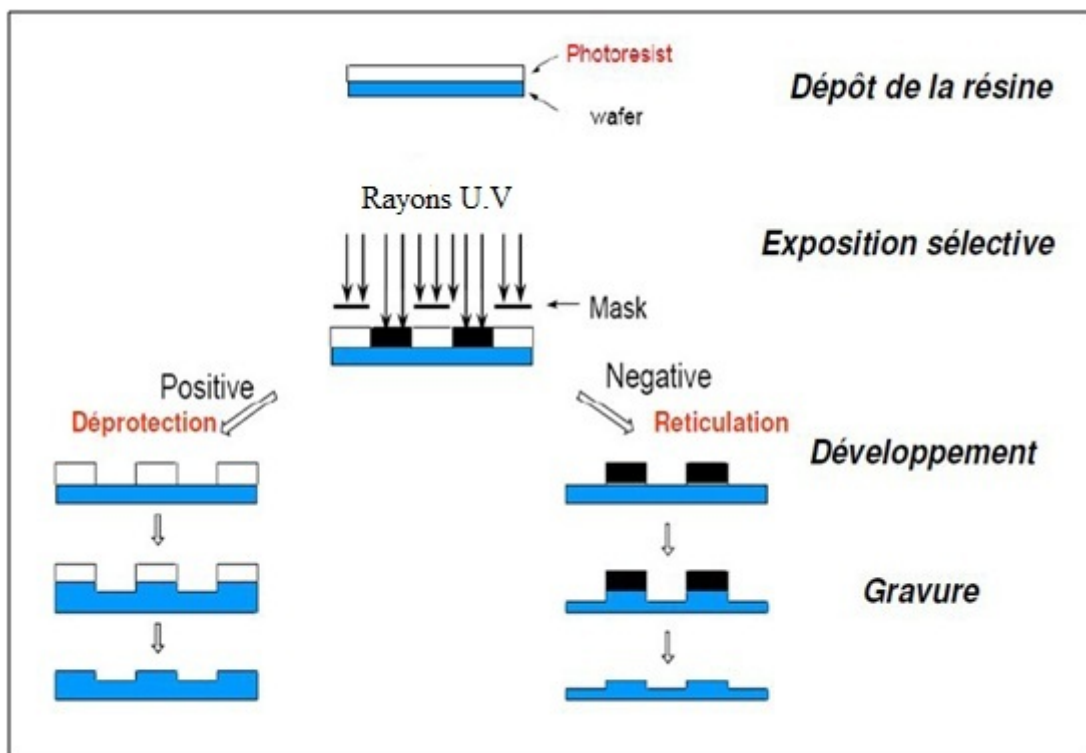


Figure II.5 : Principales étapes du procédé photolithographie [79]

D'une façon générale, la photolithographie se déroule de la manière suivante [80]:

1. Etalement de la résine photosensible par centrifugation (spin coating).
2. Séchage de la résine pour évacuer le solvant.
3. Alignement du masque : lors de la fabrication, on peut être amené à réaliser des motifs sur les deux faces du substrat, ce qui nécessite l'utilisation d'équipements spécifiques permettant un alignement entre la face avant et la face arrière. La précision d'alignement entre les deux faces est généralement de l'ordre de quelques micromètres.
4. Exposition de la résine à un rayonnement ultraviolet à travers un masque.

5. Développement de la résine : le bain de développement va dissoudre soit la partie de résine insolée dans le cas d'une résine dite positive, soit la résine non insolée dans le cas d'une résine négative.

6. La résine restante est ensuite retirée de la surface par des solvants chimiques puissants.

- Dans le cas d'une résine positive, on retrouve après l'opération, exactement le même motif sur la couche gravée de la plaquette, que sur le masque de départ.
- Dans le cas d'une résine négative, on obtient sur la plaquette le motif complémentaire.

La méthode de photolithographie est l'étape la plus importante du procédé de fabrication, car elle permet de reproduire les mêmes structures.

2.3. Techniques de gravure

La gravure est un procédé qui permet d'enlever la matière (matériaux ou substrat) dans les régions non protégées par le masque pour définir la structure souhaitée [42]. Elle est la plus utilisée pour le micro-usinage en surface et le micro-usinage en volume. Il existe plusieurs techniques de gravure, qui peuvent être classées en deux grandes catégories : la gravure humide (Wet etching) et la gravure sèche (Dry etching), chacune ayant ses propriétés (isotrope ou anisotrope).

2.3.1. Gravure humide

Le principe de gravure humide (ou gravure chimique) est très simple, il s'agit de l'immersion du substrat dans une solution liquide après la phase de photolithographie où les zones du substrat non protégée par le masque de gravure sont attaquées chimiquement. Ce procédé est le plus répandu dans la plupart des techniques de fabrication en microélectronique. En effet, il y a deux types de gravure : gravure isotrope et gravure anisotrope, la Figure II.6 montre la différence entre ces deux types [81].

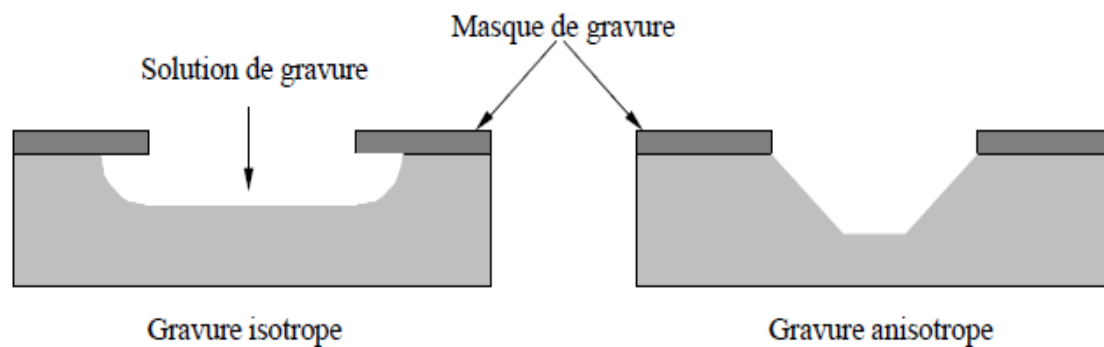


Figure II.6 : Les résultats de gravure isotrope et anisotrope par voie humide

- **Gravure isotrope**

Les solutions utilisées dans l'attaque chimique sont des acides comme l'acide fluorhydrique (HF) ou une combinaison d'acides comme le HNA qui est constitué de l'acide fluorhydrique (HF), de l'acide nitrique (HNO_3) et de l'acide acétique (CH_3COOH). La gravure isotrope s'effectue dans toutes les directions indépendamment de l'orientation cristalline, elle permet d'obtenir un profil de type arrondi.

Ce procédé de gravure est surtout utilisé pour la réalisation de structures suspendues ou en porte à faux par suppression d'une couche sous-jacente de nature différente [20]. Un exemple de cette méthode est illustré sur la Figure II.7, une poutre de polysilicium initialement déposée sur l'oxyde de silicium et libérée par une attaque à l'acide fluorhydrique (HF).

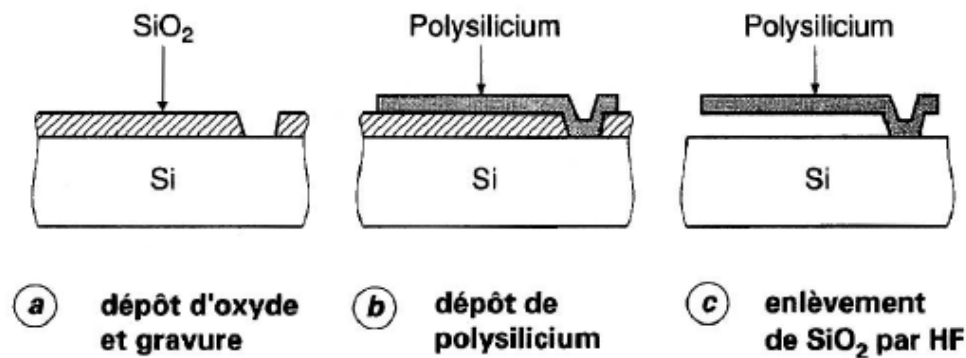


Figure II.7 : Réalisation d'une poutre de polysilicium par attaque HF de l'oxyde sous-jacent [20]

- **Gravure anisotrope**

Les solutions utilisées dans l'attaque chimique sont des hydroxydes, qui gravent les matériaux de manière préférentielle dans différentes directions cristallographiques. Les hydroxydes les plus couramment utilisés sont l'éthylène-diamine pyrochatecol (EDP), l'hydroxyde de potassium (KOH) et l'hydroxyde tétraméthylammonium (TMAH). Ces solutions sont souvent utilisées pour contrôler très précisément les dimensions des structures micro-usinées, notamment dans le cas où on veut creuser des cavités dans le silicium.

Un exemple de gravure anisotrope de silicium est illustré sur la figure II.8. Le silicium possède une structure cristallographique de type cubique à faces centrées, où les trois principaux plans cristallins comme $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ jouent des rôles importants dans les gravures anisotropes. L'attaque anisotrope est plus faible dans le plan $\langle 111 \rangle$ à cause de

leur grande densité d'atomes par rapport aux deux autres plans $\langle 110 \rangle$ et $\langle 100 \rangle$. Pour un substrat de silicium orienté $\langle 100 \rangle$, on obtient des structures de forme triangulaire ou trapézoïdale [82].

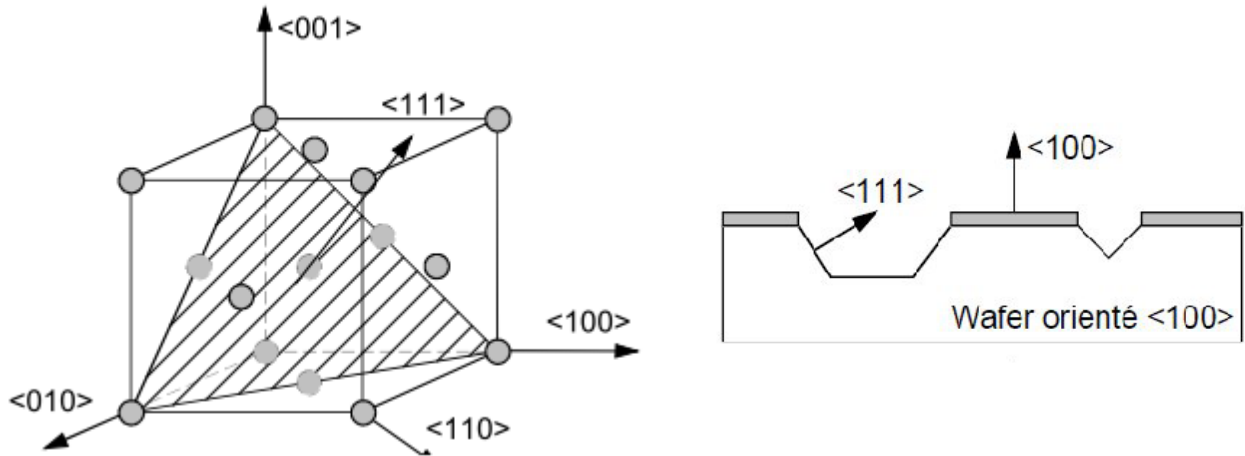


Figure II.8 : Gravure anisotrope

La gravure humide est une méthode très efficace, facile à mettre en œuvre et moins coûteuse, elle présente ainsi une bonne sélectivité des matériaux et permet aussi de graver le substrat de manière rapide. Par contre, cette technique présente les inconvénients suivantes: la gravure, dans la plupart des cas est isotrope d'où une résolution limitée. Le contrôle de gravure est délicat dans le cas des substrats constitués de multicouches, l'agitation du bain est nécessaire pour l'uniformité de l'attaque sur la surface, la consommation de réactifs est importante.

2.3.2. Gravure sèche

La gravure par voie sèche est effectuée en utilisant des espèces ioniques issues d'un gaz ou d'un plasma. Il existe plusieurs types de gravure, les plus fréquemment utilisées dans le micro-usinage sont : la gravure ionique réactive (RIE) et la gravure ionique réactive profonde (DRIE).

- **Gravure ionique réactive RIE**

La gravure ionique réactive (RIE, Reactive Ion Etching) ou la gravure sèche à plasma est une technique de gravure largement utilisée dans les technologies silicium. Elle permet de graver un substrat de silicium avec une bonne résolution. Le principe de cette technique est basé sur la combinaison des effets physiques et chimiques (gravure physico-chimique), c'est-à-dire que le processus utilise à la fois l'effet physique qui est le bombardement

de substrat par des ions réactifs du plasma et l'effet chimique qui est la réaction chimique sèche mis en jeu à la surface de matériau à graver. La figure II.9 montre le principe d'un réacteur de gravure ionique réactive RIE [20].

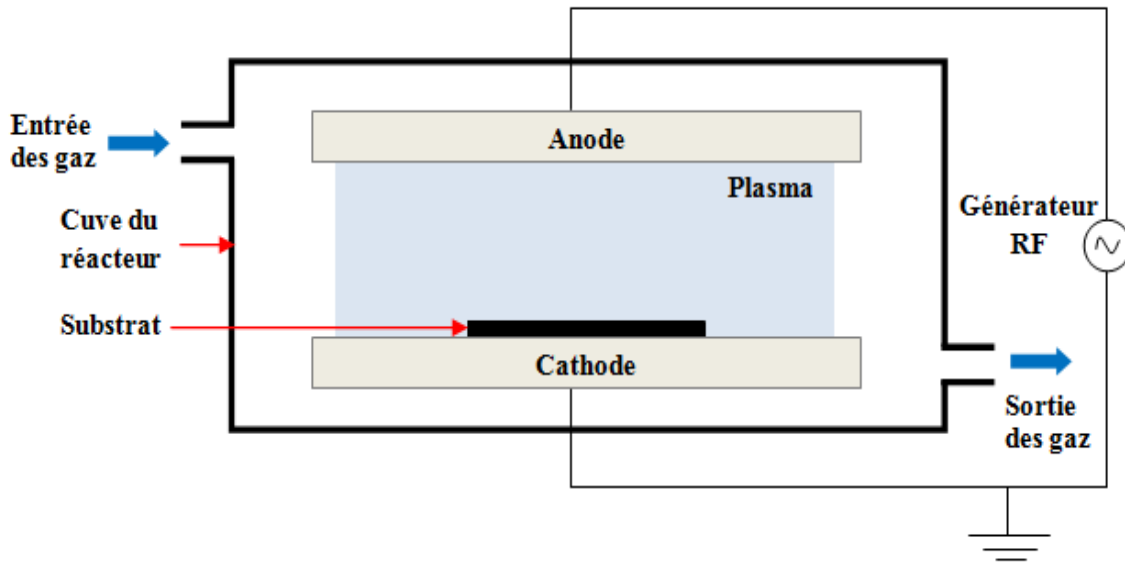


Figure II.9 : Schéma de principe de la technique RIE

Le processus de gravure est résumé en trois étapes suivantes :

- 1- Le substrat à graver est placé sur l'électrode nommé "cathode" dans une chambre à vide.
- 2- Le plasma (contient un mélange de molécules, de radicaux et d'ions chargés positivement) est créé entre les deux électrodes (Anode et Cathode) lorsque le gaz introduit dans le réacteur est soumis à une énergie produite par un générateur radiofréquence RF.
- 3- Les ions réactifs sont accélérés et viennent bombarder la surface du matériau à graver en arrachant ces atomes. Si les ions ont une énergie suffisamment élevée, ils peuvent frapper les atomes de matériau à graver sans réaction chimique.

La gravure par réaction chimique est très souvent de type isotrope et la réaction physique est anisotrope. En modifiant l'équilibre entre ces deux types de gravure, les profils de gravure obtenus vont de type isotrope (la forme des flancs sont arrondies) à anisotrope (la forme des flancs sont verticaux). On peut favoriser un processus sur l'autre en changeant des paramètres tels que la nature du matériau à graver et le gaz utilisé (par exemple, la gravure de silicium est effectuée par le gaz hexafluorure de soufre SF_6).

La pression dans la chambre et la puissance haute fréquence, déterminent le taux d'anisotropie et la vitesse de gravure.

- **Gravure ionique réactive profonde (DRIE)**

La gravure RIE profonde (DRIE, Deep Reactive Ion Etching) est une sous-division de la technique RIE. Elle est développée au début des années quatre vingt dix et brevetée par la société allemande Robert Bosch Corporation [83,84]. Cette technique est utilisée pour graver un substrat de silicium en profondeur de plusieurs centaines de microns avec des parois latérales verticales. Ce type de gravure permettant d'obtenir des flancs verticaux avec une bonne anisotropie et de graver facilement des géométries complexes.

Le procédé de gravure DRIE ressemble beaucoup de la technique RIE présentée précédemment, le principe consiste à utiliser successivement des étapes de passivation et de gravure [85]. La figure II.10 illustre les différentes étapes de la gravure DRIE :

- L'étape de passivation permet de déposer une couche de polymère protectrice qui inhibe le bombardement ionique sur les parois latérales de l'ouverture.
- L'étape de gravure consiste à éliminer premièrement la couche de polymère au fond de la cavité et par la suite le silicium sur le plan horizontal.

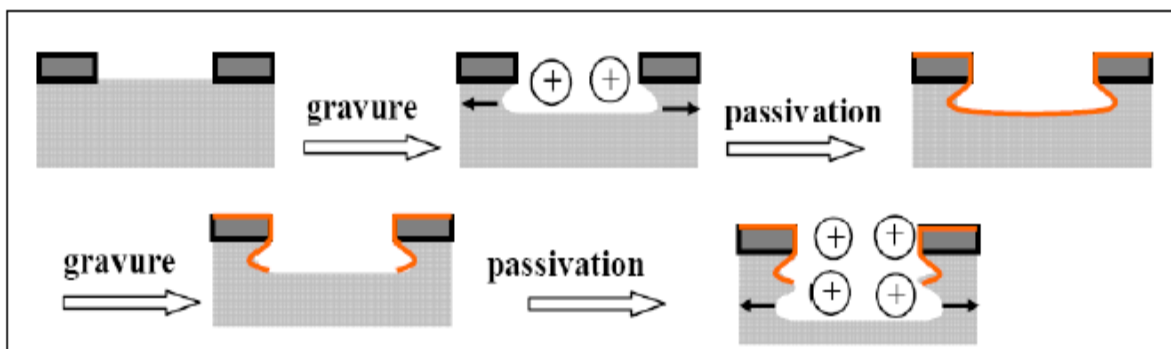


Figure II.10 : Principe de la gravure DRIE [85]

Deux compositions gazeuses sont utilisées pour la gravure du silicium : le gaz hexafluorure de soufre SF_6 pour attaquer le fond de la cavité de silicium et le gaz d'octafluorocyclobutane C_4F_8 comme une couche de passivation. Ce processus permet de graver un substrat de silicium de façon indépendante de l'orientation cristallographique contrairement à la gravure humide. L'inconvénient majeur de cette technique est la nécessité des équipements complexes.

2.4. Micro usinage en surface

Le micro usinage de surface est un procédé de fabrication qui permet de constituer des structures MEMS auto assemblées dans une couche de matériau approprié se trouvant au-dessus d'un substrat porteur. Cette technique nécessite une couche sacrificielle (dioxyde de silicium ou résine, par exemple), qui peut être gravée de manière sélective pour obtenir une structure suspendue librement ou mobile [86,87]. La couche structurale de matériau (comme le poly silicium ou un métal) est habituellement déposée en utilisant une certaine forme de dépôt chimique en phase vapeur [88]. La couche sacrificielle est déposée en utilisant un dépôt à basse pression de vapeur (LPCVD) [89]. La gravure de la couche sacrificielle peut être obtenue en utilisant des techniques de gravure humide ou sèche.

La figure II.11 montre un schéma en coupe d'une technologie de micro usinage en surface.

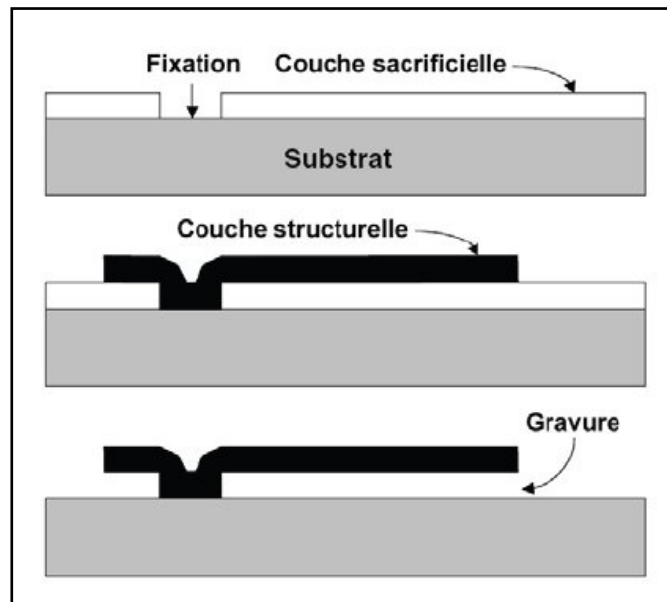


Figure II.11 : Micro usinage de surface [85]

Les limites de ce type de procédé sont les forces de capillarités, elles ont tendance à faire coller les couches entre elles lors de l'étape de l'enlèvement de la couche sacrificielle.

Le procédé permet une intégration facile avec des composants de circuit intégré (IC) de telle sorte que les circuits peuvent être inclus le long du côté du capteur [88]. Les principaux avantages d'une telle situation minimisent les effets parasites et la possibilité de trouver le procédé acceptable pour les fonderies de silicium [90].

Le micro usinage de surface a été utilisé pour produire une grande variété de dispositifs MEMS pour de nombreuses applications différentes.

Un exemple de procédé de fabrication de capacités variables usinée par la technique de micro usinage de surface est illustré sur la figure II.12 [42].

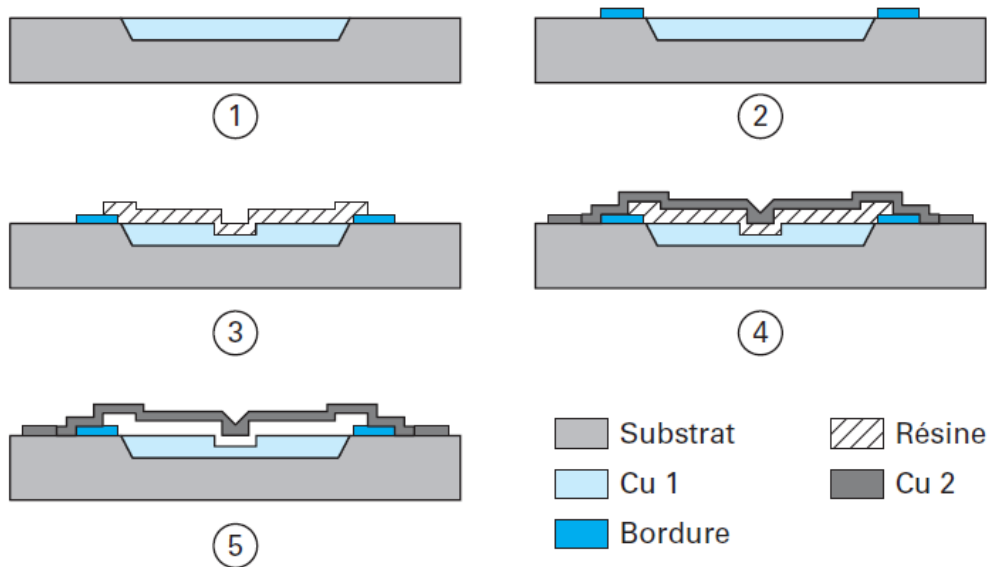


Figure II.12 : Procédé de réalisation des capacités variables [42]

- 1- Usinage du substrat anisotrope.
- 2- Dépôt des bordures
- 3- Dépôt de résine de protection.
- 4- Réalisation de la couche suspendue.
- 5- Elimination de la résine et obtention de la micro capacité

2.5. Micro usinage en volume

Le micro usinage en volume est une technique permettant l'obtention de microstructures suspendues par gravure du substrat. Le terme de volume est utilisé ici puisque la gravure forme une cavité dans le volume du substrat sous les couches déposées [42]. Généralement, le matériau du substrat dominant est le silicium monocristallin à cause de leur excellente propriété mécanique, la disponibilité en grandes quantités avec une pureté élevée et de faibles densités de défauts. Exploiter les caractéristiques de gravure anisotropes prévisibles de silicium monocristallin, de nombreux complexes de haute précision des formes en trois dimensions, telles que des rainures en V, des canaux, des fosses pyramidales, des membranes, peuvent être formés [91,92]. Une illustration d'un processus de micro usinage en volume est présentée dans la figure II.13.

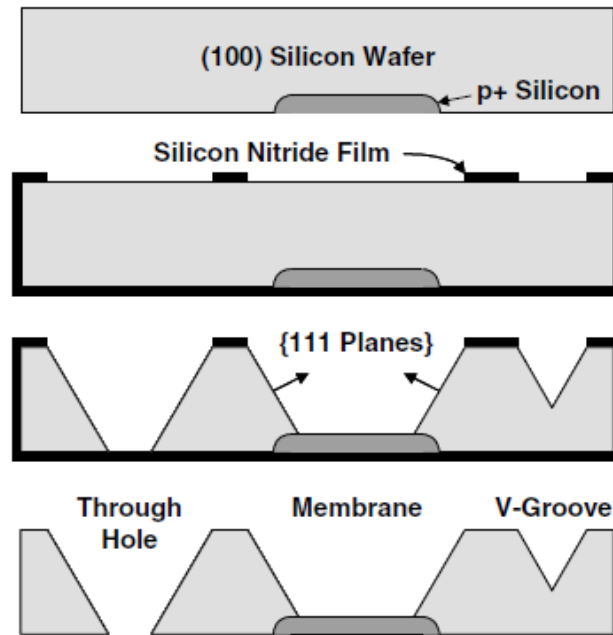


Figure II.13 : Micro usinage de volume [86]

La gravure est une étape clé dans la fabrication de dispositifs MEMS usinée en volume, le processus peut englober un ou plusieurs des techniques suivantes : gravure humide isotrope, gravure anisotrope humide, gravure plasma isotrope, gravure ionique réactive (RIE) ou gravure par des techniques d'arrêt [87,93].

L'un des premiers capteurs de pression de silicium anisotrope gravé a été fait par Greenwood en 1984 et a eu un succès commercial pour Druck Ltd., Royaume-Uni [94]. La technique a été utilisée pour produire une variété d'autres produits, y compris les têtes à jet d'encre d'impression [95].

Les principaux avantages du micro usinage en volume : les structures hautement directionnelles et reproductibles peuvent être obtenus, le dioxyde de silicium et de nitrure de silicium peuvent être utilisés comme masques [96].

Le micro usinage en volume est capable de produire des capteurs avec de bonnes caractéristiques, mais le micro usinage de surface peut être plus avantageux de plusieurs façons. En utilisant des outils et des procédés microélectroniques bien établis, le micro usinage de surface est capable de produire des structures qui sont plus petites, par plusieurs ordres de grandeur que celles produites par des micro usinage en volume [97,98].

3. Procédé de fabrication SU-8

Les différentes étapes du procédé de fabrication SU-8 standard se présentent comme suit [99].

3.1. Dépôt de SU-8

L'étape de dépôt commence par l'étalement de la résine négative SU-8 sur un substrat par centrifugation (spin-coating) : le substrat est fixé par aspiration sur un support tournant, la résine négative SU-8 est déposée sur le substrat et étalée à l'aide de la force de centrifuge. A la fin de cette étape, la résine négative SU-8 est obtenue de façon uniforme en un film mince de quelques microns (Figure II.14 (a)). L'épaisseur de la couche de SU-8 peut être contrôlée par trois paramètres : la viscosité du SU-8, la vitesse de rotation (tours par minute) et la durée de dépôt. L'épaisseur de la couche SU-8 en fonction de la vitesse de rotation (tours par minute) pour plusieurs types de SU-8 est présentée sur la figure II.14 (b).

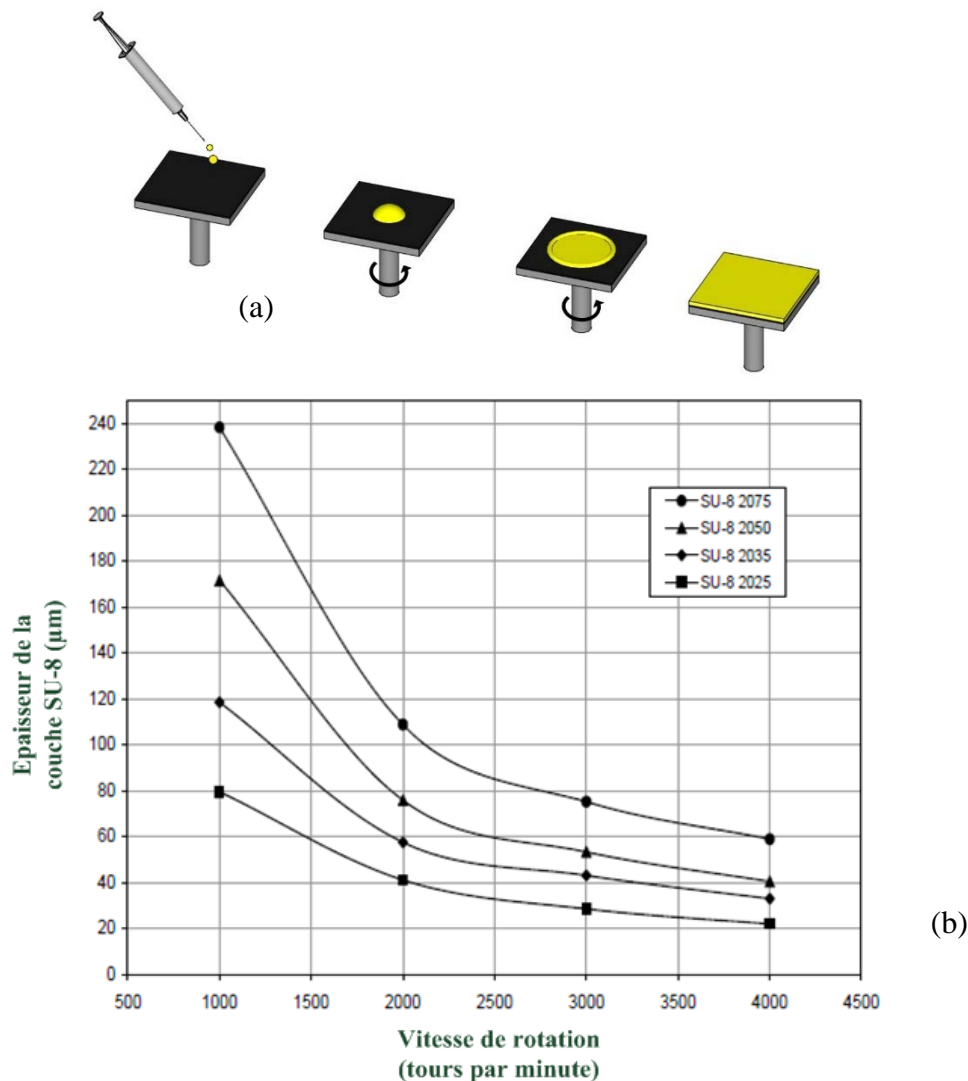


Figure II.14 : a) Dépôt de SU-8 sur le substrat par spin-coating, b) Courbe d'épaisseur de la couche SU-8 en fonction de la vitesse de rotation (tours par minute) pour différents type de SU-8 [99]

3.2. Premier recuit (softbake)

Cette étape, appelée précuite, consiste à chauffer le SU-8 sur une plaque chauffante jusqu'à l'élimination du solvant. Les températures utilisées pour le premier recuit sont de 65 °C, puis 95 °C durant une durée dépendant de l'épaisseur déposée. Le tableau II.1 présente le temps du premier recuit pour différentes épaisseurs.

Tableau II.1 : Temps du premier recuit pour différentes épaisseurs [99]

Epaisseurs (microns)	Temps du premier recuit	
	(65°C) minutes	(95°C) minutes
25 - 40	0 - 3	5 - 6
45 - 80	0 - 3	6 - 9
85 - 110	5	10 - 20
115 - 150	5	20 - 30
160 - 225	7	30 - 45

3.3. Insolation

L'insolation sert à exposer la couche SU-8 aux rayons ultraviolets UV en utilisant un masque pour définir quelle partie du dépôt doit être éliminée. Le temps d'exposition dépend du type de substrat et de l'épaisseur de la couche déposée.

3.4. Deuxième recuit (Post exposure bake PEB)

Au cours de cette étape, la SU-8 éclairée est polymérisé. La polymérisation peut être effectuée dans une température ambiante ou par l'augmentation de la vitesse du procédé, en chauffant à nouveau le SU-8 sur une plaque chauffante à des températures de 65 °C, puis 95 °C pendant une durée dépendant de l'épaisseur déposée. Le tableau II.2 présente le temps du deuxième recuit pour différentes épaisseurs.

Tableau II.2 : Temps du deuxième recuit pour différentes épaisseurs [99]

Epaisseurs (microns)	Temps du deuxième recuit	
	(65°C) minutes	(95°C) minutes
25 - 40	1	5 - 6
45 - 80	1 - 2	6 - 7
85 - 110	2 - 5	8 - 10
115 - 150	5	10 - 12
160 - 225	5	12 - 15

3.5. Développement

Le développement s'effectue par immersion de la SU-8 (insolé puis recuit) dans un liquide approprié appelé SU-8 développeur, pour éliminer les zones non exposées. Le procédé suivant consiste à effectuer un rinçage à l'Isopropanol (IPA). Le tableau II.3 présente le temps de développement pour différentes épaisseurs.

Tableau II.3 : Temps de développement pour différentes épaisseurs [99]

Epaisseurs (microns)	Temps de développement (Minutes)
25 - 40	4 - 5
45 - 80	5 - 7
85 - 110	7 - 10
115 - 150	10 - 15
160 - 225	15 - 17

3.6. Troisième recuit (Hard bake)

Le troisième recuit est une étape facultative consistant à soumettre la structure à une température comprise entre 150 à 250 °C, pendant une durée comprise entre 5 et 30 minutes. Ce dernier recuit a pour but de terminer la polymérisation et densifier le réseau.

4. Le processus BETTS

Un processus de fabrication : collage, exposition aux UV et transfert technique dans SU-8, nommé "BETTS" (bonding, UV exposing and transferring technique in SU-8) est une méthode développée par le groupe de microsystemes de l'université de Séville [13]. Les couches de SU-8 peuvent être transférées et modelées sur des microstructures en SU-8 en utilisant un substrat amovible, souple et transparent. Ce substrat est composé d'un film mince d'acétate, qui peut également être utilisé comme un masque, et une couche de PDMS durcie déposée sur elle. La couche de SU-8 est ensuite déposée par centrifugation (spin coating) et transférée sur des structures aux SU-8, en effectuant simultanément les étapes de collage et de transfert par exposition aux UV. En raison de la faible adhérence entre la couche de PDMS et la couche de SU-8, l'enlèvement de l'acétate de film peut être facilement effectué. Ces différentes étapes seront détaillées dans le quatrième chapitre concernant la fabrication des capteurs de pression capacitifs.

Le processus BETTS possède les avantages suivants :

- Facile, irréversible et collage robuste du SU-8 sur SU-8. L'absence d'équipement de plasma d'oxygène ou des systèmes à vide diminue considérablement le coût et le temps de fabrication impliqués.
- Le procédé de fabrication BETTS permet de fabriquer des structures SU-8 complexes tridimensionnelles à l'aide d'une procédure simple et peu coûteuse et assure également sa compatibilité et son intégration avec des dispositifs microfluidiques et des dispositifs fabriqués par la technologie PCB-MEMS.

En utilisant ce processus, certaines applications spécifiques tels que le réseau multi-niveaux de microcanaux, membranes à motifs, microchambres et microvannes peuvent être fabriquées facilement [100].

4.1. Le réseau de microcanaux 3D

La première structure faite avec le processus BETTS est un réseau de microcanaux fluidiques. La fabrication des parois est réalisée par le procédé de SU-8 standard, avec une hauteur de 200 μm et une largeur de 400 μm . L'épaisseur de la couche transférée entre les deux niveaux est de 40 μm avec un film de PDMS amovible de 100 μm . La couche supérieure a été déposée directement sur le film d'acétate sans les PDMS, afin de donner de la rigidité à la structure. Un réseau de microcanaux à deux niveaux a été mis en œuvre, comme illustré sur figure II.15.

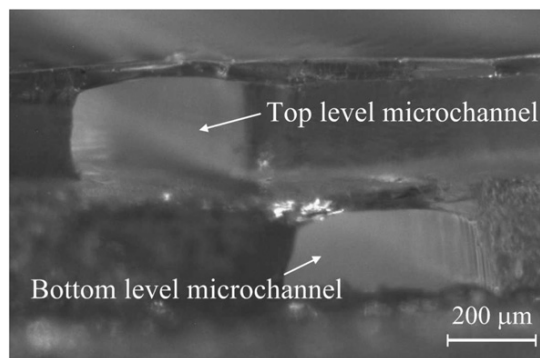


Figure II.15 : Fabrication de réseau des microcanaux en trois dimensions [13]

De nombreuses applications microfluidiques sont composées de réseaux de microcanaux. En tenant compte l'avantage du faible coût et la haute intégration de cette méthode couche sur couche, le processus BETTS peut être largement appliqué pour fabriquer des structures 3D.

4.2. Membranes à motifs

Le processus BETTS permet non seulement le transfert d'une couche uniforme, mais aussi le transfert d'un motif (une membrane poreuse).

La structure de base est réalisée par un procédé SU-8 standard, composée d'un ensemble de chambres cylindriques. Une fois la structure terminée, le transfert d'une couche SU-8 à motif est obtenue par le processus BETTS. Le résultat est illustré sur figure II.16. Le diamètre des microchambres cylindriques est de 900 μm et le diamètre des orifices sur la membrane à motif est de 100 μm . L'épaisseur de la couche transférée est de 30 μm .

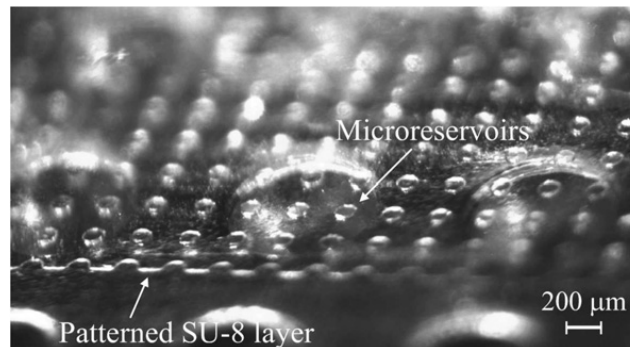


Figure II.16 : Les microchambres comme une structure de base.
Le transfert de la couche SU-8 à motif [13]

4.3. Microchambres

Le stockage des liquides ou des gaz rend les microchambres et microréservoirs essentiels dans de nombreuses applications microfluidiques. La fabrication de microchambres ou microréservoirs isolé peut également être réalisée avec le processus BETTS. Si une pression fixe est nécessaire à l'intérieur des chambres miniatures, le transfert est effectué dans un environnement à pression contrôlée.

Après la fabrication des parois microréservoirs par le procédé SU-8 standard, le transfert est effectué en utilisant le processus BETTS. Dans ce cas, l'alignement entre les parois et le couvercle est nécessaire. L'alignement est possible grâce à la fonction transparente de PDMS et le film d'acétate. Les résultats de fabrication sont illustrés sur la figure II.17 . La hauteur des microchambres est 400 μm , la largeur de paroi est 200 μm et le diamètre interne est 250 μm . L'épaisseur de la couche transférée est 70 μm . Une telle épaisseur élevée de la couche SU-8 a provoqué un déplacement pendant l'étape de collage, ce qui entraîne une bavure interne. Cet effet est responsable de la diminution du diamètre interne supérieure du cylindre, comme illustré sur figure II.18.

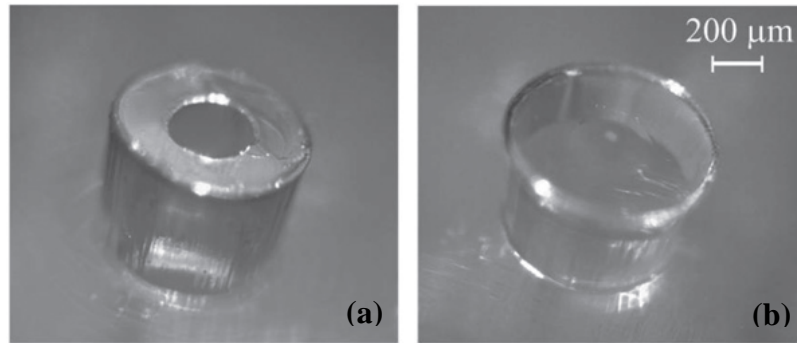


Figure II.17 : Fabrication des microchambres hermétiques. Un cylindre creux avant et après revêtement par le processus BETTS est représenté en (a) et (b) [13]

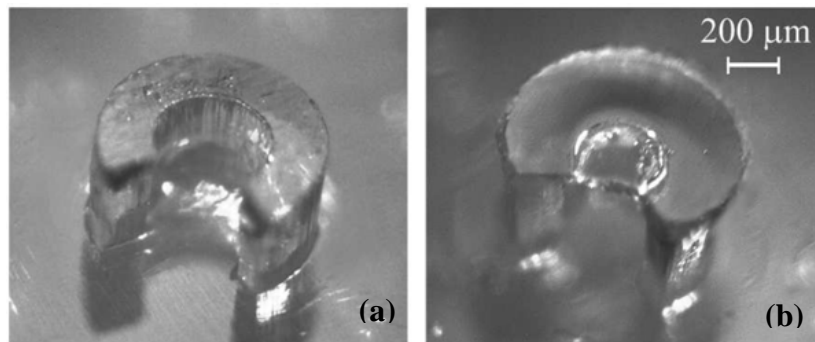


Figure II.18 : Fabrication des microchambres ouvertes.
Photos (a) et (b) illustrent une microchambre avant et après le processus de transfert [13]

5. Techniques de collage

Les techniques de collage (bonding) sont généralement utilisées pour assembler des substrats qui sont difficile à former autrement. Des différents substrats de même nature ou de nature différente peuvent être assemblés pour créer des structures complexes (par exemple, des cavités hermétiques pour les capteurs de pression, des canaux fermés pour les dispositifs micro fluidiques). Il existe plusieurs types de collage des substrats : le collage par fusion, anodique et adhésif.

5.1. Le collage par fusion

Le collage par fusion (fusion bonding) consiste à chauffer deux wafers jusqu'à la température de fusion. Cette méthode permet de coller comme exemple deux wafers de silicium. Le processus commence par l'étape de nettoyage et polissage des deux surfaces de silicium. Ensuite, l'ensemble est porté à très haute température (800-1100°C) [20]. En fin, une faible pression est appliquée sur les deux wafers de silicium pour faire coller l'ensemble (figure II.19).

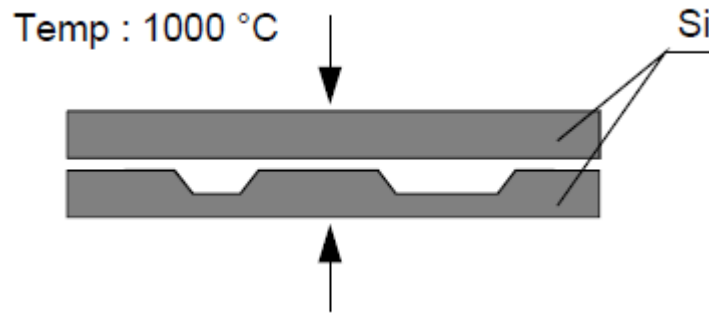


Figure II.19 : Collage par fusion [101]

5.2. Le collage anodique

Le collage anodique (anodic bonding) permet d'assembler un substrat de verre à un substrat de silicium. Les deux substrats sont mis en contact, chauffés à une température de 400 °C avec application d'une force externe sur ces derniers, puis l'application d'une différence de potentiel de l'ordre de 1000 V à travers le verre en tant que cathode et le silicium en tant qu'anode (figure II.20). Ce procédé permet un assemblage totalement hermétique de très grande qualité, ce qui est largement utilisé pour réaliser des capteurs de pression capacitifs.

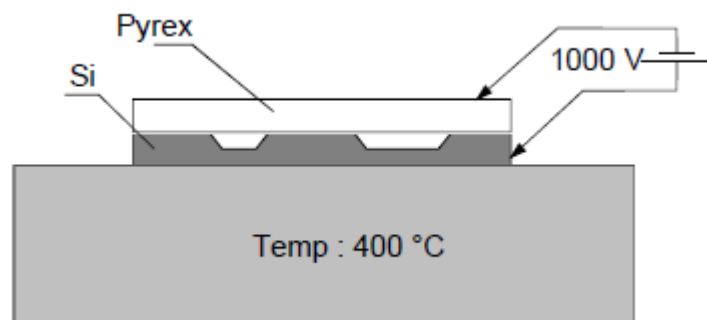


Figure II.20 : Collage anodique [101]

5.3. Le collage adhésif

Le collage adhésif consiste à assembler deux wafers à l'aide d'une couche adhésive intermédiaire telle qu'une résine ou un polymère. Contrairement aux deux types de collage décrit précédemment qui nécessitent des dispositifs complexes, des températures élevées et des prétraitements plus critiques [102], ce procédé permet d'assembler les deux wafers à basse température (la température de collage est beaucoup plus faible, elle est inférieure à 400 °C) et ainsi il peut s'étendre à de nombreux autres types des matériaux (ne sont pas seulement limités au silicium ou au verre). Le collage adhésif avec la résine SU-8 est utilisé comme exemple pour fabriquer des capteurs de pression capacitifs [103].

6. Exemple de fabrication d'un capteur de pression capacitif

D'une façon générale, la structure du capteur de pression capacitif est similaire à une capacité variable. Elle est constituée de deux électrodes dont l'une est fixée et l'autre est mobile.

La fabrication des capteurs de pression capacitifs est faite à partir des technologies de la microélectronique et de procédés spécifiques. Le procédé de fabrication du capteur de pression capacitif présenté ici comme un exemple, est basé sur une filière technologique Silicium/verre [104]. La figure II.21 montre le schéma synoptique des étapes de fabrication d'un capteur de pression capacitif.

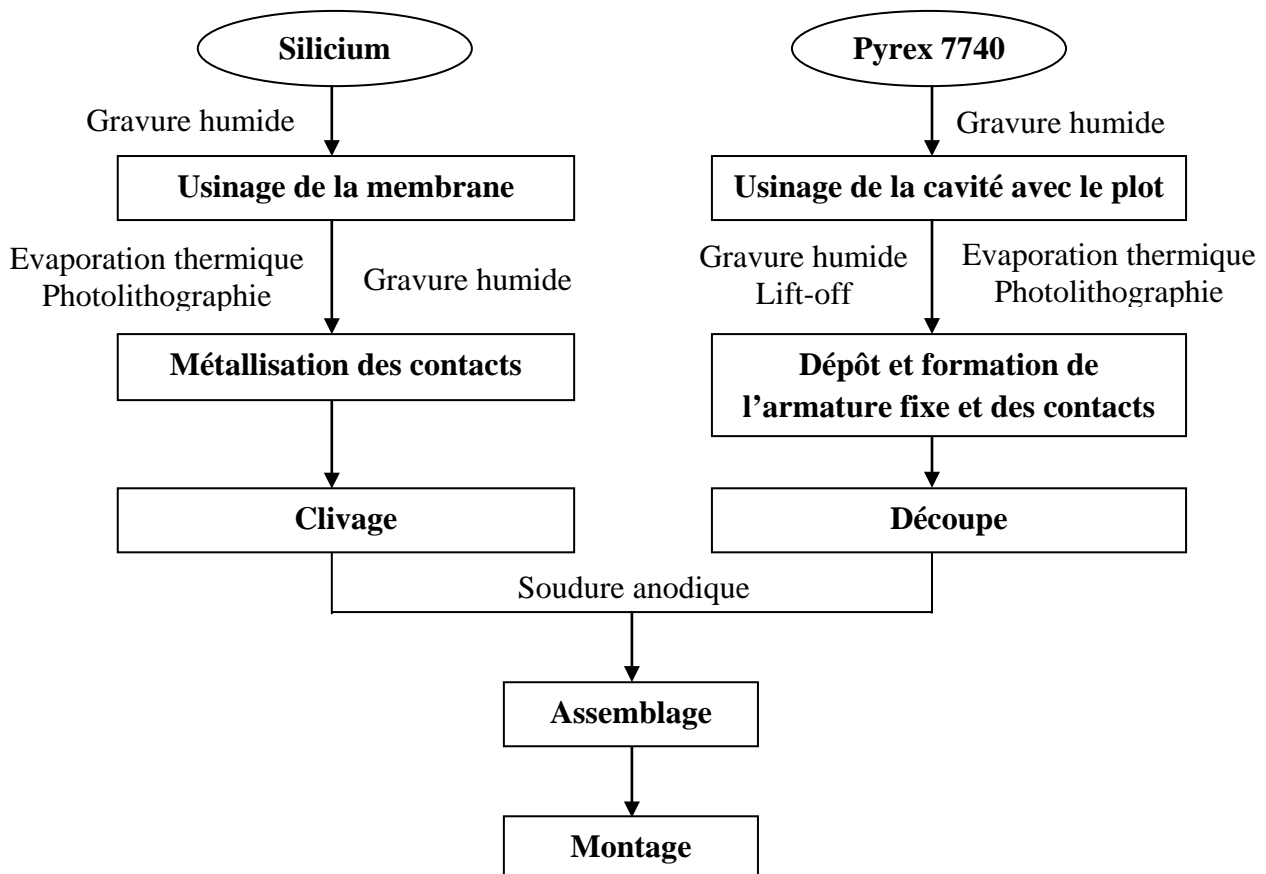


Figure II.21 : Schéma synoptique des étapes de fabrication d'un capteur de pression capacitif [105]

Les étapes suivantes présentent la méthode de réalisation du capteur de pression capacitif :

- **Usinage de la cavité avec le plot** : le substrat en Pyrex 7740 de type borosilicate (très résistant aux agents corrosifs) qui est usiné pour réaliser les cavités avec les plots (la gravure

est réalisée par une attaque chimique en phase liquide en utilisant l'acide fluorhydrique dilué à 2.5 % après le dépôt d'une couche de masquage d'or / chrome).

- **Réalisation de l'armature fixe et des contacts** : Un premier dépôt d'aluminium est effectué par évaporation thermique au fond de la cavité creusée du verre pour constituer les armatures fixes et les contacts. La gravure se fait par attaque chimique sélective (un mélange à base d'acide phosphorique) après l'étape de photolithographie. Un deuxième dépôt d'aluminium d'épaissement des contacts est alors nécessaire de réaliser par le procédé lift-off.

- **Découpe du verre.**

-**Usinage de la membrane (l'armature déformable)** : le silicium a été aminci de manière à obtenir des membranes d'épaisseur désirée, L'amincissement est réalisé par la gravure humide par le KOH [106].

- **Métallisation des Contacts** : une couche d'aluminium est déposée sur le silicium pour faciliter la prise de contact. Ensuite, elle est gravée pour n'être gardée que sur la zone d'encastrement.

- **Clivage du silicium.**

- **Assemblage** : les deux plaques (silicium et verre) sont assemblées par le collage anodique afin de former le capteur de pression capacitif.

- **Montage.**

La figure II.22 présente des photographies des différentes structures réalisées.

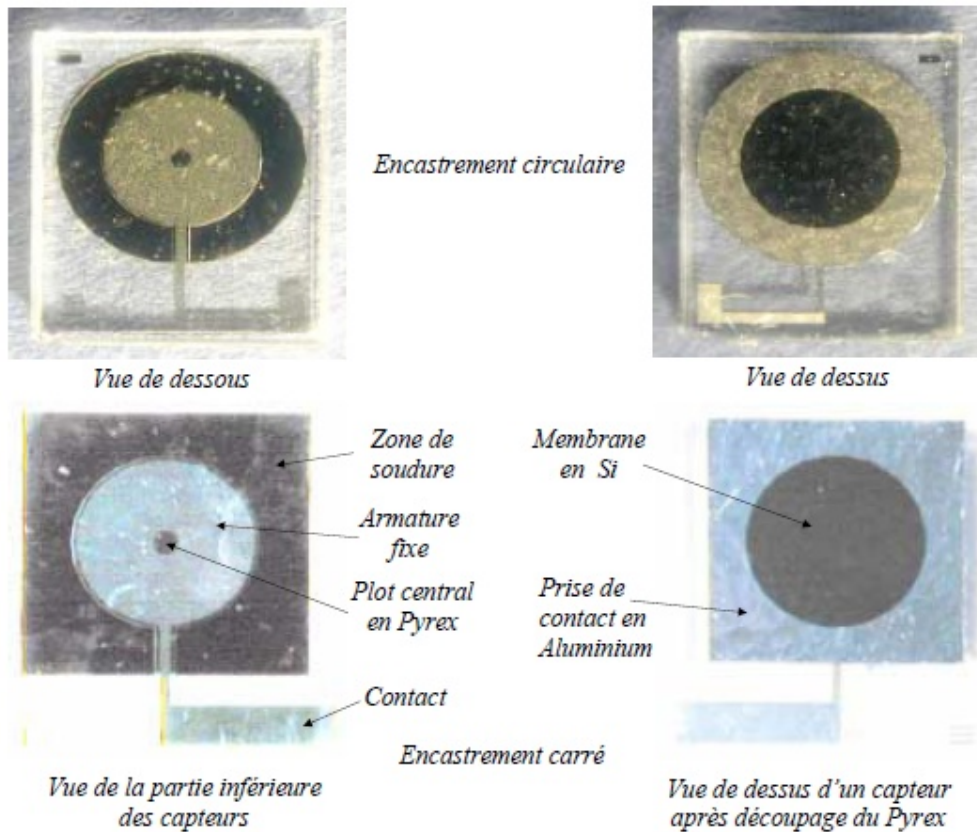


Figure II.22 : Vue de dessous et de dessus des différentes structures réalisées [104]

7. Conclusion

Dans ce second chapitre nous avons décrit les différentes techniques de déposition, de photolithographie, de gravure, de collage, micro usinage en surface, micro usinage en volume ainsi la technologie SU-8 et le processus " BETTS " afin de réaliser des capteurs de pression avec une meilleure performance.

Les capteurs de pression existants sont fabriqués avec le silicium comme une membrane déformable à cause de leur excellent comportement mécanique et de son micro usinage précis, le support substrat est en verre (Pyrex 7740), la métallisation des électrodes est en aluminium. Il existe d'autres capteurs de pression qui sont réalisés avec une membrane en polymère (SU-8, PDMS, polyamide, ...etc), le support substrat est la plaque de PCB (FR4), la métallisation des électrodes est en cuivre. Par la suite nous allons présenter la modélisation de capteurs de pression capacitif.

Chapitre III

Modélisation des capteurs de pression capacitifs

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'aspect théorique qui est nécessaire à la compréhension de la structure d'un capteur de pression capacitif ainsi que son principe de fonctionnement. Nous étudierons le comportement mécanique d'une membrane parfaitement encadrée aux bords de formes, carrée, rectangulaire et circulaire, soumise à une pression uniforme et constante, dans le cas des faibles déformations. Nous utiliserons les expressions des déformations $w(x,y)$ et $w(r,\theta)$ obtenues par la résolution de l'équation de Lagrange qui régissent le comportement mécanique d'une membrane (carrée, rectangulaire, circulaire) pour calculer la réponse capacitive $C(P)$ du capteur de pression capacitif ainsi que sa sensibilité à la pression $S(P)$.

Nous établirons un modèle 3D de la structure d'un capteur de pression capacitif par l'utilisation de logiciel COMSOL multiphysiques qui est à base de la méthode des éléments finis (FEM), afin de simuler la réponse capacitive et sa sensibilité pour différentes formes de la membrane. Nous déterminerons l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la performance du capteur de pression capacitif. Nous présenterons les résultats de simulation qui sont comparés avec les résultats théoriques afin de valider notre modèle.

2. La relation entre contrainte et déformation - loi de Hooke

D'après la théorie de l'élasticité linéaire, lorsqu'une force est appliquée sur un matériau, il s'étire ou il se comprime en réponse à la force. La force appliquée par unité de surface exprimée en Pascal (N/m^2) est appelée la contrainte mécanique " σ " (Figure III.1).

On peut l'utiliser au moyen du tenseur de contrainte qui s'écrit comme suit [107] :

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{III.1})$$

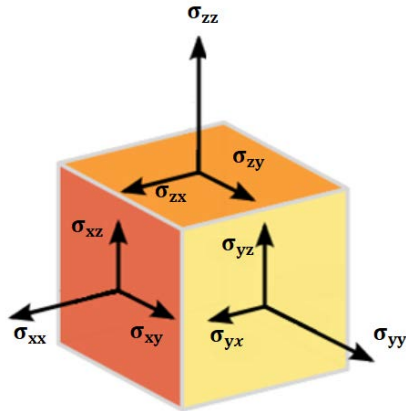


Figure III.1 : Définition des composantes du tenseur des contraintes mécaniques

Sous l'effet de cette contrainte mécanique, le matériau se déforme. Cette déformation qu'on peut l'exprimer au moyen du tenseur "ε", à une région linéaire pour de nombreux matériaux (dans le cas considéré de faibles déformations).

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Les relations des contraintes et déformations en région linéaire peuvent être représentées par la **loi de Hooke** [107,108].

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \text{ et } \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (\text{III.3})$$

Où :

C_{ijkl} : sont les coefficients du tenseur d'élasticité, ou de rigidité.

S_{ijkl} : sont les coefficients du tenseur inverse, appelés compliance élastique.

D'une façon générale, un matériau possède plusieurs propriétés mécaniques, les deux principales propriétés sont définies comme suit :

- **Le module de Young "E"** (également appelé module d'élasticité) est un constant qui mesure la résistance d'un matériau à sa déformation élastique (III.4).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III.4})$$

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

3. Modélisation mécanique de la membrane

La modélisation du comportement mécanique de la membrane (déflexion) sous l'effet de la pression appliquée est nécessaire pour connaître la réponse du capteur de pression capacitif. La variation de la capacité entre les électrodes du capteur dépend de la déflexion de la membrane. Cette déflexion est généralement représentée par une équation à dérivée partielle de quatrième ordre qui est complexe à résoudre [109]. En se basant sur la théorie des petites déformations des plaques minces (la déflexion de la membrane est très inférieure par rapport à son épaisseur), plusieurs solutions approchées ont été proposées par différentes méthodes telles que [110,111,112] : la méthode de Galerkin, la méthode de différence finie, la méthode d'éléments finis.

Les auteurs Benmoussa et Naciri [113,114] proposent une solution qui utilise la méthode de Galerkin avec une fonction de base polynomiale pour déterminer la déflexion de la membrane.

Les auteurs Ashwin Simha et al [115] proposent une approximation mathématique trigonométrique qui doit satisfaire aux conditions aux limites et à la géométrie de la membrane pour déterminer la déflexion de cette dernière.

La déflexion de la membrane dépend de nombreux facteurs notamment la forme, les solutions sont de type semi-analytique dans le cas de membrane carrée, rectangulaire et analytique dans le cas de membrane circulaire.

Les auteurs B. B. Kirankumar et B. G. Sheeparamatti [116] ont présentés l'analyse de sensibilité du capteur de pression capacitif MEMS pour différentes géométries de membranes de la même surface et de différentes épaisseurs. Pour déterminer l'influence de ces paramètres géométriques, nous sommes amenés à effectuer une analyse entre les résultats obtenus par simulation COMSOL et par les solutions analytiques (polynomiale et trigonométrique).

Nous utilisons les paramètres établis dans la littérature [115] pour différentes géométries de membranes de la même surface et de différentes épaisseurs, et par la suite pour différentes surfaces et différentes distances inter électrodes. A la fin, une étude comparative est effectuée pour montrer l'influence de ces paramètres géométriques de la membrane sur la performance du capteur de pression capacitif.

3.1. Membrane de forme carrée et rectangulaire :

L'étude du comportement mécanique (déflexion) d'une membrane parfaitement encadrée aux bords est très nécessaire pour réaliser des micros capteurs de pression capacitif.

Une membrane de forme rectangulaire est présentée dans la figure III.2. C'est une micro structure orientée selon le plan cristallographique (100), collée sur un substrat d'orientation cristallographique $\langle 110 \rangle$ [105]. Ces dimensions sont :

- la largeur a suivant l'axe ox .
- la longueur b suivant l'axe oy .
- la hauteur h suivant l'axe oz .

Avec $h \ll a$ et $h \ll b$ (hypothèses des plaques minces).

Nous définissons le facteur de forme r_d ($r_d = b/a$).

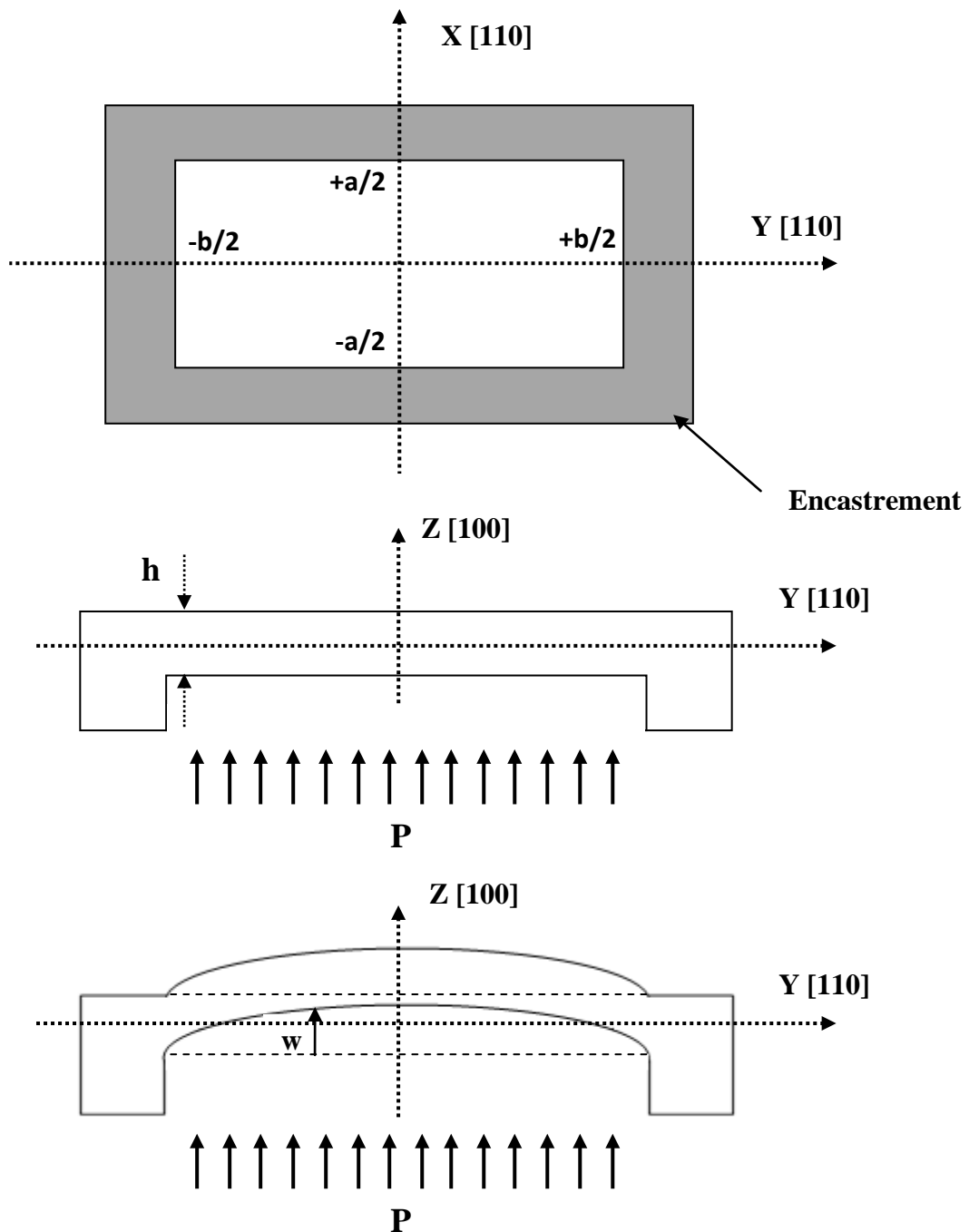


Figure III.2 : Vue de dessus de la membrane rectangulaire

En utilisant la théorie des plaques minces et en tenant compte de l'anisotropie du silicium, le comportement mécanique de la membrane dans le cas des faibles déflexions, soumise à une pression constante et uniforme, décrit par l'équation aux dérivées partielles de Lagrange d'ordre 4 ci-dessous [109] :

$$\frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^4} + 2 \alpha_{si} \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x, y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \quad (\text{III.5})$$

Où :

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

P : la pression uniforme appliquée

Avec :

$$\alpha_{si} = \nu + \frac{2G}{E} (1 - \nu^2) \quad (\text{III.6})$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (\text{III.7})$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (\text{III.8})$$

α_{si} : Coefficient d'anisotropie

ν : Coefficient de Poisson

E : Module de Young

G : Module de Coulomb

D : Coefficient de rigidité du silicium

h : Epaisseur de la membrane

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

$$\begin{aligned} w\left(x = \pm \frac{a}{2}, \forall y\right) &= 0 \\ w\left(\forall x, y = \pm \frac{b}{2}\right) &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial x}\left(x = \pm \frac{a}{2}, \forall y\right) &= 0 \\ \frac{\partial w}{\partial y}\left(\forall x, y = \pm \frac{b}{2}\right) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

- **Solution polynomiale :**

Dans la littérature [113][114], la solution approchée est effectuée par l'utilisation de la fonction polynomiale bidimensionnelle ci-dessous pour résoudre l'équation aux dérivées partielles de Lagrange d'ordre 4 :

$$w(x, y) = w_0 \left(1 - \left(\frac{2x}{a}\right)^2\right)^2 \left(1 - \left(\frac{2y}{b}\right)^2\right)^2 \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n K_{ij} \left(\frac{2x}{a}\right)^i \left(\frac{2y}{b}\right)^j \quad (\text{III.10})$$

Avec :

a , b : largeur et longueur de la membrane

i, j : des nombres entiers pairs.

K_{ij} : sont des coefficients représentés dans le tableau III.1.

w₀ : la déflexion maximale au centre de la membrane au point de coordonnée (x=0, y=0).

L'expression de **w₀** est donnée par (III.11) [117] :

$$w_0 = k(r_d) \frac{a^2 b^2 P}{16D} \quad (\text{III.11})$$

Tableau III.1 : Valeurs des coefficients réduits *k* et *K_{ij}* pour *n* = 3 [105,113]

$r_d = b/a$	1	2
K	0.0220	0.01153
k ₀₀	1	1
k ₀₂	0.214	1.3025
k ₂₀	0.214	0.0134
k ₂₂	0.2748	0.166
k ₂₄	0.09801	0.6994
k ₄₂	0.09801	-0.0205
k ₄₀	-0.006227	-0.0013
k ₀₄	-0.006227	0.4133
k ₄₄	-0.1035	0.0801

- **Solution trigonométrique :**

L'auteurs Ashwin Simha et al [115] proposent une approximation mathématique d'une fonction de base trigonométrique pour déterminer la déflexion de la membrane.

La déflexion de la membrane pourrait être représentée comme suit :

$$\mathbf{w(x, y) = w_{max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{a}\right)} \quad (\text{III.12})$$

où :

$w(x,y)$ est la déflexion de la membrane.

w_{max} est la déflexion maximale au centre de la membrane.

L'expression de W_{max} est donnée par (III.13) [109] :

$$\mathbf{W_{max} = k_1(r_d) \frac{a^4 P}{D}} \quad (\text{III.13})$$

Tableau III.2 : Valeurs de facteur k_1 pour la membrane de forme carrée et rectangulaire [109]

$r_d = b/a$	1	2
k_1	0.00126	0.00254

3.2. Membrane de forme circulaire

En tenant compte le cas des petites déformations, la déflexion d'une membrane fine de forme circulaire de rayon R, parfaitement encastree aux bords est régie par l'équation différentielle de Lagrange d'ordre 4 en coordonnées polaires (III.14) [109]

$$\mathbf{\nabla^4 w(r) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w(r)}{\partial r} \right) \right] \right]} = \frac{P}{D} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

∇ : Opérateur Nabla

P : Pression uniforme et constante appliquée

D : Coefficient de rigidité du silicium

Les conditions aux limites imposées par l'encastrement de la membrane à ses bords sont données par les équations suivantes [109,118] :

$$\begin{aligned}
 w(r = R) &= 0 \\
 \left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{(r=R)} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{III.15}$$

L'expression de la déflexion $w(\mathbf{r})$ en coordonnées polaires est une solution exacte de l'équation différentielle précédente, donnée par l'équation (III.16) [109] :

$$w(r) = w_0 \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^2
 \tag{III.16}$$

Avec :

r : Coordonnée radiale.

R : Rayon de la membrane.

w_0 : Déflexion maximale au centre de la membrane circulaire qui est donnée par [105,109] :

$$w_0 = \frac{PR^4}{64D}
 \tag{III.17}$$

4. Modélisation du capteur de pression capacitif

4.1. Réponse capacitive C(P)

La structure du capteur de pression capacitif est illustrée sur figure III.3, elle contient une armature déformable (membrane) et une armature plane fixe constituant une capacité séparée par un diélectrique.

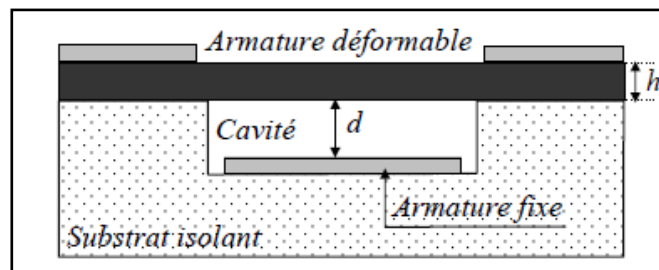


Figure III.3 : Capteur de pression capacitif au repos [104]

En l'absence de la pression appliquée sur la membrane, les armatures sont parallèles. La capacité au repos C_0 est alors donnée par la relation ci-dessous [104,119] :

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (\text{III.18})$$

Où :

- ϵ_0 et ϵ_r représentent respectivement la permittivité du vide ($8,86 \times 10^{-12}$ F/m) et la permittivité relative du gaz à l'intérieur de la cavité.
- A est la surface de l'armature fixe.
- d est la distance entre les deux armatures.

Lorsqu'on applique une pression P sur l'armature déformable, elle se fléchit vers l'armature fixe, permettant le changement de la distance d et par conséquent la variation de la capacité du capteur (Figure III.4).

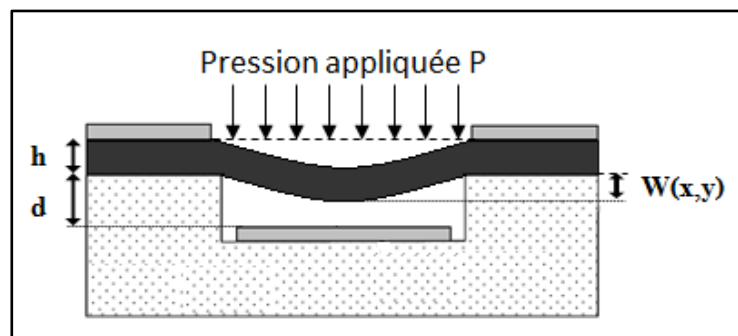


Figure III.4 : Capteur de pression capacitif en fonctionnement

Pour trouver l'expression de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée, on calcule l'intégrale sur tout l'espace déformé dans la cavité. L'expression de la capacité en fonction de la pression appliquée devient :

- Dans le cas de la membrane carrée et rectangulaire [14] :

$$C_{carrée}(P) = \epsilon_0 \epsilon_r \iint_A \frac{dA}{d - w(x, y, P)} \quad (\text{III.19})$$

où :

dA : représente un élément de surface de l'armature fixe ($dA = dx \cdot dy$)

$w(x, y, P)$: la déflexion bidimensionnelle de la membrane en fonction de la pression appliquée P au point d'un repère cartésien (x, y) dont le centre est le centre de la membrane.

Le calcul de l'intégrale double de l'équation (III.19) est compliqué et la solution est de type semi-analytique [115]. On peut exprimer l'expression de la capacité de façon approchée par un polynôme du second degré en fonction de la pression appliquée P [105].

- Dans le cas de la membrane circulaire [104] :

$$C_{\text{circulaire}}(\mathbf{P}) = \epsilon_0 \epsilon_r \iint_A \frac{d\mathbf{A}}{d - w(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{P})} \quad (\text{III.20})$$

$d\mathbf{A}$: représente un élément de surface de l'armature fixe ($d\mathbf{A} = d\mathbf{r} \cdot d\theta$)

$w(\mathbf{r}, \theta, \mathbf{P})$: la déflexion bidimensionnelle de la membrane en fonction de la pression appliquée P au point d'un repère polaire (r,θ) dont le centre est le centre de la membrane.

En utilisant l'équation (III.16, III.17), le calcul de l'intégrale double de l'équation (III.20) permet de déterminer l'expression analytique de la réponse capacitive C(P) qui est donnée par [120] :

$$C_{\text{circulaire}}(\mathbf{P}) = c_0 \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{w_0}{d} \right) + \frac{1}{5} \left(\frac{w_0}{d} \right)^2 \right] \quad (\text{III.21})$$

- **La pression maximale P_{\max} :**

La pression maximale P_{\max} qui peut être appliquée sur la membrane est définie lorsque la déflexion maximale w_0 est égale à la distance entre les deux armatures "d", au-delà de cette valeur de pression le capteur est en court circuit.

A partir des équations III.11 et III.17, l'expression de la pression maximale en fonction de la déflexion maximale au centre de la membrane est donnée par [105] :

- Dans le cas de la membrane carrée et rectangulaire :

$$P_{\max} = \frac{16Dd}{k(r_d)A^2} \quad (\text{III.22})$$

- Dans le cas de la membrane circulaire :

$$P_{\max} = \frac{64\pi^2 Dd}{A^2} \quad (\text{III.23})$$

4.2. Sensibilité S(P)

La sensibilité est un paramètre important pour concevoir un capteur de pression capacitif avec une meilleure performance. La sensibilité à la pression appliquée est définie par [14] :

$$S(P) = \frac{1}{C(P)} \frac{\partial C(P)}{\partial P} \quad (\text{III.24})$$

5. Simulation du capteur de pression capacitif

Pour étudier le comportement mécanique de la membrane et la réponse capacitive du capteur de pression, un logiciel de simulation COMSOL Multiphysiques, basé sur la méthode des éléments finis (FEM), est utilisé afin de déterminer les caractéristiques de ce capteur.

Le logiciel COMSOL Multiphysiques possède une grande variété de modules de couplage multiphysiques prédéfinis qui peuvent être utilisés pour analyser en temps réel les systèmes impliquant plus d'un domaine d'ingénierie simultanément. C'est un outil largement utilisé dans l'analyse et la conception des structures MEMS.

La simulation du capteur de pression capacitif est réalisée en utilisant le couplage des trois modules physiques suivants : mécanique des structures, maillage mobile et l'électrostatique.

5.1. Description de la structure

La structure de base du capteur de pression capacitif à modéliser est illustrée sur la figure III.5. Ce capteur est composé de deux couches en Silicium séparées par un diélectrique qui est l'air. Lorsqu'on applique la pression sur la membrane, celle-ci se déforme en fonction de plusieurs facteurs tels que : la pression appliquée, les propriétés mécaniques du matériau utilisé et la géométrie de la membrane du capteur. Cette déformation de la membrane engendre une variation de la capacité en fonction de la pression appliquée.

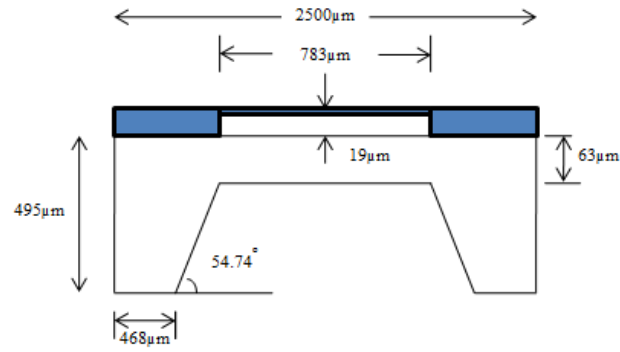


Figure III.5 : Vue en coupe de la structure du capteur de pression capacitif [115]

Pour déterminer l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la réponse capacitif du capteur, trois formes de la membrane (carrée, rectangulaire, circulaire) sont modélisées en gardant la même surface de la membrane " A " (figure III.6). Les paramètres géométriques et les caractéristiques mécaniques de silicium sont regroupés dans les deux tableaux III.3 et III.4.

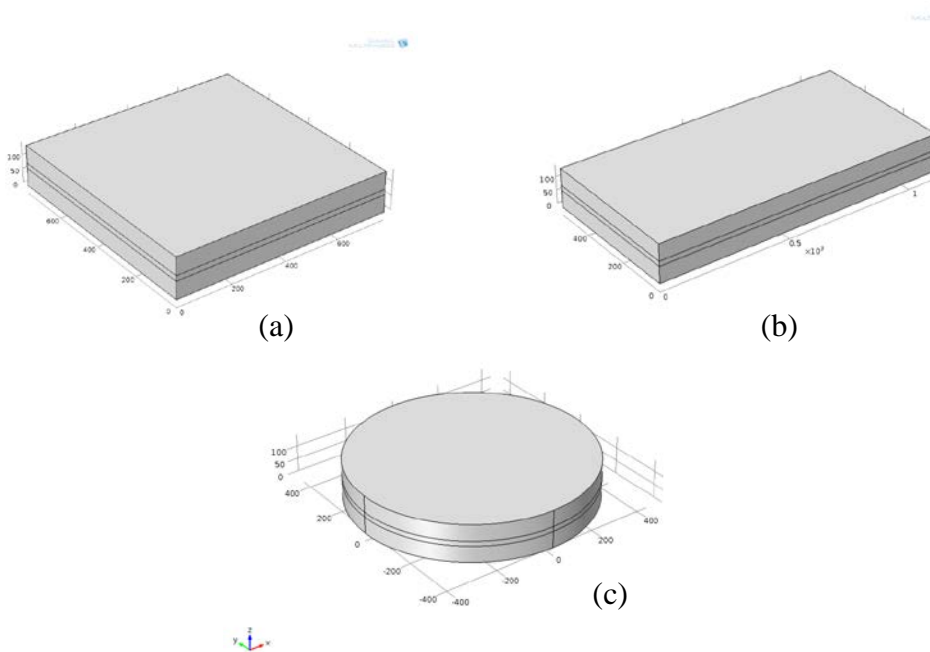


Figure III.6 : Vue en 3D des différentes structures du capteur de pression capacitif
a) carrée, b) rectangulaire, c) circulaire

Tableau III.3 : Les paramètres géométriques des capteurs utilisés dans la simulation

Paramètres	Carrée ($r_d=1$) [115,121]	Rectangulaire ($r_d=2$)	Circulaire
Dimensions (μm)	Coté $a = 783$	Largeur $a = 553$ Longueur $b = 1107$	Rayon $R = 442$
Surface de la membrane A (μm^2)	0,61	0,61	0,61
Épaisseur de la membrane h (μm)	63	63	63
Gap d (μm)	19	19	19

Tableau III.4 : Caractéristiques mécaniques de Silicium [115]

Matériau	Module de Young E (GPa)	Coefficient de Poisson ν	Masse volumique ρ (kg/m^3)
Silicium	131.9	0.27	2330

5.2. Equations fondamentales :

La déformation mécanique est un changement de forme et de volume de la structure sous l'action de forces extérieures (III.25) [122] :

$$\boxed{-\nabla \cdot \sigma = F} \quad (III.25)$$

Où :

σ : est le tenseur des contraintes.

F : représente les forces de volume (forces de masse).

Pour un matériau élastique linéaire, la relation de contrainte-déformation est montrée par l'équation (III.26) [122,123] :

$$\boxed{\sigma = D\varepsilon_{ela} = D(\varepsilon - \varepsilon_{th} - \varepsilon_0) + \sigma_0} \quad (III.26)$$

Où :

D : Tenseur d'élasticité

σ_0 : Contrainte initiale

ε_0 : Déformation initiale

ε_{th} : Déformations thermiques

Le calcul du champ électrique est obtenu à partir de la loi de Gauss et l'équation de continuité comme le montre l'équation suivante (III.27) [123] :

$$-\nabla \cdot (\epsilon_{vac} \epsilon_r \nabla V) = \rho \quad (III.27)$$

Où :

ϵ_{vac} : est permittivité du vide.

ϵ_r : est la permittivité relative.

ρ : est la densité de charge d'espace.

Le calcul de la capacité C est obtenu à partir de l'énergie du champ électrique décrit par l'équation suivante (III.28) [123] :

$$C = \frac{2}{V^2} \int W_e d\Omega \quad (III.28)$$

Où :

V : Tension appliquée sur l'électrode

We: Densité d'énergie électrique

Ω : Surface déformée dans la cavité du capteur

5.3. Maillage et résolution du modèle

Le maillage est une discrétisation du domaine en éléments finis. La figure III.7 représente la structure maillée de différentes géométries de la membrane. Le maillage est réalisé en utilisant des éléments de type tétraédrique. Le maillage est raffiné dans le milieu de la structure. La résolution du modèle est faite de manière à tenir compte le couplage entre les trois modules : mécanique des structures, maillage en mouvement et l'électrostatique.

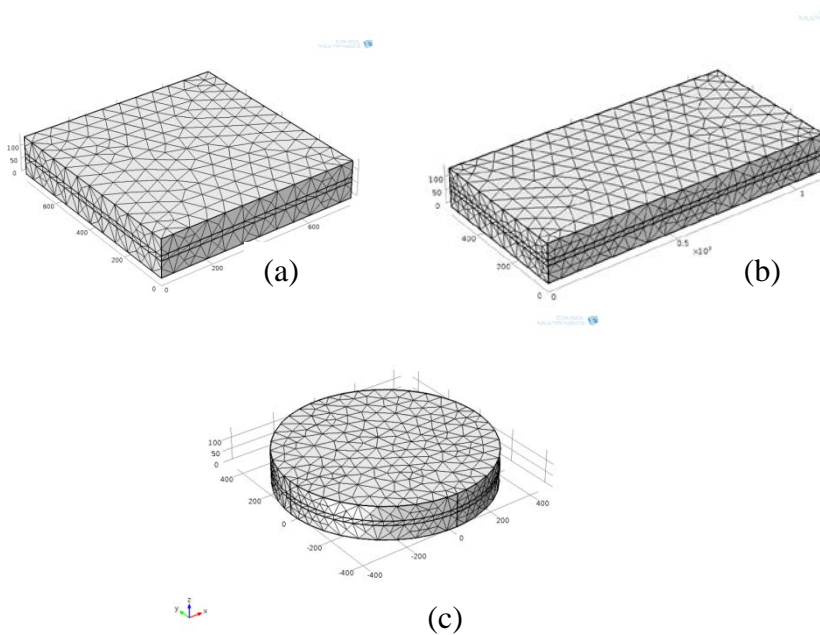


Figure III.7 : Vue en 3D des différentes structures maillées du capteur de pression capacitif
a) carrée, b) rectangulaire, c) circulaire

6. Résultats et discussions :

Nous présentons ci-après les résultats de simulation de différentes conceptions des capteurs de pression capacitif (carrée, rectangulaire, circulaire). Dans un premier temps, nous utilisons la même structure de la membrane carrée pour confirmer les résultats obtenus par [115,121], et par la suite, nous proposons deux autres structures (rectangulaire, circulaire), et la validation de ces structures s'effectue à partir des modèles analytiques.

6.1. La déformation de la membrane en fonction de la pression appliquée

A partir des équations (III.11), (III.13) et (III.17) nous traçons les courbes de variations de la déflexion $w(x, y)$ avec $r_d = 1$ et $r_d = 2$, ainsi que la déflexion $w(r, \theta)$. Les figures III.9, III.11 et III.13 montrent la déflexion (déformation) de la membrane en fonction de la pression appliquée (100 MPa) pour les trois formes (carrée, rectangulaire, circulaire). Les résultats des figures III.8, III.10 et III.12 sont obtenus à partir de la simulation par COMSOL.

- La membrane de forme carrée ($r_d=1$)

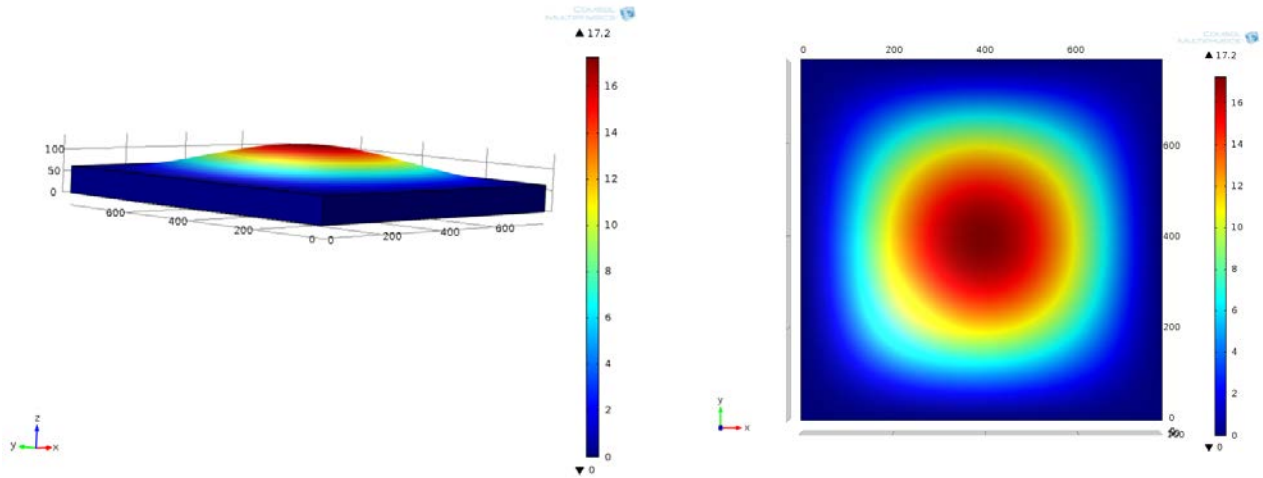


Figure III.8 : Vue en 3D de la déflexion $w(x,y)$ de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée

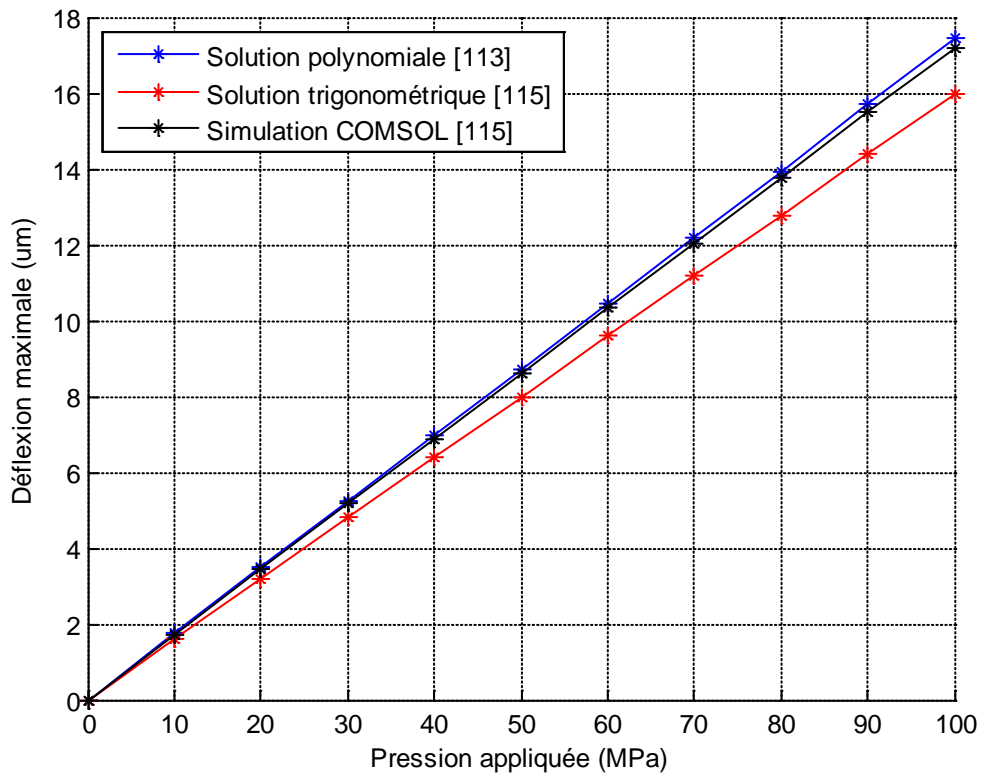


Figure III.9 : Déflexion maximale de la membrane de forme carrée en fonction de la pression appliquée

A partir des figures III.8 et III.9, nous remarquons que le résultat obtenu pour la déflexion de la membrane de forme carrée est en parfaite concordance avec ce de la littérature [115]. On note que les courbes de déflexions de la membrane sont comparable dans le cas de modèle polynomiale et le modèle trigonométrique.

- La membrane de forme rectangulaire ($r_d=2$)

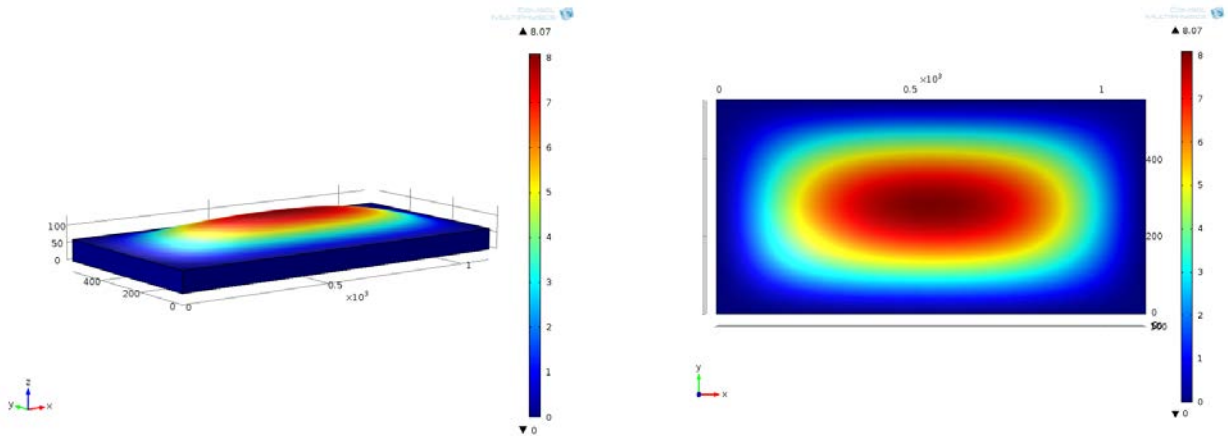


Figure III.10 : Vue en 3D de la déflexion $w(x,y)$ de la membrane de forme rectangulaire en fonction de la pression appliquée

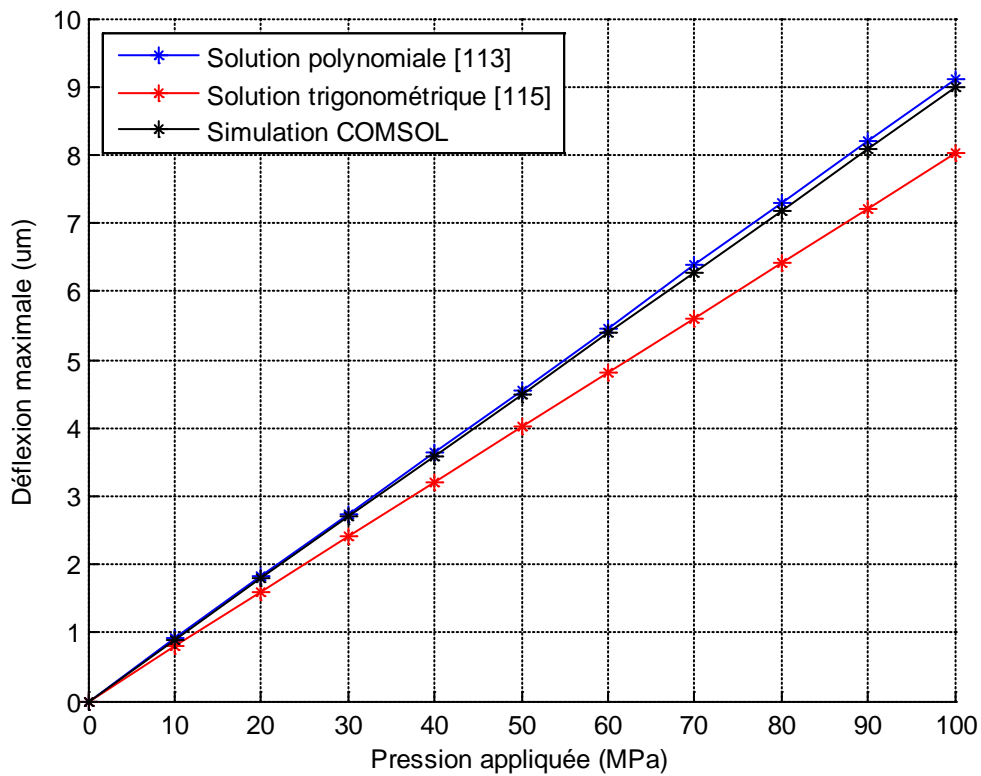


Figure III.11 : Déflexion maximale de la membrane de forme rectangulaire en fonction de la pression appliquée

A partir des figures III.10 et III.11, la variation de la déflexion de la membrane est maximale et proportionnelle en fonction de la pression appliquée. On note que les courbes de déflexions de la membrane sont comparable dans le cas de modèle polynomiale et le modèle trigonométrique.

- La membrane de forme circulaire

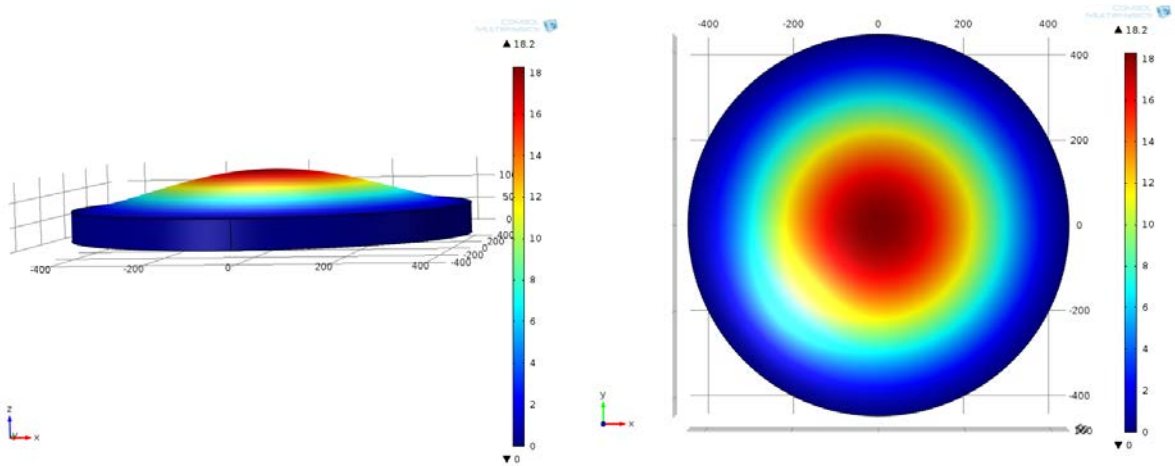


Figure III.12 : Vue en 3D de la déflexion $w(r,\theta)$ de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée

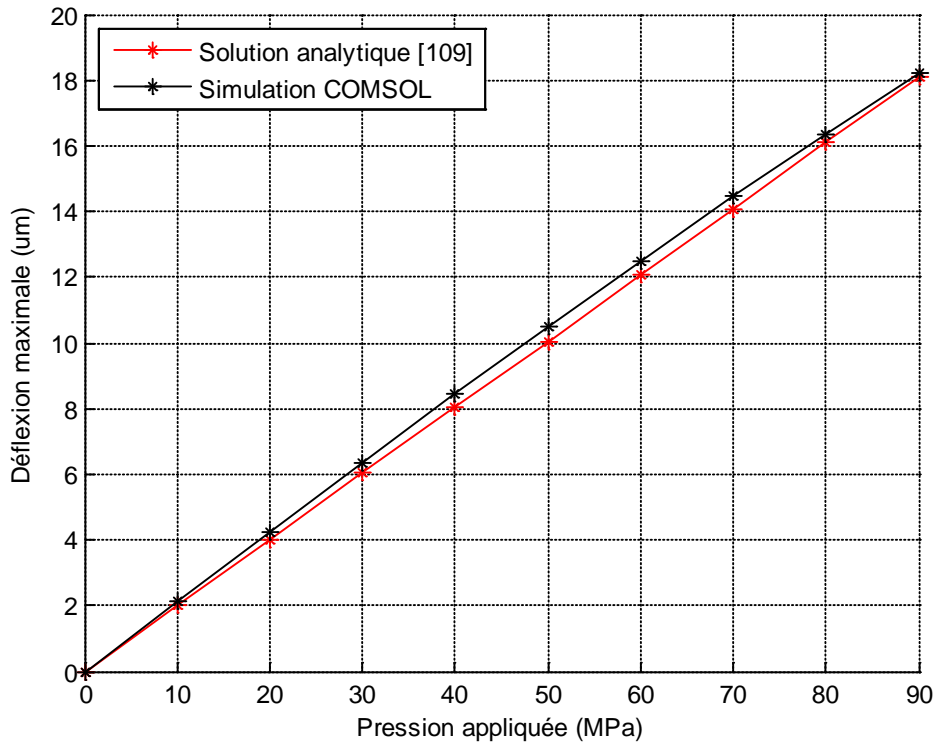


Figure III.13 : Déflexion maximale de la membrane de forme circulaire en fonction de la pression appliquée

Les figures III.12, III.13 montrent que la variation de la déflexion au centre de la membrane est maximale et proportionnelle en fonction de la pression appliquée. Le résultat de la déflexion de la membrane circulaire obtenu par le modèle analytique est presque identique par rapport au résultat obtenu par la simulation COMSOL.

6.2. La réponse de la capacité en fonction de la pression appliquée

A partir des équations (III.19), (III.21) nous traçons les courbes de variations des capacités $C(P)$ avec $r_d = 1$, $r_d = 2$ et $C_{\text{circulaire}}(P)$. Les figures III.14, III.15 et III.16 montrent la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée pour les trois formes (carrée, rectangulaire, circulaire).

- La membrane de forme carrée ($r_d=1$)

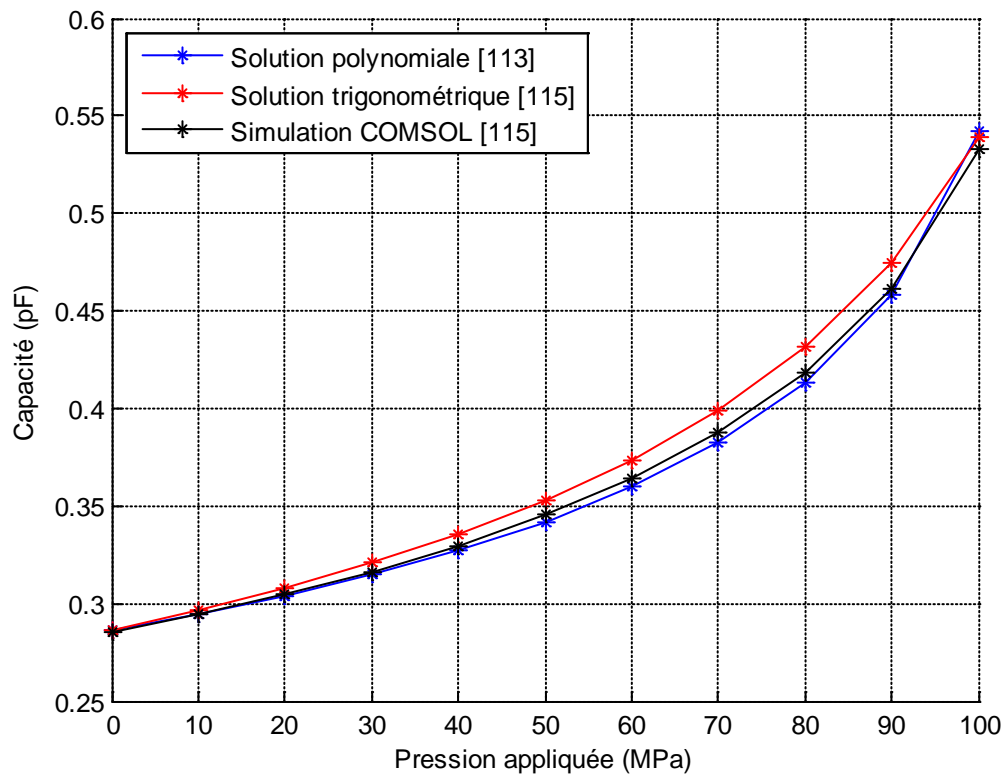


Figure III.14 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas de la membrane de forme carrée

La figure III.14 représente les variations de la capacité $C(P)$ en fonction de la pression appliquée P avec $r_d=1$, pour les deux modèles polynomiale et trigonométrique, ainsi que la simulation par COMSOL.

Nous constatons que ces courbes sont en parfaite concordance avec ceux de la littérature [115]. On note que le résultat obtenu est comparable avec le modèle polynomiale et le modèle trigonométrique.

- La membrane de forme rectangulaire ($r_d=2$)

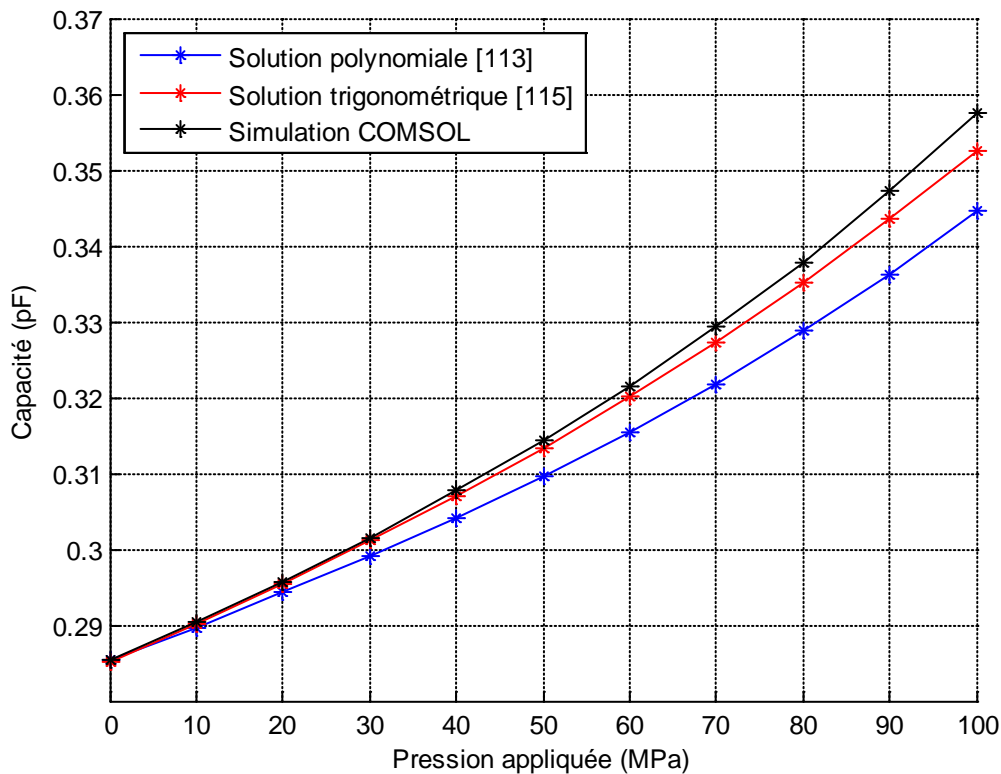


Figure III.15 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée de la membrane de forme rectangulaire

La figure III.15 représente les variations de la capacité C (P) en fonction de la pression appliquée P avec $r_d = 2$, pour les deux modèles polynomiale et trigonométrique, ainsi que la simulation par COMSOL. On constate que le modèle trigonométrique présente une bonne approximation par rapport au résultat obtenu par le modèle polynomiale. Le choix du modèle utilisé (trigonométrique ou polynomiale) est très important pour obtenir un meilleur résultat comparativement au résultat effectué par la simulation COMSOL.

- La membrane de forme circulaire

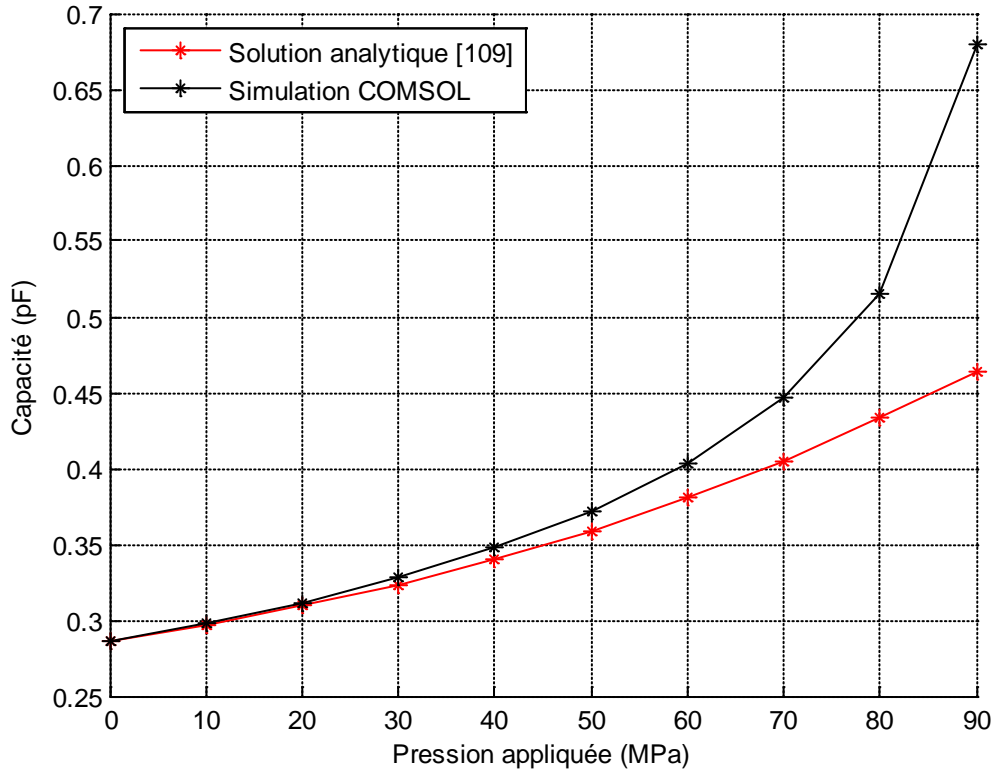


Figure III.16 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le cas de la membrane de forme circulaire

La figure III.16 représente les variations de la capacité $C(P)$ en fonction de la pression appliquée P . Nous remarquons que la variation de la capacité est proportionnelle à la pression appliquée. On constate que l'allure de la courbe obtenue par simulation COMSOL est similaire à celle du résultat obtenu analytiquement [109] dans l'intervalle de pression de 0 à 40 MPa, néanmoins une légère différence est remarquée entre ces courbes lorsqu'on augmente la pression à partir de 40 MPa.

6.3. Etude des paramètres géométriques de la membrane

Pour déterminer l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la réponse capacitive du capteur de pression capacitif, nous avons effectué la simulation de la réponse capacitive pour différentes valeurs de : la surface de la membrane " A ", la distance inter électrodes " d " et l'épaisseur de la membrane " h ". Les résultats obtenus sont représentés dans les figures III.17, III.18, III.19.

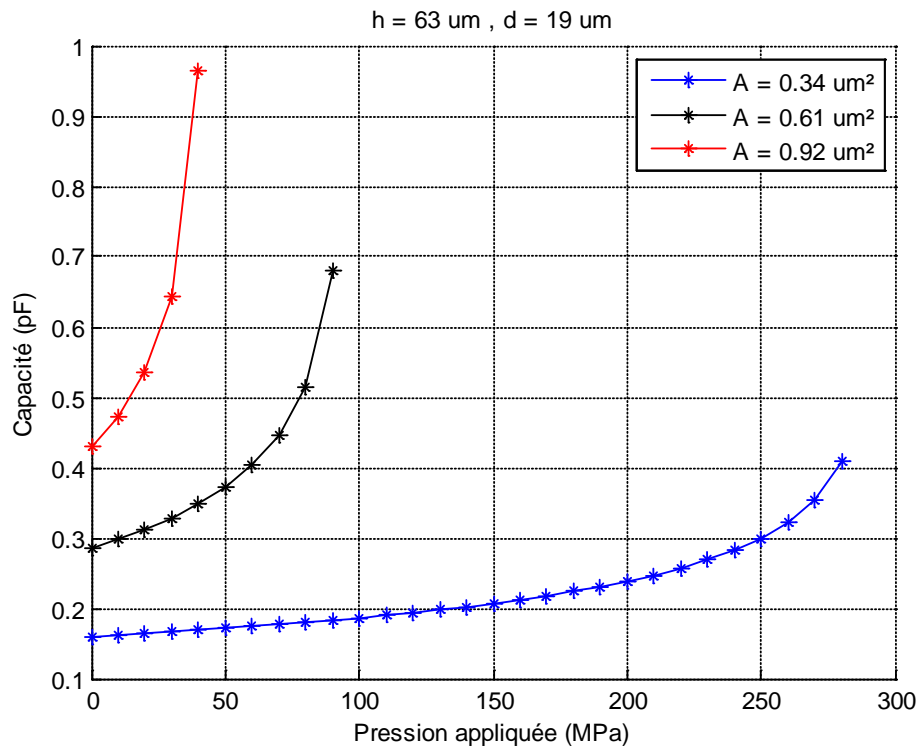


Figure III.17 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de la surface " A "

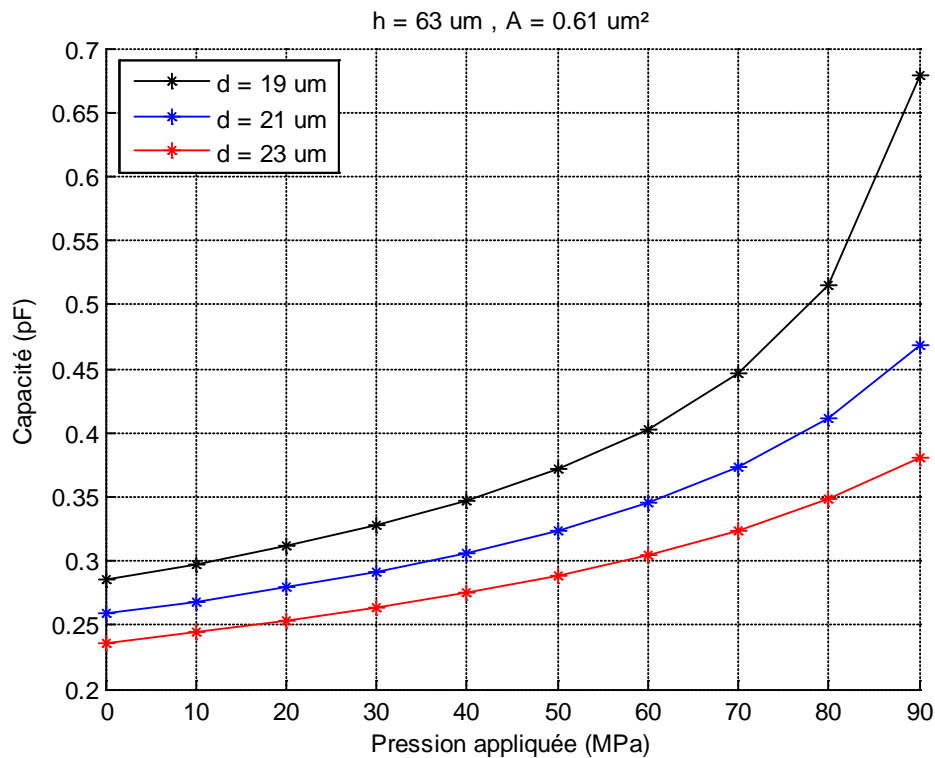


Figure III.18 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de la distance inter électrodes " d "

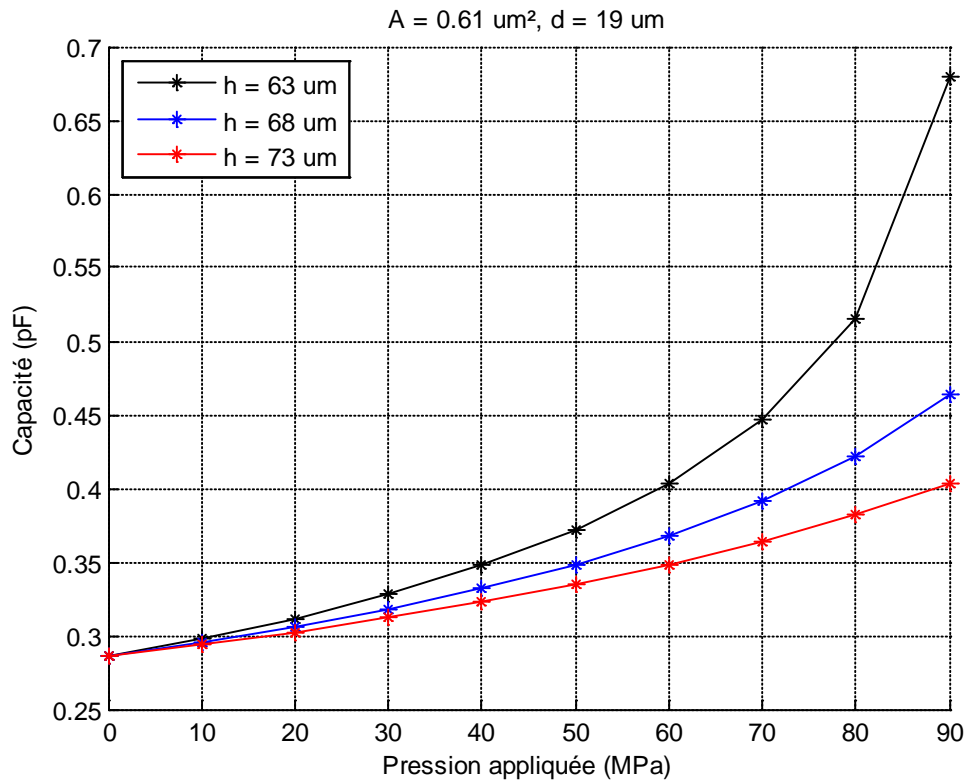


Figure III.19 : Variation de la capacité en fonction de la pression appliquée d'une membrane de forme circulaire pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane " h "

A partir de ces figures, nous remarquons qu'une augmentation de la surface " A " augmente automatiquement la valeur de la capacité. L'augmentation de la distance inter électrodes " d " et l'épaisseur de la membrane " h " permettent de diminuer la capacité dans les deux cas.

En utilisant l'équation (III.24), les courbes de la sensibilité à la pression $S(P)$ sont obtenues en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs géométriques de la membrane : la surface de la membrane " A ", la distance inter électrodes " d " et l'épaisseur de la membrane " h ".

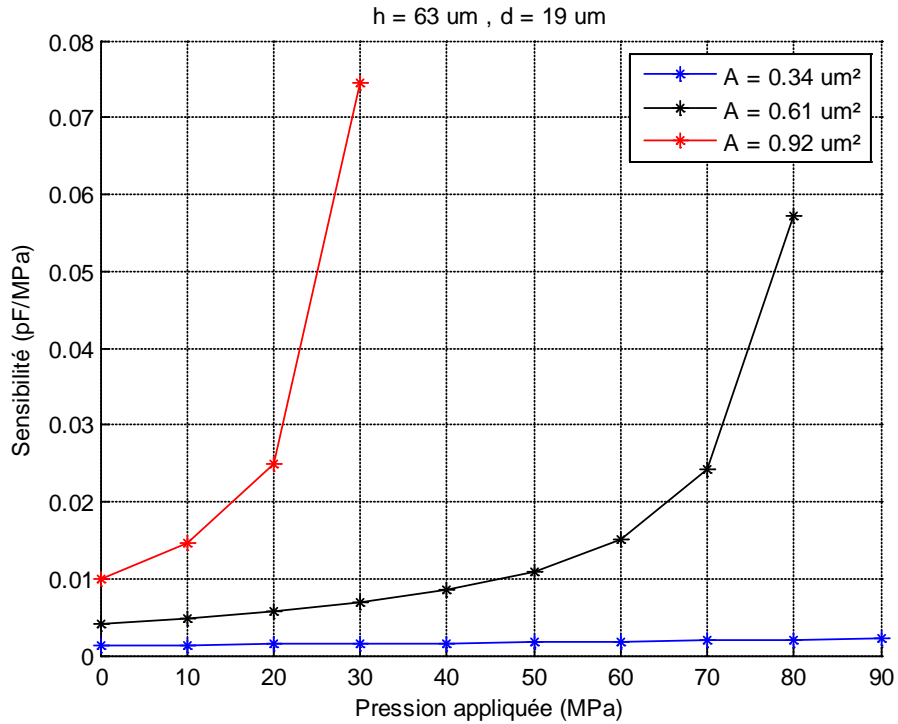


Figure III.20 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de la surface " A " d'une membrane de forme circulaire

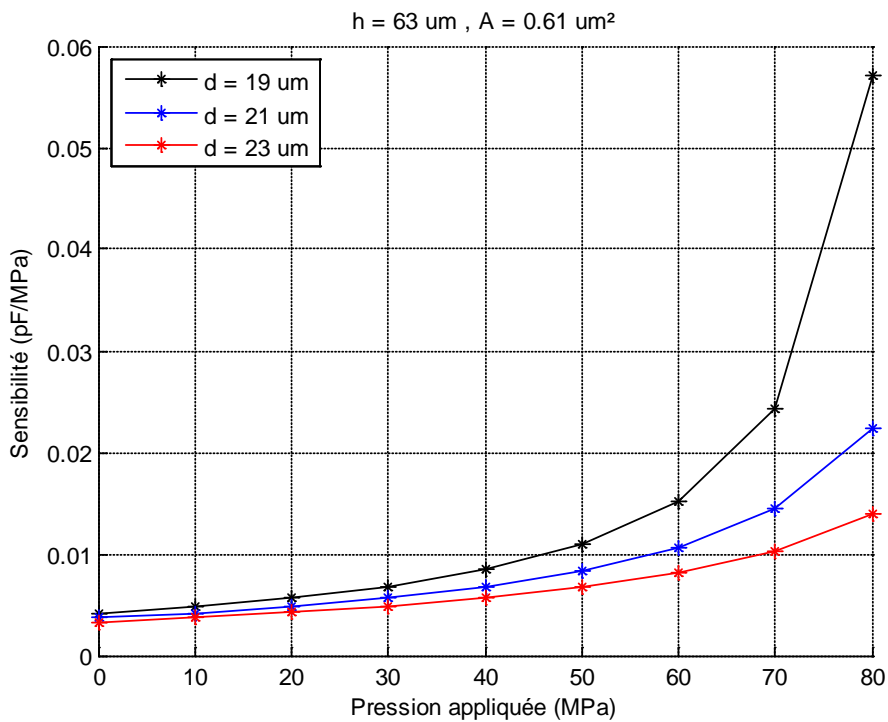


Figure III.21 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de la distance inter électrodes " d " d'une membrane de forme circulaire

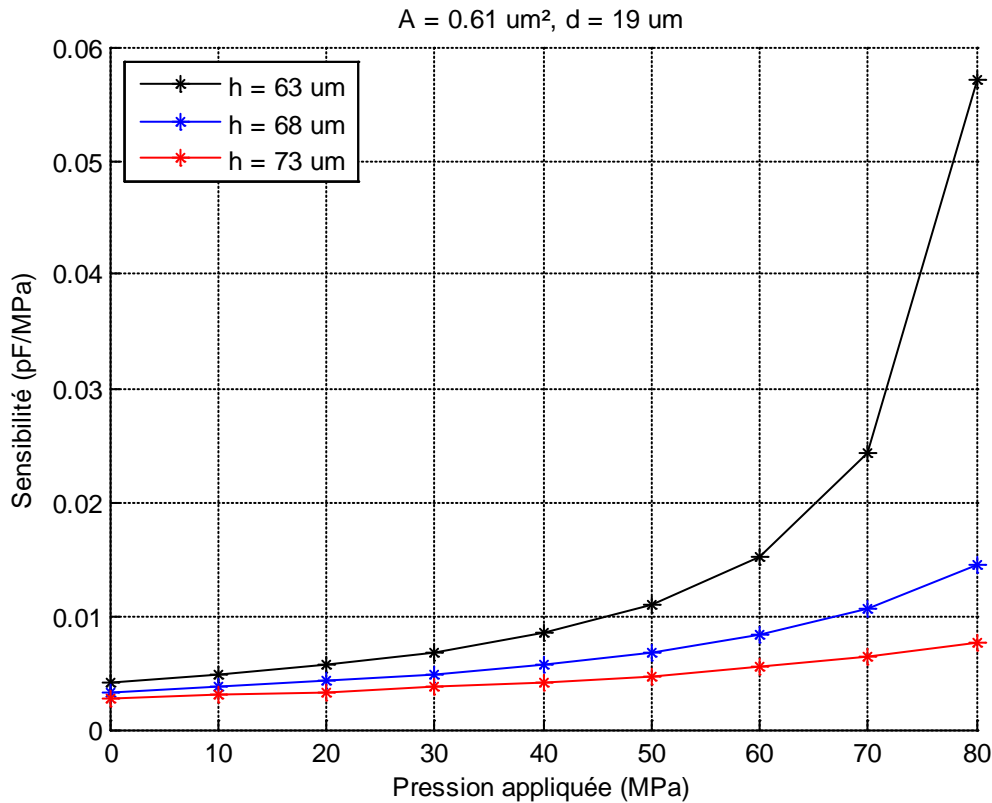


Figure III.22 : Sensibilité en fonction de la pression appliquée pour différentes valeurs de l'épaisseur de la membrane " h " d'une membrane de forme circulaire

Les figures III.20, III.21 et III.22 montrent l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la sensibilité à la pression $S(P)$ en fonction de la pression appliquée.

A partir de ces figures Nous constatons que :

- La sensibilité est proportionnelle à la surface " A ".
- La sensibilité est inversement proportionnelle à la distance inter électrode " d ".
- La sensibilité est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la membrane " h ".

D'après toutes les figures précédentes (III.17 jusqu'à III.22), on conclue que l'augmentation de la capacité ou bien de la sensibilité est obtenue par :

- La maximisation de la surface " A ".
- La minimisation de la distance inter électrodes " d ".
- La minimisation de l'épaisseur de la membrane " h ".

6.4. Etude comparative

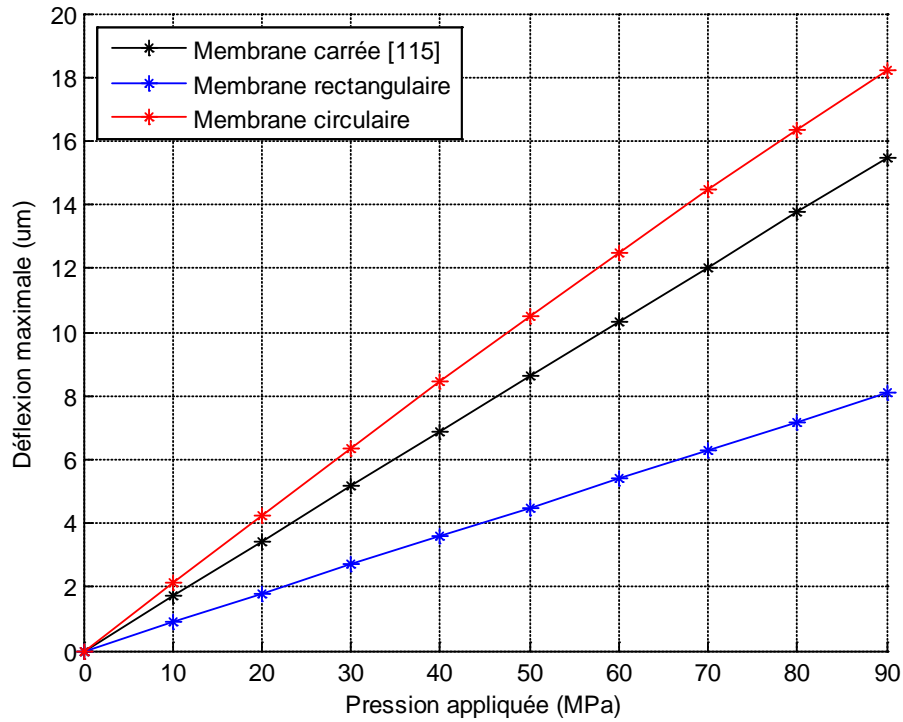


Figure III.23 : Comparaison de la déflexion maximale en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes

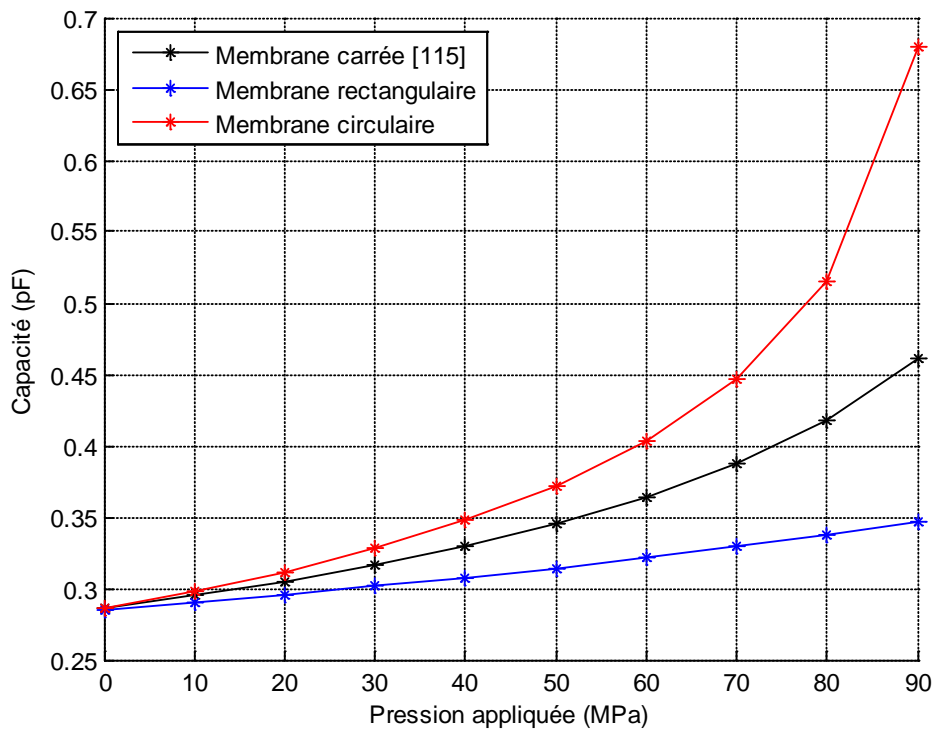


Figure III.24 : Comparaison de la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes

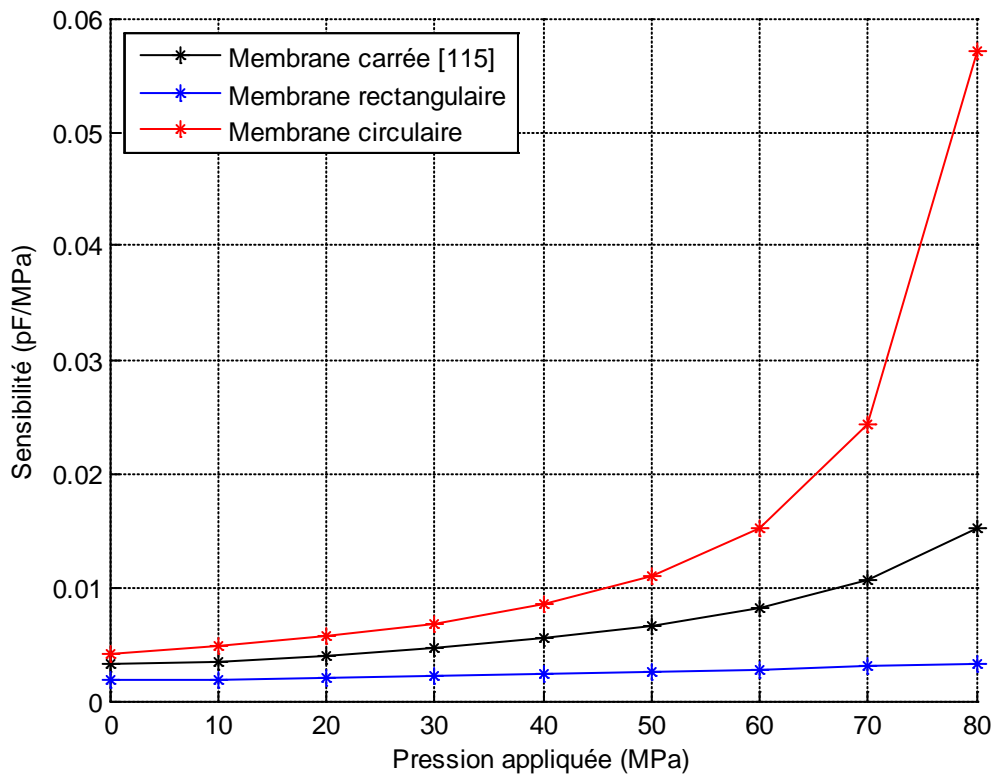


Figure III.25 : Comparaison de la variation de la sensibilité à la pression $S(P)$ en fonction de la pression appliquée pour différentes formes de membranes

Pour déterminer l'effet de la forme de la membrane sur le comportement du capteur de pression, les figures III.23, III.24 et III.25 montrent une étude comparative de la déflexion maximale, la réponse capacitive $C(P)$ et la sensibilité à la pression $S(P)$ en fonction de la pression appliquée pour les trois formes de la membrane. On observe que la déflexion dans le cas de la membrane de forme circulaire est maximale et fléchit plus, par rapport aux autres cas (carrée et rectangulaire), ce qui résulte des valeurs d'amplitudes supérieures de la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée, par conséquent une meilleure sensibilité par contre on remarque que dans le cas de la membrane rectangulaire, la réponse capacitive possède une large zone linéaire avec une faible sensibilité.

7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, un rappel théorique sur la structure d'un capteur de pression capacitif ainsi que son principe de fonctionnement, suivi d'une étude de comportement mécanique d'une membrane parfaitement encadrée aux bords de formes, carrée, rectangulaire et circulaire, soumise à une pression uniforme et constante dans le cas des faibles déformations.

Nous avons modélisé la déflexion de la membrane en fonction de la pression appliquée pour les trois formes de la membrane en basant sur deux solutions (polynomiale et trigonométriques) et la simulation par COMSOL. Nous avons montré que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de la théorie.

Nous avons trouvé que la déflexion de la membrane est maximale au centre de la membrane et proportionnelle à la pression appliquée. Une comparaison entre les résultats de la déflexion pour les trois formes de la membrane permet de constater que la membrane circulaire fléchit plus que les autres cas (carrée et rectangulaire). Cette déflexion de la membrane engendre une variation de la réponse capacitive, elle est d'une amplitude importante dans le cas de la membrane circulaire, par conséquent une meilleure sensibilité est observée.

La variation des valeurs des paramètres géométriques de la membrane influe sur la réponse capacitive et aussi sur la sensibilité à la pression. Nous avons déduit que l'obtention d'une haute sensibilité du capteur de pression capacitif nécessite une large surface de la membrane, une faible distance inter électrodes et une très mince épaisseur de la membrane [124]. En tenant comptes de ces paramètres, la conception et l'amélioration de la performance du capteur de pression capacitif est limité par la technologie utilisée et l'application visée.

Chapitre IV
Conception et réalisation
du capteur de pression capacitif
(premier prototype)

1. Introduction

Ce chapitre décrit les différents procédés de fabrication pour caractériser le premier prototype du capteur de pression capacitif. Pour développer dans l'ordre le processus de fabrication des différents masques utilisés sera présenté ainsi que les procédés utilisés pour la gravure des deux PCB.

Plusieurs alternatives ont été faites pour parvenir à un processus final et fonctionnel. Le matériau choisi pour fabriquer la membrane, tel que mentionné ci-après, la résine photosensible SU-8 de la série 2025 MICROCHEM et le substrat choisi est FR4 (plaque de PCB). Le choix est dû à la plus grande accessibilité à ce type de substrat, la bonne adhérence avec SU-8 et l'intégration facile avec d'autres composants électroniques. Par la suite, nous allons présenter les résultats expérimentaux, ainsi que les résultats de simulation obtenus afin de les comparer.

2. Définition de la structure

Les principaux éléments tels que la membrane, l'électrode supérieure (armature mobile) et l'électrode inférieure (armature fixe) définissent la structure du capteur de pression capacitif.

La variation capacitive du capteur de pression capacitif est similaire à une capacité variable. Lorsqu'une pression est appliquée sur la membrane, elle engendre un déplacement de l'électrode supérieure vers le bas. La variation de la distance inter électrodes entraîne une variation de la capacité de la structure.

Le capteur de pression capacitif présenté dans la figure IV.1 est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en argent. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur.

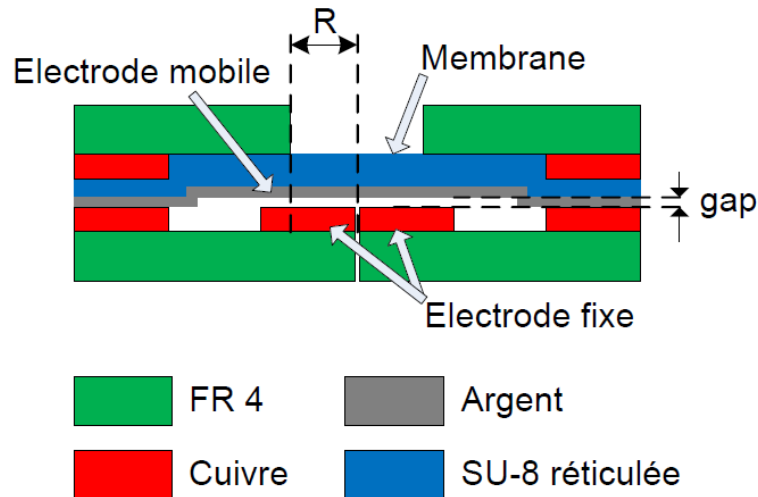


Figure IV.1 : Vue en coupe du capteur de pression capacitif

La structure est composée d'une membrane circulaire ayant une épaisseur t et de rayon R . La membrane SU-8 est recouverte d'un matériau conducteur (argent) qui agit en tant qu'électrode mobile. La capacité variable est située entre l'électrode mobile et l'électrode fixe.

Le gap entre les deux électrodes est défini par l'épaisseur de la couche supérieure gravée en cuivre comme indiqué dans la figure IV.1. Toutefois, ce gap peut être défini facilement par le processus de fabrication.

3. Fabrication des masques

Un masque permet de transférer la conception de la structure à une couche de matériau que nous souhaitons formé pour fabriquer notre capteur de pression de type capacitif.

La fabrication des masques s'effectue en utilisant le phototraceur. Cette étape est très importante dans la procédure de photolithographie, où la structure finale de notre capteur est réalisée. Pour fabriquer notre capteur de pression, nous avons utilisé deux masques, le masque 1 pour définir l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB) comme illustré dans la figure IV.2 et le masque 2 pour définir l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB) comme présenté dans la figure IV.3.

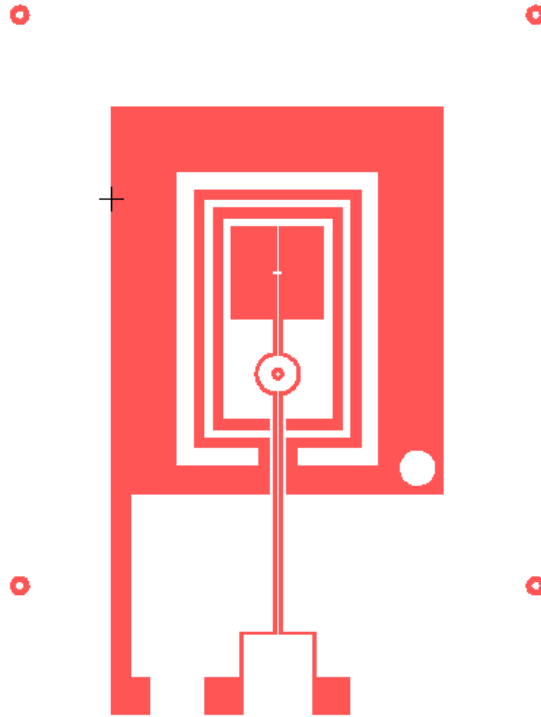


Figure IV.2 : Masque 1 de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB)

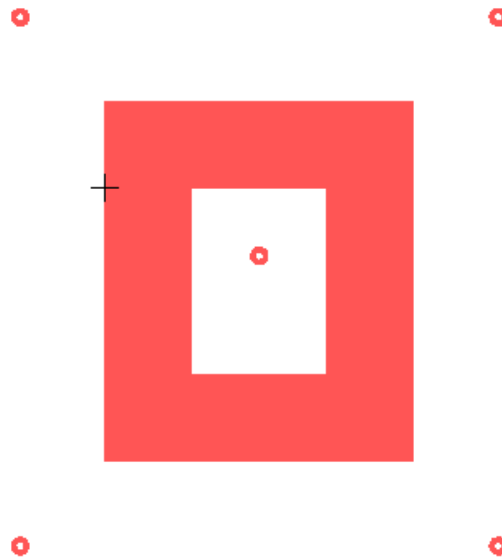


Figure IV.3 : Masque 2 de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB)

Nous avons conçu les deux masques avec les dimensions suivants :

- Le masque 1 de l'électrode fixe (plaque inférieure de PCB) ayant une largeur de 3,6 cm et une longueur de 6.2 cm. Trois pastilles carrés de 4 mm de côté servant comme prises de contact pour mesurer la capacité du capteur. Ces pastilles distinctes sont écartées les unes des autres pour éliminer les effets parasites pendant la mesure.

- Le masque 2 de l'électrode mobile (plaque supérieure de PCB) ayant une largeur de 3,6 cm et une longueur de 4.2 cm. Un cercle de diamètre de 1 mm situé à l'intérieur est utilisé pour déterminer la position de la membrane. Les quatre autres cercles sont utilisés pour régler l'alignement de ce masque avec le masque 1 durant l'étape d'assemblage.

La conception des masques est faite en utilisant le logiciel L-Edit (Layout Editor de Tanner Research Incorporated) [125]. C'est un outil facile pour dessiner différentes couches qui peuvent être facilement représentées par différentes couleurs et motifs. Il permet à la fin de produire des fichiers intermédiaires de format standard utilisé généralement dans l'industrie. La figure IV.4 et la figure IV.5 présentent le masque de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB) et le masque de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB), pour les deux capteurs réalisés respectivement.

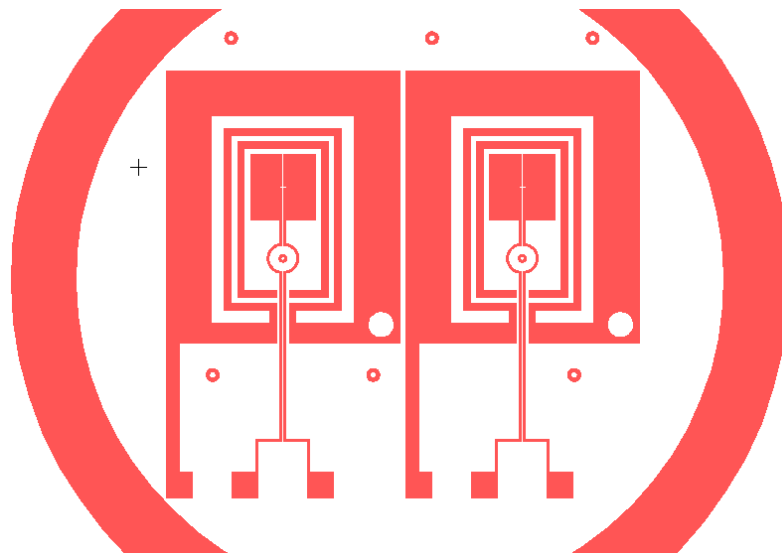


Figure IV.4 : Masque de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB), pour les deux capteurs

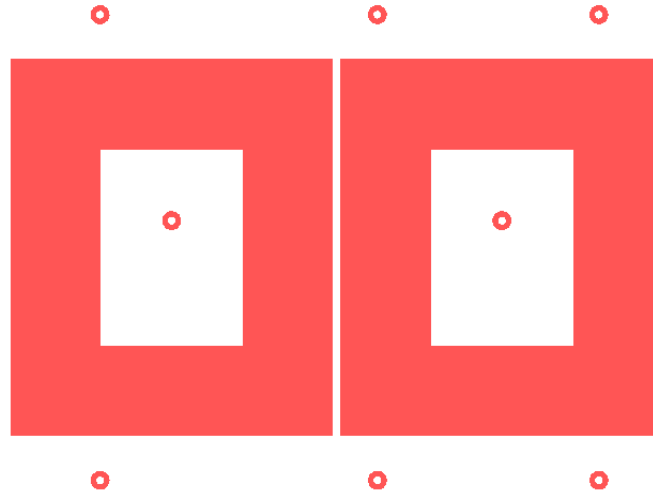


Figure IV.5 : Masque de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB), pour les deux capteurs

Après la conception du masque par le logiciel L-Edit, l'étape suivante est de changer le format de fichier (l'extension finale est FPF). Cette étape est nécessaire pour imprimer le masque (résolution de 2032 dpi) en utilisant un phototraceur (FP-8000 XL de Bungard) connecté avec un ordinateur (figure IV.6).

L'étape de fabrication de masque est réalisée en salle blanche (laboratoire de microsysteme, université de Séville) avec une lumière verte spéciale pour ne pas endommager le masque qui est totalement noir.

Un morceau de masque carré coupé selon les dimensions de la structure qu'on veut réaliser et attaché à l'intérieur de la machine du phototraceur avec du ruban adhésif. A la fin, le processus de développement de masque commence.



Figure IV.6 : Phototraceur

Le temps de développement du masque dans la machine de phototraceur dépend des dimensions et de la forme de la structure qu'on souhaite fabriquer.

Après cette étape, le développement de masque est réalisé en utilisant trois bacs qui contiennent le révélateur (Kodak RA-2000), de l'eau et le fixateur (Kodak RA-3000).

Le masque est immergé pendant une minute dans le premier bac de révélateur et dans le deuxième bac contenant de l'eau durant le même temps. Puis le masque est introduit directement dans le troisième bac contenant le fixateur pendant une durée de cinq minutes.

A la fin, le masque est rincé encore une fois dans l'eau et laissé sécher, suite à cette procédure, le masque dessinée est prêt à être utilisé dans l'étape de photolithographie. Les masques réalisés sont présentés dans les figures IV.7 et IV.8.

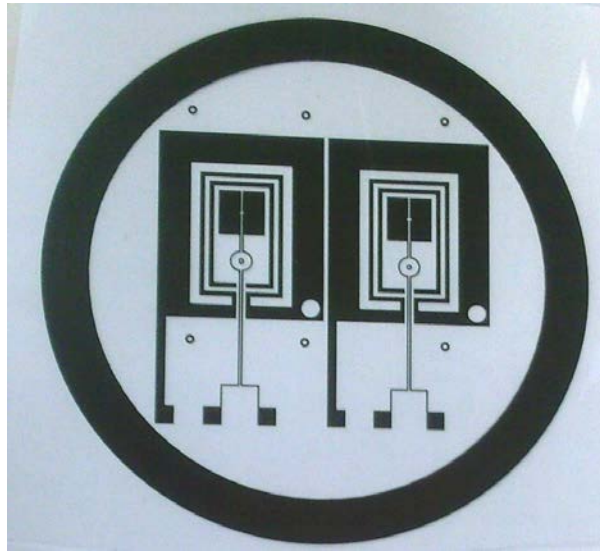


Figure IV.7 : Masque réalisé de l'électrode fixe (la plaque inférieure de PCB), pour les deux capteurs

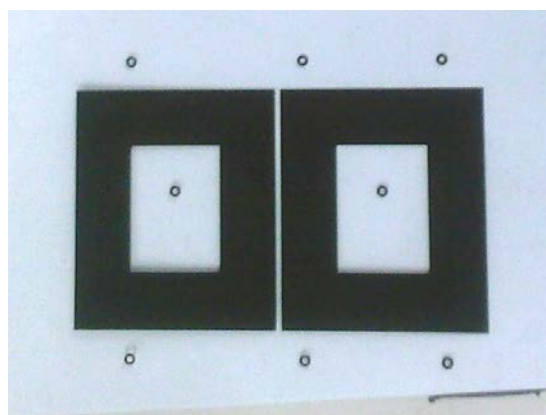


Figure IV.8 : Masque réalisé de l'électrode mobile (la plaque supérieure de PCB), pour les deux capteurs

4. Procédés de fabrication

La structure du capteur est fabriquée en utilisant la technologie PCBMEMS. La réalisation du capteur est effectuée au laboratoire Microsystèmes, université de Séville. La figure IV.9 présente la structure en 3D du capteur de pression capacitif (premier prototype). Les principales étapes du procédé de fabrication sont présentées dans la figure IV.10.

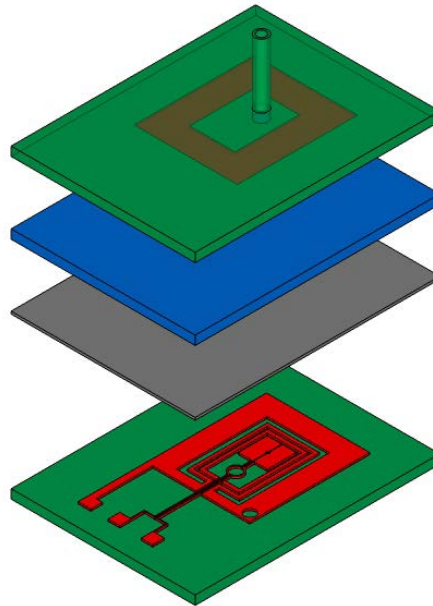


Figure IV.9 : Structure en 3D du capteur de pression capacitif (premier prototype)

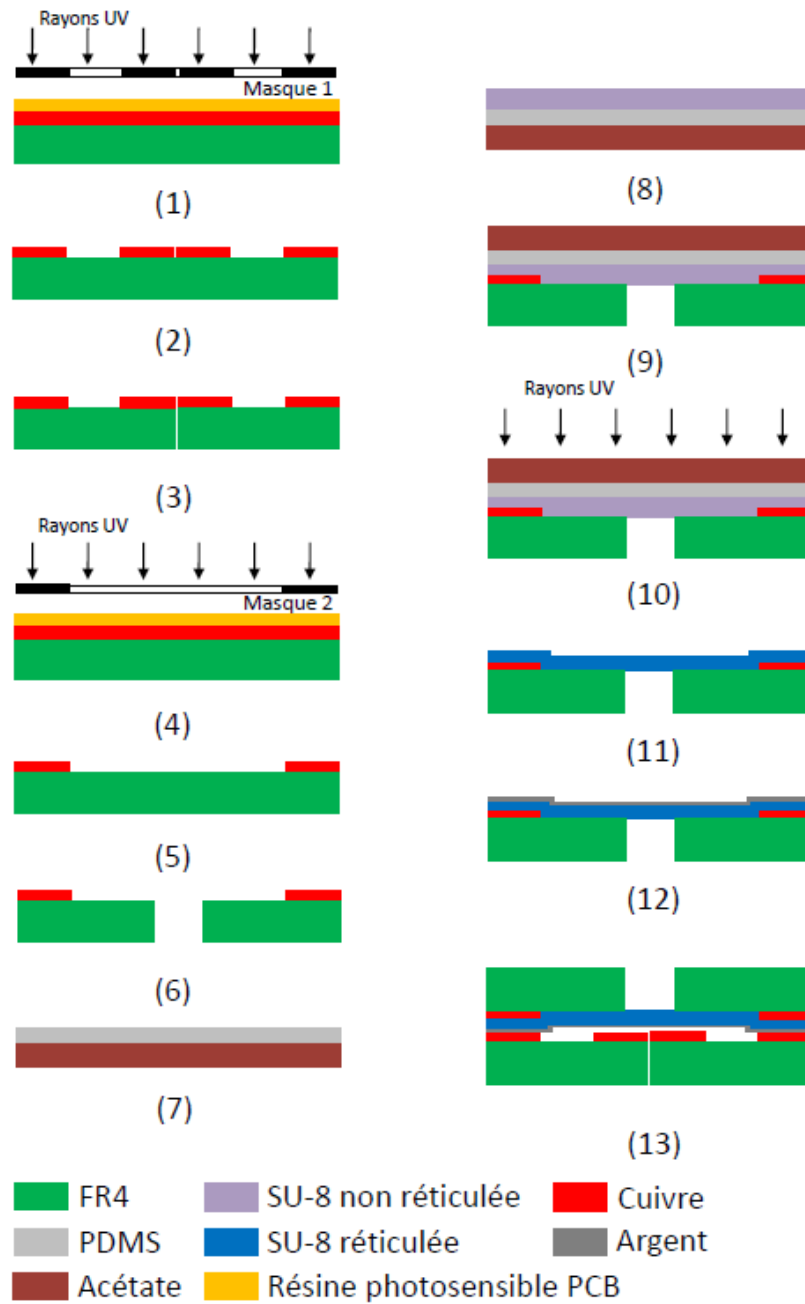


Figure IV.10 : Procédés de fabrication du premier prototype

4.1. Réalisation des circuits imprimés

4.1.1. Plaque inférieure de PCB

La plaque inférieure de circuit imprimé PCB contient l'électrode fixe et les connexions électriques. La figure IV.11 illustre le processus de fabrication de la plaque inférieure de PCB.

étape 1 : la lithographie UV standard.

étape 2 : la gravure de la couche de cuivre.

étape 3 : le perçage du substrat FR4.

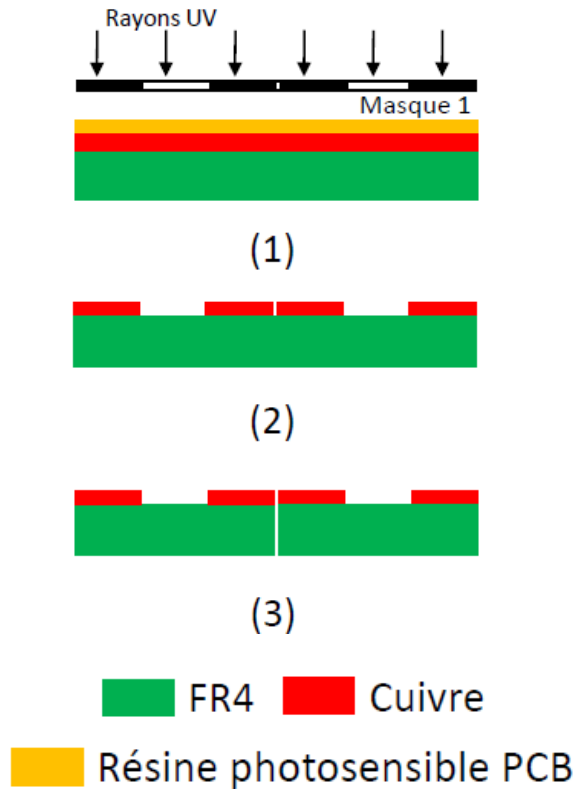


Figure IV.11 : Processus de fabrication de la plaque inférieure PCB

a. Substrat

La plaque de circuit imprimé PCB (printed circuit board) est constituée d'une plaque en bakélite ou en verre époxy sur laquelle se trouve une couche de cuivre. Une couche de résine photosensible (sensible aux rayons ultraviolets UV) se trouve au dessus du cuivre. Un film protecteur au dessus de la résine photosensible permet de protéger cette dernière contre les rayonnements UV naturels et qu'il faudra enlever avant l'étape d'insolation.

La figure IV.12 présente les différents couches de la plaque PCB. Notons qu'il existe différentes épaisseurs de cuivre de la plaque PCB. La plaque de circuit imprimé est utilisée comme substrat ayant une couche de cuivre d'épaisseur de 18 μm .

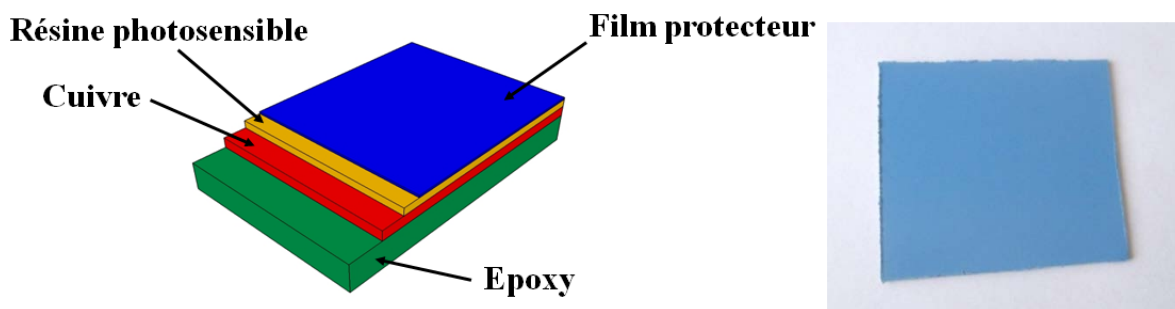


Figure IV.12 : (a) Structure 3D de la plaque PCB (b) photographie de la plaque PCB

b. Masque

La première étape nécessaire à la gravure est la réalisation d'un masque. Il s'agit simplement d'une feuille transparente, sur laquelle est dessinée en noir le dessin du circuit imprimé. La conception de masque est effectuée en utilisant le logiciel L-Edit et pour l'impression du masque, en utilisant une imprimante spécial assistée par ordinateur.

Le masque 1 utilisé pour la fabrication du capteur de pression capacitif est décrit précédemment dans la figure IV.2. Un tel masque est nécessaire dans l'étape d'insolation. L'avantage principal est de permettre d'utiliser ce masque pour réaliser plusieurs circuits imprimés.

c. Insolation

Tout d'abord, on enlève la feuille de plastique protégeant la face de la résine photosensible. Ensuite, on place le masque sur la face de la résine photosensible de la plaque de circuit imprimé, et on expose le tout aux rayons ultraviolets UV pendant un certain temps (Figure IV.13). Le temps d'insolation dépendra de la puissance du rayonnement UV (nombre des tubes UV) et de l'opacité du masque (le temps d'insolation entre 1 à 4 minutes). Dans tous les cas, des essais expérimentaux s'imposent pour connaître le temps d'insolation idéal.

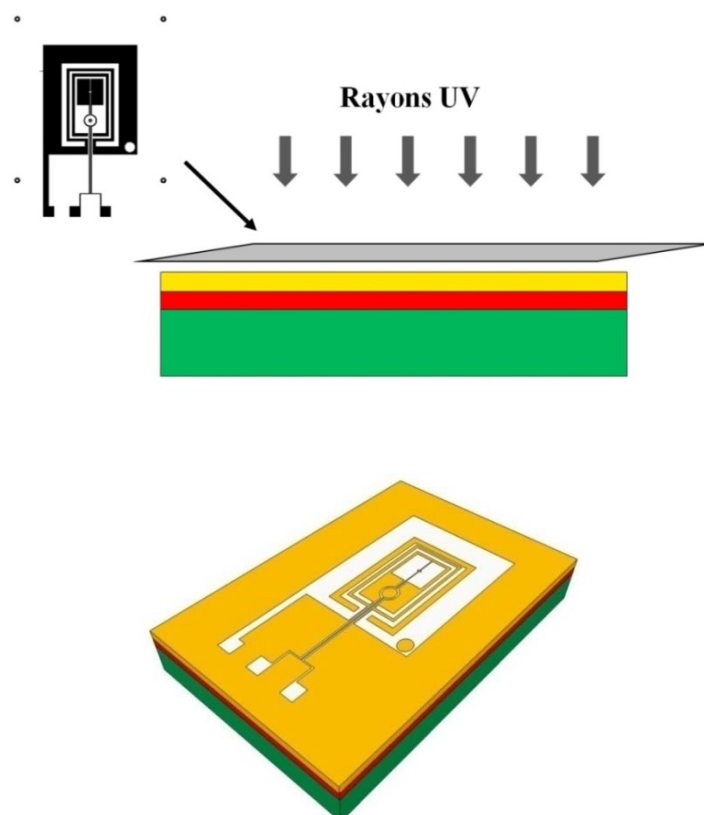


Figure IV.13 : Insolation de la plaque PCB

L'appareil utilisé dans cette étape est présenté sur la figure IV.14. Une insoleuse est un appareil simple, doté de plusieurs tubes UV, d'un minuteur et d'une pompe à vide. Elle permet d'insoler des plaques de circuit imprimé PCB pour révéler le schéma de masque sur la résine photosensible.



Figure IV.14 : Une insoleuse (Marque : Bi2000 KF)

d. Développement

Cette étape a pour but de dissoudre la résine photosensible ayant été exposée aux rayons UV. La plaque du circuit imprimé est introduit dans un bain contenant un produit révélateur. Le temps de développement (révélation) dépend des dimensions et de la forme de la structure qu'on souhaite fabriquer (quelques dizaines de secondes). Une fois la révélation effectuée, la plaque du circuit imprimé est rincé dans un bain contenant de l'eau et puis laissé sécher (Figure IV.15).

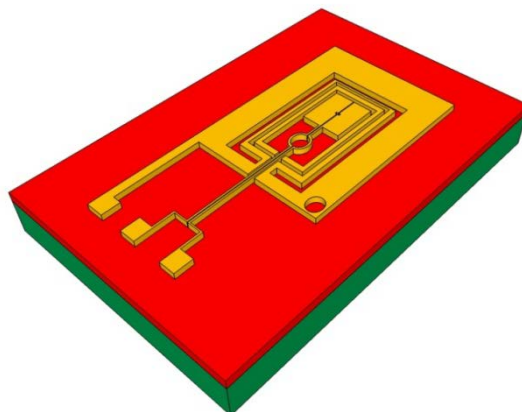


Figure IV.15: Développement de la plaque PCB

e. Gravure

La couche de cuivre située au dessous de la résine photosensible est gravée selon un processus chimique (figure IV.16). Il consiste à éliminer une partie du cuivre non protégés par la résine photosensible. La plaque de circuit imprimé est introduit pendant 2 minutes dans un bain contenant de l'eau oxygénée (H_2O_2), d'acide chlorhydrique (HCl) et de l'eau (H_2O). Les proportions (obtenues expérimentalement) utilisés dans cette procédure sont les suivantes: 1 volume d'eau oxygénée, 1 volume d'acide chlorhydrique et 2 volumes d'eau. A la fin de la gravure, le cuivre qui reste correspond au dessin du masque. La plaque du circuit imprimé est rincée encore une fois dans l'eau et laissé sécher.

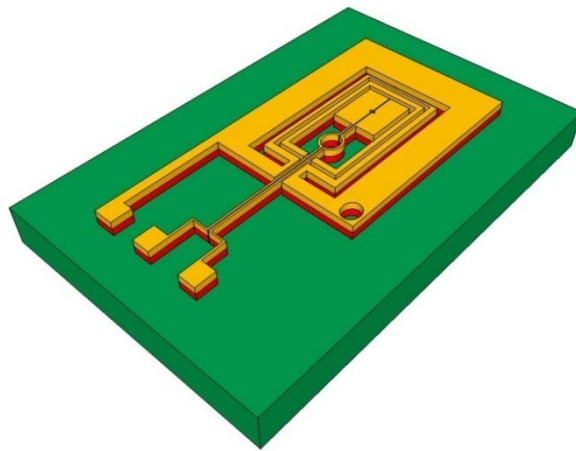


Figure IV.16 : Gravure de la plaque PCB

La résine photosensible restante est enlevée en passant un coup de chiffon imbibé d'acétone sur la plaque de circuit imprimé (Figure IV.17). La figure IV.18 présente la photographie de la plaque inférieure de circuit imprimé avec des électrodes en cuivre.

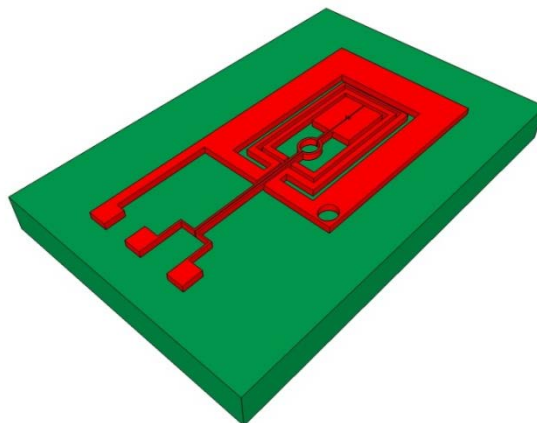


Figure IV.17 : Structure 3D de la plaque PCB



Figure IV.18 : Photographie de la plaque inférieure du PCB contenant l'électrode de cuivre et les fils de connexions électriques

4.1.2. Plaque supérieure de PCB

Dans l'étape 4 et 5 (figure IV.19), le procédé typique de la plaque de circuit imprimé est réalisée dans une autre plaque PCB pour fabriquer l'électrode supérieure (armature mobile) avec le masque correspondant (masque 2 présenté auparavant dans la figure IV.3). Après cela, le substrat FR4 est percé afin de définir l'emplacement de la membrane (étape 6).

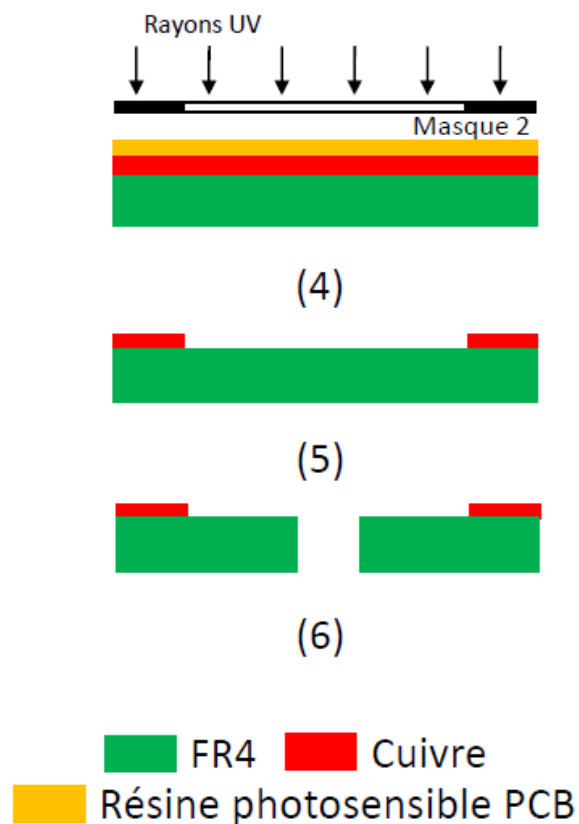


Figure IV.19 : Processus de fabrication de la plaque supérieure PCB

4.2. Le processus BETTS

Une fois que le substrat est percé, le BETTS (collage, UV exposition et le transfert technique dans SU-8) est utilisé pour transférer une membrane mince sur le PCB [13].

L'utilité de la couche PDMS dans ce processus servira comme un substrat pour déposer la couche en SU-8. Ainsi, le PDMS est déposé sur le substrat, qui sera l'acétate et après l'étape de durcissement de PDMS, la couche de SU-8 est déposée facilement sur la couche de PDMS. La raison d'utiliser ce procédé, consiste à profiter de la faible adhérence existant entre le PDMS et SU-8, de sorte que, lorsque la couche de SU-8 est réalisée, le PDMS peut se décoller sans qu'il adhère à la surface. Le procédé de fabrication contient les étapes essentielles pour que le PDMS soit durci.

4.2.1. Dépôt de PDMS

a. Préparation du PDMS

Pour effectuer le transfert de la couche polymère, le procédé de fabrication commence par la préparation de la couche de PDMS en utilisant un mélange d'agent de durcissement et de prépolymère avec un rapport en poids de 1:10, respectivement (figure IV.20).



Figure IV.20 : Balance électronique

Le mélange est maintenu dans un récipient ouvert et doit être le plus homogène possible (figure IV.21).



Figure IV.21 : Le mélange de l'agent de durcissement et de prépolymère pour obtenir le PDMS

b. Elimination des bulles

Après avoir mélangé l'agent de durcissement et le prépolymère, le récipient est placé dans une chambre à vide pendant 45 minutes à une pression de -400 mbar pour éliminer les bulles qui ont été générées dans le PDMS pendant l'étape de mélange (figure IV.22).

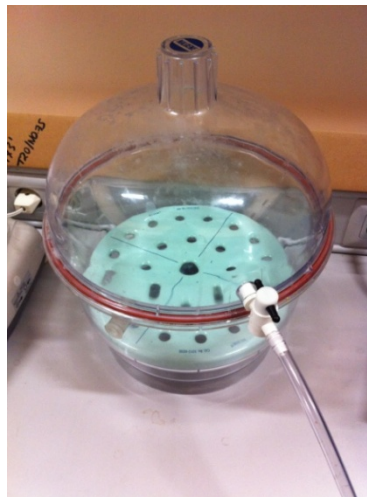


Figure IV.22 : Appareil pour élimination des bulles

c. Dépôt de PDMS

Le PDMS est déposé sur le film d'acétate par la tournette (spin coating), il est centrifugé à 500 tours par minute pendant 10s puis à 700 tours par minute pendant 50 s (figure IV.23).



Figure IV.23 : Photographie de la tournette (spin coating)

d. Le recuit

Après avoir déposé le PDMS, l'étape suivante est de mettre le PDMS dans une plaque chauffante (figure IV.24) à la température de 80 °C pendant une durée de 15 min (étape 7, figure IV.25). Après ce processus, le PDMS est durci et sera prêt à l'emploi pour le dépôt de la couche de SU-8.



Figure IV.24 : Photographie des plaques chauffantes



(7)

Figure IV.25 : Dépôt de PDMS

4.2.2. Dépôt de la résine négative SU-8

La figure IV.26 présente les différentes étapes (8,9,10,11) pour fabriquer la membrane SU-8 du capteur de pression capacitif.

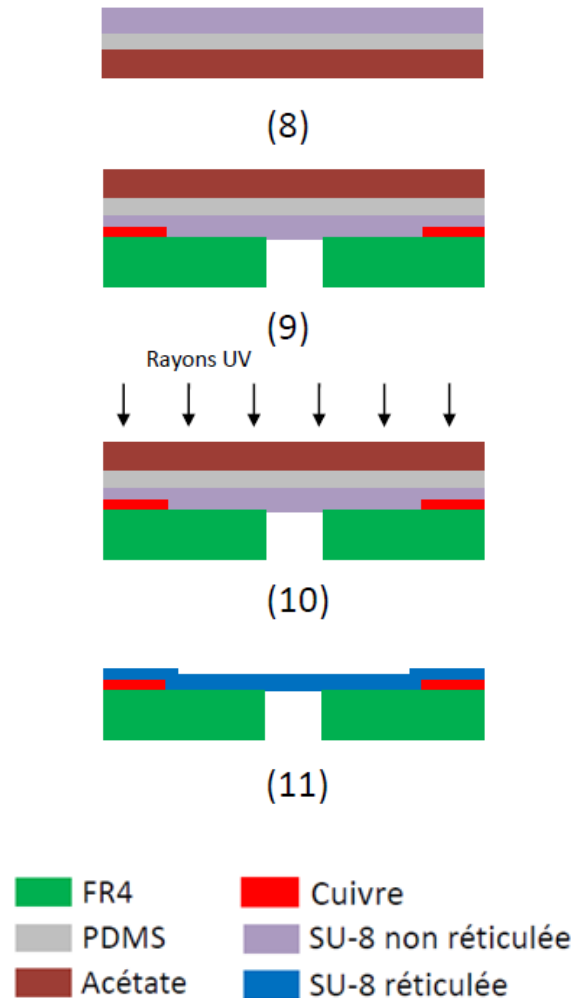


Figure IV.26 : Le processus de fabrication de la membrane SU-8

a. Etalement de la résine

Cette étape consiste à étaler la résine photosensible SU-8 sur la couche PDMS (étape 8, figure IV.27), par la méthode de la tournette (spin coating). L'épaisseur de la couche de SU-8 photosensible déposée dépend non seulement de la viscosité des formulations mais aussi de la vitesse de rotation et le temps de dépôt.

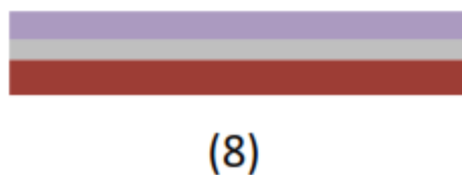


Figure IV.27 : Dépôt de SU-8 par spin coating

b. Exposition

La couche SU-8 non réticulée est ensuite retournée et placée sur la carte de circuit imprimé, réalisant un contact total en raison de la tension de surface (étape 9, figure IV.28).

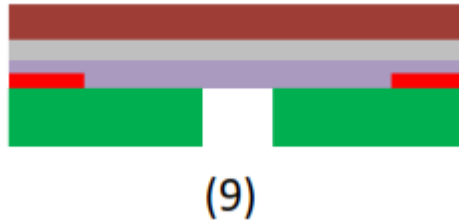


Figure IV.28 : Rotation et placement de la couche SU-8 sur la plaque supérieure PCB

Ensuite, la couche SU-8 non réticulée est exposée à la lumière UV pour effectuer l'activation du photo-initiateur pour amorcer la réaction de réticulation (étape 10, figure IV.29). La durée d'insolation dépend de l'épaisseur du film désiré. Le film d'acétate et PDMS ne limitent pas la polymérisation de la couche SU-8 en raison de leur grande transparence.

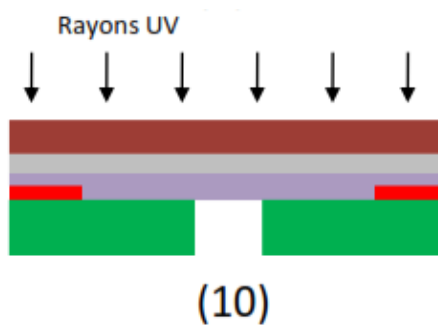


Figure IV.29 : Insolation UV de la couche SU-8

La machine utilisée pour effectuer l'insolation est présentée sur la figure IV.30.



Figure IV.30 : Appareil d'insolation UV

c. Recuit

Ensuite, une étape de polymérisation (recuit thermique) PEB est effectuée pour obtenir la réticulation du SU-8. La SU-8 non réticulée est placée sur une plaque chauffante à des températures de 65 °C , puis 95 °C pendant une durée dépendant de l'épaisseur déposée.

Après une étape de refroidissement, le film acétate avec le PDMS est décollée, libérant facilement la membrane SU-8 avec une épaisseur de 40 µm (étape 11, figure IV.31).

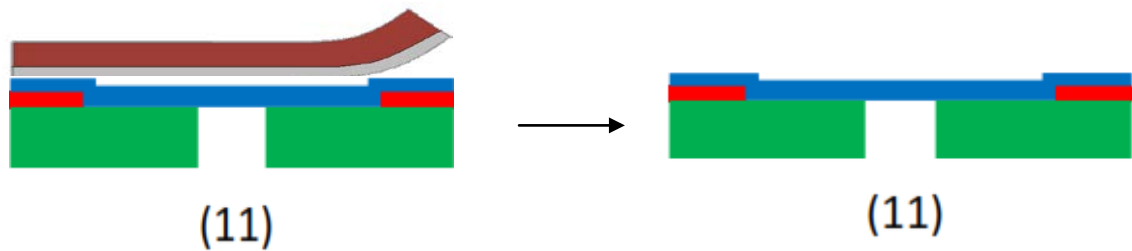


Figure IV.31 : Réalisation de la membrane SU-8

4.3. Métallisation de l'électrode supérieure

A l'étape 12, une couche mince de 100 nm d'argent (Figure IV.32) est déposée par la méthode de pulvérisation cathodique en utilisant l'appareil de marque EMITECH K550X [126] (figure IV.33), pour réaliser l'électrode supérieure.

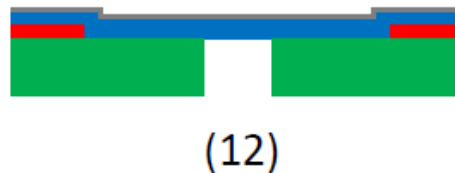


Figure IV.32 : Métallisation de l'électrode supérieure



Figure IV. 33 : Photographie de l'appareil pour effectuer la métallisation
(Marque : EMITECH K550X)

La figure IV.34 présente la plaque supérieure de PCB avec l'électrode d'argent et de la membrane SU-8.

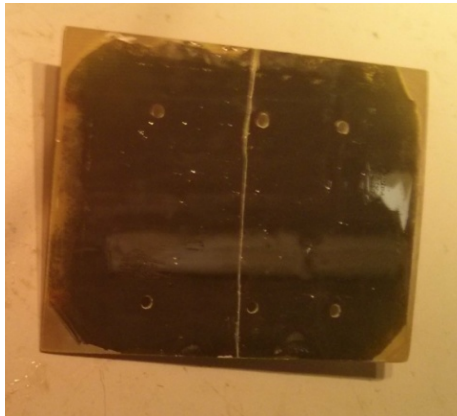


Figure IV.34 : L'électrode supérieure en Argent avec la membrane en SU 8 (Vue de dessous PCB)

4.4. Assemblage des deux circuits imprimés

Enfin, le substrat FR4 est percé à l'étape 13 (figure IV.35) et les deux circuits imprimés sont assemblés. Les deux PCB sont assemblés avec des vis et des boulons, et le dispositif final fabriqué peut être vu sur la figure IV.36.



(13)

Figure IV.35 : Capteur de pression capacitif

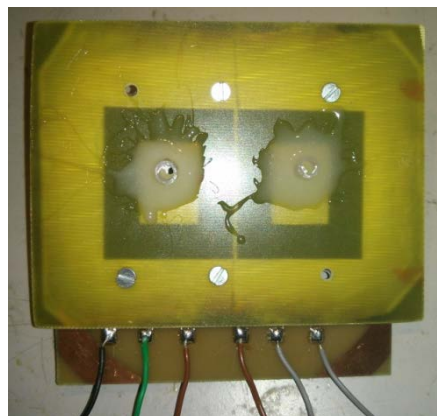


Figure IV.36 : Photographie du capteur de pression capacitif après assemblage

5. Description du banc de test

Pour tester les performances du capteur fabriqué, un dispositif expérimental est mis en place comme illustré dans la figure IV.37. Il se compose d'une source de pression externe (générateur de pression) qui est relié au capteur de pression capacitif. Un régulateur de pression pour contrôler la pression générée. Une source d'alimentation est utilisée pour alimenter le capteur et le circuit convertisseur. Un manomètre et un Oscilloscope sont utilisées pour mesurer la valeur de la pression appliquée et la fréquence de sortie, respectivement.

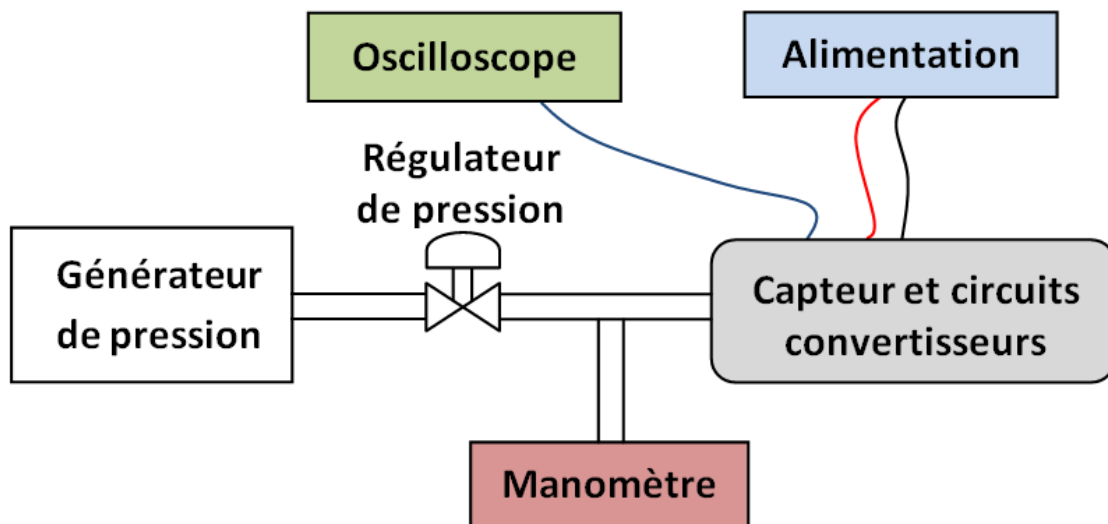


Figure IV.37 : Le dispositif expérimental utilisé

6. Circuit convertisseur Capacité - Fréquence

Un circuit auxiliaire est relié au capteur de pression capacitif (capteur 1) à travers des connexions électriques dans le but de mesurer la capacité de ce capteur. L'utilisation de ce circuit comme un multivibrateur astable, permet de convertir la capacité en fréquence. Par conséquent, la fréquence mesure directement les variations de la capacité due à la pression appliquée sur la membrane SU-8. Le circuit convertisseur capacité - fréquence se compose d'un circuit intégré NE 555 (timer), deux résistances et une capacité variable (la capacité du capteur est C_{capteur}) [127]. La figure IV.38 présente le schéma électrique du circuit, ainsi une photographie du circuit réalisé.

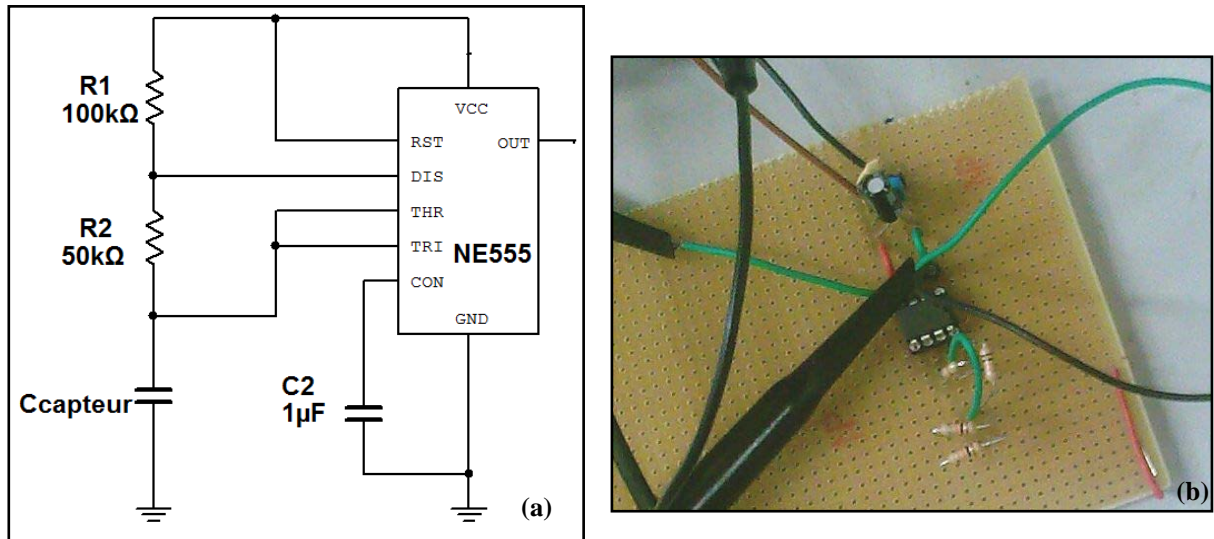


Figure IV.38 : Un circuit NE555 en mode astable, (a) schéma électrique (b) photographie de circuit convertisseur astable

La fréquence du multivibrateur astable est donnée par (IV.1) [128] :

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)(C_{\text{capteur}})} \quad (\text{IV.1})$$

où C_{capteur} est la capacité du capteur fabriquée, les valeurs des résistances R_1 et R_2 sont choisies comme 100 k Ω et 50 k Ω , respectivement.

6.1. Relation entre la fréquence et la capacité

La relation entre la fréquence et la capacité peut être déterminée en utilisant le circuit multivibrateur astable défini précédemment. Pour étalonner notre capteur, plusieurs condensateurs de différente capacité (tableau IV.1) sont mis à la place de la capacité du capteur de pression capacitif. Un oscilloscope permet de mesurer les variations de la fréquence en fonction des valeurs de la capacité (figure IV.39).

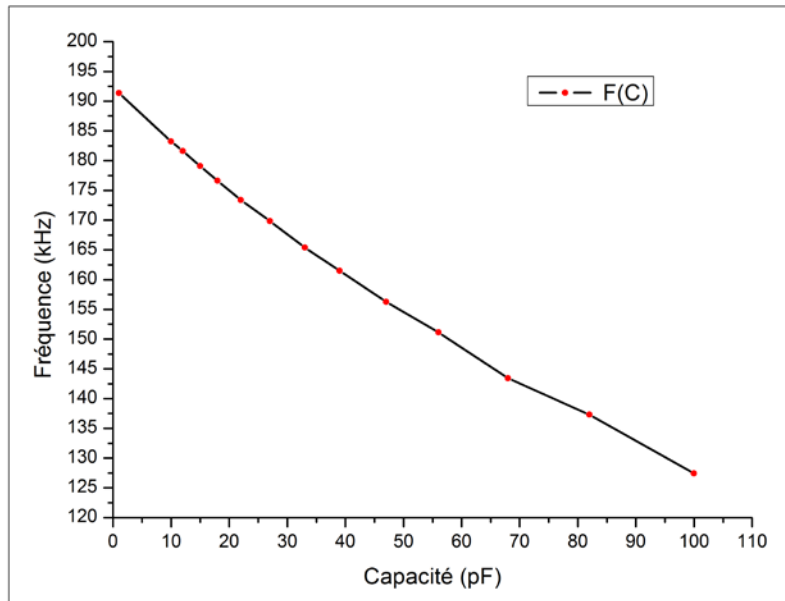


Figure IV.39 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité

Les résultats montrent que la fréquence diminue de 191,368 kHz jusqu'à 127,434 kHz lorsque les valeurs de la capacité augmentent de 1 pF à 100 pF.

Tableau IV.1 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité

Capacité (pF)	Fréquence (kHz)
1	191,368
10	183,237
12	181,631
15	179,094
18	176,617
22	173,384
27	169,852
33	165,37
39	161,48
47	156,257
56	151,157
68	143,423
82	137,298
100	127,434

7. Modélisation par la méthode des éléments finis

Le logiciel COMSOL Multiphysiques est utilisé pour concevoir et simuler le comportement du capteur de pression capacitif. Ce logiciel est largement utilisé pour la modélisation des capteurs de pression capacitif [129, 130].

La structure du capteur de pression capacitif est représentée sur la figure IV.40, le modèle est constitué d'une membrane circulaire, une électrode supérieure et une électrode inférieure en cuivre, les deux sont séparées par une distance inter électrodes (gap) en air.

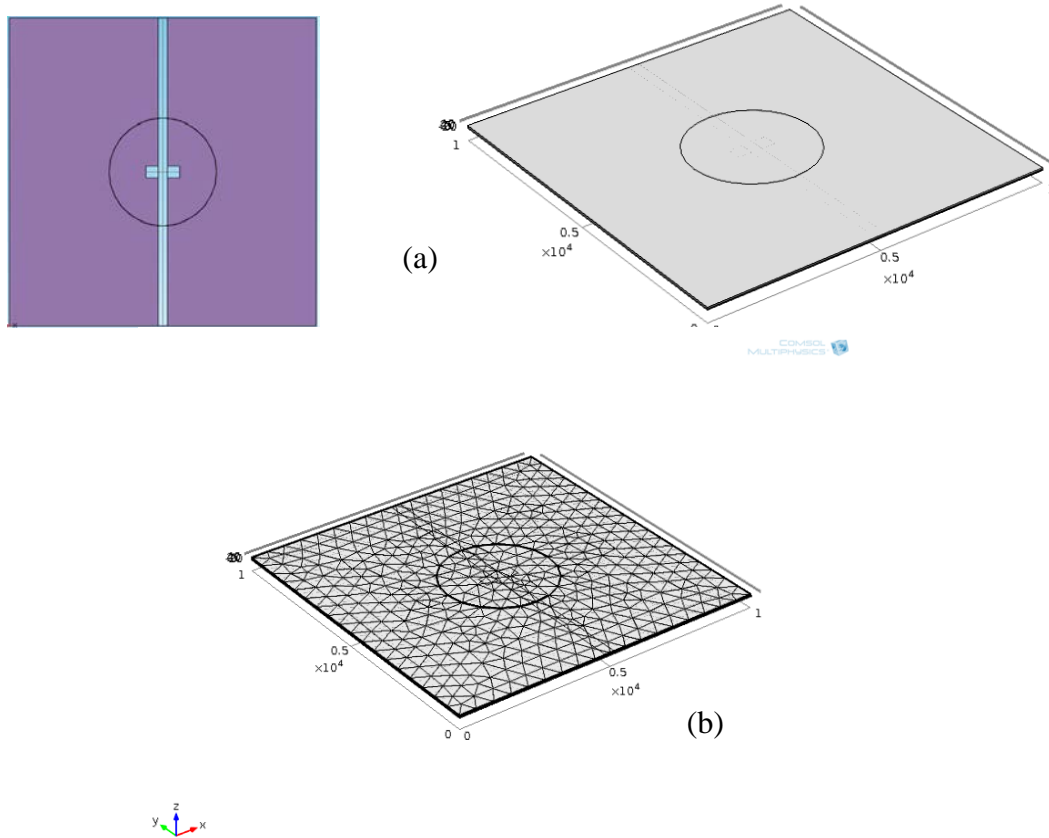


Figure IV.40 : a) Représentation schématique en 3D de la géométrie du capteur de pression capacitif, b) la structure maillée en 3D.

- Le diamètre de la membrane SU-8 est de 3,5 mm avec une épaisseur de 40 μm.
- La surface de l'électrode du cuivre est 96,68 mm² avec une épaisseur de 18 μm.
- Le capteur capacitif de pression est conçu pour mesurer la pression jusqu'à 350 mbar (35 kPa).
- La membrane en SU-8 est utilisée parce qu'elle possède de bonnes propriétés mécaniques et la possibilité de fabriquer de nombreuses structures simples ou complexes.
- Le modèle contient trois modules physiques : mécanique des structures, maille en mouvement et l'électrostatique.

Les figures IV.41 et IV.42 présentent la déformation de la membrane SU-8 et la capacité en fonction de la pression appliquée.

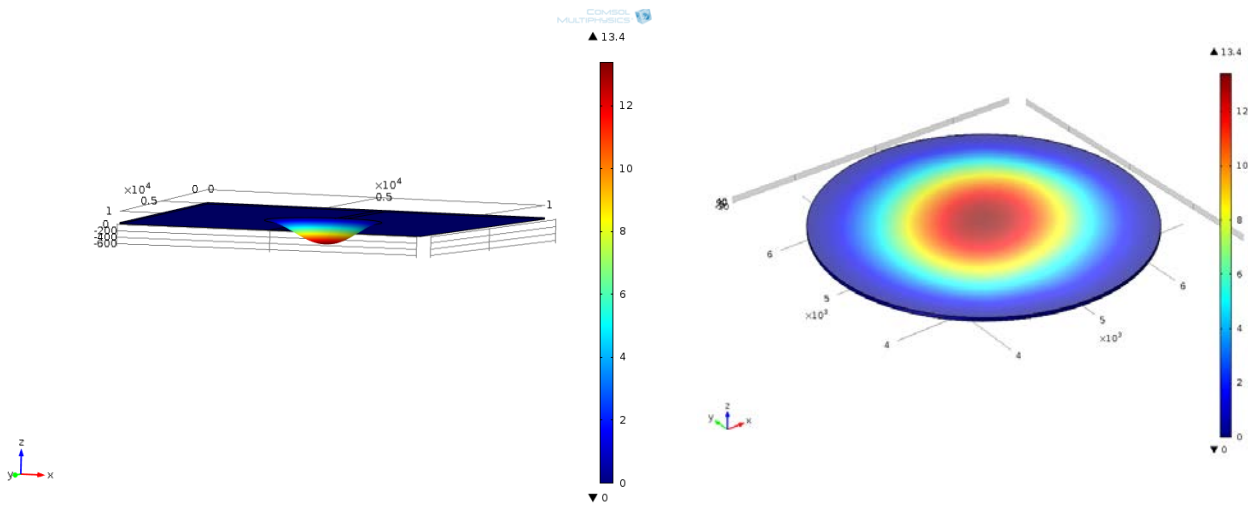


Figure IV.41 : La déformation de la membrane SU-8 en fonction de la pression appliquée

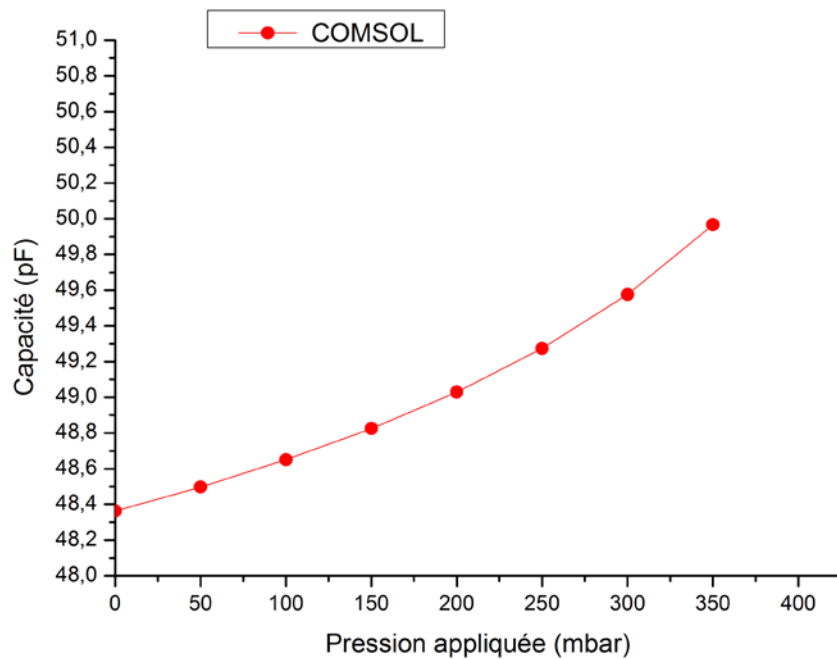


Figure IV.42 : La réponse de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée

Comme on peut le voir sur la figure IV.41, la déformation maximale se situe au centre de la membrane SU-8 et la déformation de la membrane SU-8 augmente avec l'augmentation de la pression appliquée. Dans la figure IV.42, l'augmentation de la capacité de capteur est proportionnelle à la pression appliquée. Par conséquent, la réponse de la capacité est presque linéaire.

8. Résultats expérimentaux du premier prototype

8.1 Relation entre la fréquence et la pression appliquée

La variation de capacité du capteur de pression capacitif est convertie en fréquence en utilisant le circuit astable.

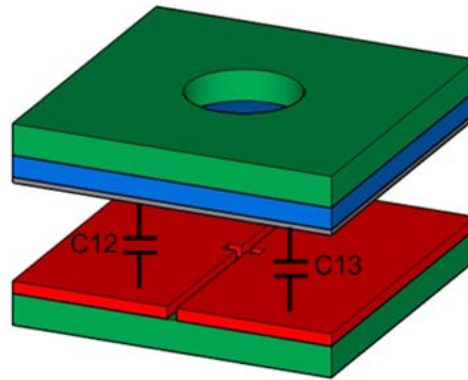


Figure IV.43 : Structure 3D des deux électrodes du premier capteur

La fréquence F12 correspond à la capacité C12 entre la moitié de l'électrode inférieure et l'électrode supérieure (figure IV.43).

La fréquence F13 correspond à la capacité C13 entre l'autre électrode de la moitié inférieure et l'électrode supérieure (figure IV.43).

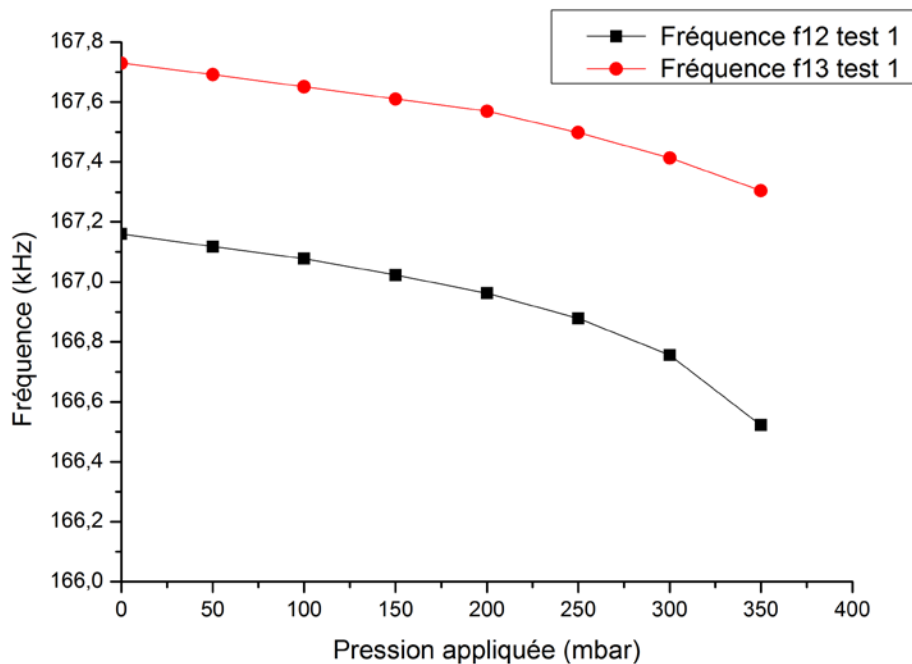


Figure IV.44 : Variations des fréquences f12 et f13 (test 1) en fonction de la pression appliquée

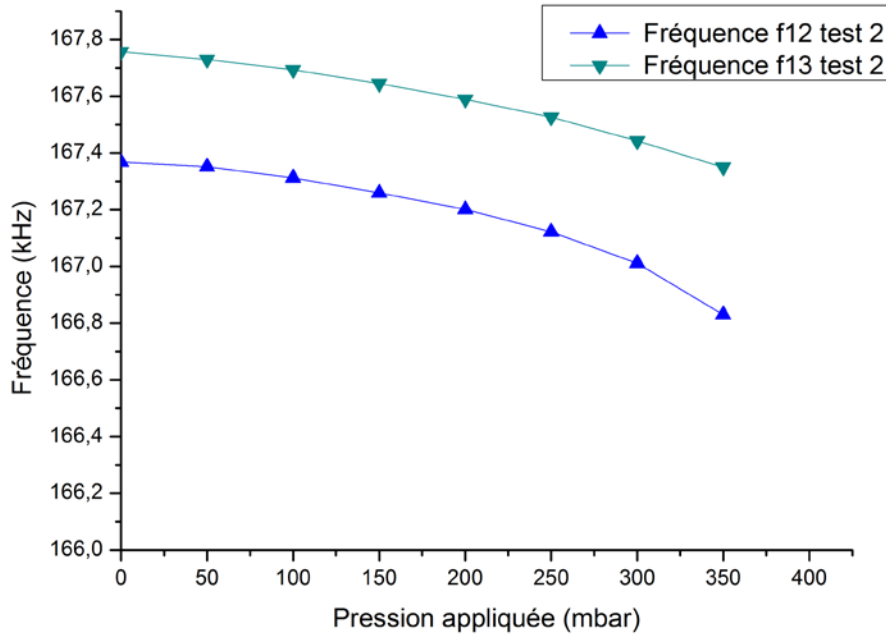


Figure IV.45 : Variations des fréquences f_{12} et f_{13} (test 2) en fonction de la pression appliquée

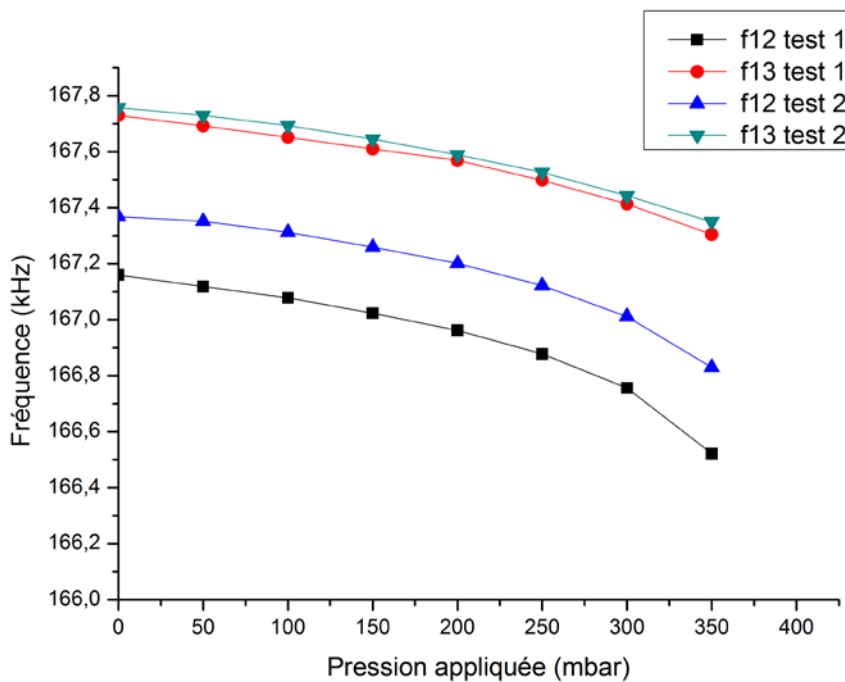


Figure IV.46 : Comparaison des fréquences f_{12} et f_{13} pour le test 1 et test 2 en fonction de la pression appliquée

Sur les figures IV.44, IV.45 et IV.46, la fréquence du capteur de pression capacitif varie en fonction de la pression appliquée. Les résultats expérimentaux montrent des changements de la fréquence pour le premier test (test 1) : la fréquence f_{12} varie de 167,160 kHz à 166,522 kHz lorsque la pression appliquée varie de 0 à 350 mbar (35 kPa). En outre, la fréquence f_{13} change de 167,730 kHz à 167,304 kHz lorsque la pression appliquée varie de 0 à 350 mbar. Pour le deuxième test (test 2), les changements de la fréquence f_{12} varie de 167,368 kHz à 166,83 kHz lorsque la pression appliquée varie de 0 à 350 mbar (35 kPa). En outre, la fréquence f_{13} change de 167,757 kHz à 167,35 kHz lorsque la pression appliquée varie de 0 à 350 mbar. Nous remarquons que les courbes de la fréquence en fonction de la pression appliquée sont presque identiques dans la fréquence f_{13} (correspond à l'électrode C13) pour les deux tests effectués (la déviation maximale est de l'ordre de 0,02 %). Par contre une légère différence dans la fréquence f_{12} (correspond à l'électrode C12) pour les deux tests effectués où la déviation maximale est de l'ordre de 0,18 %.

8.2. Relation entre la capacité et la pression appliquée

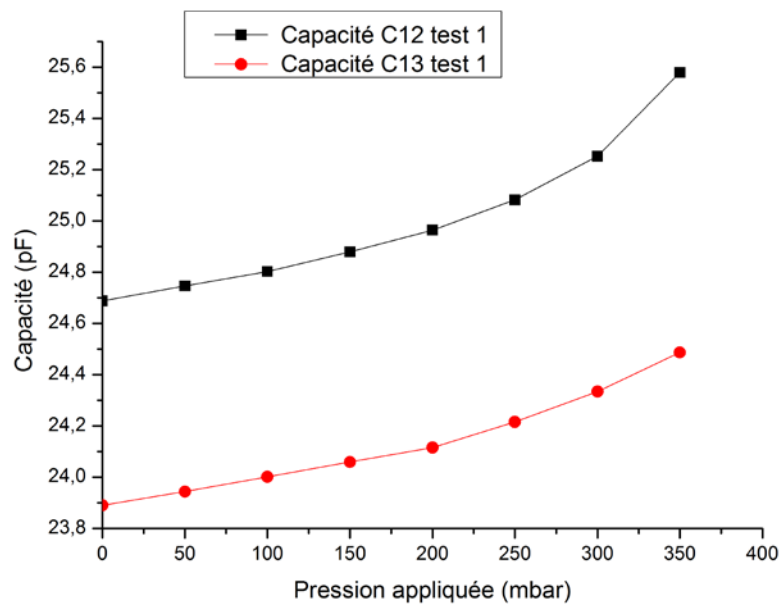


Figure IV.47 : Variations des capacités C12 et C13 (test 1) en fonction de la pression appliquée

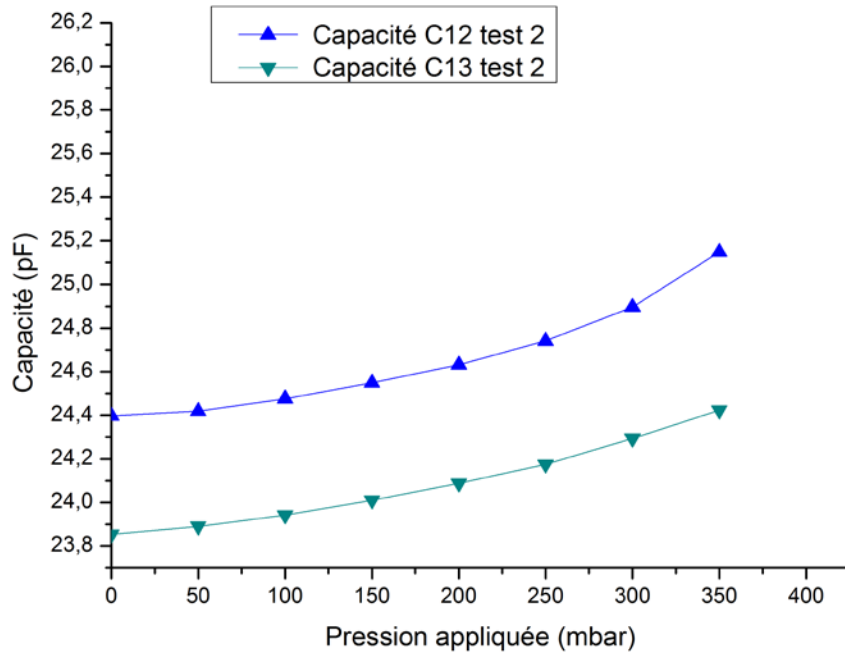


Figure IV.48 : Variations des capacités C12 et C13 (test 2) en fonction de la pression appliquée

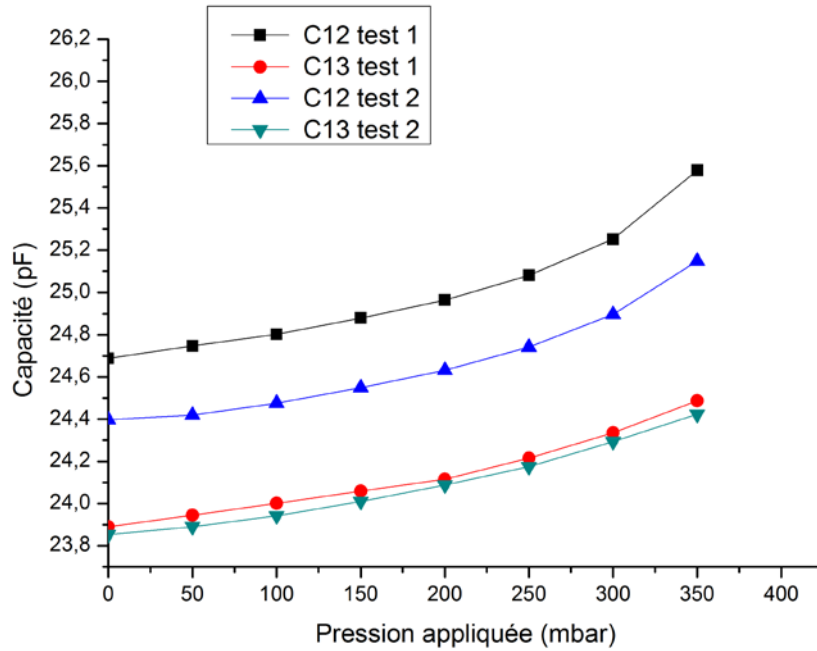


Figure IV.49 : Comparaison des capacités C12 et C13 pour le test 1 et test 2 en fonction de la pression appliquée

La combinaison des résultats expérimentaux représentés sur les figures IV.39, IV.44 et IV.45, nous a permis de déterminer la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée dans le capteur de pression capacitif (figures IV.47, IV.48 et IV.49).

Le comportement de la capacité présente une réponse proportionnelle à la pression appliquée pour les deux capacités C12 et C13, respectivement. Nous remarquons que les courbes de la capacité en fonction de la pression appliquée sont presque identiques dans l'électrode C13 pour les deux tests effectués (la déviation maximale est de l'ordre de 0,26 %), par contre une légère différence dans l'électrode C12 pour les deux tests effectués où la déviation maximale est de l'ordre de 1,7 %.

9. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation par COMSOL

Une comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation COMSOL présentent dans les figures IV.50 et IV.51.

La capacité totale "Ccapteur" du capteur de pression capacitif est la somme des capacités C12 et C13. La relation de Ccapteur est donnée par :

$$C_{\text{capteur}} = C12 + C13 \quad (\text{IV.2})$$

Les résultat expérimentaux (test 1, test 2) de la capacité correspond à la somme des capacités C12 et C13.

L'équation IV.3 présente l'expression de la capacité relative $\frac{\Delta C}{C}$ en fonction de la pression appliquée [131] :

$$\Delta C = C - C_0 = \iint_A \frac{\epsilon_0 \epsilon_r dA}{d - w(r, \theta, P)} - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (\text{IV.3})$$

La figure IV.51 présente la variation de la capacité relative $\frac{\Delta C}{C}$ en fonction de la pression appliquée.

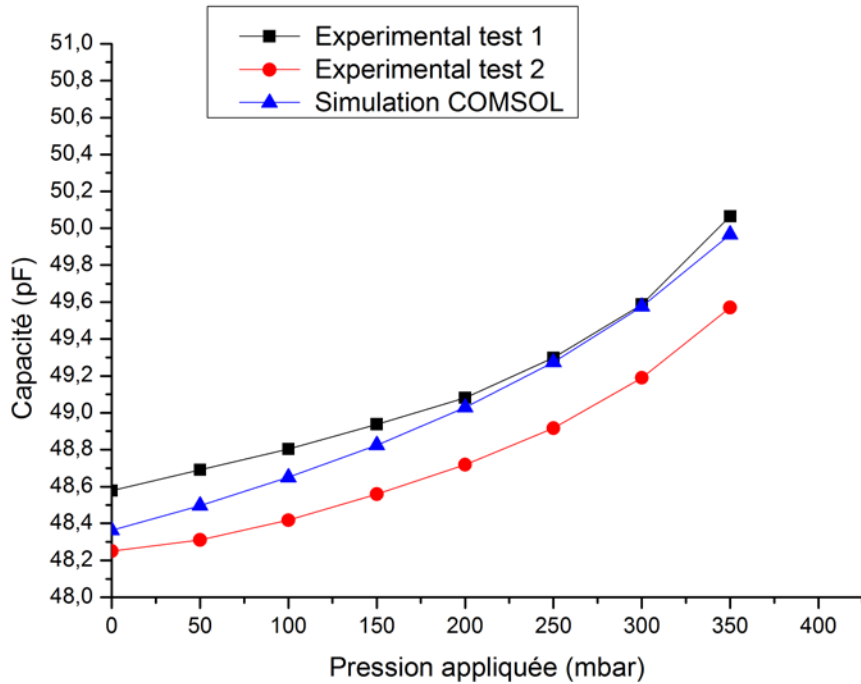


Figure IV.50 : Comparaison de la variation de capacité en fonction de la pression appliquée, obtenue expérimentalement et par simulation COMSOL

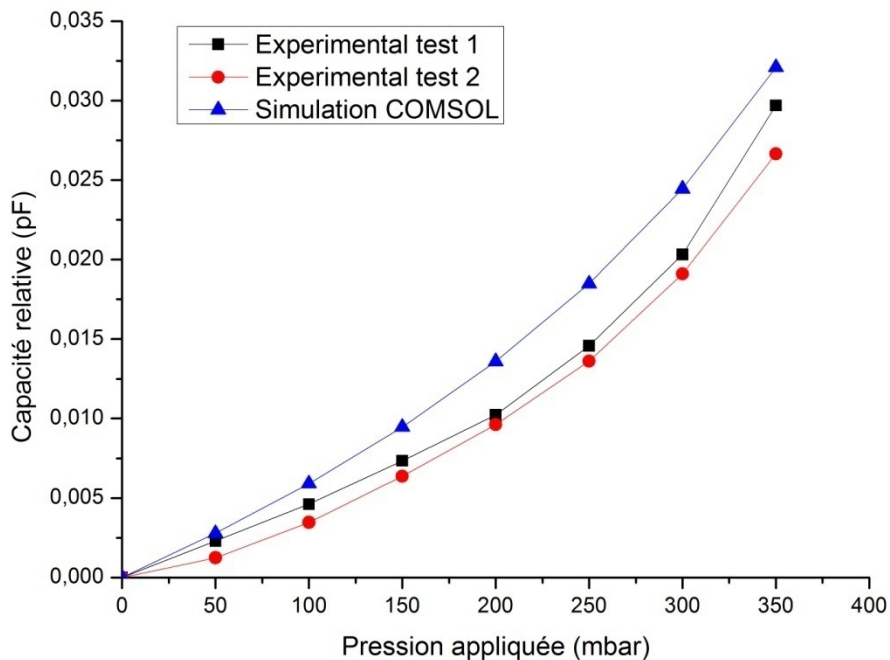


Figure IV.51 : Comparaison de la variation de la capacité relative ($\Delta C/C$) en fonction de la pression appliquée, obtenue expérimentalement et par simulation COMSOL.

Dans un premier temps, nous constatons que la variation de la capacité et la capacité relative du capteur simulé par le logiciel COMSOL présente la même allure que celle retrouvée expérimentalement pour les deux tests (test 1 et test 2).

Le comportement de la réponse capacitive du capteur représenté par les trois courbes est presque identique. En l'absence de la pression appliquée sur la membrane SU-8, nous remarquons qu'il y a une légère différence de la capacité initiale entre les résultats de simulation COMSOL et les résultats expérimentaux. Nous pouvons expliquer que cette différence est due à la contrainte initiale de la membrane SU-8 qui est de l'ordre de 60 MPa (la résistance à la traction du SU-8 est 119 MPa) [132], ou à l'interconnexion entre les fils qui provoque une capacité parasite additionnelle lorsque le capteur est sous test.

Nous observons une augmentation de la capacité du capteur de pression capacitif (Ccapteur) lorsqu'il y a une augmentation de la pression appliquée. Nous remarquons que la capacité du capteur de pression capacitif varie de 48,578 pF à 50,065 pF lorsque la pression augmente de 0 à 350 mbar (35 kPa). Les résultats de la simulation montre que la capacité varie de 48,362 pF à 49,995 pF lorsque la pression augmente de 0 à 35 kPa. Les résultats montrent que la modélisation par COMSOL donne des résultats comparables à ceux de l'expérimental.

Le tableau IV.2 présente une comparaison de la sensibilité à la pression en fonction de la pression appliquée pour les résultats expérimentaux et la simulation par COMSOL.

Nous constatons que la sensibilité obtenue expérimentalement est légèrement différente que celle obtenue par simulation.

Tableau IV.2 : Comparaison de la sensibilité

Sensibilité	Simulation COMSOL	Expérimental Test 1	Expérimental Test 2
pF/bar	4,58	4,25	3,77

10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la conception et la réalisation d'un capteur de pression capacitif du premier prototype. Le procédé de fabrication proposé de ce capteur est basé sur la technologie PCB-MEMS. Il est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en argent. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur.

Le premier prototype du capteur de pression est simulé, fabriqué et caractérisé. La sensibilité de ce capteur est 4,25 pF/bar. Nous avons montré que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de l'expérimental. L'utilisation de ces circuits imprimés PCB et le procédé de fabrication proposé permettent de contrôler le gap de manière facile.

Chapitre V

Conception et réalisation du capteur de pression capacitif (deuxième prototype)

1. Introduction

Nous allons présenter dans ce chapitre la conception et la fabrication du deuxième prototype du capteur de pression capacitif afin que nous puissions caractériser son comportement. Ce capteur (deuxième prototype) est une amélioration du premier prototype car les procédés de fabrication nécessaires pour le construire sont presque les mêmes, sauf que l'électrode fixe est réalisée en Or en utilisant le processus lift-off. Plusieurs alternatives ont été faites pour parvenir à un processus final et fonctionnel. Ce capteur permet de mesurer une pression allant jusqu'à 12,5 kPa. L'application de tel capteur est généralement utilisée dans les domaines de faible pression tel que le biomédical. Par la suite, nous allons présenter les résultats expérimentaux, ainsi que les résultats de simulation obtenus afin de les comparer.

2. Définition de la structure

Le principe de détection du capteur de pression capacitif est basé sur la variation du gap entre une électrode supérieure mobile et une électrode inférieure fixe. Lorsqu'une pression est exercée sur une membrane flexible qui agit comme une électrode mobile, cette membrane se déforme, en changeant la distance entre les deux électrodes, ce qui permet de mesurer la capacité de ce capteur et par conséquent la mesure indirecte de la pression appliquée. Une section transversale de la structure proposée du capteur de pression capacitif est représentée sur la Figure V.1.

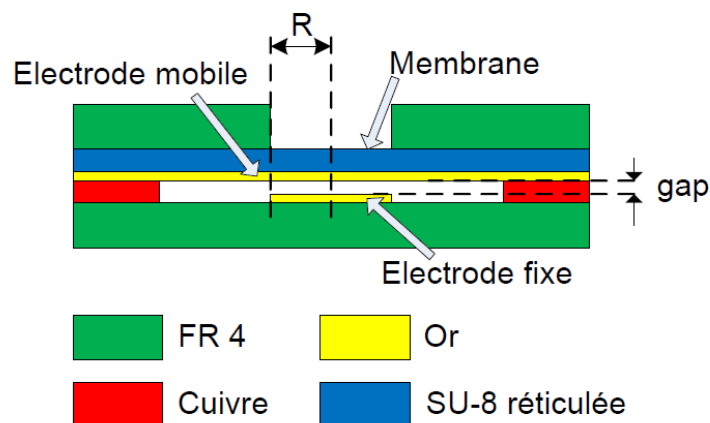


Figure V.1 : Vue en coupe du capteur de pression capacitif

La structure du capteur de pression se compose de deux parties :

La première est une plaque (la plaque supérieure de PCB) contient une membrane en couche de polymère SU-8 ayant un rayon R.

Une couche d'Or nanométrique se trouve sous la membrane pour obtenir la conductivité de l'électrode supérieure.

La deuxième partie est une plaque (la plaque inférieure de PCB) avec des lignes de cuivre ayant pour fonctions, les connexions électriques et définissent le gap du capteur. Elles forment les parties qui sont en contact avec les électrodes supérieures et inférieures, afin de rendre ces électrodes électriquement accessibles.

L'écart entre les deux plaques (gap) est définie comme étant l'épaisseur de cuivre du circuit imprimé lorsque l'épaisseur des couches d'Or est négligée. L'utilisation de ce système montre que le paramètre le plus important dans un capteur de pression capacitif est le gap.

3. Fabrication des masques

La fabrication de la nouvelle structure du deuxième prototype décrite précédemment nécessite trois masques. La conception de ces masques est faite en utilisant le logiciel L-Edit. Le processus de fabrication de ces masques est le même que celui utilisé dans la fabrication du premier prototype.

Le premier masque (masque 3) est illustré dans la figure V.2, il est utilisé pour définir la distance entre les deux armatures, ainsi pour la connexion électrique avec l'électrode mobile et l'électrode fixe (plaque inférieure de PCB).

Le deuxième masque (masque 4) est utilisé dans la technique lift-off, qui permet de définir l'électrode fixe (plaque inférieure de PCB) comme présentée dans la figure V.3.

Le troisième masque (masque 5) est illustré dans la figure V.4, il est utilisé pour définir la membrane (électrode mobile : plaque supérieur de PCB).

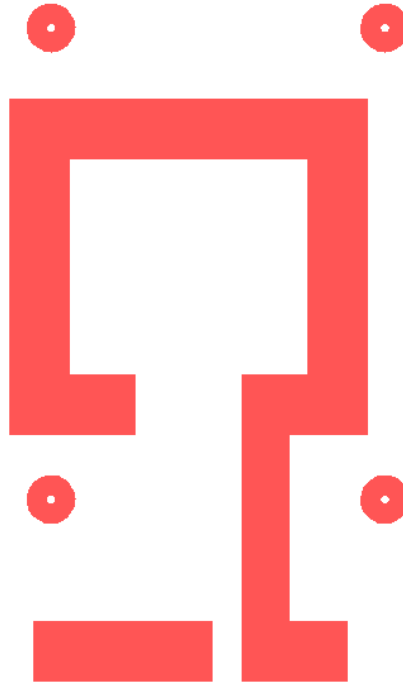


Figure V.2 : Masque 3, la distance entre les deux armatures
les connexions électriques des électrodes fixe et mobile (plaque inférieure de PCB)

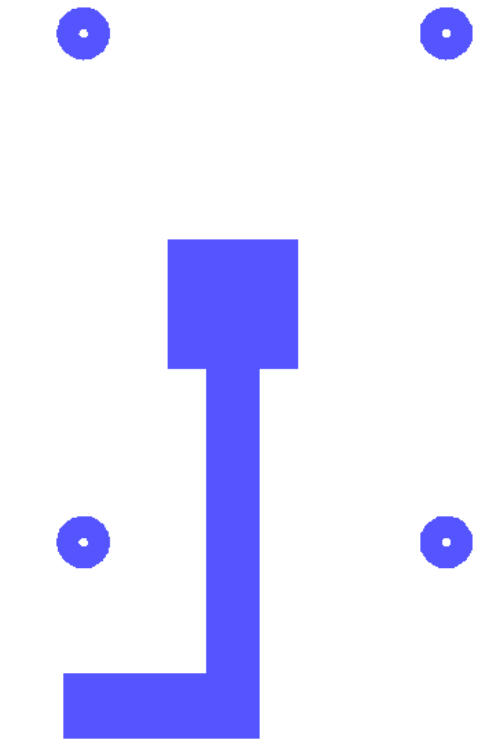


Figure V.3 : Masque 4 de l'électrode fixe
(plaque inférieure de PCB)

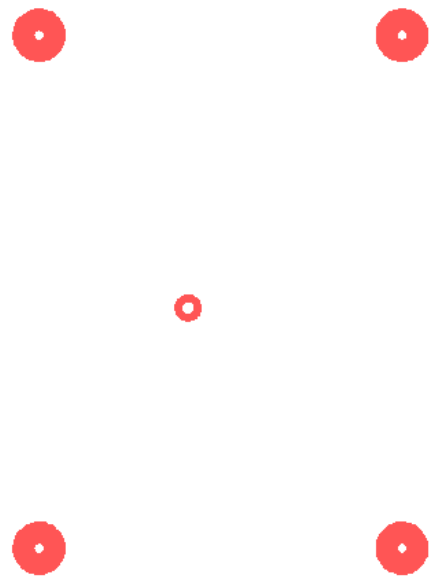


Figure V.4 : Masque 5 de l'électrode mobile
(membrane : plaque supérieure de PCB)

Nous avons conçu les trois masques avec les dimensions suivantes :

- Le masque 3 (plaque inférieure de PCB) ayant une largeur de 3 cm et une longueur de 4,86 cm. Deux pastilles rectangulaires (15 mm x 5 mm) et (9 mm x 5 mm) pour mesurer la capacité du capteur. Ces pastilles sont conçues tout à fait distinctes les unes des autres pour éliminer l'effet parasite pendant la mesure.
- Le masque 4 de l'électrode fixe (plaque inférieure de PCB) possède une largeur de 1,8 cm et une longueur de 3,86 cm. Une pastille rectangulaire (15 mm x 5 mm) est utilisée pour la connexion électrique avec l'électrode fixe de 10 mm x 10 mm.
- Le masque 5 de l'électrode mobile (plaque supérieure de PCB) est constitué d'un cercle de diamètre de 1 mm pour définir la position de la membrane et de quatre autres cercles (diamètre de 2 mm) qui sont utilisés pour l'alignement des masques 1 et 2 dans l'étape d'assemblage.

Les figures V.5, V.6 et V.7 présentent respectivement, la conception et la fabrication des trois masques (Masque 3, Masque 4, Masque 5) utilisés pour la fabrication des deux capteurs.

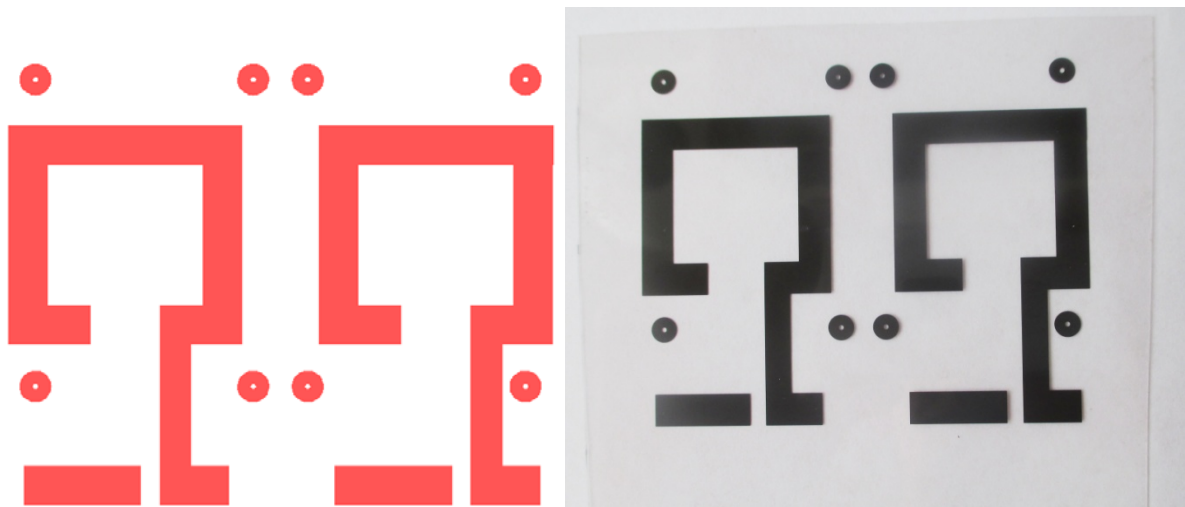


Figure V.5 : (a) Conception de masque 3. (b) Masque 3 réalisé pour les deux capteurs

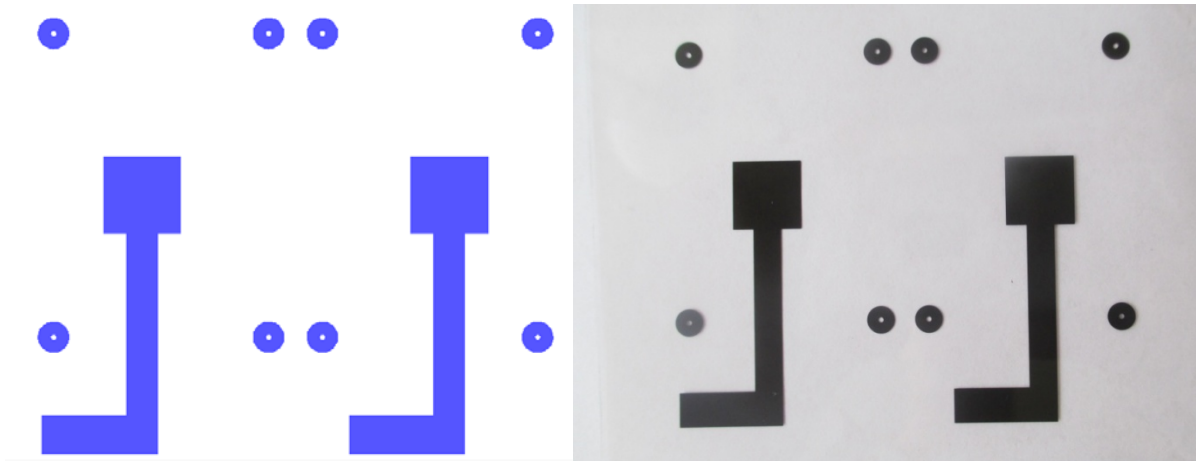


Figure V.6 : (a) Conception de masque 4, (b) Masque 4 réalisé pour les deux capteurs

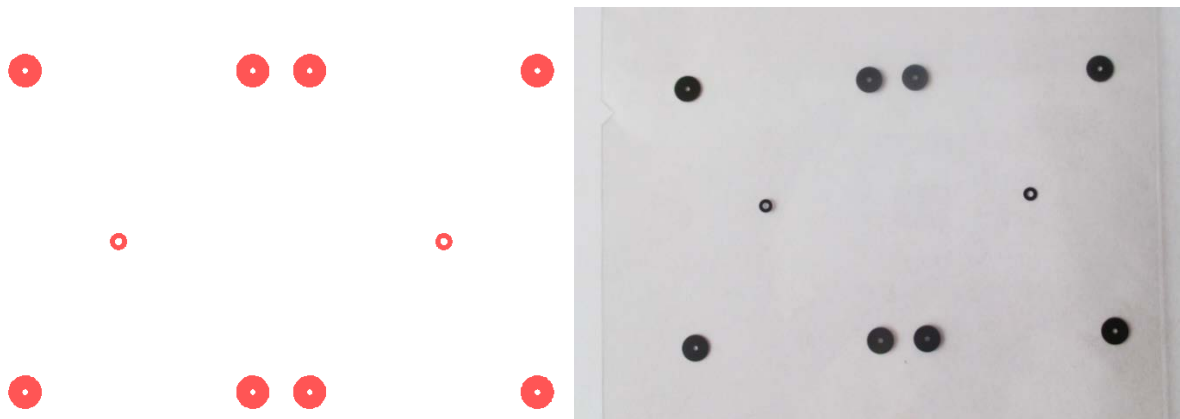


Figure V.7 : (a) Conception de masque 5, (b) Masque 5 réalisé pour les deux capteurs

4. Procédés de fabrication

La structure du capteur est fabriquée en utilisant la technologie PCB -MEMS [133]. La figure V.8 présente la structure en 3D du capteur de pression capacitif (deuxième prototype). Les principales étapes du procédé de fabrication sont représentées sur la figure V.9. Le capteur comprend deux parties qui sont décrites dans les sous-sections qui suivent.

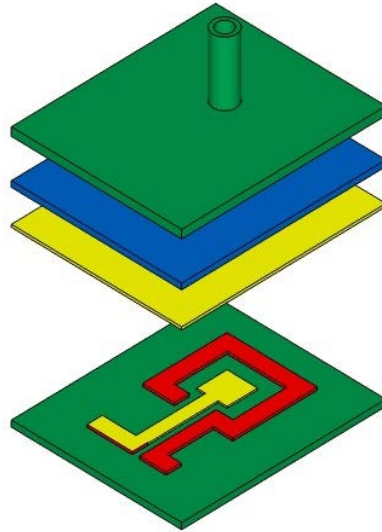


Figure V.8: Structure 3D du capteur de pression capacitif (deuxième prototype)

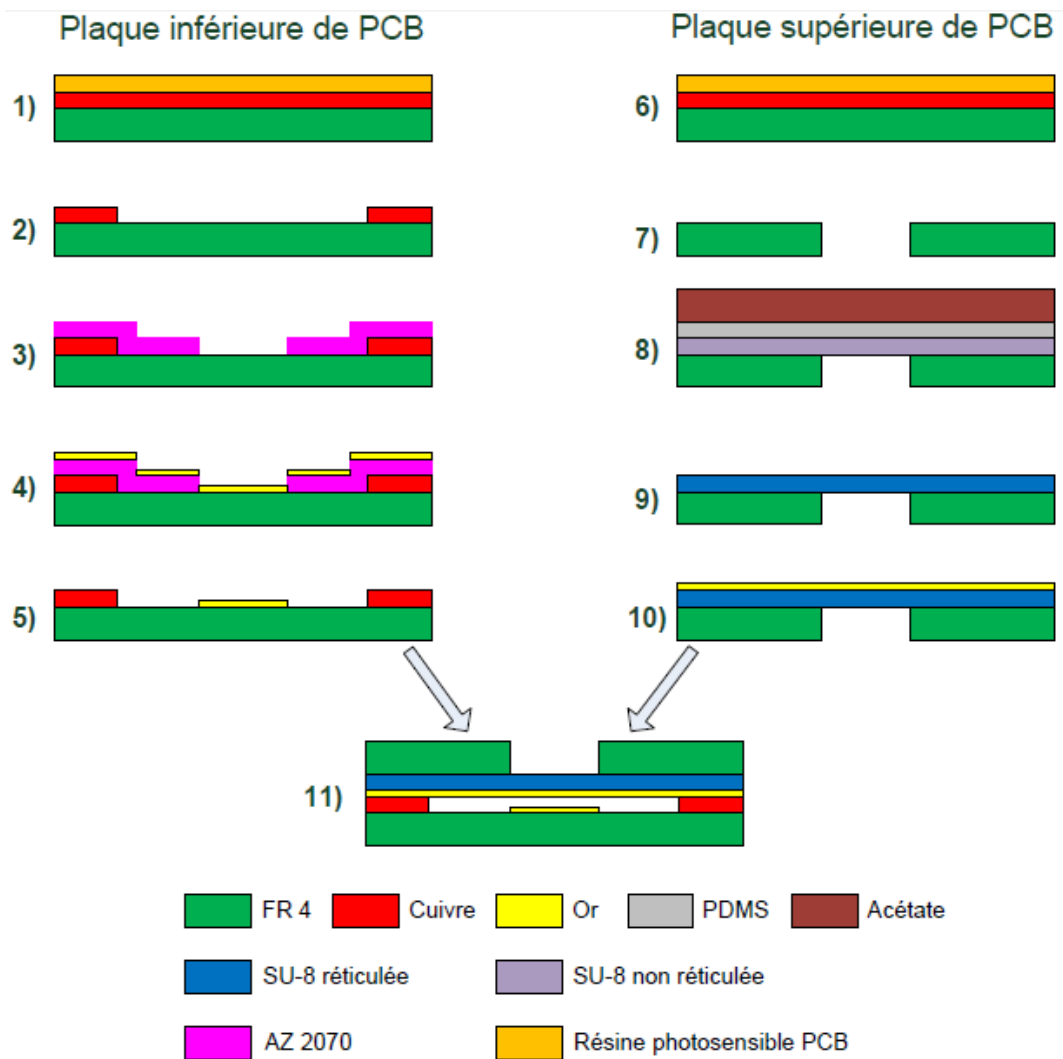


Figure V.9 : Procédé de fabrication du deuxième prototype

4.1. Réalisation de la plaque inférieure PCB (électrode fixe)

Une plaque de PCB avec une couche de cuivre d'épaisseur de 18 μm est utilisée pour ce processus. La procédure de fabrication commence par le processus de photolithographie typique de la plaque de circuit imprimé. Pour ce faire, la résine photosensible positive de la plaque PCB est exposée à une lumière ultraviolette (UV) à travers un masque approprié (masque 3 présenté dans la figure V.2) pour définir les lignes de cuivre et les repères d'alignement (étape 1 de la figure V.9). Ensuite, la résine photosensible est développée, et les zones de cuivre choisies sont gravées en utilisant un mélange 1:1:2 de HCl, H₂O₂ et H₂O. Après cela, la résine photosensible restante est éliminée avec de l'acétone (l'étape 2).

4.1.1. Méthode de métallisation par lift off

L'étape suivante (étape 3) consiste à réaliser l'électrode inférieure avec une couche d'or au-dessus de la FR4 au moyen d'un procédé lift off (figure V.10). Ce procédé est simple et facile, il permet de fabriquer des motifs métalliques sur un substrat.

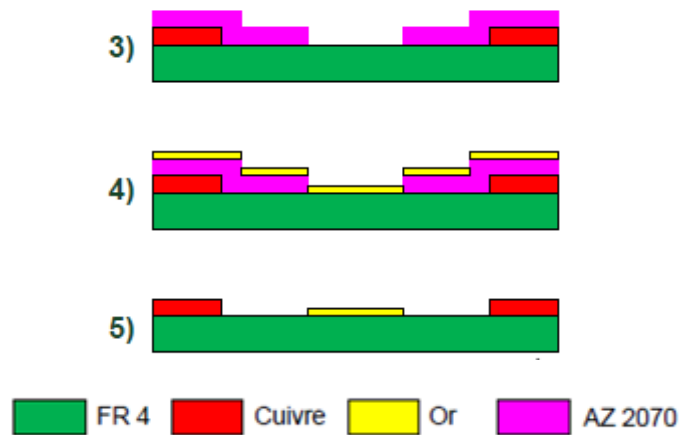


Figure V.10 : Métallisation de l'Or par lift off

Dans un premier temps, une résine photosensible négative (AZ nLOF 2070) est déposée sur le FR4 par la méthode de la tournette (spin coating), suivi d'un recuit à basse température. Ensuite la couche étalée est exposée aux rayons UV, à travers un masque qui définit l'électrode en Or (masque 4 présenté dans la figure V.3), suivi par un deuxième recuit (post exposure bake). L'étape suivante est le développement de la résine photosensible négative (AZ nLOF 2070). Dans l'étape 4, une couche mince en Or d'épaisseur 120 nm est déposée par pulvérisation cathodique. Enfin, à l'étape 5 on réalise l'enlèvement de la résine photosensible par l'immersion dans un bac contenant le liquide TechniStrip[®] NI555 (MicroChemical), de telle sorte que la structure de l'électrode en Or reste sur le FR4.

4.2. Réalisation de la plaque supérieure PCB (La membrane en SU-8 et l'électrode mobile)

Une deuxième plaque de PCB ayant une couche de cuivre d'épaisseur 18 μm est utilisée pour ce processus. Dans l'étape 6, le processus typique de la carte de circuit imprimé est réalisé pour définir les repères d'alignement de cette électrode supérieure. Après cela, le substrat FR4 est percé pour définir l'emplacement de la membrane (étape 7). Le procédé BETTS est utilisé pour transférer une couche de SU-8 sur la plaque de PCB (membrane en SU-8) [13]. Le transfert commence par le dépôt d'une couche mince de PDMS (polydiméthylsiloxane) par centrifugation sur un film d'acétate. Après cela, une couche SU-8 est déposée sur la couche de PDMS durci par la méthode de la tournette. Le composé multicouche de SU-8 non réticulée, PDMS et de l'acétate est ensuite retourné et placé sur la plaque de circuit imprimé, réalisant un contact total dû aux forces capillaires. Ensuite, la SU-8 non réticulée est exposée à la lumière UV. Le film d'acétate et le PDMS ne nuisent pas à la polymérisation de la couche SU-8 en raison de leurs grandes transparences. Ensuite, une étape de deuxième recuit "PEB" est effectuée pour réaliser la réticulation du SU-8 (l'étape 8). Après une étape de refroidissement, le film acétate avec le PDMS est décollé, en libérant la membrane SU-8 avec une épaisseur de 70 μm (étape 9). A l'étape 10, une couche d'Or d'épaisseur de 120 nm est pulvérisée pour effectuer l'électrode supérieure. Enfin, les deux parties de PCB sont assemblées par des vis (étape 11).

4.3. Photographies du capteur réalisé

Les résultats de la fabrication du capteur de pression sont indiqués sur la figure V.11 [133].

- La photographie dans la figure V.11(a) présente la plaque supérieure de PCB avec une membrane SU-8 et l'Or pulvérisé.
- La plaque inférieure de PCB présente l'électrode en Or et les lignes de cuivre qui a pour but de définir le gap et les pastilles pour les connexions électriques (figure V.11(b)).
- L'assemblage des deux plaques est représenté sur la figure V.11(c). En outre, dans cette dernière figure, la connexion fluide est utilisée pour appliquer une pression à la membrane SU-8.

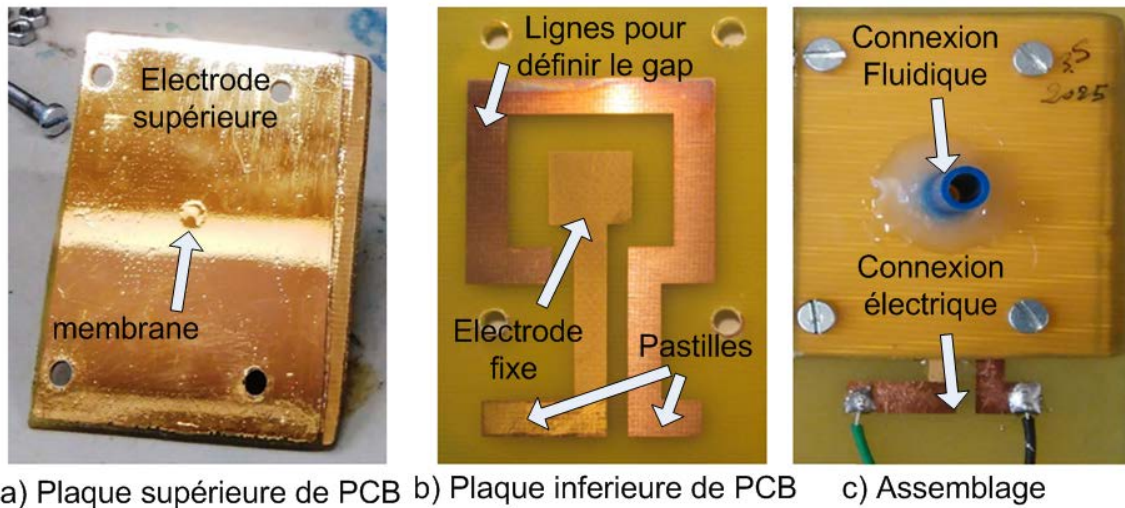


Figure V.11 : Capteur de pression fabriqué (deuxième prototype)

Les détails de la section transversale du capteur (la membrane SU-8 et le gap) sont représentés sur la figure V.12.

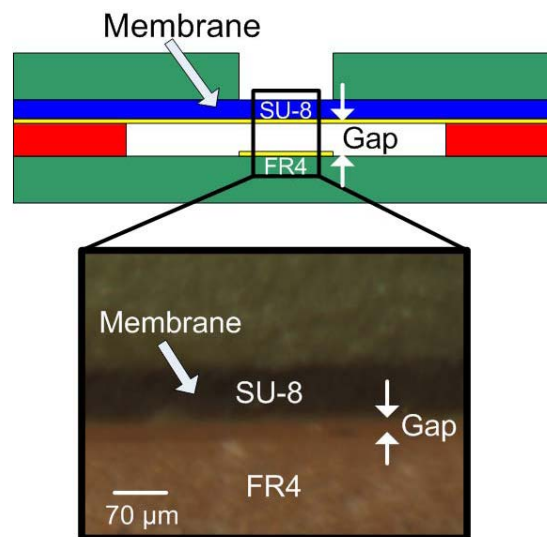


Figure V.12 : Photographie de la membrane SU-8 et le gap

La partie supérieure du capteur (plaque supérieure de PCB) contenant la membrane SU-8 peut être conçue en utilisant d'autre matériau de type polymères qui sont flexibles, par exemple le kapton ou le PDMS. En outre, le matériau des électrodes peut être en Or où en un autre métal tels que l'argent ou l'aluminium.

Dans la structure du capteur proposé, le SU-8 est choisi en raison de la bonne adhérence de la couche de SU-8 réticulée avec le substrat FR4. L'Or est choisi parce que ce matériau est inoxydable.

5. Description du banc de test

Le dispositif expérimental utilisé pour tester le capteur de pression capacitif est illustré dans la figure V.13. Il se compose d'une source de pression externe (générateur de pression) qui est reliée au capteur de pression par l'intermédiaire d'un régulateur de pression. Une source d'alimentation est utilisée pour alimenter le capteur et le circuit convertisseur. Un manomètre et un fréquencemètre sont utilisés pour mesurer la valeur de la pression appliquée et la fréquence de sortie, respectivement.

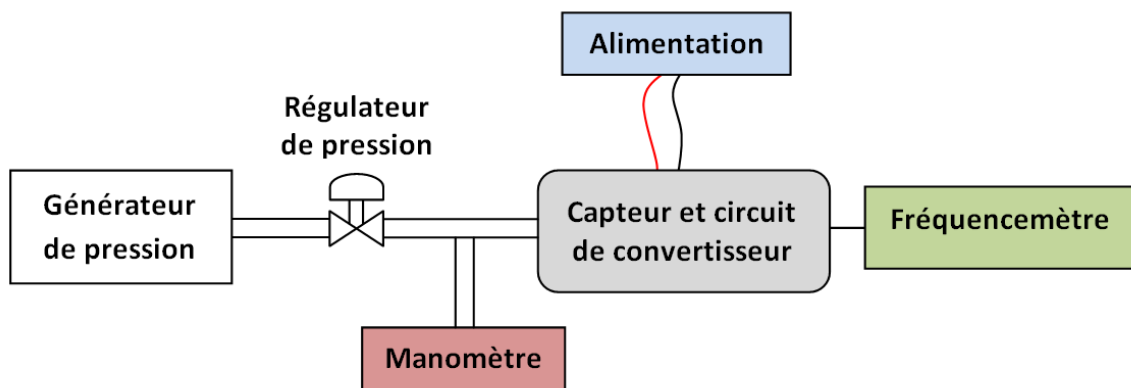


Figure V.13: Le dispositif expérimental utilisé

6. Circuit convertisseur Capacité - Fréquence

Un oscillateur à relaxation représenté sur la figure V.14 est utilisé pour mesurer la capacité du capteur de pression capacitif. L'oscillateur de relaxation est constitué d'un amplificateur opérationnel LF351, trois résistances et un condensateur variable, dont la capacité du capteur nommée " C_{capteur} ".

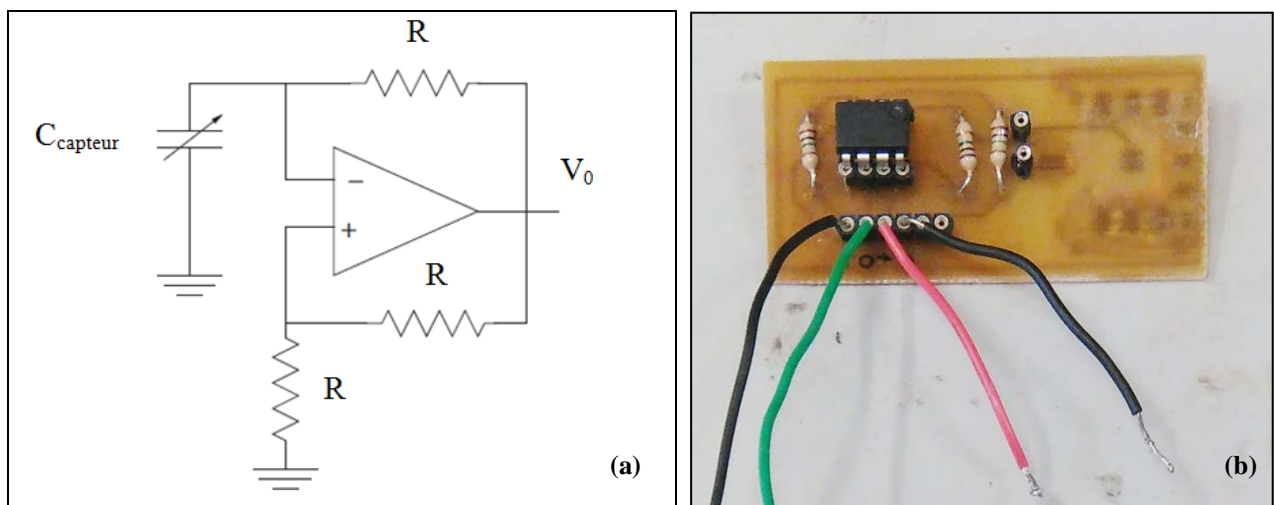


Figure V.14 : Un oscillateur à relaxation : (a) schéma électrique, (b) photographie de circuit convertisseur

La fréquence en fonction de la capacité est donnée par (V.1) [134] :

$$f = \frac{1}{2RC_{\text{capteur}} \ln(3)} \quad (\text{V.1})$$

où $R = 1 \text{ MOhm}$ et C_{capteur} est la capacité du capteur fabriqué.

La valeur de la capacité dépend de la pression appliquée. Par conséquent, la fréquence de l'oscillateur de relaxation dépend aussi de la pression appliquée, donc on peut déterminer la fonction $P(f)$, la pression en fonction de la fréquence.

L'objectif de ce dispositif est de connaître la pression d'un système où le paramètre électrique à mesurer est la fréquence.

6.1. Relation entre la fréquence et la capacité

La relation entre la fréquence et la capacité peut être déterminée en utilisant le circuit oscillateur de relaxation défini précédemment. Pour étalonner notre capteur, plusieurs condensateurs de différentes capacités (tableau V.1) sont mis à la place de la capacité du capteur de pression capacitif. Un fréquencemètre permet de mesurer les variations de la fréquence en fonction des valeurs de la capacité (figure V.15).

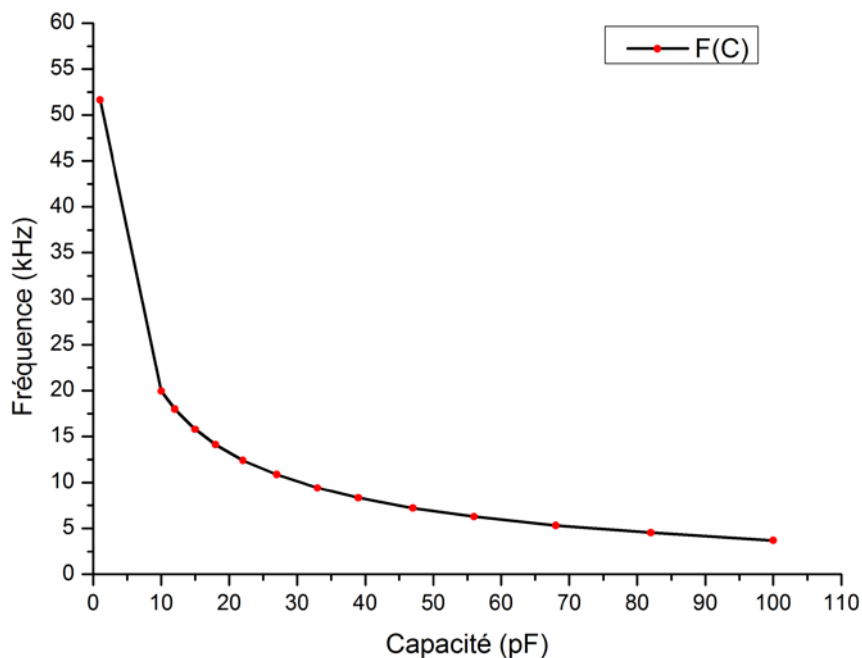


Figure V.15 : Variation de la fréquence en fonction de la capacité

Les résultats montrent que la fréquence diminue de 51,66 kHz jusqu'à 3,7 kHz lorsque les valeurs de la capacité augmentent de 1 pF à 100 pF.

Tableau V.1 : *Variation de la fréquence en fonction de la capacité*

Capacité (pF)	Fréquence (kHz)
1	51,66
10	19,93
12	17,97
15	15,79
18	14,11
22	12,41
27	10,87
33	9,39
39	8,33
47	7,19
56	6,28
68	5,32
82	4,54
100	3,7

7. Modélisation par la méthode des éléments finis

La structure du capteur de pression capacitif qu'on veut simuler par le logiciel COMSOL Multiphysiques est représentée sur la figure V.16. Le modèle est constitué d'une membrane SU-8 circulaire. Les électrodes supérieures et inférieures en Or sont de forme carrée, séparées par une distance inter électrode (gap) en air.

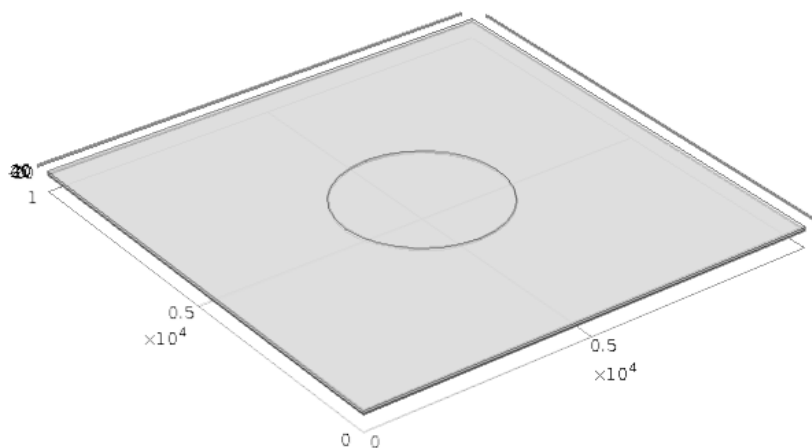


Figure V.16 : *Représentation schématique de la géométrie du capteur de pression capacitif*

- Le diamètre de la membrane SU-8 est de 3,5 mm avec une épaisseur de 70 μm .
- L'épaisseur de cuivre est de 18 μm et donc l'espace d'air est de 18 μm .
- Les dimensions de l'électrode fixe (électrode inférieure) en Or est de 10 mm x 10 mm avec une épaisseur de 120 nm.
- Le capteur capacitif de pression est conçu pour mesurer la pression jusqu'à 125 mbar (12.5 kPa).
- La membrane en SU-8 est utilisée parce qu'elle possède de bonnes propriétés mécaniques et la possibilité de fabriquer de nombreuses structures simples ou complexes. Le module de Young de SU-8 est 4,4 GPa, le coefficient de Poisson est de 0,22 et la densité est de 1190 kg / m³ [62].

Le modèle contient trois modules physique : mécanique des structures, maille en mouvement et l'électrostatique. Dans un premier temps, la mécanique des structures est utilisée pour réaliser la déformation de la membrane SU-8 lorsque la pression est appliquée sur elle. Ensuite, la maille en mouvement permet au maillage de se déplacer lorsque la membrane est déformée. Enfin, le module électrostatique est utilisé pour le calcul de la capacité entre les deux électrodes à partir du champ électrique.

Les figures V.17 et V.18 présentent la déformation de la membrane SU-8 et la capacité lorsque la pression est appliquée, respectivement.

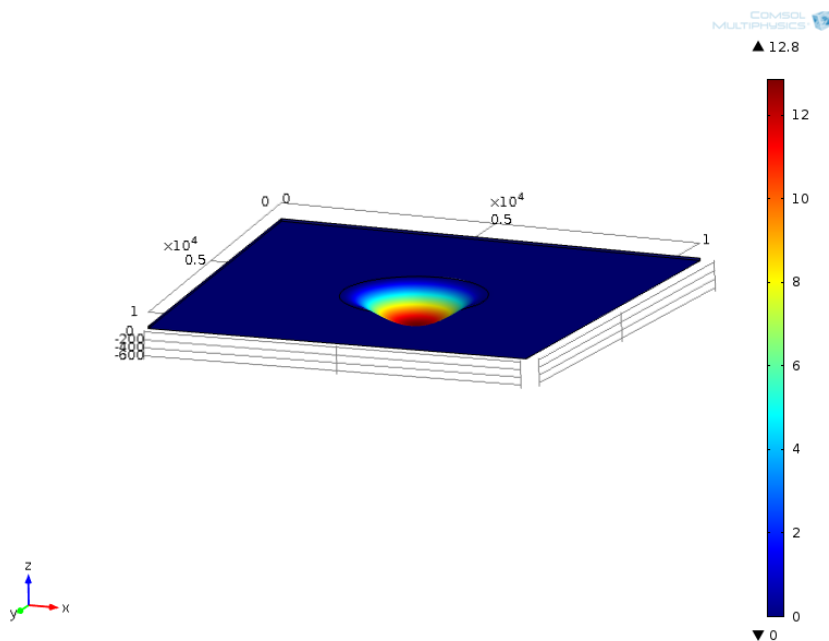


Figure V.17 : La déformation de la membrane SU-8 en fonction de la pression appliquée pour $P=12.5 \text{ kPa}$

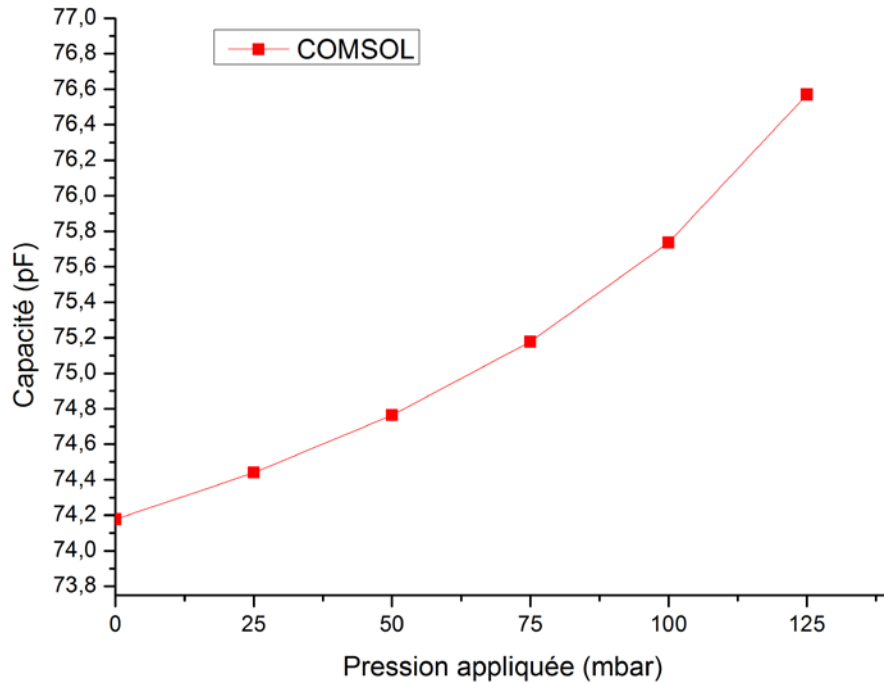


Figure V.18 : La réponse de la capacité du capteur en fonction de la pression appliquée

Comme on peut le voir sur la figure V.17, la déformation maximale se situe au centre de la membrane SU-8. Dans la figure V.18, l'augmentation de la capacité du capteur est proportionnelle à la pression appliquée. Par conséquent, la réponse de la capacité est presque linéaire.

La pression en fonction de la fréquence est représentée sur la figure V.19.

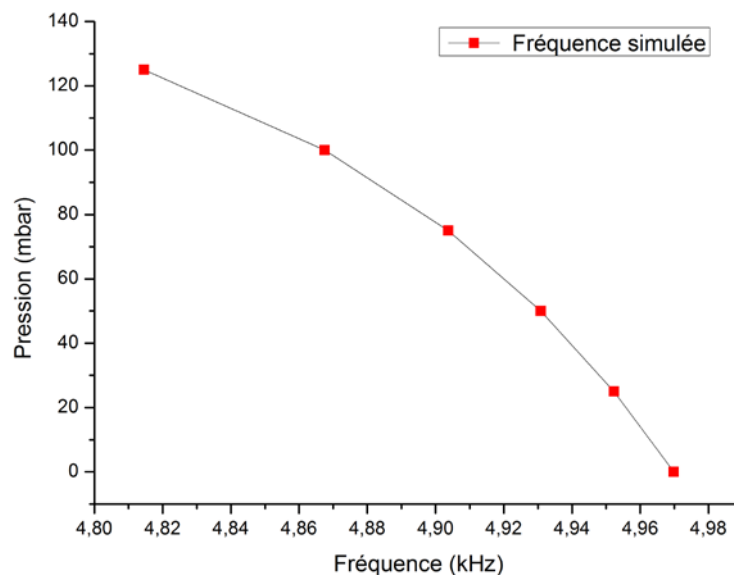


Figure V.19 : La pression en fonction de la fréquence simulée par COMSOL

8. Résultats expérimentaux du deuxième prototype

Pour tester les performances de notre capteur de pression, la structure a été montée et démontée à plusieurs reprises afin d'obtenir la moyenne de déviation du gap en raison du processus de fabrication. Cette valeur est 84,25 nm pour 8 ensembles de la structure.

Les fonctions de transfert obtenues pour plusieurs ensembles de structure sont présentées sur la Figure V.20, où Exp1, Exp2 et Exp3 correspondent à l'expérimental 1, l'expérimental 2 et l'expérimental 3, respectivement. Puis, trois essais ont été réalisés en utilisant un nouvel ensemble pour montrer la déviation du comportement de capteur (Figure V.21).

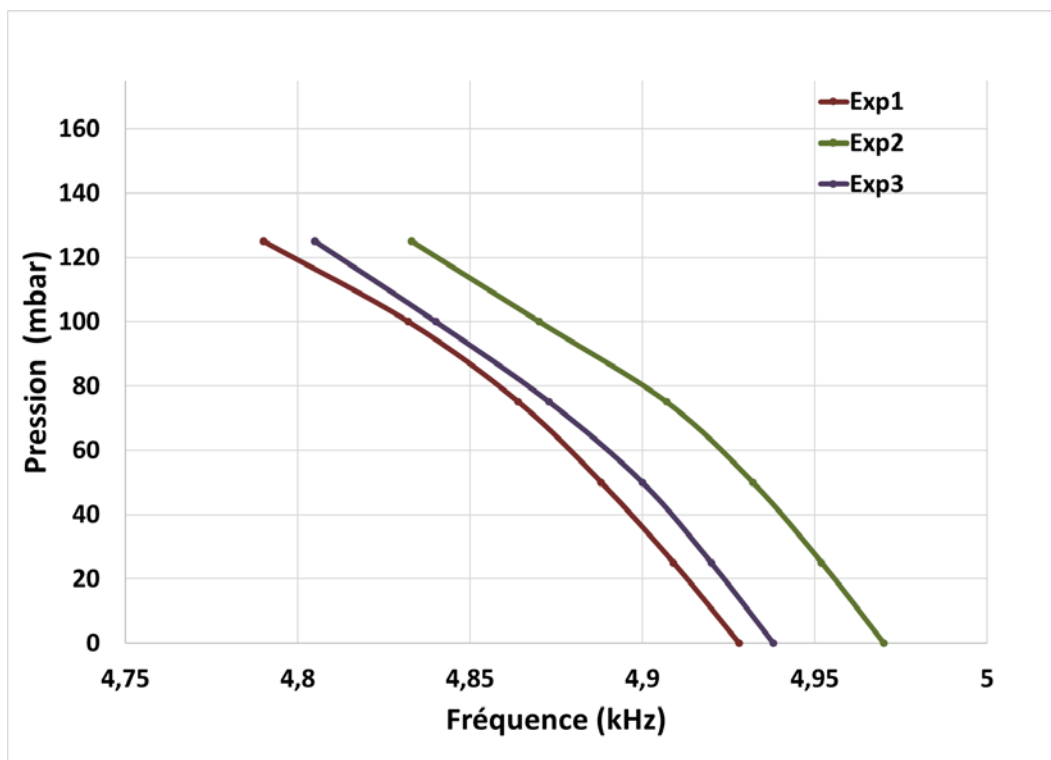


Figure V.20 : Fonction de transfert du capteur de pression capacitif

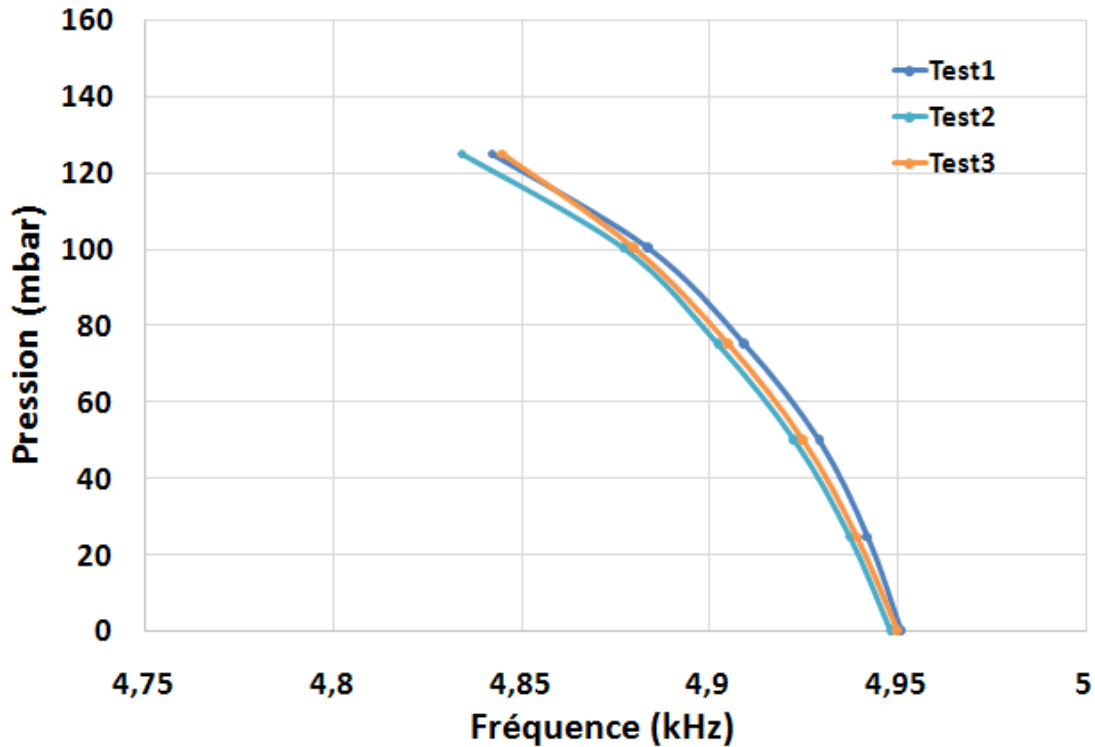


Figure V.21 : Trois tests expérimentaux pour la même structure assemblée

Les courbes représentant les variations de la réponse de la fonction de transfert sont parallèles et dépendent du décalage de fréquence. Ce décalage peut être expliqué par l'erreur générée suite à la fabrication du gap au cours du processus de fabrication. Selon (III.19) et (V.1), la déviation du gap peut être estimée pour obtenir la fonction de dépendance représentée sur la figure V.22.

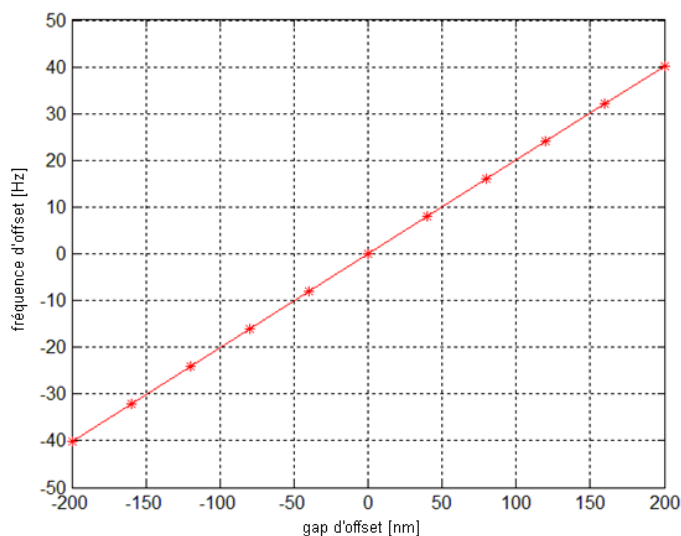


Figure V.22 : Variation de la fréquence d'offset en fonction du gap d'offset

Tableau V.2 : Décalage de la fréquence du capteur correspond à la déviation du gap effectif estimé

Décalage de la fréquence (Hz)	41,5	1,5	24,5
Déviations du gap effectif estimé (nm)	207,5	7,5	122,5

Les valeurs du tableau V.2 sont obtenues en utilisant la dépendance de fréquence / gap de la figure V.22 et les décalages de fréquence mesurés. Ces petites déviations du gap à l'échelle nanométrique ne peuvent pas être évitées au cours du processus de fabrication proposé, mais ils peuvent être facilement compensés en soustrayant ces valeurs à leur fonction de transfert correspondante. Ces valeurs de l'ordre du nanomètre doivent être considérées comme une déviation du gap effectif. Comme on peut le voir sur la figure V.23, les courbes décalées coïncident avec celles obtenues par la simulation. En prenant en compte ces remarques, le processus d'étalonnage (calibrage) est proposé comme suit :

1. Déterminer la fréquence pour le mode non contact jusqu'au mode de transition.
2. Détermination du décalage de fréquence (fréquence d'offset) relativement à la fréquence théorique.
3. Soustraire la fréquence d'offset à une fréquence mesurée pour la compensation de la fréquence.
4. Appliquer la fonction de transfert théorique à la fréquence compensée pour obtenir la pression différentielle appliquée.

9. Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation (sous environnement COMSOL)

Les résultats expérimentaux Exp1, Exp2, Exp3 sont comparés avec les résultats de la simulation effectuée avec le simulateur COMSOL. La figure V.23 présente les variations de la pression en fonction de la fréquence compensée (décalage de la fonction du transfert) obtenue expérimentalement et par la simulation.

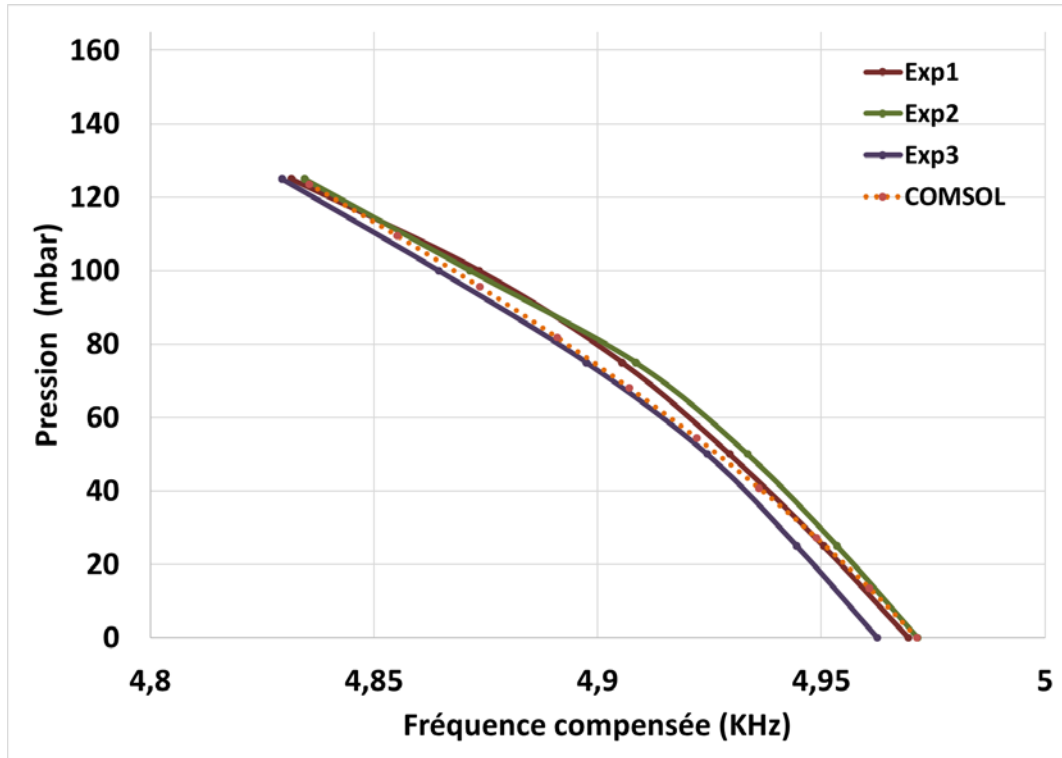


Figure V.23 : Décalage de la fonction de transfert du capteur de pression capacitif

Nous constatons que ces résultats expérimentaux présentent la même tendance que ceux obtenus par simulation COMSOL.

Le procédé d'étalonnage utilisé pour compenser la déviation du gap de l'ordre du nanomètre améliore l'utilisation du capteur et sa fiabilité. Le prototype fabriqué en utilisant le procédé de fabrication proposé a une sensibilité de 20,13 pF/bar.

9.1. Effet de température

La température influe sur le comportement du capteur, de sorte que, lorsque la pression augmente, la gamme de température dans laquelle le capteur fonctionne correctement diminue. Ce résultat est représenté sur la figure V.24. La température influe sur le comportement du capteur, de sorte que, la pression augmente, la gamme de température est plus faible à laquelle le capteur fonctionne correctement.

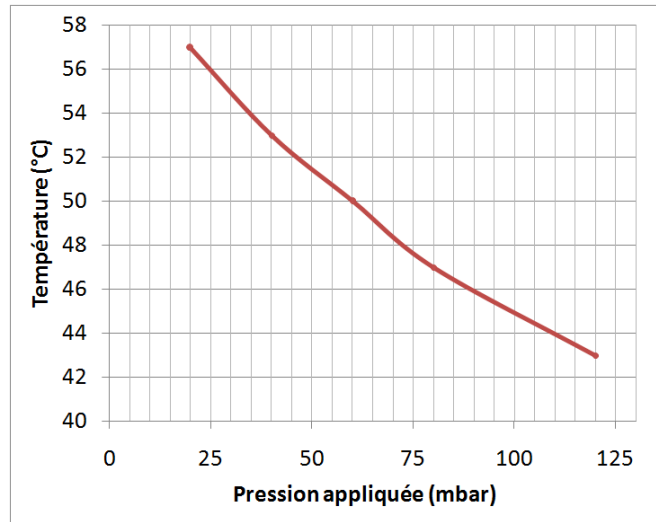


Figure V.24 : Variation de la température maximale du capteur en fonction de la pression appliquée

La déformation de la membrane SU-8 en raison de l'augmentation de la température modifie le comportement du mode non-contact à la mode en transition. Cette déformation est plus élevée, car le module de Young du SU-8 diminue lorsque la température est élevée [135] et aussi en raison de l'effet du coefficient de dilatation thermique (CTE) du SU-8.

Par conséquent, la gamme de pression appliquée du capteur peut être limitée entre 0 et 120 mbar et de température entre 25 à 43 °C. Comme on peut le voir, si la plage de la pression est plus faible, la plage de température est plus élevée. La température dépendance pour plusieurs valeurs de la pression appliquée est représentée sur la figure V.25.

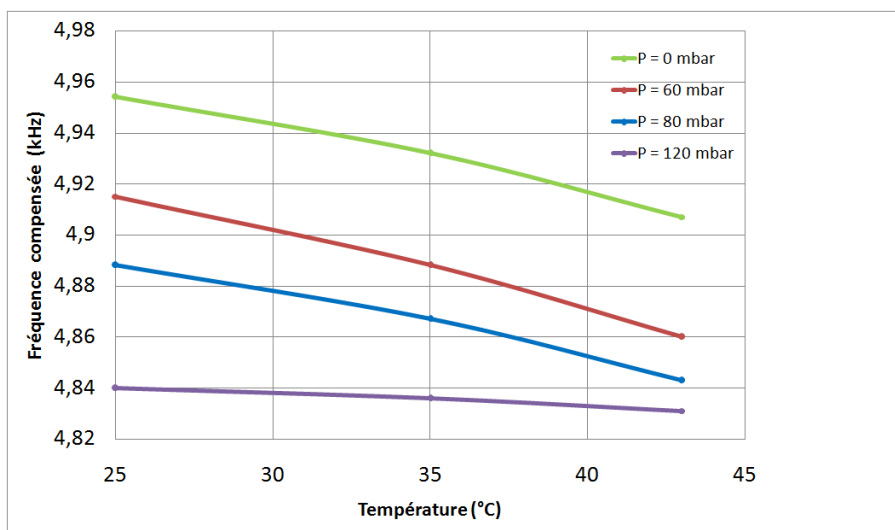


Figure V.25 : La fréquence compensée en fonction de la température pour différentes valeurs de la pression appliquée

10. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la conception et la réalisation d'un capteur de pression capacitif (deuxième prototype). Le procédé de fabrication proposé est basé sur la technologie PCB-MEMS.

Le deuxième prototype est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en Or. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe en Or qui est déposée par la méthode lift off. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur.

Le deuxième prototype est simulé, fabriqué et caractérisé. Il a une sensibilité de 20,13 pF/bar. En outre, une procédure d'étalonnage simple précitée pour surmonter sur les déviations inhérentes du procédé de fabrication.

L'utilisation de ces circuits imprimés PCB et le procédé de fabrication proposé permettent de contrôler le gap de manière facile. L'avantage principal de la structure proposée est la facilité de processus de fabrication et le faible coût.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a porté sur la réalisation d'un capteur de pression capacitif (premier et deuxième prototype) utilisant les technologies MEMS. L'objectif principal a été de mettre en place un capteur de pression à faible coût pour être intégré dans les technologies de PCB.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté de façon générale le principe de détection d'un capteur de pression, l'état de l'art sur les différentes méthodes de fabrication des capteurs de pression capacitifs qui utilisent uniquement la technologie PCB ou par la combinaison de deux technologies PCB-MEMS. Nous avons décrit les matériaux les plus répandus dans la fabrication des capteurs de pression : le silicium comme un matériau de base, le Polydiméthylsiloxane (PDMS) est utilisé aussi dans la réalisation des dispositifs microfluidiques et la résine photosensible négative SU-8 utilisée dans notre cas grâce à ses propriétés mécaniques et thermiques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté de manière descriptive les différentes méthodes de fabrication concernant la réalisation de capteur de pression. Les différentes techniques de déposition, de photolithographie, de gravure, de collage, micro usinage en surface, micro usinage en volume ainsi que la technologie SU-8 et le processus " BETTS ". Ces techniques permettent de mieux comprendre les différents procédés de fabrication de la conception et réalisation du capteur de pression. Un exemple de réalisation du capteur de pression capacitif basé sur la filière technologique Silicium/verre est présenté.

Dans le troisième chapitre, nous avons montré la structure et le principe de fonctionnement d'un capteur de pression capacitif. Nous avons décrit les équations du comportement mécanique d'une membrane parfaitement encadrée aux bords de formes, carrée, rectangulaire et circulaire, soumise à une pression uniforme et constante dans le cas des faibles déformations. Nous avons modélisé la déflexion de la membrane en fonction de la pression appliquée pour les trois formes de la membrane en basant sur deux solutions (polynomiale et trigonométriques) et la simulation par COMSOL. Nous avons trouvé que la déflexion de la membrane est maximale au centre de la membrane et proportionnelle à la pression appliquée. La déflexion de la membrane circulaire fléchit plus que les autres cas (carrée et rectangulaire), cette déflexion de la membrane engendre une variation de la réponse capacitive, elle est d'une amplitude importante, par conséquent une meilleure sensibilité est observée. Nous avons étudié les paramètres géométriques qui influent sur les performances

du capteur (la réponse capacitive et la sensibilité à la pression). Nous avons constaté que la conception d'un capteur de pression capacitif de sensibilité élevée nécessite une large surface de la membrane, une faible distance inter électrodes et une très mince épaisseur de la membrane. Notant que ces paramètres sont limités par la technologie utilisée et l'application visée. Nous avons déduit que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de la théorie.

Dans le quatrième et cinquième chapitre, nous avons pris en considération les résultats obtenus dans le troisième chapitre pour effectuer la fabrication de capteur de pression capacitif, et nous avons montré, les différents procédés de fabrication pour caractériser chaque capteur, le procédé de fabrication du capteur capacitif de pression basé sur la technologie PCB MEMS a été proposé. Le gap entre les deux électrodes est défini par l'épaisseur de la couche de cuivre des PCB. Les prototypes ont été fabriqués, simulés et caractérisés. Nous avons utilisé la SU-8 pour la membrane, l'argent et l'or pour les électrodes mobile et fixe.

Le premier prototype est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en argent. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe en cuivre. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur. La sensibilité de ce capteur est 4,25 pF/bar. Nous avons montré que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de l'expérimental.

Le deuxième prototype est constitué par deux plaques de PCB. Une plaque supérieure de PCB contient la membrane SU-8 et l'électrode mobile en Or. Une plaque inférieure de PCB constitue une électrode fixe en Or qui est déposée par la méthode lift off. L'assemblage de ces deux circuits imprimés forme la cavité du capteur. Le prototype fabriqué a une sensibilité de 20,13 pF/bar. Une procédure d'étalonnage simple précitée pour surmonter sur les déviations inhérentes du procédé de fabrication. Nous avons étudié l'effet de température sur la réponse du capteur de pression capacitif.

L'utilisation de ces circuits imprimés PCB et le procédé de fabrication proposé permettent de contrôler le gap de manière facile. Le gap entre les deux électrodes est défini par l'épaisseur de la couche de cuivre des PCB commerciaux. L'épaisseur de la couche de cuivre (PCB) a un large éventail de valeurs normalisées environ 5 à 210 um, donc le gap choisi ne se limite pas à 18 um.

Les principaux avantages des structures proposées sont :

- La facilité de processus de fabrication et le faible coût.
- La possibilité d'intégrer le circuit convertisseur capacité - fréquence sur la même plaque PCB.
- La capacité d'être adapté à une application spécifique en modifiant la géométrie, le diamètre et l'épaisseur de la membrane et le gap.

En perspective de ce travail :

- Etude expérimentalement de la déflexion de la membrane SU-8 en fonction de la pression appliquée.
- Etude de la reproductibilité de fabrication de ces deux prototypes.
- Conception et réalisation d'un capteur de pression piezoresistive en utilisant la technologie PCB-MEMS.
- L'application de ces capteurs dans le domaine médical : l'intégration de l'un de ces capteurs dans un système de régulation et contrôle de pression pour la désinvagination intestinale aigue chez les nouveaux nés (l'appareil de désinvagination intestinale aigue) [136,137].

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Y. Chuan and L. Chen, " The compensation for hysteresis of silicon piezoresistive pressure sensor ", IEEE Sensors J., vol. 11, no. 9, pp. 2016–2021, September 2011.
- [2] M. N. M. Nawi, A. Abd Manaf, M. F. Abd Rahman, M. R. Arshad, and O. Sidek, " One side electrode type fluidic based capacitive pressure sensor ", IEEE Sensors J., vol. 15, no. 3, pp. 1738–1746, March. 2015.
- [3] J.S. Danel, M. Dufour, F. Michel, " Application of quartz micromachining to the realization of a pressure sensor ", Proc, 47th. IEEE International Frequency Control Symposium, pp 587-596, 2-4 June 1993.
- [4] C. Wei, W. Zhou, Q. Wang, X. Xia, and X. Li, " TPMS (tire pressure monitoring system) sensors: Monolithic integration of surface micromachined piezoresistive pressure sensor and self-testable accelerometer ", Microelectron. Eng., vol. 91, pp. 167–173, March 2012.
- [5] K. N. Bhat et al., " Design, development, fabrication, packaging, and testing of MEMS pressure sensors for aerospace applications ", in Micro and Smart Devices and Systems. New Delhi, India: Springer-Verlag, pp. 3–17, 2014.
- [6] C. S. Shin, Y. T. Tseng, and S. K. Liaw, "A novel fiber Bragg grating needle pressure sensor for medical applications ", J. Neurosci. Neuroeng., vol. 2, no. 1, pp. 53–57, 2013.
- [7] W. P. Eaton and J. H. Smith, " Micromachined pressure sensors : Review and recent developments ", Smart Mater. Struct., vol. 6, no. 5, pp. 530–539, 1997.
- [8] A. Luque, R. G. Bolea, M. Fernández-Bolaños, A. Ionescu, and J. M. Quero, " Capacitive pressure microsensor fabricated by bulk micromachining and sacrificial layer etching ", in Proc. 32nd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. (IECON), pp. 2969–2974, Nov. 2006.
- [9] C. H. Mastrangelo, X. Zhang, and W. C. Tang, " Surface-micromachined capacitive differential pressure sensor with lithographically defined silicon diaphragm ", J. Microelectromech. Syst., vol. 5, no. 2, pp. 98–105, 1996.
- [10] P. Rey, P. Charvet, M. Delaye, and S. A. Hassan, "A high density capacitive pressure sensor array for fingerprint sensor application ", in Proc. Int. Conf. Solid State Sens. Actuators (TRANSDUCERS), Chicago, IL, USA, vol. 2, pp. 1453–1456, 1997.
- [11] A. Luque, F. Perdignes, D. Medina, J. Garcia, and J. M. Quero, " Capacitive pressure sensor fabricated using printed circuit board techniques ", in Proc. Spanish Conf. IEEE Electron Devices (CDE), pp. 1-4, February 2011.

- [12] W. Inman, K. Domansky, J. Serdy, B. Owens, D. Trumper, and L. G. Griffith, " Design, modeling and fabrication of a constant flow pneumatic micropump ", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 17, no. 5, pp. 891–899, 2007.
- [13] C. Aracil, F. Perdigones, J. M. Moreno, and J. M. Quero, " BETTS: Bonding, exposing and transferring technique in SU-8 for microsystems fabrication ", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 20, no. 3, 035008 (7pp.), 2010.
- [14] P. Menini, " Faisabilité d'un capteur de pression capacitif miniature sur silicium", thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1998.
- [15] S. Le Dren, " Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques ", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 2000.
- [16] T. Shanmuganatham et al, " A study scheme of Energy harvesting process of MEMS piezoelectric pressure sensor ", *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, IEEE, 18-19 March 2016.
- [17] Abhay B. Joshi , Ashok E. Kalange, Dhananjay Bodas, S.A. Gangal, " Simulations of piezoelectric pressure sensor for radial artery pulse measurement ", *Materials Science and Engineering*, vol 168, no 1-3, pp 250–253, 2010.
- [18] A.V. Shirinov, W.K. Schomburg, " Pressure sensor from a PVDF film", *Sensors and Actuators A*, vol.142, no 1, pp 48–55, 2008.
- [19] Zinck, C, Pinceau, D, Defay, E, Delevoye, E, Barbier, D, " Development and characterization of membranes actuated by a PZT thin film for MEMS applications. *Sensors and Actuators A Physical*, vol.115, no 2-3, pp 483-489, 2004.
- [20] A. Permy, E. Donzier, F. Rezgui, " Capteurs microélectroniques ", *Technique de l'ingénieur T3093*, mai 2004.
- [21] Y.C. Sun, Z. Gao, L.Q.Tian, Y.Zhang, " Modeling of the reverse current and its effect on the thermal drift of the offset voltage for piezoresistive pressure sensors ", *Sensors and actuators A*, vol.116, no 1 , pp 125-132, 2004.
- [22] Y. Sun, X.Sun, B.Sun, Q. Meng, " Electric drift of the bridge offset for pressure sensors and its utilization ", *Sensors and actuators A*, vol.58, no.3, pp 249-256, 1997.
- [23] G. Kowalaski, " Miniature pressure sensors and their temperature compensation ", *Sensors and actuators A*, vol.11, no.4, pp 367-376, 1987.
- [24] E. Perraud, " Theoretical model of performance of silicon piezoresistif pressure ", *Sensors and actuators A*, vol.57, no.3, pp 245-252, 1996.

- [25] D. Šaponjić, A. Žigic, " Correction of a piezoresistive pressure sensor using a microcontroller ", *Instruments and Experimental Techniques*, vol.44, no.1, pp 38–44, 2001.
- [26] M. Ras lain, " Contribution à l'identification des paramètres de non idéalité dans les capteurs de pression piézorésistifs au Silicium", thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2009.
- [27] C. Plantier, " Conception, Modélisation et réalisation d'un capteur de pression piézorésistif à faible dérive thermique ", thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, mars 1992.
- [28] C. Malhaire, "Caractérisation et modélisation de microtransducteurs de pression à hautes performances intégrés sur silicium", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 1998.
- [29] J. N. Palasagaram and R. Ramadoss, " MEMS-capacitive pressure sensor fabricated using printed-circuit-processing techniques ", *IEEE Sensors J.*, vol. 6, no. 6, pp. 1374–1375, December. 2006.
- [30] J. N. Palasagaram and R. Ramadoss, " MEMS Capacitive Pressure Sensor Array fabricated Using Printed Circuit Processing Techniques ", *Industrial Electronics Society (IECON2005)*, 31st annual conference of IEEE, pp.2357-2362, 2005.
- [31] M. Zagnoni et al., " A non-invasive capacitive sensor strip for aerodynamic pressure measurement ", *Sensors and actuators A, Phys.*, vols. 123–124, pp. 240–248, September 2005.
- [32] A. Petropoulos, G. Kaltsas, D. Goustouridis, and E. Gogolides, " A flexible capacitive device for pressure and tactile sensing ", *Procedia Chem.*, vol. 1, no. 1, pp. 867–870, 2009.
- [33] D. Shin and J. Kim, " Design and implementation of PCB-type capacitance displacement sensor collocated with magnetic bearings ", *Sensors and actuators A, Phys.*, vol. 71, no. 3, pp. 223–229, 1998.
- [34] D. Fries et al., " PCB MEMS for environmental sensing systems ", in *Proc. 31st Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, p5, November 2005.
- [35] S. Gaßmann and L. Pagel, " Flow injection analysis realized using PCBs ", in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, pp. 3239–3243, June 2007.
- [36] S. Gaßmann, I. Ibendorf, and L. Pagel, " Realization of a flow injection analysis in PCB technology ", *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 133, no. 1, pp. 231–235, 2007.
- [37] K. Kontakis, A. Petropoulos, G. Kaltsas, T. Speliotis, and E. Gogolides, " A novel microfluidic integration technology for PCB-based devices: Application to microflow sensing", *Microelectron. Eng.*, vol. 86, no. 4–6, pp. 1382–1384, 2009.

- [38] C. Aracil, F. Perdignes, J. M. Moreno, A. Luque, and J. M. Quero, " Portable Lab on PCB platform for autonomous micromixing ", *Microelectron. Eng.*, vol. 131, pp. 13–18, January 2015.
- [39] S. Gaßmann, A. Luque, F. Perdignes, J. M. Quero, and L. Pagel, " Sensor structures generated with combination of SU8 and PCBMEMS ", in *Proc. 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. (IECON)*, pp. 108–112, November 2013.
- [40] S.M. Sze, "Semiconductor Sensors", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1994.
- [41] J.W. Gardner, "Microsensors Principles and Applications", John Wiley and Sons Ltd., Chichester, England, 1994.
- [42] Sylvain Paineau, Philippe Andreucci, Catherine Shaffout " Microsystèmes : Application et mise en oeuvre ", *Technique de l'ingénieur T.I : 3090*, 02/2005.
- [43] A. Permuy, E. Donzier, F. Rezugui, " Micro systèmes1 ", *technique de l'ingénieur 3092*, 05/2004.
- [44] R. Hamoui, " Contribution à une plate forme d'aide à la conception de microsystème ", thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2009.
- [45] J. D. Turner, L. Austin, " Sensors for automotive telematics ", *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 11, no.2, pp. R58-R79, 2000.
- [46] F. Pressecq, *Electronique spatiale : des composants dédiés aux composants commerciaux, enjeux d'une mutation . Colloque de CAO de circuits intégrés et systèmes*, pp. 64-67, 1999
- [47] J. B. Huang, C. M. Ho, S. Tung, C. Liu, Y. C. Tai, " Micro thermal shear stress sensor with and without cavity underneath ", *Proceedings of the IEEE Instrumentation/ Measurement Technologies Conference (IMTC/95)*, pp. 171-174, 1995.
- [48] F. J. Martin, C. Groove, " Microfabricated drug delivery systems : concept to improve clinical Benefit ", *Biomedical Microdevices*, pp. 97-108, 2001.
- [49] B. Raul , " Techniques de conception des circuits intégrés analogiques pour les applications en haute température, en technologies sur substrat de silicium", thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble soutenue, 1999
- [50] F. Tounsi, " Microphone électrodynamique MEMS en technologie CMOS: étude, modélisation et réalisation", thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2010.
- [51] M. Grégory, "Absorption de l'eau par les polymères", thèse de doctorat, Université de Savoie, 2009.
- [52] S. Jiguet, " Microfabrication d'objets composites fonctionnels en 3D et à haut facteur de forme, par procédés UV-LIGA et microstéréolithographie ", thèse de doctorat, École polytechnique fédérale de Lausanne, 2004.

- [53] Yuli Wang, Jeng-Hao Pai, Hsuan-Hong Lai, Christopher E Sims, Mark Bachman, G P Li and Nancy L Allbritton, " Surface graft polymerization of SU-8 for bio-MEMS applications ", *Journal of micromechanics and microengineering*, vol 17, no.7, pp1371–1380, 2007.
- [54] Lorenz H, Despont M, Fahrni N, LaBianca N, Renaud P and Vettiger P, " EPON SU-8: a low-cost negative resist for MEMS ", In: 7th Workshop on Micromachining, Micromechanics and Microsystems in Europe (MME 96), Barcelona, Spain, 1996.
- [55] Lorenz H, Despont M, Vettiger P and Renaud P, " Fabrication of photoplastic high-aspect ratio microparts and micromolds using SU-8 UV resist ", *Microsystem Technologies*, vol.4, no.3, pp 143-146, May 1998.
- [56] J. Zhang, K. L. Tan, G. D. Hong, L. J. Yang et H. Q. Gong, " Polymerization optimization of SU-8 photoresist and its applications in microfluidic systems and MEMS ", *J. Micromech. Microeng.* vol.11, no.1, pp 20-26, 2001.
- [57] A. A. Bettiol, T.C. Sum, J. A. Van Kan et F. Watt, " Fabrication of micro-optical components in polymer using proton beam micro machining and modification", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol.210, pp 250-255, 2003.
- [58] http://www.microchem.com/products/su_eight.htm
- [59] Lorenz H, Despont M, Fahrni N, LaBianca N, Renaud P and Vettiger P, " SU-8: a low-cost negative resist for MEMS", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol.7, no.3, pp.121-124, 1997.
- [60] Shaw J M, Gelorme J D, LaBianca N C, Conley W E and Holmes S J, " Negative photoresists for optical lithography ", *IBM Journal of Research and Development*, vol.41, no.1-2, pp 81-94, 1997.
- [61] <http://www.microchem.com/pdf/SU-8-table-of-properties.pdf>
- [62] J. I. Lee, M. Shikida, and K. Sato, " Polymer micromachining technologies for a table-shaped tactile sensor using thick sacrificial layer ", *Microsyst. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 239–246, 2015.
- [63] <http://memscyclopedia.org/su8.html>
- [64] MicroChem , "SU-8 2000 Permanent Epoxy Negative Photoresist", *Processing Guidelines*, 2010, disponible en: http://www.microchem.com/products/pdf/SU-82000DataSheet2000_5thru2015Ver4.pdf
- [65] *Polymer Data Handbook*, Mark J., Oxford Univ. Press, New York , 1999.
- [66] A. Khaldi, " Contribution à l'étude d'écoulements traversant les microcanaux ", thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.

- [67] J.C Lotters, W. Olthuis, P.H.Veltink et P.Bergveld, " The mechanical properties of the rubber elastic polymer polydimethylsiloxane for sensor applications", Journal of Micromechanics and Microengineering, vol 7, no.3, pp 145-147, 1997.
- [68] Pavel Ripka, Alois Tipek, Modern Sensors Handbook, Instrumentation and Measurement, Wiley-ISTE, May 2007.
- [69] Michel Massénat : Circuits en couches minces - Couches minces traditionnelles .
Référence E3365 | Date de publication : 10 févr. 2003 . www .Techniques -ingénieur.fr
- [70] <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap8b.htm>
- [71] MEMS Exchange® <http://www.mems-exchange.org/catalog/> – Process Hierarchy
- [72] <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap8c.htm#cathodique>
- [73] Eric Donzier, Alfred Permuy, Fadhel Rezgui : Capteurs à semi-conducteurs, Référence E3092 | Date de publication : 10 mai 2004 , www .techniques-ingenieur.fr
- [74] Eric Saint-Etienne, " Nouvelle filière technologique de circuits micro–ondes coplanaires à faible pertes et à faible dispersion sur membrane composite d’oxyde et nitrure de silicium ", thèse de doctorat , Université Paul Sabatier , Toulouse III novembre 1998.
- [75] P. Temple Boyer, " Développement des matériaux dans le cadre des microtechnologies ", thèse de doctorat, Architecture des Systèmes du C.N.R.S, 2004.
- [76] A. Hemeryck, " Modélisation à l’échelle atomique des premiers stades de l’oxydation du silicium : Théorie de la Fonctionnelle de la Densité et Monte Carlo cinétique ", thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2008.
- [77] Jingbo. X et al, "A monolithic silicon multi-sensor for measuring three-axis acceleration, pressure and temperature", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol 22, no 4, pp731-739, 2008.
- [78] <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap7b.htm>
- [79] S. Annane, " Conception d'un microcapteur de pression, humidité et température en technologie MEMS ", thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [80] C. Tahanout, " Etude, Simulation électrothermique d’un micro capteur de gaz à base d’oxyde semi-conducteur", thèse de magister, Université M’Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [81] L. Latorre, " Evaluation des techniques microélectroniques contribuant à la réalisation de microsystèmes : application à la mesure du champ magnétique ", thèse de doctorat, Université Montpellier II, 1999.

- [82] Xuan F. Zha, A web-enabled open database system for design and manufacturing of micro-electro-mechanical systems (MEMS), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.32, no.3, pp 378–392, March 2007.
- [83] Lärmer, F., and P. Schlip, “Method of Anisotropically Etching Silicon,” German Patent No. DE 4,241,045, 1994.
- [84] J. K. Bhardwaj et H Ashraf, "Advanced silicon etching using high-density plasmas", *Proc. SPIE*, vol. 2639, pp. 224-233, 1995.
- [85] M. Jatlaoui, " Capteurs passifs à transduction électromagnétique pour la mesure sans fil de la pression ", thèse de doctorat, université de Toulouse, 2009.
- [86] JackW Judy, " Microelectromechanical systems (MEMS) : fabrication, design and applications ", *smart materials and structures*, institute of physics publishing, vol.10, no.6, pp 1115–1134, 2001.
- [87] A. Arshak, et al, " Review of the potential of a wireless MEMS and TFT microsystems for the measurement of pressure in the GI tract ", *Medical Engineering & Physics* vol.27, no.5, pp347–356, 2005.
- [88] Varadan VK, Jiang X, Varadan V., " Microstereolithography other fabrication techniques for 3D MEMS ", Chichester : John Wiley & Sons Ltd.; p 260, 2001.
- [89] David J. Monk, David S. Soane and Roger T. Howe, " LPCVD silicon dioxide sacrificial layer etching for surface micromachining", *Materials Research Society symposia proceedings*, vol.276, pp 303-310, 1992.
- [90] R. Puers, " Capacitive sensors : when and how to use them ", *Sensor & Actuators A*, vol.37-38, pp.93–105,1993.
- [91] G.T.A. Kovacs, " *Micromachined Transducers Sourcebook*, Boston, MA: McGraw-Hill, 1998.
- [92] K.E. Petersen, " Silicon as a mechanical material ", *Proc. IEEE*, vol.70, no.5, pp. 420-457, 1982.
- [93] Gardner JW, Varadan VK, Awadelkarim OO, " *Microsensors, MEMS, and smart devices*", Chichester: John Wiley & Sons Ltd, p 502, 2001.
- [94] Gardner JW., " *Microsensors principles and applications* ", Chichester: John Wiley & Sons Ltd, p331, 1994.
- [95] Romig JAD, Dugger MT, McWhorter PJ, " *Materials issues in microelectromechanical devices: science, engineering, manufacturability and reliability* ", *Acta Materialia*, vol.51, no.19, pp.5837–5866, 2003.

- [96] Akar O, Akin T, Najafi K, " A wireless batch sealed absolute capacitive pressure sensor", *Sensor & Actuators A*, vol.95, no.1, pp.29–38, 2001.
- [97] H. Dudaicevs et al, " Surface micromachined pressure sensors with integrated CMOS read-out electronics ", *Sensor & Actuators A*, vol.43, no.1-3, pp.157–163, 1994.
- [98] B. Ziaie et al, " Hard and soft micromachining for BioMEMS: review of techniques and examples of applications in microfluidics and drug delivery ", *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol.56, no.2, pp.145–172, 2004 .
- [99] <http://www.microchem.com/pdf/SU-82000DataSheet2025thru2075Ver4.pdf>
- [100] J.M. Moreno, F.Perdigones, J.M. Quero, " Fabrication process of a SU-8 monolithic pressurized microchamber for pressure driven microfluidic applications ", in *Proc. Spanish Conf. IEEE Electron Devices (CDE)*, Feb. 2011.
- [101] H. Münzel, "Application of etching technologies ", *Microsystem Technologies*, 1994.
- [102] W.H. Ko, Q. Wang, " Touch mode capacitive pressure sensors ", *Sensors and Actuators A*, vol.75, no.3, pp 242–251, 1999.
- [103] Cheng Pang, Zhan Zhao, Lidong Du, Zhen Fang, " Adhesive bonding with SU-8 in a vacuum for capacitive pressure sensors ", *Sensors and Actuators A*, vol.147, no.2, pp 672–676, 2008.
- [104] M. Al Bahri, " Influence de la température sur le comportement statique et dynamique des capteurs de pression capacitif sur silicium ", thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2005.
- [105] F. Kerrou, " Etude et modélisation de capteur de pression piezorésistifs et capacitifs au silicium ", thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, 2008.
- [106] Ed. Palik, O.J. Glembocki, and I. Heard, " Study of Bias-Dependant Etching of Si in Aqueous KOH ", *J. Electrochem. Soc.*, vol.134, no.2, pp. 404-409, 1987.
- [107] Hal F. Brinson L. Catherine Brinson, " *Polymer Engineering Science and Viscoelasticity : An Introduction*", deuxième édition, springer US, pp 15-55, 2015.
- [108] F. Rochette, " Etude et caractérisation de l'influence des contraintes mécaniques sur les propriétés du transport électronique dans les architectures MOS avancées ", thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [109] S.P. Timoshenko, S.Woinowsky.Krieger," *Theory of plates and shells* ",Second Edition, McGraw-Hill, Classic Textbook reissue, 1987.

- [110] C. Fletcher, " Computational Galerkin method ", Springer Verlag, 2004.
- [111] Ki-Won Lee and Kensall D Wise, " SENSIM : A Simulation Program for Solid-State Pressure Sensors ", IEEE Transactions on Electron Devices, vol.29, no.1, pp.34-41, January 1982.
- [112] T. Y. Bin and R. S. Huang, " CAPSS: A thin diaphragm capacitive pressure sensor ", Sensors and Actuators, vol.11, no.1, pp. 1-22, 1987.
- [113] N. Benmoussa, " Conception, Modélisation et réalisation d'un capteur de pression capacitif microélectronique ", thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1985.
- [114] Y. Naciri, " Contribution à l'étude de capteur de pression capacitif miniaturisés ", thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1986.
- [115] Ashwin Simha, S. M. Kulkarni and S. Meenatchisundaram, "An analytical method to determine the response of a micro capacitive pressure sensor ", Sensors & Transducers Journal, vol.130, no.7, pp.118-126, July 2011.
- [116] B. B. Kirankumar and B. G. Sheeparamatti, " Sensitivity Analysis of MEMS Capacitive Pressure Sensor with Different Diaphragm Geometries for High Pressure Applications ", International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 4, no.03, pp.426-431, 2015.
- [117] G. Blasquez, Y. Naciri, P. Blondel, N. Ben Moussa and P. Pons, " Static response of miniature capacitive pressure sensors with square or rectangular silicon diaphragm ", Rev. Phys. Appl. (Paris), vol. 22, no.7, pp 505-510, 1987.
- [118] A. Beddiaf, F.Kerrou, S. Kemouche, " Thermal drift characteristics of capacitive pressure sensors", Journal of Enginneering Science and Technology, vol.11, no.3, pp 346-361, 2016.
- [119] A. Ettouhami, N. Zahid, M. Elbelkacemi, "A novel capacitive pressure structure with high sensitivity and quasi linear response ", C.R.Mécanique, vol.332, no.2, pp141-146, 2004.
- [120] Y. Hezarjaribi and M. N. Hamidon, " Theoretical formulation to evaluate capacitance for before and after touch point MEMS capacitive pressure sensors", Int. J. Eng. Sci., vol.2, no.1, pp.278–286, 2013.
- [121] Tai-Ran Hsu, " MEMS and Microsystems Design and Manufacture ", 1st ed., Tata McGraw Hill Education Private Limited, pp.96-103, 254, 2002.
- [122] Chun-Shan Tsui, " Performance Analysis in Modeling Micro Capacitive Pressure Sensor ", 4th international microsystems, packaging , assembly and circuit technology, IEEE, pp39-42, 2009.

- [123] COMSOL Multiphysics, MEMS Module : www.comsol.com.
- [124] M. Souilah, A. Chaabi, M. Ras lain," Analysis of membrane influence on the response of a capacitive pressure sensor", 10^{ème} Congrès National de la Physique et de ses Applications (CNPA 2012), 20-22 Novembre 2012, Mostaganem, Algérie.
- [125] <https://www.mentor.com/tannereda/l-edit>.
- [126] https://www.quorumtech.com/__assets__/pdf/Manuals/K550X-Manual-Iss5-NEW-LOGO.pdf
- [127] Jose K. Abraham, Shawn Sullivan, and Sridhar Ranganathan," Low-cost and disposable pressure sensor mat for non-invasive sleep and movement monitoring applications ", 33rd Annual International Conference of the IEEE EMBS Boston, Massachusetts USA, August 30 - September 3, 2011.
- [128] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>
- [129] M. Souilah, A. Chaabi, M. Ras lain," Modeling the response of a capacitive pressure sensor using COMSOL", 11th Conference on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS11), 25-28, Annaba, Algeria, Juin 2012.
- [130] Giulio Fragiacomio, Thor Ansbaek, Thomas Pedersen, Ole Hansen, Erik V. Thomsen, " Analysis of small deflection touch mode behavior in capacitive pressure sensors ", Sensors and Actuators A, vol.161, no.1-2, pp.114-119, 2010.
- [131] H. E. Elgamel, " A simple and efficient technique for the simulation of capacitive pressure transducers ", Sensors and Actuators, vol.77, no.3, pp.183-186, 1999.
- [132] A. Mcleavey, G. Coles, R. L. Edwards and W. N. Sharpe, JR, " Mechanical properties of SU-8 ", Materials Research Society Mat. Res. Soc. Symp. Proc. vol.546, pp.213-218, 1999.
- [133] M. Souilah, A. Chaabi, F. Perdignes, J. M. Quero, G. Flores, and M. Ras Lain, "Fabrication Process for PCBMEMS Capacitive Pressure Sensors Using the Cu Layer to Define the Gap", IEEE Sensors Journal, Vol.16, no.5, pp.1151-1157, MARCH 1, 2016.
- [134] S.-P. Chang and M. G. Allen, " Demonstration for integrating capacitive pressure sensors with read-out circuitry on stainless steel substrate ", Sens. Actuators A, Phys., vol. 116, no. 2, pp. 195–204, 2004.
- [135] T. Namazu, S. Inoue, K. Takio, T. Fujita, K. Maenaka, and K. Koterazawa, " Visco-elastic properties of micron-thick SU-8 polymers measured by two different types of uniaxial tensile tests ", in Proc. 18th IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst. (MEMS), pp.447-450, 2005.

[136] M. Souilah et C.Daoudi, " Etude et réalisation d'un système de régulation et contrôle de pression pour la désinvagination intestinale aigue chez le nouveau né", Mémoire de projet fin d'étude, université mentouri de Constantine, 2010.

[137] M. Ras lain, A. Chaabi, M. Souilah, C.Daoudi, H. Choutri, " Application of a piezoresistif pressure sensor in the pediatric surgery for reducing the acute intussusception", International Academy, Research, and Industrial Association (IARIA) NetWare 2013, 25-31 August 2013, Barcelone, Espagne.

Productions scientifiques

Productions scientifiques

1. M. Souilah, A. Chaabi, F. Perdignes, J. M. Quero, G. Flores, and M. Ras Lain, "Fabrication Process for PCBMEMS Capacitive Pressure Sensors Using the Cu Layer to Define the Gap", IEEE SENSORS JOURNAL, Vol.16, no.5, pp 1151-1157, March 1, 2016.
2. M. Souilah, A. Chaabi, M. Ras lain, "Modeling the response of a capacitive pressure sensor using COMSOL", 11th Conference on Beam Injection Assessment of Microstructures in Semiconductors (BIAMS11). 25-28 Juin 2012, Annaba, Algeria
3. M. Ras lain, A. Chaabi, M. Souilah, C.Daoudi, H. Choutri, " Application of a piezoresistif pressure sensor in the pediatric surgery for reducing the acute intussusception", International Academy, Research, and Industrial Association (IARIA) NetWare 2013, 25-31 August 2013, Barcelone, Espagne
4. M. Souilah, A. Chaabi, M. Ras lain, "Analysis of membrane influence on the response of a capacitive pressure sensor", 10^{ème} Congrès National de la Physique et de ses Applications (CNPA 2012) , 20-22 Novembre 2012, Mostaganem, Algeria.

Résumé

Le travail de cette thèse porte sur la conception, la modélisation et la réalisation de capteurs de pression capacitifs en utilisant la combinaison entre deux techniques PCB-MEMS.

Nous avons commencé par décrire les différents procédés de fabrication des capteurs de pression et récapituler l'état de l'art des différentes méthodes de fabrication du capteur de pression capacitif. La modélisation du comportement mécanique des membranes, carrée, rectangulaire et circulaire est effectuée pour étudier l'influence sur la variation de la capacité en fonction de la pression appliquée (la réponse capacitive), ainsi que la sensibilité à la pression. Nous avons déterminé l'influence des paramètres géométriques de la membrane sur la performance du capteur de pression capacitif. Nous avons effectué une étude comparative entre les résultats de simulation obtenus en utilisant le logiciel COMSOL et les résultats théoriques. Nous avons trouvé que les résultats de simulation sont conformes avec ceux de la théorie.

Nous avons proposé deux structures fabriquées du capteurs de pression capacitifs en utilisant la technologie PCB-MEMS. Le processus BETTS est utilisé pour fabriquer la membrane en SU-8 et la gravure chimique ainsi que le procédé lift-off pour réaliser les deux électrodes du capteur de pression capacitif. Le gap situé entre les deux électrodes est défini par l'épaisseur de couche de cuivre du circuit imprimé commercialisé. L'avantage principale de la procédure proposée c'est la simplicité et le faible coût du processus de fabrication. De plus, la facilité d'intégrer des circuits électroniques auxiliaires sur le même circuit imprimé et la possibilité de modifier la géométrie de la structure pour l'application spécifique. Ensuite, deux prototypes ont été fabriqués, simulés et caractérisés afin de déterminer leurs caractéristiques. Nous avons trouvé que la sensibilité du capteur de pression capacitif (premier prototype) est 4,25 pF/bar et le deuxième prototype a une sensibilité de 20,13 pF/bar. Une procédure d'étalonnage simple précitée pour surmonter les déviations inhérentes au procédé de fabrication. Nous avons étudié l'effet de température sur la réponse du capteur de pression capacitif. De ce fait, les résultats obtenus par la simulation COMSOL sont conformes avec ceux de l'expérimental.

Mots clé : Capteur de pression capacitif, PCB-MEMS, BETTS, SU-8, simulation.

Abstract

The work of this thesis focuses on the design, modeling and realization of capacitive pressure sensors using the combination of two techniques PCB-MEMS.

We started by describing the various manufacturing processes of pressure sensors and summarizing the state of the art of the various methods of manufacturing the capacitive pressure sensor. The modeling of the mechanical behavior of square, rectangular and circular membranes is carried out to study the influence on the variation of capacitance as a function of the applied pressure (the capacitive response), as well as the sensitivity to the pressure. We determined the influence of the geometric parameters of the membrane on the performance of the capacitive pressure sensor. We performed a comparative study between the simulation results obtained from COMSOL software and the theoretical results. We found that the simulation results are consistent with those of the theory.

We proposed two structures made of capacitive pressure sensors using PCB-MEMS technology. The BETTS process is used to fabricate the SU-8 membrane and chemical etching as well as the lift-off process to realize the two electrodes of the capacitive pressure sensor. The gap between the two electrodes is defined by the thickness of the copper layer of the commercial printed circuit. The main advantage of the proposed procedure is the simplicity and low cost of the manufacturing process. Moreover, the ease of integrating auxiliary electronic circuits on the same printed circuit and the possibility of modifying the geometry of the structure for the specific application. Then, two prototypes were manufactured, simulated and characterized to determine their characteristics. We found that the sensitivity of the capacitive pressure sensor (first prototype) is 4.25 pF/ bar and the second prototype has a sensitivity of 20.13 pF/bar. A simple calibration procedure is mentioned to overcome the inherent deviations of the manufacturing process. We studied the effect of temperature on the response of the capacitive pressure sensor. Consequently, the results obtained by the COMSOL simulation are in good agreement with those of the experimental.

Keywords : Capacitive pressure sensor, PCB-MEMS, BETTS, SU-8, simulation.

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو تصميم ومحاكاة وتصنيع أجهزة استشعار الضغط بالسعة باستخدام تقنية الدوائر المطبوعة و المايكروسيستمز PCB-MEMS .

عن طريق وصف مختلف عمليات تصنيع أجهزة استشعار الضغط، وتلخيص أساليب مختلفة لصناعة أجهزة استشعار الضغط بالسعة. يتم تنفيذ محاكاة السلوك الميكانيكي للأغشية، المربعة، المستطيلة والدائرية لدراسة المؤثرات التي تؤدي الى تغيرات في السعة وفقا للضغط المطبق (الاستجابة بالسعة) وحساسية الضغط. توصلنا إلى تحديد تأثير المعايير الهندسية لأداء غشاء أجهزة استشعار الضغط بالسعة. أجرينا دراسة مقارنة بين نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج COMSOL والنتائج النظرية. وجدنا أن نتائج المحاكاة موافقة لتلك النظرية.

اقترحنا بنيتين مصنوعتين من أجهزة استشعار الضغط بالسعة باستخدام تقنية PCB-MEMS تستخدم عملية BETTS لتصنيع غشاء SU-8 والحفر الكيميائي وطريقة القلع (lift-off) لإنتاج قطبين من أجهزة استشعار الضغط بالسعة . يتم تعريف الفجوة بين القطبين بواسطة سمك طبقة النحاس من الدوائر المطبوعة التجارية . والميزة الرئيسية لهذا الإجراء المقترح هو البساطة وانخفاض تكلفة عملية التصنيع . وبالإضافة إلى ذلك، سهولة دمج الدوائر الإلكترونية الإضافية على نفس الدوائر المطبوعة وإمكانية تعديل هندسة البنية إلى تطبيق معين . بعد ذلك ، تم صناعة محاكاة نموذجين أوليين لتحديد خصائصها . وجدنا أن حساسية استشعار الضغط بالسعة (النموذج الأول) هو 4.25 بيكو فاراد/ بار و النموذج الثاني لديه حساسية جهاز استشعار الضغط بالسعة 20.13 بيكو فاراد/ بار. تم إجراء المعايرة للتغلب على الانحرافات الموجودة في عملية التصنيع . درسنا تأثير درجة الحرارة على الاستجابة لأجهزة استشعار الضغط بالسعة. والنتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة COMSOL تتفق مع النتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية : أجهزة استشعار الضغط بالسعة ، PCB-MEMS ، عملية BETTS ، المحاكاة